UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC

Waleska da Silva Barbosa

Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos

São Paulo

2010

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC

Waleska da Silva Barbosa

Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica da USP para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi

Área de concentração: Componentes e Materiais de Construção, na linha de Pesquisa em Pastas e Argamassas.

São Paulo

2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada à fonte.

Catalogação da Publicação
Preparada pela Biblioteca do Serviço de Biblioteca e Documentação
da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Engenharia Civil

FICHA CATALOGRÁFICA

Barbosa, Waleska da Silva
Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos / W.S. Barbosa. -- São Paulo, 2010.
152 p.

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

1. Reologia 2. Substratos porosos 3. Pasta de cimento 4. Squeeze-flow I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II. t.

Nome: Barbosa, Waleska da Silva
Título: Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em:
Banca Examinadora :

Prof. Dr. _____
Instituição: _____
Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____
Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____
Julgamento: _____

Assinatura: _____

“... o fato de uma coisa ser difícil tem de ser mais um motivo para fazê-la...

... sermos corajosos diante do que é mais estranho, mais maravilhoso e mais inexplicável entre tudo com que nos deparamos**...**

Assim como as abelhas juntam o mel, reunimos o que há de mais doce em tudo e o construímos.”

Rainer Maria Rilke

“Dedico este trabalho primeiramente a minha mãe, Irô, pelo amor imensurável, pelo esforço e dedicação despendida para a minha formação pessoal e profissional. A minha irmã, Thayana, por sua alegria de sempre. Ao meu pai, Valdir (*in memorian*). Ao meu companheiro de longa data, Rafael, com quem divido o árduo e sublime aprendizado de amar.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que colaboraram, mesmo que indiretamente, na realização deste trabalho, nos âmbitos acadêmico, técnico e pessoal.

Ao meu orientador Dr. Rafael G. Pilleggi, que demonstrou imensa paciência com minha teimosia, incentivando-me nos momentos mais difíceis e me conduzindo de maneira singular ao término deste trabalho, sendo muitas vezes um grande conselheiro profissional e pessoal. Aqui fica registrado o meu: *muito obrigada!!!*

A todos os professores do Departamento de Pós-Graduação da Escola Politécnica da USP cujas disciplinas freqüentei. Agradeço aos professores Dr. Vanderley M. John e Dra. Maria Alba Cincotto, os quais admiro e sob quais possuo grande carinho.

Ao Fabio Alonso Cardoso e Cesar Romano agradeço a disponibilidade em fornecer apoio, esclarecer minhas dúvidas e também pela paciência nas inúmeras vezes que os incomodei.

Ao Laboratório de Microestrutura, em especial ao Mário Takeashi, que teve que agüentar diariamente o meu gênio difícil por dois anos e meio, e sempre demonstrou muito carinho comigo, ainda tenho que agradecê-lo por ter sido o fotografo oficial deste trabalho. Também agradeço aos queridos e dedicados alunos de iniciação científica do laboratório de microestrutura: Caio e Márcia.

Ao CONSITRA pelo apoio técnico e financeiro a esta pesquisa. A Cimpor pelo apoio com parte dos materiais desta pesquisa.

Ainda no âmbito financeiro, agradeço a CAPES pelo apoio através da bolsa de mestrado.

Também agradeço a minha mãe pela complementação da bolsa, através do deposito mensal todo dia 20, nestes dois anos e meio, obrigada pelo *"matrocinio"*!!!!

Aos amigos de pós-graduação Flávio Maranhão, Cleber Dias, Andrea M. Betioli, Juarez Hoppe Filho, Daniel Sentone, Cynthia Diezel, Nereu Cavalcanti e Thais, por tornar os meus dias longe de casa mais agradáveis.

Ao Vitor Scarpelli, pela convivência em um período curto, mas significativo, repleto de carinho, amizade e muitos risos.

Agradeço também aos membros do Coral da USP, em especial a Silvia Ueno, que colaboraram para *musicalizar* minha estada em São Paulo.

Ao apoio da Votorantim Cimentos na etapa final do mestrado e aos colegas de trabalho Leila, Juvenil, Eiji, Marco, Wagner, Junior e Aline, em especial ao Isac José da Silva pela compreensão, possibilitando que eu dedicasse mais tempo para a conclusão deste trabalho.

As minhas queridas amigas que estão presentes na minha vida desde criança, e foram muito importantes nesta etapa: Andressa Chinzarian e Sofia Maciel. E também aos amigos que superam o laço de amizade Betina Lepretti, Patrícia Faraco Benthien, Luiz Carlos Benthien e Mara Cláudia Faraco Benthien.

Aos companheiros de pós-graduação, amigos e irmãos do coração para a vida toda: Brunoro Giordano e Rui Barbosa de Souza, os quais foram o meu alicerce para que eu não sucumbisse em meio às diversidades que se apresentaram nesta jornada, além de acompanharem o meu trabalho e ajudar com discussões e idéias, com toda amizade e carinho deste mundo eu vos digo: ***MUITO OBRIGADA!!!***

A Eliane Betânia Costa, pela amizade, pelo carinho, pela dedicação nas leituras de cada capítulo, pela companhia nos momentos difíceis, por escutar minhas lamúrias e sempre me mostrar outro ponto de vista, por me apoiar e incentivar e, principalmente, por todos os momentos agradáveis e engraçados que vivemos neste período: ***muito obrigada***, você foi muito importante para tornar a minha vida em Sampa mais leve.

Aos queridos Zeca e Monet que ficaram ao meu lado, mesmo que dormindo, todas as noites e fins de semanas nestes meses finais de trabalho.

A minha família que representa nada menos que, a razão e o sentido da minha vida: Irô (mãe), Thayana (irmã) e Rafael (*namorido*).

RESUMO

BARBOSA, W. S. Alteração do comportamento reológico da suspensão cimentícia aplicada sobre substratos porosos. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Engenharia Civil, 2010, 160p.

As argamassas de revestimento são amplamente utilizadas na construção civil e, suas propriedades no estado endurecido são fortemente influenciadas pelas propriedades no estado fresco, as quais dependem de fatores como: materiais empregados; forma de aplicação; e interação entre substrato e argamassa. Os ensaios utilizados para caracterização reológica das argamassas não contemplam as alterações que ocorrem devido o contato com o substrato, gerando discordâncias nas teorias sobre os fenômenos pelo qual ocorre a resistência de aderência. Sendo assim, o presente trabalho visa identificar as alterações do comportamento reológico de suspensões cimentícias aplicadas em substratos porosos por meio do ajuste do método do squeeze-flow. Para tanto, foram utilizadas duas configurações do *squeeze-flow,* com e sem confinamento do fluxo radial; três tipos de base, sendo uma metálica e duas porosas; e, pastas com diferentes materiais, a saber: cimento; cal e filler calcário. A escolha da pasta ao invés da argamassa foi basicamente por duas razões: primeiro, porque a pasta é a parcela da argamassa mais suscetível aos efeitos de sucção capilar do substrato; e segundo, para simplificar o cenário de análise, eliminando a variável areia. Ambas as configurações apresentaram-se viáveis na identificação da alteração do comportamento reológico da pasta, devido aos fatores como: tipo de substrato; o tempo de contato entre pasta e substrato; perda de água da pasta; e energia de mistura. Além disso, observou-se que os procedimentos adotados, assim como o auxílio de outros ensaios, podem colaborar em estudos da influência de fatores como: temperatura; rugosidade; ângulo de contato; distribuição granulométrica de pastas e argamassas; e, principalmente, compreender os fenômenos que ocorre no período denominado como tempo de puxamento, ao passo que este influencia diretamente na resistência de aderência.

ABSTRACT

BARBOSA, W. S. Modification of rheological behavior of cementitious paste applied on porous substrates, Dissertation (Master). São Paulo. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Engenharia Civil, 2010, 160p.

Mortar renderings are used in most of the constructions and their properties in the hardened state are strongly influenced by the properties in the fresh state, which depend on factors such as materials used; application form; and interaction between substrate and mortar. The determination of rheological parameters of fresh mortars doesn't include the changes that occur due to contact with the substrate. It generates disagreements in the theories about the phenomena of formation of the bond strength. Therefore, this study aims to identify changes in the rheological behavior of cementitious paste applied to porous substrates by adjusting the squeeze flow method. For this, two configurations of squeeze flow were used, with and without confinement of the radial flow; three substrate types; and pastes with different materials, namely cement, lime and sand. The choice of paste instead of mortar was basically for two reasons: first, because the paste is the portion of mortar more susceptible to the effects of capillary suction of substrate; and second, to simplify scenario analysis, eliminating the variable sand. Both configurations were viable in the identification of the alteration of rheological behavior of paste, due to factors such as substrate type; the contact time between paste and substrate; loss of water from paste; and mixing energy. In addition, it was observed that the procedures adopted as well as the aid of the other tests can collaborate on studies of the influence of factors such as temperature, roughness, contact angle, particle size distribution of pastes and mortars; and above all to understand the phenomena that occurs in the initial periods of contact paste/substrate and consequently in the bond strength.

Sumário

Introdução 16

1 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SUSPENSÕES 19

1.1 INTRODUÇÃO 19

1.1.1 Comportamento reológico 20

1.1.2 Tipos de comportamento reológico 20

1.1.3 Caracterização reológica em argamassas e suspensões cimentícias 25

1.1.3.1 Ensaio de Fluxo 27

1.1.3.2 Ensaio oscilatório 29

1.1.4 Fatores que influenciam no comportamento reológico 30

1.1.4.1 Influência das propriedades físicas 30

1.1.4.2 Concentração volumétrica de sólidos e distância de separação entre partículas 32

1.1.4.3 Influência das interações superficiais 33

1.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL 36

1.2.1 Caracterização no estado anidro 36

1.2.2 Procedimento de mistura e aplicação 36

1.2.3 Ensaios nas pastas no estado fresco 37

1.3 RESULTADOS 38

1.3.1 Resultados no estado anidro 38

1.3.2 Resultados do ensaio de calorimetria 40

1.3.3 Resultados do reômetro rotacional 42

1.4 CONCLUSÕES PARCIAIS 47

2 SUBSTRATOS POROSOS 48

2.1 INTRODUÇÃO 48

2.1.1 Sucção Capilar dos Substratos 49

2.1.2 Textura Superficial 51

2.1.3 Interação substrato e pasta cimentícia 52

2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 55

2.3 RESULTADOS 57

2.3.1 Caracterização do estado anidro 57

2.3.2 Caracterização do substrato no estado fresco 58

2.3.3 Caracterização do substrato no estado endurecido 60

2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS 64

3 *SQUEEZE-FLOW* 66

3.1 INTRODUÇÃO 66

3.2 ENSAIO *SQUEEZE-FLOW* 67

3.2.1 Condições de Contorno 67

3.2.1.1 Placas Paralelas 68

3.2.1.2 Dimensões das Amostras 71

3.2.1.3 Taxa de Deslocamento 72

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 73

3.3.1 *Squeeze-Flow* 74

3.3.1.1 Com confinamento do fluxo radial 77

3.3.1.2 Sem confinamento do fluxo radial 79

3.3.2 Desenvolvimento do Substrato Poroso 80

3.3.3 Pastas 80

3.3.4 Mistura e Aplicação 81

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 81

3.4.1 *Squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial 81

3.4.2 *Squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial 88

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS 98

4 SQUEEZE-FLOW SOBRE SUBSTRATOS POROSOS 99

4.1 INTRODUÇÃO 99

4.1.1 Etapas de interação da argamassa (ou pastas) com o substrato 99

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL 101

4.2.1 Suspensão cimentícia 102

4.2.2 Procedimento de mistura e aplicação 102

4.2.3 Método de obtenção da absorção de água do substrato absorvente 102

4.3 RESULTADOS 103

4.3.1 Influência do substrato no ensaio de absorção de água 103

4.3.2 Influência do substrato no comportamento reológico das pastas 105

4.4 CONCLUSÕES PRCIAIS 113

5 INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE MISTURA 114

5.1 INTRODUÇÃO 114

5.1.1 Energia de mistura 114

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL 115

5.2.1 Procedimento de mistura e aplicação 115

5.2.2 Ensaio de retenção de água 117

5.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração 118

5.3 RESULTADOS 119

5.3.1 Efeito da mistura na retenção de água 119

5.3.2 Efeito da mistura: ensaio de absorção de água dos substratos 121

5.3.3 Efeito da mistura: ensaio squeeze-flow 122

5.3.4 Efeito da mistura: comportamento reológico 124

5.3.5 Efeito da mistura: resistência de aderência à tração 127

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS 128

6 CONCLUSÕES 129

7 REFERÊNCIAS 132

APÊNDICE 139

Introdução

Ao se pensar na argamassa, desde seu processo de fabricação até o revestimento endurecido e aderido ao substrato, existem muitas etapas relevantes que influenciam na qualidade do produto.

A primeira delas é a escolha dos materiais que serão utilizados e suas caracterizações, tais como distribuições granulométricas, área superficial específica, composição química, ou seja, o máximo de informações que possa caracterizar o estado anidro dos insumos e auxiliar na escolhas das proporções.

O passo seguinte é avaliar o comportamento reológico da argamassa para obter propriedades requeridas à sua aplicação. Nesta etapa, a concentração volumétrica de sólidos, o teor de água, a energia e o tempo de mistura são determinados. Em alguns casos de aplicações específicas recomenda-se a análise da cinética de hidratação do cimento, principalmente quando utilizado aditivos que podem modificar o período de hidratação.

Após determinar as propriedades no estado fresco, inicia-se a etapa de aplicação, na qual se avalia empiricamente propriedades como espalhamento da argamassa no substrato, coesão, “consistência pegajosa”, adesão da argamassa na ferramenta, entre outras características.

Ao encerrar a etapa de lançamento inicia-se um processo de consolidação da argamassa, sendo conseqüência de conformação plástica da argamassa, a qual ocorre devido à sucção de água da base e sua evaporação ambiente, ocasionando perda de trabalhabilidade. Nos canteiros de obra este processo denomina-se como “tempo de puxamento”.

A consolidação da argamassa sobre o substrato é fortemente influenciada pelas condições do ambiente e o tipo de substrato, tais fatores alteram o comportamento reológico das argamassas. Entretanto, as alterações das propriedades reológicas neste processo de consolidação das argamassas em contato com os substratos são muito difíceis de serem determinadas.

O conhecimento teórico e experimental ainda é insuficiente, contudo não é de hoje que se buscam compreender os fenômenos que ocorrem nesta etapa. O fato é que o tempo de consolidação da argamassa determina o momento adequado para as etapas de nivelamento e acabamento, que podem variar para cada aplicador. Após o endurecimento são realizados testes para verificar a resistência de aderência.

Pensando nesta problemática foi elaborado o projeto da presente pesquisa, cujo **objetivo geral é adequar o squeeze-flow para a realização do ensaio sobre substratos poroso,** com intuito de encontrar um procedimento de ensaio capaz de identificar as alterações que ocorrem no comportamento reológico de pastas cimentícias quando em contato com a base porosa, etapa denominada como consolidação da argamassa.

A parcela mais suscetível à sucção capilar do substrato é a pasta presente na argamassa. Por esta razão optou-se por estudar apenas a pasta, reduzindo o numero de variáveis na tentativa de compreender o fenômeno de interação entre pasta e substrato.

Para tanto, o presente trabalho foi dividido em 5 capítulos, aos quais se seguem uma conclusão (capítulo 6) e as referências bibliográficas (capítulo 7).

O capítulo 1 apresenta uma revisão dos principais fundamentos sobre reologia, aplicada à argamassas e suspensões cimentícias, bem como a caracterização com técnicas reológicas de três pastas com diferentes materiais, as quais foram utilizadas na validação das adequações do método *squeeze-flow.*

O capítulo 2 é dedicado à caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos dois substratos porosos que serão utilizados durante os capítulos subseqüentes.

O capítulo 3 é a parte principal deste trabalho, pois são propostas as duas configurações para o squeeze-flow sobre substrato poroso. Apenas a base metálica e o substrato com maior porosidade são utilizados, sendo que as três pastas caracterizadas no capítulo 1 são testadas neste capítulo.

O capítulo 4 utiliza os procedimentos adotados no capítulo 3 e compara os dois substratos porosos para apenas uma pasta cimentícia.

O capítulo 5 incrementa a discussão do capítulo 4 com a inclusão de mais uma variável, a energia de mistura.

Os resultados indicam que as adaptações executadas no squeeze-flow foram capazes de medir a alteração do comportamento reológico de pastas aplicadas sobre substratos absorventes. Contudo, foi verificado que o auxílio de outros ensaios refina as discussões e corrobora na análise dos dados.

1 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE SUSPENSÕES

1.1 INTRODUÇÃO

O comportamento das argamassas no estado fresco é complexo, principalmente no ponto de vista das diferentes demandas reológicas associadas ao tipo e fase da aplicação dos revestimentos. Como exemplo pode-se citar: o transporte da argamassa, com uso do carrinho de mão ou processo de bombeamento; a forma de aplicação, lançamento manual ou uso de projeção; o espalhamento da argamassa sobre o substrato que está relacionado com a área de contato, fato relevante na resistência de aderência no estado endurecido; o tempo de consolidação da argamassa sobre o substrato, definindo o momento de execução do nivelamento e acabamento, influenciando na produtividade do aplicador.

A partir do processo pelo qual a argamassa será aplicada pode-se adequar formulações que possuam o melhor desempenho reológico, com base nas características e proporções dos materiais empregados, na intensidade e tempo de mistura, no tipo de substrato utilizado, bem como nas condições do ambiente, temperatura e umidade. Todas estas variáveis podem e devem ser avaliadas através de ensaios que medem o comportamento reológico de argamassas. Inclusive, analisando o panorama atual, percebe-se que as pesquisas acadêmicas caminham no sentido de compreender os parâmetros reológicos e suas correlações com a aplicação nos canteiros de obra.

Um exemplo claro são as novas técnicas empregadas como ferramentas de análise do comportamento reológico de pastas cimentícias e argamassas de revestimento, demonstrando o avanço tecnológico nesta área (MIN et al., 1993; MIN et al., 1994; ANTUNES, et al. 2005; CARDOSO et al., 2005; TOUTOU et al., 2005; BETIOLI, 2007; CARDOSO, 2009).

Desta forma, o **objetivo** do capítulo consiste em apresentar **conceitos de reologia aplicados à argamassa de revestimento e suspensões cimentícias, bem como caracterizar as pastas de cimento, cal e calcário a partir de técnicas de reometria rotacional e oscilatória.**

Através da caracterização destas pastas pretende-se apresentar as diferenças reológicas entre os materiais utilizados. Isto se faz necessário devido ao fato de que estas pastas serão utilizadas no capítulo 3 para a validação dos dois procedimentos proposto do squeeze-flow sobre substratos porosos.

1.1.1 Comportamento reológico

A reologia é o estudo da deformação e do fluxo do material, com ênfase no fluxo e sua relação entre tensão, deformação, taxa de deformação e o tempo (BANFIL, 2003).

Entre os fluidos estudados na reologia destacam-se os líquidos, as emulsões e as suspensões de partículas. As suspensões são formadas pela mistura de partículas sólidas envoltas por um líquido. Os componentes sólidos atuam como unidades resistentes ao fluxo dificultando o escoamento do fluido, ou seja, aumentando a viscosidade (PILEGGI, 2001).

Através da análise da deformação e do fluxo do material é possível obter parâmetros de medidas como viscosidade, tensão de escoamento e taxa de deformação (BANFILL, 2005). A reologia é considerada uma ciência multidisciplinar, pois correlacionam aspectos físicos e químicos, que dependem das propriedades e substâncias contidas nos materiais (MALKIN, 1994), sendo estas interações que promovem diferentes tipos de comportamento reológicos.

1.1.2 Tipos de comportamento reológico

Na descrição do comportamento reológico de uma suspensão, são usualmente empregados modelos matemáticos que correlacionam a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) aplicada, sendo a viscosidade aparente (η) da suspensão igual à relação entre tensão cisalhante e taxa de cisalhamento.

De forma geral existem dois tipos de líquidos, os líquidos Newtonianos e os não-Newtonianos. Para os fluidos **Newtonianos**, o comportamento é descrito por uma relação

linear entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, cuja tensão de escoamento é igual a zero, isto indica que o aumento da taxa de cisalhamento não altera a viscosidade do fluido, também chamados de líquidos ideais (SCHRAMM, 2006).

Existem duas classes de fluidos não-Newtonianos: os fluidos com comportamento reológico independentes do tempo e os dependentes do tempo. A figura 1.1 apresenta os fluidos independentes do tempo, os quais são: os pseudoplásticos, com ou sem tensão de escoamento (τ_0); os dilatantes, com ou sem tensão de escoamento; os fluidos de Bingham; e o fluido Newtoniano.

O fluido de **Bingham** é caracterizado como uma suspensão viscoplástica, comporta-se como sólido quanto submetido a tensões menores que a tensão de escoamento ($\tau < \tau_0$), quando a tensão sobre o fluido excede a tensão de escoamento ($\tau > \tau_0$), inicia-se o fluxo, com relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento (MALKIN, 1994; PILEGGI, 2001; GRIESSER, 2002; BANFILL, 2005).

A viscosidade aparente do comportamento reológico do fluido Bingham diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. O mesmo ocorre para os fluidos com comportamento reológico **pseudoplástico**, cuja diminuição da viscosidade aparente é devido ao aumento da taxa ou tensão cisalhante. O efeito da taxa de cisalhamento pode ser reversível para a maioria dos pseudoplásticos (SCHAMM, 2006). Para suspensões cimentícias e argamassas de revestimento, o aumento na taxa de cisalhamento pode propiciar a quebra de partículas aglomeradas, diminuindo a turbulência das linhas de fluxo devido à redução do diâmetro das partículas. Outro fator é a forma de aplicação da taxa de cisalhamento, a qual pode promover alinhamento nas partículas, orientando o deslocamento na direção das linhas de fluxo. Com menor resistência o fluxo a viscosidade aparente diminui.

Os fluidos **dilatantes** apresentam aumento na viscosidade aparente quando aumentada a tensão ou taxa de cisalhamento, este comportamento é observado em suspensões com elevada concentração de sólidos ou distribuições granulométricas estreitas, ambas as características reduzem a distância média entre as partículas (PILEGGI, 2001).

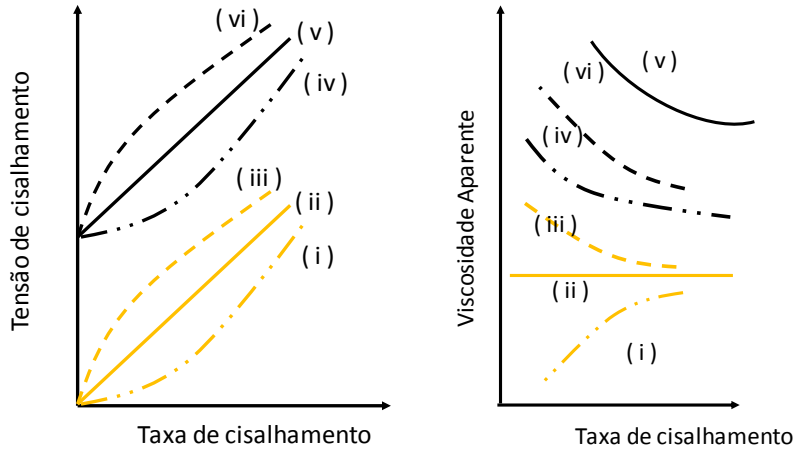


Figura 1.1 - Exemplo esquemático de comportamentos reológicos independentes do tempo: (i) dilatante; (ii) Newtoniano; (iii) pseudoplástico; (iv) dilatante com tensão de escoamento; (v) Bingham; (vi) pseudoplástico com tensão de escoamento (Fonte: Pileggi, 2001).

Diferentes modelos podem ser utilizados para calcular os parâmetros do comportamento reológico dos fluidos independentes do tempo e não-Newtonianos, alguns destes modelos são apresentados por Steffe (1996).

Os modelos matemáticos mais recorrentes são Bingham e Herschel-Bulkley, Equações 1.1 e 1.2, respectivamente (ADAMS et al., 1993; STEFFE, 1996; PILEGGI, 2001; BANFILL; 2003):

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} * \dot{\gamma} \qquad \text{Equação 1.1}$$

$$\tau = \tau_0 + \kappa * \dot{\gamma}^{\,n} \qquad \tau \geq \tau_0 \quad \text{(a)}$$

$$\tau = \tau_0 \rightarrow \dot{\gamma} = 0 \qquad \tau < \tau_0 \quad \text{(b)} \qquad \text{Equação 1.2}$$

onde η_{pl} representa a viscosidade plástica da suspensão (equação 1.1), κ é uma constante que representa a consistência do fluxo em cisalhamento e ^{n} é um índice do fluxo em cisalhamento (ambos da equação 1.2).

O comportamento reológico dependente do tempo é relacionado com a alteração da estrutura do material, cuja viscosidade modifica-se em função do tempo, quando submetido a

uma taxa de cisalhamento constante. As suspensões dependentes do tempo se enquadram em dois tipos de comportamentos reológicos: os tixotrópicos ou os reopéxicos (STEFFE, 1996).

Fluidos com comportamento **tixotrópico** apresentam um decréscimo na viscosidade em relação ao tempo, com taxa de cisalhamento constante. O contrário é verificado para os fluidos **reopéxicos**, cuja viscosidade aumenta com o tempo, sob taxa de cisalhamento constante, conforme demonstrado na Figura 1.2.

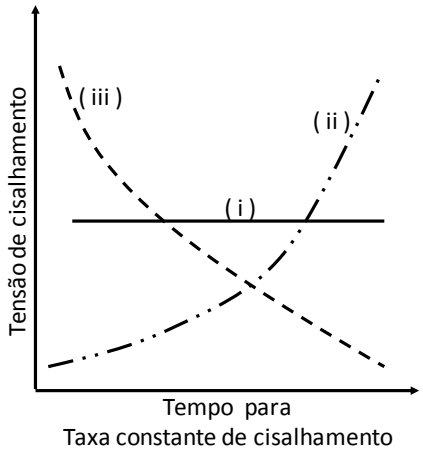
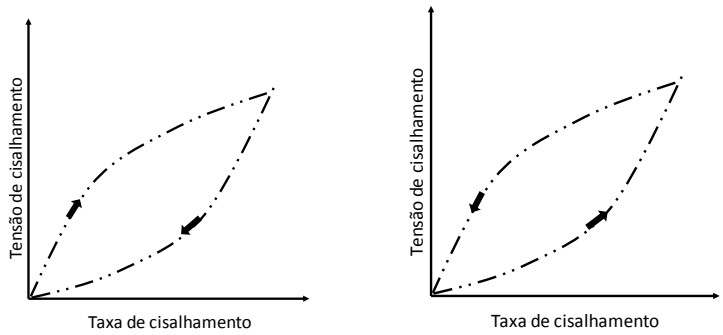


Figura 1.2 – Comportamento reológico de fluidos dependentes do tempo, tensão de cisalhamento em função do tempo, para taxa constante de cisalhamento: i) comportamento de um fluido independente do tempo; ii) fluidos reopéxicos, aumento da tensão de cisalhamento; iii) fluidos tixotrópicos: diminuição da tensão de cisalhamento (Fonte: STEFFE, 1996).

Quando fluidos com comportamento reológicos dependentes do tempo são submetidos à taxa de cisalhamento variável (aceleração e desaceleração), apresentam área de histerese na curva de taxa de cisalhamento *versus* tensão de cisalhamento (STRUBEL; JI, 2001; BETIOLI, 2007). Para os fluidos tixotrópicos os valores de tensão de cisalhamento são maiores na aceleração. Quando aplicada taxas de cisalhamento para a desaceleração o fluido apresenta menores valores de tensão de cisalhamento, ver Figura 1.3 (a). Já os fluidos reopéxicos apresentam menores tensões de cisalhamento na aceleração do que na desaceleração, conforme Figura 1.3 (b).

O aumento da taxa de cisalhamento nos fluidos tixotrópicos promove uma desaglomeração das partículas floculadas, ao diminuir a taxa aplicada o fluido possui menor resistência ao fluxo, pois os aglomerados já foram desfeitos, o que resulta em menores tensões de cisalhamento.

O comportamento tixotrópico pode ser considerado como conseqüência da ruptura da estrutura, que pode com o tempo reflocular, denominado efeito reversível (BANFILL, 2003). Por outro lado, no comportamento reopéxico ocorre a construção de uma estrutura, o que pode ser devido à quebra da estrutura, reversível ou não, ou devido a efeitos de cinética, interações intermoleculares, como interações de força iônica e pontes de hidrogênio (MALKIN, 1994).



a) (b)

Figura 1.3 – Curvas de histerese para comportamentos reológicos dependentes do tempo submetidos a ciclos de aceleração e desaceleração: a) fluidos tixotrópicos – maiores tensões de cisalhamento na aceleração; b) fluidos reopéxicos – menores tensões de cisalhamento na aceleração (MALKIN, 1994; BETIOLI, 2007).

Entretanto, ambos os comportamentos dependentes do tempo são fortemente influenciados pelo histórico de cisalhamento, ou seja, a intensidade e tempo pelo qual o fluido foi submetido anteriormente à análise reológica (OLIVEIRA, 2000).

Em pastas de cimento, a intensidade de mistura pode influenciar em um período de até duas horas, cujos sistemas com menores intensidades de mistura são responsáveis por maiores valores de tensão (YANG; JENNINGS, 1995). Isto pode ser explicado devido a presença

de aglomerados que em baixas energias de mistura não são dispersos e promovem maior dificuldade de fluxo na pasta.

1.1.3 Caracterização reológica em argamassas e suspensões cimentícias

Parâmetros do comportamento reológico são importantes indicativos de aplicação para argamassas de revestimentos. Entre os métodos tradicionais de avaliação de argamassas, destacam-se o *dropping ball* e mesa de consistência, os quais fornecem informações pontuais sobre o perfil reológico das argamassas, mas muitas vezes não são capazes de identificar comportamentos reológicos diferenciados (CARDOSO et al*.,* 2005; ANTUNES et al., 2005; BANFILL, 2005; HOPPE F. et al., 2007).

Hoppe F. et al. (2007) apresentaram um estudo comparativo entre diversas técnicas de caracterização reológica para argamassas, apresentando os princípios físicos, além de uma análise crítica para cada método. A tabela 1.1 foi extraída do trabalho destes autores, pois apresenta uma síntese das discussões e os parâmetros reológicos obtidos por diferentes métodos.

O *squeeze-flow* recentemente vem sendo aplicado para estudos do comportamento reológico de argamassas de revestimento e suspensões cimentícias (MIN et al., 1994; CARDOSO et al., 2005; TOUTOU et al., 2005; CARDOSO, 2009). Outros ensaios de caracterização reológica são utilizados em pastas cimentícias, como exemplo pode-se citar o cone de Marsh, Vane *test*, mini *slump* e o reômetro rotacionais.

Tabela 1.1 – Finalidade das técnicas de caracterização reológica de argamassas no estado fresco (Fonte: HOPPE F° et al., 2007)

Ensaio	Tipo de ensaio*	Parâmetro reológico relacionado	Argamassas				
			Alta consistência	Baixa consistência	Com fibras	Bombeáveis	Projetadas
Mesa de consistência *(Flow table)*	Mono-ponto	Viscosidade	X	X	x		
Dropping	Mono-ponto	Tensão de escoamento	X				
Cone de penetração	Mono-ponto	Tensão de escoamento	X				
Gtec test	Mono-ponto	Viscosidade	X		X		
Flow cone	Mono-ponto	Viscosidade	X	X			
Plastometro de Voss	Mono-ponto	Viscosidade	X				
Vane test	Mono-ponto	Viscosidade	X	X	x		
Squeeze flow	Multiponto	Tensão de escoamento e viscosidade	x	X	X		
Reômetros	Multiponto	Tensão de escomaneto e viscosidade	X	X	X	x	X

*Mono-ponto: ensaio que está relacionado a uma taxa de cisalhamento, permitindo a mensuração indireta de um parâmetro reológico fundamental (tensão de escoamento ou viscosidade)

Multiponto: ensaio que permite a determinação da tensão de escoamento e das viscosidades aparentes para as correspondentes taxas de cisalhamento.

O reômetro rotacional é uma ferramenta muito utilizada para pastas de cimento, auxiliando em estudos como: análise do comportamento reológico em função do tempo ou em função das condições de contorno (ERWIN; JENNINGS, 1993; SCHULTZ; STRUBLE, 1993; SAAK et al., 2001; SUN et al., 2006; PHAN et al., 2006); assim como estudos do estados de dispersão das partículas, eficiência de mistura (YANG; JENNINGS, 1995; WILLIAMS et al., 1999); além da influência de aditivos no comportamento das suspensões e na hidratação de pastas cimentícias (PAPO; PIANI, 2004; PHAN et al., 2006; BETIOLI, 2007), entre outros experimentos.

Os reômetros rotacionais permitem a solicitação da amostra frente a diferentes condições de cisalhamento, desde fluxos de cisalhamento estacionários, com aumento e

decréscimo de tensão ou deformação, varreduras de cisalhamento e freqüências, assim como testes oscilatórios, podendo ser realizados em função do tempo e temperatura, entre outros.

1.1.3.1 Ensaio de Fluxo

Diferentes geometrias podem ser utilizadas para obtenção do fluxo laminar, entre elas encontram-se as placas paralelas, o uso de dois cilindros concêntricos, bem como o uso de uma placa e um cone, para ambas as configurações uma das partes permanece estática enquanto a outra se movimenta (STEFFE, 1996; SCHRAMM, 2006).

O ensaio de fluxo consiste na aplicação de aceleração e desaceleração da taxa de cisalhamento ou tensão de cisalhamento, obtendo como resultado a tensão em função da taxa de cisalhamento, que pode ser expressa por curva de escoamento. A partir disso, obtêm-se parâmetros reológicos como a viscosidade e a tensão de escoamento (WILLIAMS et al., 1999; PAPO; PIANI, 2004; BETIOLI, 2007).

Para cada ponto da curva de escoamento é possível calcular a viscosidade aparente, basta dividir o valor da tensão de cisalhamento pela taxa de cisalhamento. Por outro lado a tensão de escoamento é um tanto subjetiva, tendo em vista que não se mede o valor da tensão de cisalhamento para a taxa de cisalhamento igual a zero, ao passo que a tensão de escoamento representa o esforço necessário sob o fluido para que ele inicie o fluxo.

É usual a utilização de extrapolação da curva para determinar a tensão de escoamento. Esta extrapolação pode ser feita com o prolongamento da curva de aceleração até a intercessão com o eixo da tensão de cisalhamento, determinando assim, o valor da tensão de escoamento para a taxa de cisalhamento igual a zero (BETIOLI, 2007). Por outro lado, alguns autores consideram que existem dois tipos de tensão de escoamento: uma que relaciona estrutura do material em repouso, tensão de escoamento estática, a qual pode ser facilmente desestruturada quando submetida ao movimento do fluido; e a outra tensão é insensível a

taxa de cisalhamento e segue a curva de equilíbro do fluxo, tensão de escoamento dinâmico, ver figura 1.4 (STEFFE, 1996)[1].

Yoo et al. (1995) *apud* Steffe (1996) definiu um novo número adimensional para o escoamento, o qual é resultante da divisão da tensão de escoamento estática pela tensão de escoamento dinâmica.

Apesar de o ensaio de fluxo ser relativamente simples, o resultado pode agregar informações relevantes para o comportamento do fluido de suspensões cimentícias. Como exemplo pode-se citar a presença de aglomerados. A aplicação da aceleração no ensaio de fluxo pode ocasionar desaglomeração, se a taxa ou tensão de cisalhamento aplicada na aceleração for suficiente para quebrá-los, pode gerar menores valores de tensões ou taxas de cisalhamento na desaceleração, apresentando área de histerese, conforme demonstrado na Figura 1.4.

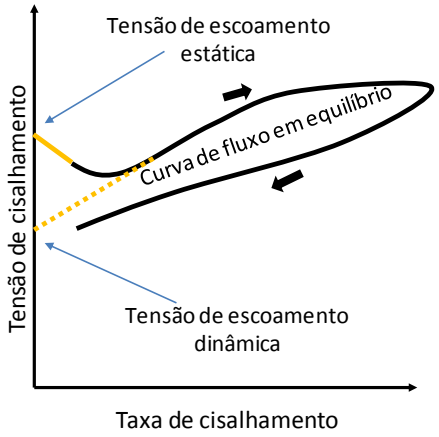


Figura 1.4 – Extrapolação da curva de aceleração do fluxo para obtenção das tensões de escoamento estática e dinâmica (STEFFE, 1996).

[1] Steffe (1996) cita diversos autores que correlacionam ambas as tensões de escoamento, estática e dinâmica, porém nem sempre utilizam a mesma nomenclatura.

1.1.3.2 Ensaio oscilatório

O princípio básico da técnica é a aplicação de amplitude de deformação máxima, em geral senoidal, sob condição de cisalhamento, tensão ou deformação, obtendo como resposta uma dada deformação ou tensão (STEFFE, 1996).

A deformação (γ) é dada em função da amplitude de deformação máxima (γ_0), do tempo (t) e a da freqüência (ω), conforme a Equação 1.3.

$$\gamma = \gamma_0 \text{ sen } t\omega \qquad \text{Equação 1.3}$$

Os testes de cisalhamento oscilatório podem fornecem parâmetros como: módulo elástico ou armazenamento (G') e módulo viscoso ou de perda (G"), sendo o primeiro referente à rigidez da estrutura da amostra relacionadas ao armazenamento de energia, enquanto o segundo refere-se as interações que controlam as conformações ou deslocamento da estrutura da amostra, relacionada à energia dissipada (CRUZ et al., 2008). Tais parâmetros são importantes no estudo de pastas cimentícias, devido ao processo de hidratação que promove a consolidação do fluxo em função do tempo.

O módulo complexo (G*) é a soma dos dois módulos. Quando se analisa um sólido ideal a parcela de deformação elástica é nula, G' é igual a zero, o inverso ocorre com fluidos Newtonianos, cujo G" é igual a zero (SCHULTZ; STRUBLE, 1993), ver Equação 1.4.

$$G^* = G' + i\, G'' \qquad \text{Equação 1.4}$$

A viscosidade dinâmica (η') é outro parâmetro dos ensaios oscilatórios que fornece relevantes informações do material e pode ser obtida a partir do G" dividido pela ω. A η' é uma parcela referente à η^* (viscosidade complexa), a qual depende também da η'' (componente da viscosidade complexa = G'/ω).

Tais parâmetros reológicos são importantes para distinguir os comportamentos de diferentes materiais, contudo é relevante ressaltar que as condições de ensaio devem ser as

mesmas, pois cada parâmetro alterado modifica o resultado final, impossibilitando a comparação entre amostras.

1.1.4 Fatores que influenciam no comportamento reológico

1.1.4.1 Influência das propriedades físicas

As características físicas das partículas presentes na suspensão, tais como tamanho das partículas, formato, densidade, distribuição granulométrica e área superficial específica influenciam no comportamento reológico (PILEGGI, 2001).

O tamanho da partícula afeta principalmente o tipo de força atuante sobre ela, no caso de partículas maiores (milimétricas) predominam as forças gravitacionais; por outro lado, quanto às partículas menores (sub-micrométricas e micrométricas) prevalecem as forças de superfícies (OLIVEIRAS, et al. 2000).

A argamassa no estado fresco pode ser considerada como uma suspensão de partículas com alto teor de sólidos, geralmente multifásico: partículas milimétricas de areia imersa em uma matriz, ou pasta (partículas finas e água). Desta forma, tanto as forças gravitacionais como as forças de superfície atuam simultaneamente no sistema.

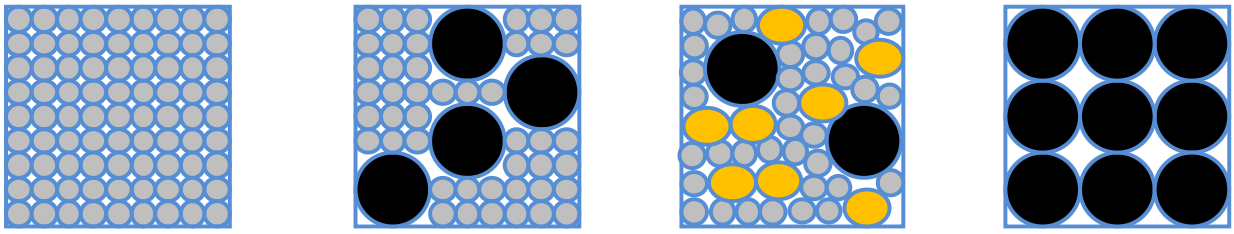
O formato das partículas pode influenciar no comportamento da suspensão, ao considerar que a maior irregularidade na superfície das partículas tende a aumentar a fricção interparticular e minimizar a eficiência de empacotamento das partículas (PILEGGI, 1996). Desta forma, pode-se supor que tal fato gere também um aumento na força aplicada para que a suspensão inicie o fluxo.

A área superficial específica das partículas influencia principalmente no estado de dispersão da suspensão, devido às forças de superfícies (OLIVEIRA et al., 2000). Nas argamassas, grandes concentrações de partículas com elevada área superficial específica requerem também um acréscimo considerável de água para a molhagem e subseqüente fluidez do sistema. Caso o aumento de partículas com elevada área superficial específica seja atribuído a material inerte, este aumento de água pode ocasionar maior quantidade de vazios no estado endurecido, provocando um decréscimo nas propriedades mecânicas do material.

Na Figura 1.5 é possível observar a influência da área superficial específica, cuja área de molhagem é superior para Figura 1.5 (a), a qual apresenta partículas de menores diâmetros, o que promove aumento na área superficial específica. Ao comparar a Figura 1.5 (a) e (d), observa-se diminuição considerável na área superficial das partículas.

Ainda na Figura 1.5, pode-se observar o empacotamento das partículas. Na terminologia adotado por Oliveira et al. (2000) as monodispersões são compostas por partículas de um único diâmetros, as distribuições de tamanho discreto são faixas estreitas de granulometria, e as polidispersões são compostas por mais de uma fração de monodispersão ou tamanhos discretos.

Usualmente se trabalha com distribuições de tamanhos discretos, pois as monodispersões são muito difíceis de obter, na maioria dos casos utilizam-se distribuições que propiciem o maior empacotamento possível (PILEGGI, 1996).



a) b) c) d)

Figura 1.5 – Desenho esquemático de distintas distribuições granulométricas: a) sistema de monodispersão - partículas finas; b) sistemas de polidispersão - duas frações de monodispersão, partículas finas e grandes; c) sistemas de polidispersão – com partículas finas, médias e grandes; d) sistema de monodispersão – partículas grandes.

Pileggi (1996) ressalta que área superficial específica é tão importante quanto o empacotamento e recomenda a análise das duas variáveis mutuamente, a fim de melhor determinar a parcela de água disponível para movimentação das partículas. Assim, um ponto importante é a concentração volumétrica das frações das partículas utilizadas na suspensão.

1.1.4.2 Concentração volumétrica de sólidos e distância de separação entre partículas

A concentração do volume de sólidos influencia diretamente a viscosidade das suspensões de partículas, sendo assim, um aumento no volume de sólidos acarreta maior viscosidade (STRUBLE e JI, 2001).

O aumento da concentração volumétrica dos sólidos é diretamente proporcional à distância de separação interparticular (IPS), pois à medida que se acrescenta sólidos em um dado volume, maior quantidade de água é necessária para recobrir as partículas, sendo que a água primeiramente preenche os vazios e posteriormente afasta as partículas, conforme Figura 1.6.

Outro fator relevante para suspensões com elevada concentração de sólidos é que a maior aproximação entre partículas favorecendo a aglomeração (em sistemas com elevada área superficial), e em altas taxas de cisalhamento pode aumentar a força de atrito devido à maior probabilidade de colisões (PILEGGI, 2001). A concentração volumétrica de sólidos, assim como a área superficial específica e a eficiência de empacotamento são fatores que determinam a distância entre as partículas.

O modelo de cálculo de distância de separação entre as partículas apresentado por Oliveiras et al. (2000) leva em consideração tanto a área superficial quanto a concentração volumétrica, além da distribuição granulométrica e o contato entre partículas, quando a distância entre elas igual a zero. Isso ocorre quando o líquido presente é suficiente apenas para preencher os vazios do sistema.

Quanto maior a distancia entre as partículas menor é a viscosidade do sistema, e este resultado pode ser controlado pela alteração na porosidade, com ajustes da distribuição granulométrica (OLIVEIRA et al., 2000).

Deste modo, para aumentar a fluidez de uma suspensão é preciso aumentar a distância entre as partículas, para isto pode-se, por exemplo, diminuir a fração volumétrica das partículas mais finas e de elevada área superficial específica, assim proporcionar maior quantidade de água livre proporcionando maior afastamento entre partículas.

Por outro lado, é necessário que a pasta tenha certa concentração de sólidos, pois em argamassas, pastas com baixa concentrações de sólidos podem causar tanto segregação das partículas mais grossas, como a exsudação devido ao excesso de água. Outra opção é aumentar a faixa de distribuição granulométrica, na tentativa de diminuir a porosidade, pois elevada porosidade requer maior quantidade de água para preencher os vazios, e posteriormente atuar no afastamento das partículas.

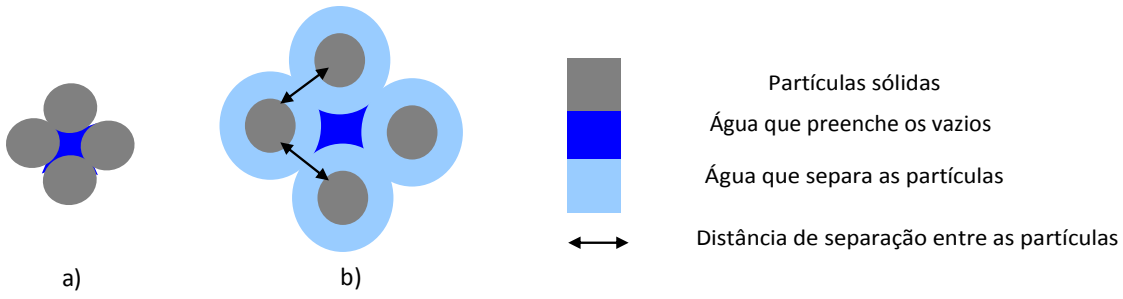


Figura 1.6 – Distância média de separação entre as partículas: a) partículas em contato sem nenhum fluido ou com fluido suficiente para preencher os vazios; b) partículas com vazios preenchidos e separadas pelo fluido. Desenho esquemático elaborado com base no desenho apresentado por PILEGGI, 2001.

1.1.4.3 Influência das interações superficiais

As interações superficiais atuam em suspensões com partículas inferiores a 100 μm, as quais estão sujeitas às forças de atração, van der Waals e repulsão, forças eletrostáticas (YANG et al., 1997; OLVEIRA et al.,2000; GRIESSER, 2002).

Em suspensões com partículas inferiores a 10 μm podem ocorrer forças como movimento browniano (YANG et al., 1997), o qual consiste na movimentação aleatória das partículas devido ao choque com as moléculas do fluido na superfície sólida (OLIVEIRA et al., 2000).

As partículas podem conter cargas de superfície, seja por imperfeições do plano cristalino próximo ou na superfície, seja por adsorção de um íon específico na superfície, ou dissolução de espécies iônicas da superfície (NEUBAUER et al., 1998; GRIESSER, 2002).

Nas suspensões cimentícias ocorre continua produção de íons na interface entre a partícula de cimento não hidratada e os produtos de hidratação (NAGELE, 1985). Nos primeiros minutos de mistura entre cimento e água ocorre a dissolução completa de sulfatos alcalinos e liberação de íons K^+, Na^+, SO_4^{2-}, Ca^+ e OH^-, bem como a dissolução de sulfatos de cálcio di-hidratados que controlam a reação do C_3A evitando a pega instantânea (TAYLOR, 1990; GRIESSER, 2002).

Os íons provenientes da dissolução do C_3A e C_4AF reagem com os íons SO_4^{2-} e Ca^+ formando cristais de etringita (AFt) na superfície do C_3A, mas também pode ocorrer na superfície de outras partículas de cimento (TAYLOR, 1990; GRIESSER, 2002; BETIOLI, 2007). Estas reações ocorrem nos primeiros minutos após a mistura, e fazem parte da primeira etapa de hidratação do cimento, conforme figura 1.7. Neste período também ocorre à formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sobre a superfície da partícula de C_3S, esta formação é mais lenta e a quantidade passa a ser relevante com o passar das horas (TAYLOR,1990).

Portanto, as interações de superfície, dissolução e adsorção das partículas reagentes, assim como a concentração de sólidos, distribuição granulométrica, área superficial específica, tempo e intensidade de mistura[2], entre outros, são determinantes no comportamento reológico das suspensões, os quais serão apresentados no item seguinte.

---

[2] Neste capítulo não serão discutidos os efeitos da intensidade de mistura nas suspensões cimentícias, pois o capítulo 5 é dedicado a este assunto.

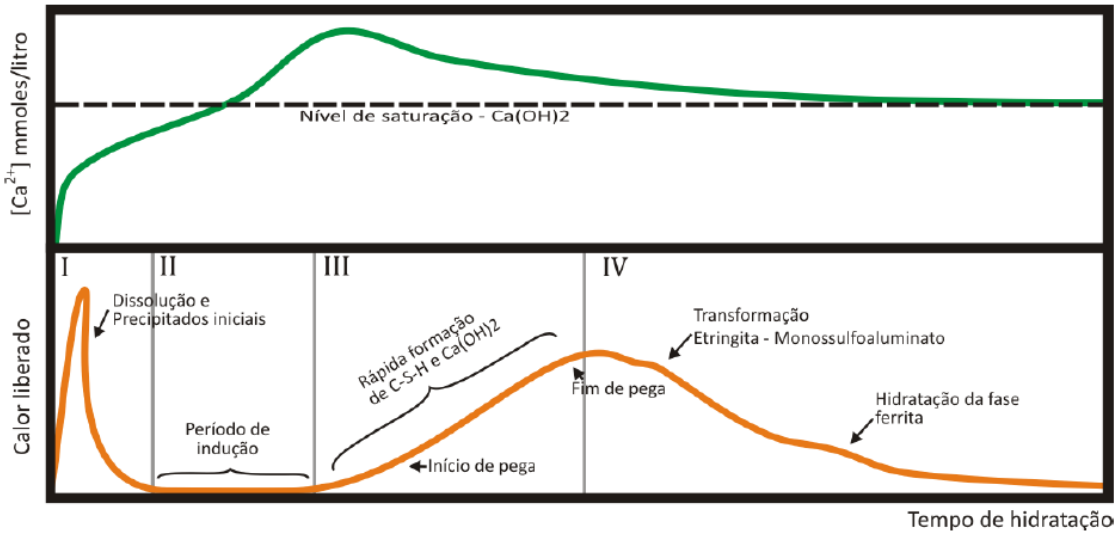


Figura 1.7 – Desenho esquemático do processo de liberação de calor nas etapas de hidratação do cimento Portland (Fonte: SOUZA et al., 2009): I) dissolução e precipitados iniciais - decorrentes da molhagem; II) período de indução - as formações dos hidratos são interrompida devido a uma camada de gel na superfície das partículas, desta forma as dissoluções e precipitações são parcialmente interrompidas até tornar-se mais permeável a difusão iônica[3]; III) período de aceleração das reações – como o meio aquoso encontra-se fortemente iônico ocorre uma rápida formação de C-S-H[4]; IV) período de desaceleração das reações – prossegue a formação de C-S-H e hidróxido de cálcio em taxas bem reduzida[5] (TAYLOR, 1990; AÏTCIN, 2000; GRIESSER,2002; BETIOLI,2007).

Com base na revisão apresentada foi elaborado o procedimento experimental, a fim de verificar diferenças entre as pastas de cimento, cal e filler calcário, quando submetidas à ensaios de reometria e calorimetria. Estes ensaios são importantes para indicar o perfil reológico das pastas nos intervalos de tempo que serão realizados na adequação do *squeeze-flow* sobre substratos porosos, capítulo 3.

---

[3] Neste período ocorre um aumento considerável dos íons K^+, Na^+, SO_4^{2-}, Ca^+ e OH^-, pois a formação do gel sobre as partículas retardam o processo de formação da etringita e C-S-H.

[4] Nesta etapa ocorre a diminuição dos íons sulfato e cálcio devido a continua formação de etringita. O início desta etapa de aceleração é denominado como o início de pega.

[5] Na etapa de desacelerações ocorre diminuição do fluxo de calor liberado, sendo as reações controladas por difusão iônica. O início do período de desaceleração indica o fim de pega.

1.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta etapa foram utilizadas três pastas com diferentes materiais: pasta de cimento de relação água/cimento igual a 0,58; pasta de *filler* calcário com relação água/calcário de 0,48; e pasta de cal hidratada CH-I, com relação água/cal de 1,5. Essas três pastas serão utilizadas no capítulo 3 para a verificação das adaptações propostas para o *squeeze-flow* sobre substrato poroso, assim é necessária a caracterização do estado anidro, do comportamento reológico, bem como da reatividade de cada material.

1.2.1 Caracterização no estado anidro

No estado anidro foi determinada a densidade, área superficial específica e distribuição granulométrica, para cada material. A densidade foi obtida por picnômetro de gás hélio, no equipamento MultiPycnometer da Quantachrome Instruments.

Para obter a distribuição granulométrica utilizou-se granulômetro a laser Mastersize da Malvern.

A área superficial específica foi obtida a partir do método BET com adsorção de nitrogênio no equipamento Gemini III 2375 – Micromeritics.

1.2.2 Procedimento de mistura e aplicação

Em um recipiente fixado ao misturador foi colocada a água para a mistura, na seqüência o material particulado foi adicionado ao recipiente através de uma calha vibratória, com rotação do misturador de 900 rpm; após 2 minutos e 30 segundos foi aumentada a rotação para 1500 rpm, permanecendo sob está intensidade até completar 5 minutos de mistura.

Após a mistura, as pastas foram submetidas a um dispersor com 9500 rpm, por um período de 2 minutos e 30 segundos. A forma de aplicação da pasta foi dependente do procedimento do ensaio realizado no estado fresco.

1.2.3 Ensaios nas pastas no estado fresco

O ensaio de calor de hidratação foi realizado no calorímetro isotérmico da marca TA Instruments, modelo TAM AIR, conforme Figura 1.8. As amostras foram pesadas e misturadas, conforme o procedimento de mistura citado anteriormente. Com o auxílio de um funil a amostra foi colocada dentro do recipiente, lacrada e adicionada no calorímetro isotérmico.

O reômetro rotacional utilizado foi o AR 550, da marca TA Instruments, de acordo com a Figura 1.9. Em cada amostra foi realizado dois ensaios seqüenciais, sendo o primeiro um ensaio de fluxo e o segundo o ensaio oscilatório.

O ensaio de fluxo iniciou-se com 12 minutos após a mistura, sendo composto pelas seguintes etapas: 1) pré-cisalhamento a 0,60 Pa com duração de 10 segundos; 2) posteriormente um período de repouso de 4 segundos; 3) na seqüência foi aplicada a aceleração da placa superior com a taxa de cisalhamento variando de 0 s^{-1} até 150 s^{-1}, com duração de 1 minuto e 30 pontos de medição; 4) inicio da desaceleração com a taxa de cisalhamento decrescendo de 150 s^{-1} até 0 s^{-1}, sendo o mesmo tempo de duração e quantidade de pontos de medida que o período de aceleração.

(a) (b) (c)

Figura 1.8 – Figura demostrativa do ensaio de calorimetria: a) adicionar a amostra no recipiente de ensiao; b)procedimento para lacrar o recipiente com a amostra; c) colocar o recipiente com a amostra e um recepiente vazio no canal de referência, por fim, iniciar a coleta de dados. (Fonte: Souza et al. 2009).

O ensaio oscilatório teve duração de 30 minutos, com intervalos de medida a cada 30 segundos, a deformação máxima foi de 1E-4, ou 5E-6 rad, e a freqüência de 1 Hz ou 6,283 rad/s. Esse ensaio foi realizado na seqüência do ensaio de fluxo, sendo o seu início próximo aos 15 minutos após a mistura.

Figura 1.9 - Reômetro rotacional com placas paralelas, sendo adotado o seguinte procedimento de ensaio: a torre superior desce até o *gap* de 1 mm (distância entre placas) comprimindo a amostra, posteriormente é retirado o excesso de material localizado fora da área entre as duas placas, na seqüência inicia-se o ensaio.

A determinação do tempo de ensaio no reômetro rotacional foi escolhida com base nos tempos de ensaios realizados no squeeze-flow sobre substratos porosos (capítulos 2 e 3), no qual o tempo máximo de ensaio é de 20 minutos, para o ensaio oscilatório o tempo adotado foi de 30 minutos.

A temperatura utilizada no reômetro rotacional foi de 25°C. Todas as amostras tiveram o mesmo procedimento de mistura. Os ensaios foram repetidos 3 vezes para cada amostra.

1.3 RESULTADOS

1.3.1 Resultados no estado anidro

Na tabela 1.2 encontra-se a densidade e a área superficial específica para cada material. A elevada área superficial específica da cal hidratada requisitou maior quantidade de água para que obtivesse uma consistência semelhante as demais pastas.

As distribuições granulométricas estão apresentadas na Figura 1.10. Percebe-se que os três materiais possuem curvas diferenciadas, cujo *filler* calcário possui a distribuição mais aberta, variando de 0,5 µm até aproximadamente 200 µm, sendo que sua maior freqüência de partículas encontra-se entre os diâmetro de 1 µm a 2 µm.

A cal CH-I é uma fração intermediária entre os três materiais, sendo que a maior freqüência de partículas localiza-se entre os diâmetros 0,7 µm até 10 µm. O cimento por sua vez, possui material com maior freqüência de partículas na faixa dos diâmetros de 10 µm e 50 µm.

Tabela 1.2 – Densidade e a área superficial específica para os materiais: Cimento CP II F, *filler* calcário e cal CH-I.

Material	**Área Superficial Específica (m^2/g)**	**Densidade (g/cm^3)**
Cimento CP II F	1,75	3,00
Filler Calcário	0,75	2,73
Cal CH-I	14,5	2,62

Considerando os diferentes teores de água para cada pasta, densidade, área superficial específica e distribuição granulométrica, é possível afirmar que do ponto de vista da caracterização anidra os materiais são diferentes.

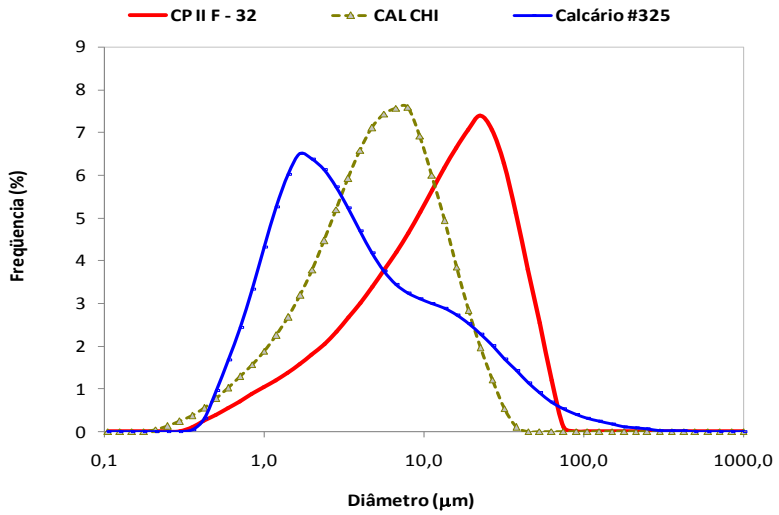


Figura 1.10 – Distribuições granulométricas dos materiais: cimento CP II F; cal CH-I; *filler* calcário, passante na peneira #325. A curva de distribuição granulométrica é obtida em função do diâmetro da partícula *versus* freqüência de ocorrência para cada diâmetro.

Contudo é necessário verificar a cinética de hidratação para a pasta de cimento e o calor liberado na molhagem para a cal hidratada e o *filler* calcário, além do calor acumulado com o tempo. Desta forma, será possível afirmar que os materiais também são distintos quanto às propriedades reativas ou inertes. Assim sendo, foi realizado o ensaio de calorimetria.

1.3.2 Resultados do ensaio de calorimetria

A curva do fluxo de calor para as três amostras encontram-se na figura 1.11. O primeiro pico referente à molhagem e a dissoluções das partículas. É relevante citar que os resultados referentes ao primeiro pico, dissolução e formação de precipitados, independente do tipo de material, sofre influência do método de mistura (interna ou externa), temperatura do ambiente, temperatura do ensaio e até mesmo temperatura do recipiente. Logo, é difícil conseguir reprodutividade nas curvas de liberação de calor para o primeiro estágio de hidratação. Este fato pode ter influencia na baixa liberação de calor apresentada pela pasta de cimento.

Por outro lado, pode-se dizer que o valor elevado de fluxo de calor para a cal hidratada pode ser atribuída à dissolução das partículas, bem como a maior área superficial deste material.

Observando a curva quando atingido 1 hora de ensaio, ambos os fluxos de calor diminuem, para o *filler* calcário este valor é praticamente nulo e continua assim até o término das 24 horas. A cal hidratada com 1 hora de ensaio, também decresce o fluxo de calor liberado, e seu fluxo de calor continua descendente até aproximar-se de zero.

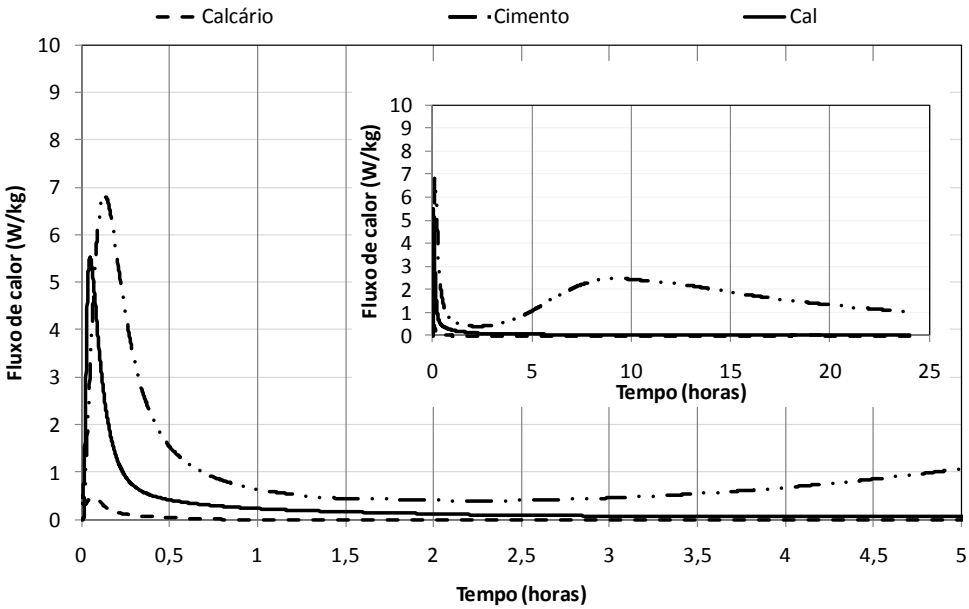


Figura 1.11 – Fluxo de calor liberado para o período de 5 horas. Curvas de fluxo de calor para as três pastas: pastas de cimento; cal hidratada; e *filler* calcário. Na figura reduzida no canto direito da imagem, está apresentado o fluxo de calor para o tempo de até 24 horas.

Em relação ao calor liberado pelo cimento, percebe-se que a curva obtida para as 24 horas apresenta os três estágios demonstrados na Figura 1.7, sendo que o primeiro pico refere-se ao calor liberado na dissolução e molhagem, seguido de um decréscimo no calor para entrar no período de indução, e assim consecutivamente.

Para a amostra de cimento, o período de indução durou aproximadamente 2,5 horas, a partir disso, iniciou a etapa de aceleração das reações de hidratação, e posteriormente a redução gradual das reações.

Os ensaios sobre substratos porosos, capítulo 3 e 4, serão realizados no intervalo de até 30 minutos, sendo que neste período a pasta de cimento ainda não iniciou as reações de hidratação, cujo calor liberado está relacionado à molhagem e dissolução das partículas. O mesmo ocorre para a pasta com cal hidratada. Para a pasta com filler calcário o fluxo de calor é praticamente nulo em relação às demais pastas.

1.3.3 Resultados do reômetro rotacional

O resultado do ensaio de fluxo encontra-se na Figura 1.12. Para a pasta de cimento percebe-se que no fluxo de aceleração, a tensão de cisalhamento foi maior em relação à mesma taxa de cisalhamento aplicada no fluxo de desaceleração. Isto pode indicar que a aplicação da taxa de cisalhamento máxima proporcionou desaglomeração, ou quebra na estrutura, que tende a aglomerar devido as forças de superfície. O ensaio de fluxo iniciou-se com 12 minutos após o término da mistura.

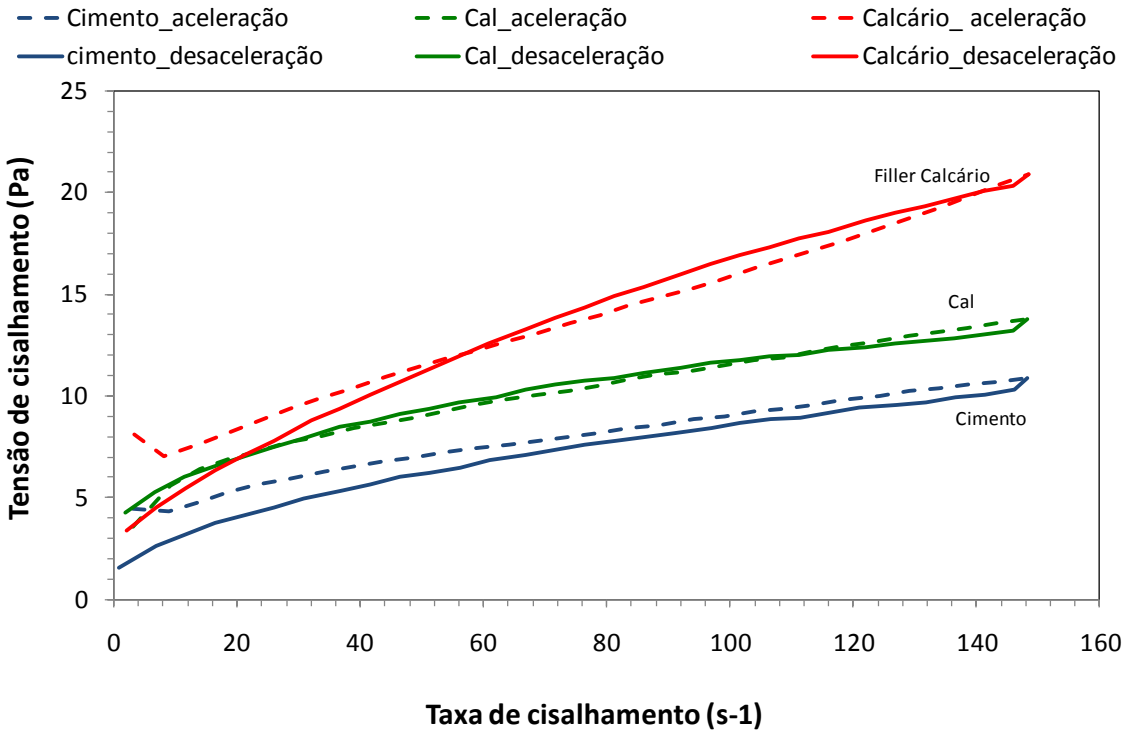


Figura 1.12 – Resultado do ensaio de fluxo para as pastas de cimento, cal CH-I e *filler* calcário. Curvas de tensão de escoamento em função da taxa de cisalhamento aplicada: em amarelo o perfil da curva para a aceleração da taxa de cisalhamento (0 s^{-1} até 150 s^{-1}); em preto o perfil da curva para a desaceleração (150 s^{-1} até 0 s^{-1}) .

A pasta de cal CH-I apresentou valores de tensão de cisalhamento muito semelhantes, tanto na aceleração quanto na desaceleração. Por ser uma pasta inerte podemos dizer que sob estas taxas aplicadas a pasta de cal comportou-se como um fluido pseudoplástico com tensão de escoamento.

Para o *filler* calcário o comportamento foi diferenciado, no início da aceleração a pasta apresentou maiores cargas em relação às mesmas taxas aplicadas na desaceleração. Na medida em que a taxa de cisalhamento aumentou a tensão também aumentou. Contudo, a tensão obtida na desaceleração da taxa de cisalhamento foi maior, o que promove uma pequena área de histerese entre as taxas de cisalhamento de 135 s^{-1} até 55 s^{-1}. A partir desta taxa o comportamento reológico altera-se novamente, sendo a tensão de cisalhamento na desaceleração menor do que na aceleração.

Um fator que pode promover esse comportamento sensível ao acréscimo e decréscimo

da taxa de cisalhamento é a distribuição granulométrica do calcário, a qual contém uma larga faixa de diâmetros, além de partículas de maiores diâmetros que os demais materiais. Tal fato pode gerar um melhor empacotamento das partículas, em contrapartida pode aumentar o atrito com o incremento na taxas de cisalhamento.

Na Figura 1.13, encontram-se as viscosidades em função da taxa de cisalhamento, também obtidas no ensaio de fluxo.

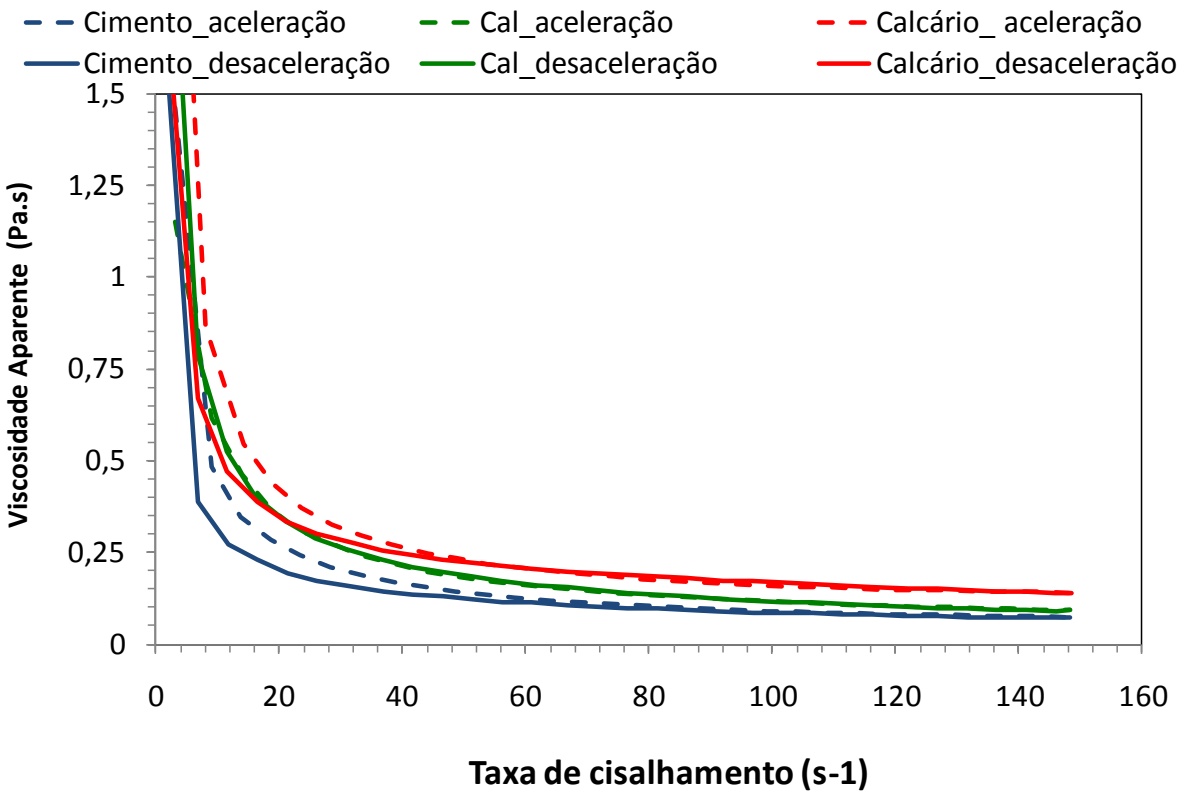


Figura 1.13 – Resultado do ensaio de fluxo para a pasta de cimento, cal CH-I e *filler* calcário. Curvas de viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento, sendo que: em amarelo o perfil da curva para a aceleração da taxa de cisalhamento (0 s^{-1} até 150 s^{-1}); em preto o perfil da curva para a desaceleração (150 s^{-1} até 0 s^{-1}) .

Os perfis das curvas indicam que o aumento da taxa de cisalhamento proporcionou diminuição na viscosidade. Contudo em baixas taxas de cisalhamento foi ambos as pastas apresentaram maiores valores de viscosidade aparente. Para a pasta com cal a curva de

viscosidade na aceleração foi semelhante à curva na desaceleração. Já para a pasta de cimento e de calcário, as viscosidades na desaceleração foram menores do que na aceleração, isto pode indicar que estas pastas possuem potencial de aglomeração.

A Figura 1.14 apresenta os valores do módulo elástico (G') para as pastas de cimento, cal hidratada e *filler* calcário.

Como o período de ensaio foi relativamente curto, 30 minutos, não foi possível observar o efeito da hidratação do cimento, ou consolidações das pastas neste intervalo de tempo ensaiado.

Analisando o módulo elástico (G') para as três pastas, foi verificado que a pasta de cal apresenta maior rigidez. A pasta de cimento e filler calcário até aproximadamente 20 minutos possuem o módulo eslático semelhante, a partir deste ponto a pasta com cimento tende à aumentar a rigidez, distanciando-se da pasta de cal. Contudo, pode-se dizer que os valores resultantes deste ensaio são semelhantes. Claro que esta observação é valida apenas para este intervalo de tempo do ensaio, pois a pasta de cimento, com o avanço da hidratação ocorre fortes consolidações na estrutura, o que enrijece o fluxo e os valores do módulo aumenta expressivamente.

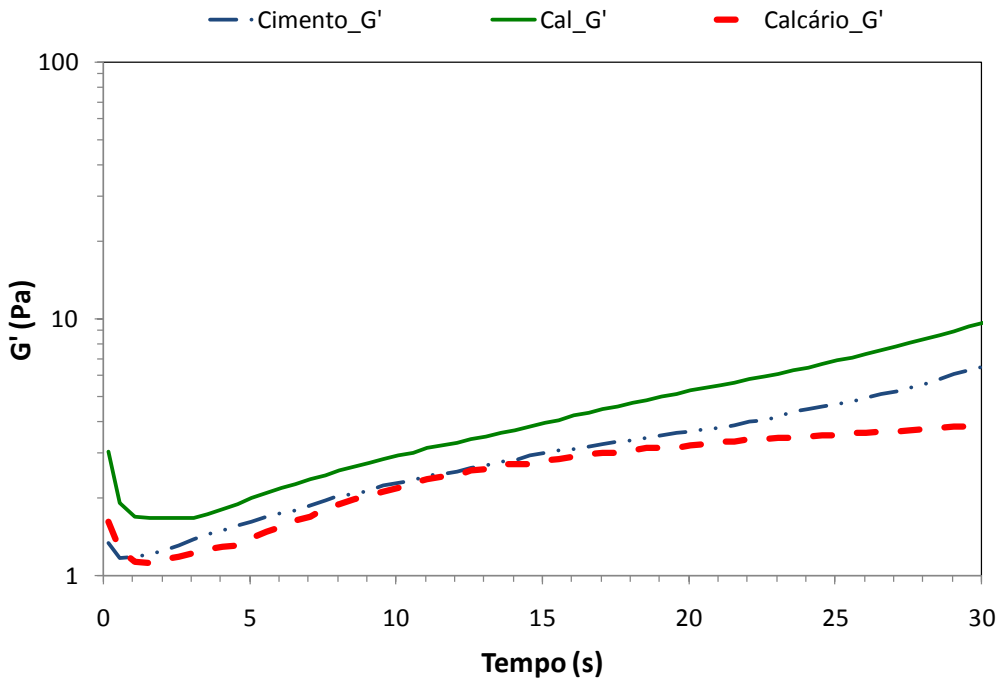


Figura 1.14 – Resultado do ensaio oscilatório. Módulo elástico (G') em função do tempo para as pastas de cimento, cal CH-I e *filler* calcário. Freqüência aplicada de 1 Hz e deformação máxima de 1E-4.

Desta forma não foi possível diferenciar a pasta de cimento em relação às pastas de cal e calcário quanto aos efeitos de consolidação, pois o tempo utilizado para este ensaio foi muito curto. Porém, de modo geral, a pasta de calcário apresentou maior resistência ao fluxo, seja no ensaio de aceleração e desaceleração, ou no ensaio oscilatório.

Conclui-se que, do ponto de vista reológico, e sob as condições de ensaios estudadas, as pastas, neste intervalo de tempo, não estão sujeitas a fortes consolidações, tampouco sedimentação ou elevadas reações hidratação.

Por outro lado, o tempo de 30 minutos é maior do que os intervalos de tempo estudados nos próximos capítulos. Assim pode-se dizer que a pesar dos resultados não serem muito diferentes entre as pastas, a análise possibilitou a compreensão do comportamento reológico das pastas sem o efeito do substrato, assim como seu comportamento devido a solicitações distintas das quais serão realizadas nos próximos capítulos.

1.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- A diferença da área superficial específica entre os materiais resultou em demandas de água distintas, a fim de que as viscosidades aparentes fossem semelhantes;
- A distribuição granulométrica dos materiais influenciou principalmente no resultado do ensaio de fluxo, cujo calcário com maior extensão granulométrica, apresentou maior tensão de cisalhamento à medida que se aumentou a taxa de cisalhamento, com fluxo turbulento pode ter ocorrido maior fricção entre as partículas, sendo que as pastas apresentaram comportamentos reológicos distintos quando submetidas ao fluxo de cisalhamento;
- Foi possível observar a diferença na liberação de calor da cal e do filler calcário em relação à cinética de hidratação do cimento, através do ensaio de calorimetria no período de até 24 horas;
- O ensaio oscilatório foi importante para indicar que as pastas, no período de análise, não estão sujeitas a consolidações que alterem o comportamento reológico, desta forma possíveis enrijecimentos verificados no ensaio de squeeze-flow sobre substratos poros podem ser atribuídos principalmente ao efeito de sucção das bases.

A caracterização no estado anidro da cal, do calcário e do cimento, e suas diferentes relações de água/material sólido, assim como as respostas reológicas destas pastas quando submetidas a diferentes taxas de cisalhamento, indicam que são pastas de distintos comportamentos. Desta forma, tais pastas serão utilizadas nos estudos do capítulo 3, com intuito de validar adequações do *squeeze-flow* para ensaio sobre substratos porosos.

Com as pastas caracterizadas o passo seguinte é a caracterização dos substratos porosos que serão utilizados sob as pastas, por esta razão foi elaborado o próximo capítulo.

2 SUBSTRATOS POROSOS

2.1 INTRODUÇÃO

Diferentes substratos são utilizados como alvenaria estrutural ou de vedação, entre eles encontram-se os blocos de concreto e cerâmico, sobre os quais, na maioria dos casos, são aplicados argamassas de revestimento. Independentemente da razão pela qual é aplicado este revestimento: regularização da superfície; estética; acústica ou aumento na durabilidade da estrutura, é necessário que ocorra adesão entre a argamassa e o substrato, principalmente para evitar a ocorrência de acidentes, como o desplacamento do revestimento, além de prejuízos financeiros.

A resistência de aderência entre argamassa e substrato depende da interação entre as duas partes, sendo a adesão inicial o processo pelo qual ocorre o contato entre matriz e substrato, com a percolação da parcela líquida através dos poros (fenômeno de transporte). Posteriormente, ocorre o processo de endurecimento e travamento mecânico na interface denominado como aderência (CARASEK, 1996; ANTUNES, 2005).

Diversos autores se dedicaram a compreensão dos fenômenos pelo qual ocorre a aderência entre substratos e argamassas e de modo geral concordam que a absorção do substrato possui função relevante neste processo (VOSS, 1933; PALMER; PARSONS, 1934; DÉTRICHÉ; MASO, 1986; LAWRENCE; CAO, 1988; JUNG, 1988; MCGINLEY, 1990; GROOT, 1993; CARASEK, 1996; COURARD, 1999; GROOT; LARBI, 1999; SUGO, 2000; SCARTEZINI, 2002; PAES, 2004).

Contudo, a influência da rugosidade da superfície do substrato na aderência da argamassa é um dos pontos que provoca controvérsias (GALLEGOS, 1995; CARASEK, 1996; COURARD, 1999; SUGO, 2000; GARBACZ et al., 2005). Isto ocorre principalmente porque a maioria dos trabalhos não avalia as propriedades reológicas juntamente com as características rugosas da base, ou seja, uma argamassa com elevada viscosidade pode ter maior dificuldade para penetrar nas reentrâncias rugosas, diminuindo a área de contato com a base, o que pode ocasionar menor resistência de aderência.

Assim, considerando que o objetivo geral do trabalho é compreender como o substrato poroso altera o comportamento reológico da pasta cimentícia, o **presente capítulo é dedicado à caracterização dos substratos porosos que serão utilizados nos capítulos seguintes**. Para tanto serão discutidas algumas características dos substratos que influenciam a resistência de aderência, tais como: a absorção da base, a rugosidade da superfície e a interação substrato/argamassa.

2.1.1 Sucção Capilar dos Substratos

O fluxo capilar ocasionado pelo contato da argamassa/substrato é explicado através de teorias referentes à pressão capilar (GROOT, 1993; PEL, 1995; BROCKEN et al., 1998; COURARD, 1999; TAHA et al., 2001). Em geral, para a aplicação destas teorias é necessário simplificar condições e variáveis do sistema de interação argamassa/substrato. Isso ocorre porque alguns fatores possuem alta complexidade de determinação, dentre os quais destacam-se: a tortuosidade, a profundidade e o diâmetro dos poros capilares do substrato e principalmente da argamassa. Todavia, a busca para compreender a influência destes fatores na resistência de aderência é intensamente discutida.

Nesse sentido, Détriché e Maso (1986) apresentaram um modelo na tentativa de explicar a sucção capilar que ocorre entre a argamassa e o substrato. Este modelo assume que os poros capilares presentes nos dois materiais são tubos cilíndricos paralelos, com diferentes diâmetros. A água contida nos tubos capilares da argamassa, com raio médio igual a *ra*, é succionada pelos tubos capilares presente no substrato de raio médio igual a rs. Isto ocorre devido a diferença de pressão proporcionada pelo tamanho do raio médio da base em relação ao raio médio da argamassa ($ra > rs$).

Enquanto ocorre a sucção capilar no sentido do substrato, o raio médio dos tubos capilares da argamassa é considerado fixo. A partir do momento em que os poros capilares da argamassa começam a diminuir devido à perda de água para o substrato, e por evaporação, a pressão capilar da base deixa de succionar a água dos capilares da argamassa, finalizando o processo de sucção capilar (DÉTRICHÉ; MASO, 1986).

Gallegos (1995) sugere a existência de uma faixa de diâmetros de poros do substrato responsáveis pela sucção de água da argamassa, denominada como poros ativos, 1 µm a 5 µm, e admite que diâmetros superiores a 5 µm não possuem forças capilares suficientes

para succionar a água da argamassa, poros inativos. Cabe ressaltar que os poros das argamassas variam aproximadamente de 0,001 µm a 5 µm, e os do substrato de 0,001 µm até 10 µm (GALLEGOS,1995). Carasek (1996) correlaciona a medida de aderência com os poros médios do substrato e conclui que nem sempre maiores pressões capilares representam maior aderência, devido à dificuldade de penetração da pasta e a formação da etringita no interior dos poros menores.

Uns dos métodos mais utilizados para obtenção da absorção do substrato é o IRA (índice de absorção inicial), contudo sua eficácia é discutida em relação à capacidade de absorção e sua correlação com a aderência final do revestimento (CARASEK, 1996).

Alguns autores afirmam que o IRA pode ser um bom indicativo de absorção de água da argamassa e possui correlação com a resistência de aderência, cujas bases com maior IRA possuem maior quantidade de poros, e por conseguinte, maior absorção de água da argamassa (PEL, 1995; BROKEN et al.,1998; GROOT; LARBI, 1999). Por outro lado, experimentos apresentados por outros pesquisadores demonstram que a perda de água da argamassa nem sempre é maior para substrato com altas taxas de absorção inicial (VOSS, 1933; DAVISON, 1961; IOPPI et al., 1995; CARASEK, 1996; PAES, 2004).

Ao encerrar o processo de sucção capilar do substrato, a água da argamassa pode ainda penetrar no substrato por adsorção ou por difusão (PAES, 2004).

Ainda é encontrada na literatura a possibilidade de fluxo reverso, o qual consiste na remoção de água do substrato pelo aumento da pressão capilar na argamassa, recorrente da redução do raio médio dos poros capilares da argamassa. Após a perda de água da argamassa para o ambiente e substrato, o decréscimo do diâmetro médio dos poros desta pode ser elevado a tal ponto que ficam menores que o do substrato. Desta forma, a água presente no substrato passa a ser succionada pela argamassa, formando o fluxo reverso (DÉTRICHÉ; MASO, 1986; GROOT; LABRI, 1999).

É importante ressaltar que os poros capilares da argamassa no estado fresco dependem de diferentes fatores: relação a/c; área superficial específica dos aglomerantes e agregados, assim como a proporção destes materiais (BASTOS, 2001).

2.1.2 Textura Superficial

A influência da textura superficial para os diferentes substratos na resistência de aderência é amplamente discutida, mas nem sempre os resultados são conclusivos. No estudo realizado por Garbacz et al. (2005), os autores avaliaram a aderência de dois sistemas de reparos sobre superfície de concreto com diferentes tratamentos superficiais, sendo verificado que maiores rugosidades proporcionaram maior resistência de aderência quando aplicado material com elevada trabalhabilidade. Por outro lado, o sistema de reparo com menor trabalhabilidade não obteve o mesmo desempenho sobre superfície com maior rugosidade.

A resistência de aderência da argamassa pode ser aumentada quanto maior a rugosidade superficial do substrato, uma vez que pode proporcionar maior área superficial de contato (GALLEGOS, 1995). Em contrapartida, Carasek (1996) afirma que uma elevada rugosidade pode ser prejudicial para a resistência de aderência, devido à dificuldade que as argamassas podem encontrar para penetrar nas cavidades gerando defeitos de contato na interface.

Se o comportamento reológico da argamassa não é adequado para preencher a rugosidade da superfície, ocorrerá presença de vazios que diminuem a área de contato e, conseqüentemente, a resistência de aderência. Apesar disso, a rugosidade superficial não tem sido freqüentemente quantificada (GALLEGOS, 1995; SUGO, 2000).

Conforme Courard (2000), o uso de técnicas para determinar a textura da superfície pode contribuir na escolha do material capaz de promover maior área de contato com o substrato. Porém, equipamentos capazes de medir a rugosidade superficial nem sempre estão disponíveis.

Garbacz et al. (2006) correlaciona diferentes técnicas de medidas de textura superficial: em nível macroscópico, o método da areia (índice de rugosidade superficial) e microscópico perfilômetro mecânico e a laser. O autor concluiu que em superfície de concreto com diferentes tratamentos superficiais, os parâmetros obtidos em cada método são estatisticamente significantes, com o coeficiente de correlação elevado ($r>0,9$). Assim, métodos como o índice de rugosidade superficial podem ser uma boa escolha, devido a facilidade de execução.

2.1.3 Interação substrato e pasta cimentícia

O processo de aplicação da argamassa (ou pasta de cimento) consiste na molhagem do líquido sobre o sólido. Por esta razão, devem-se considerar as interações referentes ao equilíbrio termodinâmico.

Quando a gota de um líquido entra em contanto com uma superfície sólida podem ser encontrados dois tipos distintos de regimes de equilíbrio termodinâmico, molhagem parcial ou molhagem completa, Figura 2.1.

A molhagem parcial refere-se a um ângulo de contato (θ) maior que zero e a completa molhagem ao θ = 0°. Assim, quanto menor o ângulo de contato maior o espalhamento do líquido sobre a superfície do sólido (GENNES, 1985).

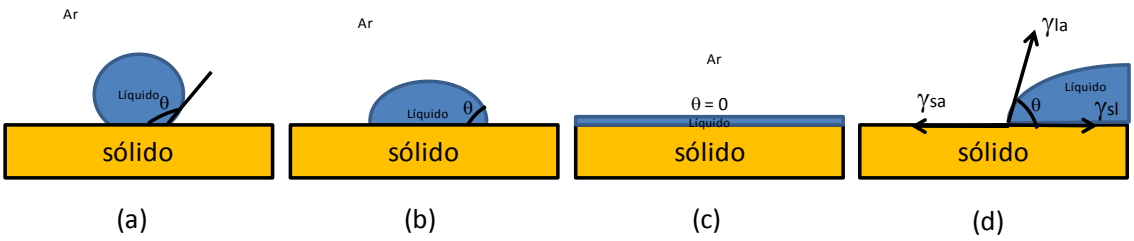


Figura 2.1 – Ângulo de contato entre sólido e líquido: a) e b) molhagem parcial; c)molhagem completa; e d) as tensões superficiais resultantes da interação entre as fases.

A equação de Young-Dupré descreve a condição de equilíbrio entre as três fases: sólido, líquido e ar, em função do ângulo de contato entre sólido e líquido e as tensões superficiais das interações entre cada fase:

$$\gamma_{sa} = \gamma_{la} \cdot \cos\theta + \gamma_{sl} \qquad \text{Equação (2.1)}$$

onde: γ_{sa} é a tensão superficial entre sólido e ar; γ_{sl} a tensão superficial entre sólido e líquido; e a tensão superficial entre líquido e ar é γ_{la} , sendo esta última, por simplificação muitas vezes é encontrada apenas como γ; θ é o valor medido do ângulo de contato.

A viscosidade do líquido e a superfície do sólido podem provocar histerese na medida do ângulo de contato. Isto ocorre quando a superfície possui vales e picos e a viscosidade do

fluido impede a penetração nesta rugosidade, assim como nas cavidades capilares, acarretando presença de ar entre o sólido e o fluido (GENNES,1985; COURARD,1999)[1].

A Figura 2.2 apresenta um exemplo deste fenômeno, o qual pode ocorrer devido à viscosidade inadequada de argamassas ou pastas e os diferentes níveis de rugosidade de substratos utilizados na construção civil.

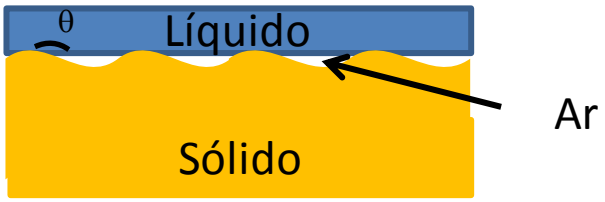


Figura 2.2 – Espaços preenchidos com ar devido à viscosidade do fluido e presença de vales e de picos da superfície do substrato.

Desta forma, a rugosidade da base, assim como a viscosidade da argamassa pode também interferir na molhagem, e, por conseguinte na absorção de água pelo substrato, pois se a argamassa ou a pasta não está totalmente em contato com a superfície do substrato, pode ocorrer menor sucção de água devido aos vazios entre o revestimento e a base.

O ângulo de contato vai influenciar também na sucção capilar, tendo em vista que para um fluido percolar por um material poroso ele depende da tensão superficial entre líquido e sólido, assim como da geometria dos poros. Ao assumir que os poros da base possuem formato de tubos cilíndricos, o efeito de ascensão capilar pode ser atribuído com base na equação de Young-Laplace:

$$\Delta P = (2 * \gamma * \cos \theta) / R \qquad \text{Equação (2.2)}$$

onde ΔP é a diferença de pressão através da interface fluida; γ a tensão superficial do líquido; θ o ângulo de contato do líquido na parede do tubo com a tangente da superfície em um ponto de encontro com a parede, e; R o raio. A ascensão capilar ocorre quando o ângulo de contato entre líquido e sólido é inferior a 90° (RAMACHANDRAN; BEAUDOIN, 2001). Quando o ângulo de contato é igual a 0°, ou seja, molhagem completa, a equação da pressão capilar é expressa:

[1] Gennes (1985) afirma que superfícies contaminadas ou produtos químicos também podem induzir a histerese do ângulo de contato.

$$\Delta P = (2 * \gamma) / R \qquad \text{Equação (2.3)}$$

Quando o ângulo de contato formado entre o líquido e o sólido é superior a 90° ocorre à depressão capilar, representada pela Equação 2.4, cujo P_c é a pressão capilar.

$$P_C = (2* \gamma \ *\cos \theta)/ R \qquad \text{Equação (2.4)}$$

A figura 2.3 apresenta um desenho esquemático dos fenômenos de ascensão e depressão capilar.

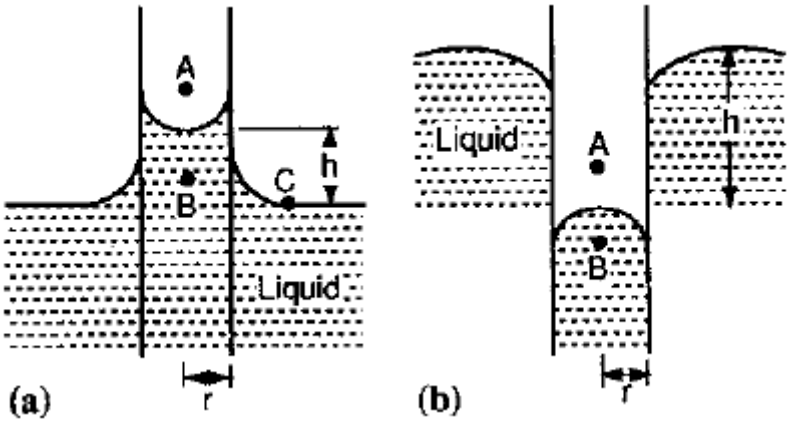


Figura 2.3 – Desenho esquemático de pressão capilar: a) ascensão capilar, ângulo de contato < 90°; b) depressão capilar com ângulo de contato > 90° (RAMACHANDRAN; JAMES, 2001).

O fenômeno de ascensão capilar pode ser reportado ao contato entre a argamassa e substrato, uma vez que se refere à molhagem de um líquido sobre o sólido, sendo que a pasta presente na argamassa é suscetível à sucção dos poros capilares do substrato (CASALI, 2008).

O mecanismo de depressão capilar pode ocorrer em argamassa ou pastas cimentícias, que por sua vez, pode provocar a retração do material. Isto ocorre quando a pressão capilar exerce uma força de atração, seja entre duas partículas, as paredes do capilar e/ou no interior destes quando separado por um fluido. Esta força de atração ocorre em umidades relativas inferiores a 100%, ocasionando o desequilíbrio na pressão capilar, cuja água tende a evaporar formando um menisco até que se atinja o equilíbrio (MELLO NETO, 2002).

A partir desta revisão da literatura foi elaborado o procedimento experimental com intuito de caracterizar física e mecanicamente os substratos porosos que serão utilizados nesta dissertação.

2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na confecção dos substratos foi utilizada uma argamassa industrializada, com teor de água de 16,5%, sendo este o recomendado pelo fabricante. Para caracterizar o material anidro foi realizado o peneiramento mecânico para a fração superior a 100 μm e as partículas inferiores a este diâmetro foram ensaiadas no granulômetro a laser *Mstersize* da *Malvern*.

A densidade específica foi determinada por picnômetro a gás hélio, no equipamento *MultiPycnometer* da *Quantachrome Instruments*. A área superficial específica foi obtida a partir do método BET com adsorção de nitrogênio no equipamento *Gemini* III 2375 – *Micromeritics*.

A mistura da argamassa foi realizada em um Reômetro Rotacional do Laboratório de Microestrutura do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, Figura 2.4. O procedimento de mistura foi:

1) adicionar o material sólido no recipiente e iniciar a mistura a 500 rpm;

2) adicionar a água a pós 30 segundos com o auxílio de um funil de vazão controlada;

3) período de mistura total de 5 minutos.

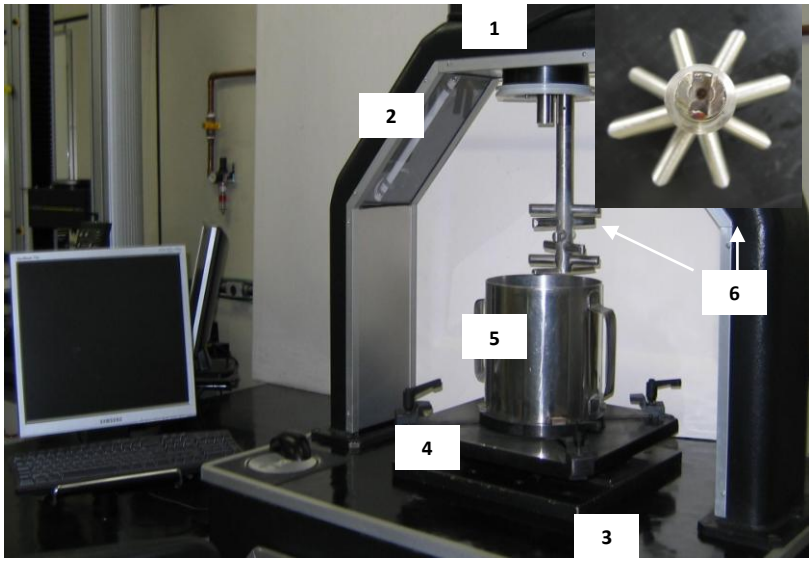


Figura 2.4 - Reômetro para argamassas, destaque dos componentes: 1) torre superior; 2) dispositivo rotacional; 3) base de reação e console; 4) elevador; 5) recipiente de ensaio; 6) Geometria de mistura e ensaio composta por haletas radiais montadas em espiral. Figura fornecida por Fabio Alonso Cardoso.

Com a mesma argamassa foram moldados os dois substratos, **sub_A** – *substrato de alta porosidade* e **sub_B** – *substrato de baixa porosidade*. A principal diferença entre eles é que para inibir a incorporação de ar da argamassa industrializada foi utilizado um teor de 2% de álcool isopropílico em relação à massa de sólidos.

O teor de álcool isopropílico adicionado foi descontado no teor de água da argamassa, sendo previamente adicionado na água antes de acrescentar na mistura. Desta forma, a relação em massa líquido/sólido permaneceu constante para ambos os substratos. Os teores de ar incorporado no estado fresco para os dois substratos foram executados conforme NBR 13278/95.

Os substratos foram moldados em anel de PVC com preenchimento em apenas uma camada e 25 golpes, posteriormente rasados com uma régua do centro da amostra para as bordas. O anel possui diâmetro igual a 101,6 mm e altura de 25 mm. Os moldes de PVC foram colocados sobre placas também de PVC (Figura 2.5), sendo que a superfície do substrato em contato com a placa foi o lado da base porosa no qual se realizou o ensaio de *squeeze-flow*. Tal fato possibilitou uma superfície plana e constante para todos os substratos.

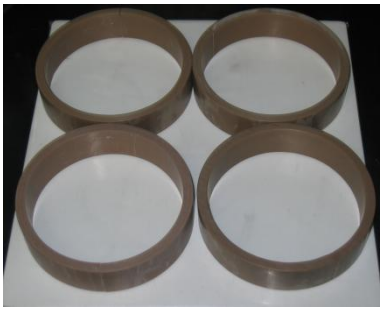


Figura 2.5 – Anéis cilíndricos de PVC utilizados como molde para os substratos, posicionados sobre placa também de PVC.

A cura úmida teve período de 14 dias com temperatura de 23 $\pm$ 2 °C e umidade relativa superior a 95%.

Posteriormente, os substratos foram secos em estufa a 60 °C por 4 dias, ou até a obtenção de massa constante. Após a secagem foram lacrados e armazenados a espera de completarem 28 dias, aguardando a realização dos ensaios de caracterização física e mecânica, os quais se encontram no item 2.3.

As características no estado endurecido foram determinadas através de ensaios de capilaridade (NBR 15259/05), absorção de água (NBR 9778/87), resistência à tração na flexão em 3 pontos (NBR 13279/05), ensaio de resistência à tração na compressão diametral[2], o módulo de elasticidade dinâmico (NBR 15630/08) e porosimetria por intrusão de mercúrio.

O ângulo de contado foi medido com o equipamento de marca Kruss Gmbh Dermany, modelo FM 40, através de uma gota de água deionizada com volume de 1 ul, ou 0,001 ml, sobre a superfície do substrato e o uso do software Drop Shape Analysis. Assim que a gota entrou em contato com o substrato, foi registrada a imagem de ambos e o ângulo de contato foi medido. Para a realização deste ensaio a superfície dos substratos foi previamente limpa com ar comprimido de pressão igual a 2,7 bar.

A rugosidade da superfície foi obtida através do índice de rugosidade com base na norma BS EN1766. A partir do diâmetro médio e volume conhecido de areia espalhada sobre uma superfície obtém-se o grau de macro-textura. Este método macroscópico foi utilizado por Gabazac (2001), o qual correlacionou os resultados com técnicas microscópicas tais como rugosimetro a laser e mecânico, observando alta correlação entre ambos os métodos.

O diâmetro da areia utilizada deve estar entre 0,18 mm a 0,25 mm. Neste trabalho foram utilizadas esferas de vidro como areia. O procedimento de ensaio e a verificação da aplicação do método em diferentes substratos estão apresentados no Apêndice A.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Caracterização do estado anidro

Na produção dos substratos absorventes foi utilizada uma argamassa industrial de densidade anidra igual a 2,79 g/cm^3, com teor de água de 16,25% em relação à massa de sólidos. Demais características da argamassa, tais como densidade, área superficial, proporção volumétrica de finos e areia estão apresentadas na Tabela 2.1 e, na figura 2.6, encontra-se a distribuição granulométrica da argamassa.

[2] O método de ensaio utilizado para obter a resistência à tração na flexão foi realizado seguindo o procedimento interno realizado no Laboratório de Microestrutura do Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.

Tabela 2.1 – Caracterização do estado anidro da argamassa industrial

Caracterização do Estado Anidro	Unidade	Material	Valores
Densidade	g/cm^3	Argamassa	2,79
		Agregado	2,76
		Finos	2,88
Volume de Material	%	Agregado	75,98
		Finos	24,02
Área Superficial Específica	m^2/g	Agregado	0,27
		Finos	1,14

A partir da distribuição granulométrica da areia (figura 2.6) é possível observar que a maior concentração de partículas encontra-se entre 300 a 700 μm, com baixa freqüência de material com diâmetro acima de 1000 μm. Os finos possuem maior freqüência de partículas entorno de 30 μm, apesar de ter uma larga faixa que abrange, desde 0,5 a 100 μm.

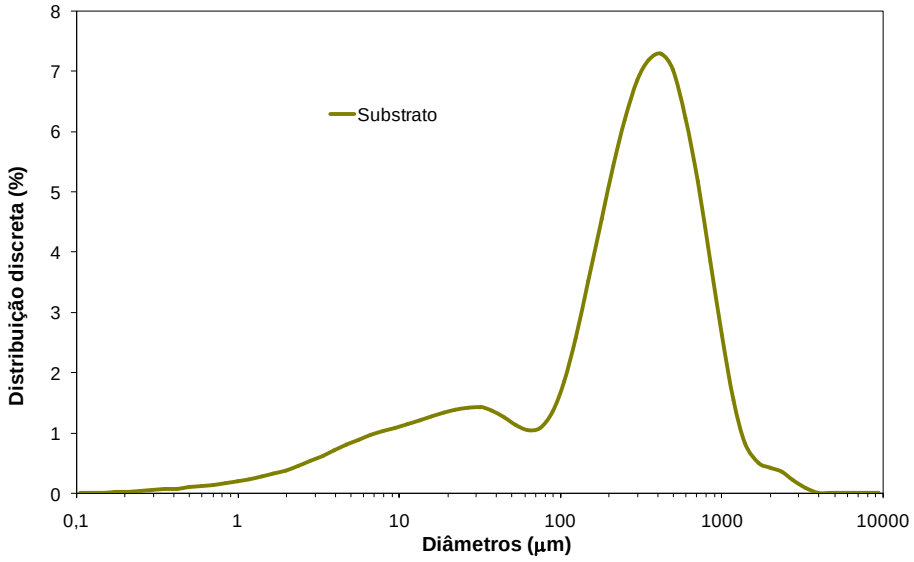


Figura 2.6– Distribuição granulométrica da argamassa industrial utilizada para confeccionar os substratos porosos.

2.3.2 Caracterização do substrato no estado fresco

A partir da utilização do Reômetro Rotacional foi possível controlar e garantir a homogeneidade das misturas para ambos os substratos. Na figura 2.7 estão apresentadas 6

curvas de misturas da argamassa para a fabricação do substrato A e as etapas de mistura no Reômetro Rotacional, as quais são: 1) subida do elevador com o recipiente de ensaio e argamassa seca, em torno de 20 s; 2) mistura do material seco por 10 s; 3) aos 30 s é adicionada a água na cuba com um funil de vazão controlada; 4) período de homogeneização, o qual varia conforme a amostra misturada; 5) argamassa homogeneizada. A curva de mistura é obtida através do torque (Nm) medido para manter a rotação de 500 rpm em função do tempo.

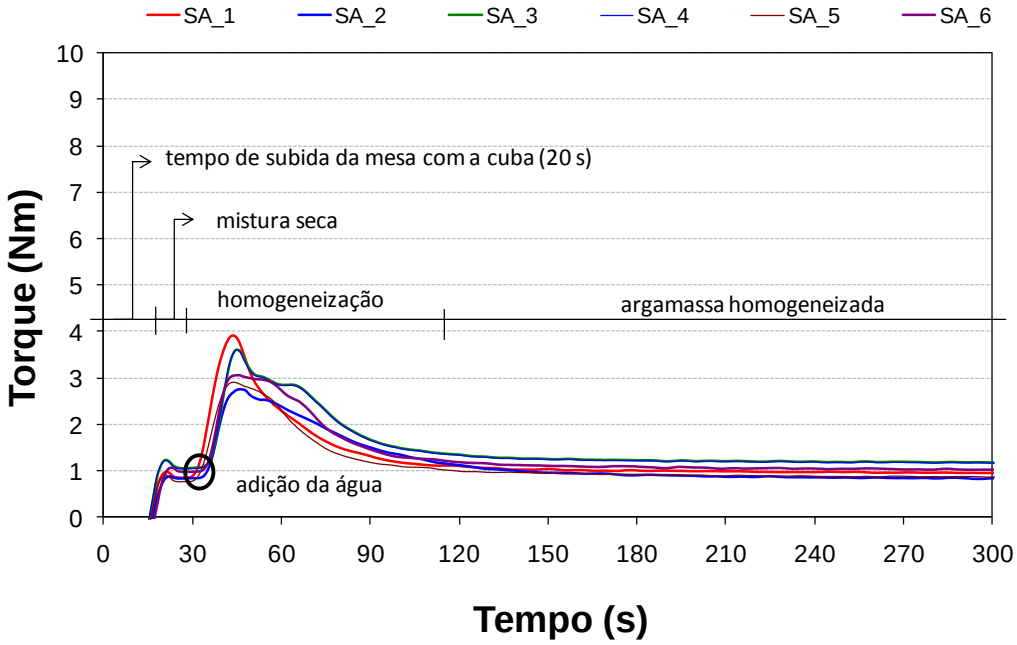


Figura 2.7 – Etapas da mistura no Reômetro Rotacional e repetibilidade para a mistura do substrato A.

Pode-se observar na Figura 2.8 a influência do álcool isopropílico, cujo torque necessário foi superior para o sub_B, isto ocorreu devido à redução do ar incorporado, resultando na aproximação dos grãos e diminuindo a lubrificação do sistema.

O teor de ar incorporado para o sub_A foi em torno de 25%, medida realizada após o término da mistura, enquanto o sub_B, com adição de 2% de álcool isopropílico, obteve uma média igual a 8,02% de ar incorporado. A densidade no estado fresco do sub_A foi de 1,66 g/cm^3 e 2,05 g/cm^3 para o sub_B. A maior densidade para o sub_B é justamente devido à redução do ar incorporado na mistura.

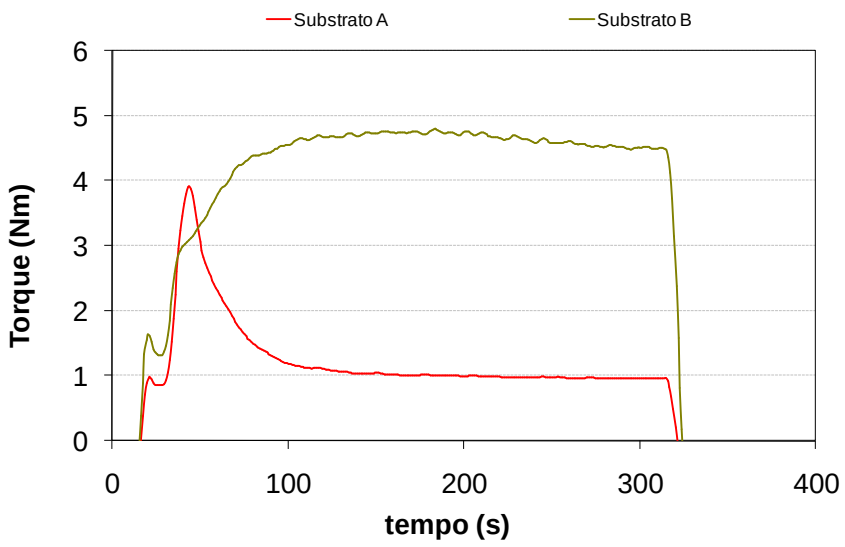


Figura 2.8 – Curva de mistura do reômetro rotacional para as argamassas industriais, submetidas a rotação de 500 rpm: substrato A, alta porosidade; substrato B, baixa porosidade.

2.3.3 Caracterização do substrato no estado endurecido

Os resultados de caracterização do substrato no estado endurecido encontram-se na Tabela 2.2. O número de amostras para cada ensaio e seus respectivos resultados encontra-se no Apêndice B.

Tabela 2.2 Caracterização no estado endurecido dos substratos porosos

Substrato	Ensaio	Unidade	Média	*DesvPad*	*coef. de var.*
A	Resistência à Tração na Flexão	MPa	1,00	0,03	3,50
B			0,99	0,05	5,28
A	Resistência à Tração na Compressão Diametral	MPa	0,38	0,04	9,66
B			0,78	0,06	7,41
A	Absorção por Imersão	%	14,28	0,32	2,25
B			12,26	0,15	1,22
A	Coeficiente de Capilaridade	g/dm2.min^1/2	7,63	0,17	2,20
B			10,95	0,90	8,19
A	Módulo de Elasticidade	GPa	5,03	0,14	0,03
B			10,80	0,15	0,01

As amostras utilizadas no ensaio de resistência à compressão na flexão foram moldadas na mesa de adensamento, o mesmo procedimento foi utilizadas no moldagem das amostras do ensaio de capilaridade. Por outro lado, as amostras utilizadas no ensaio de

compressão diametral foram moldadas em duas camadas de 15 golpes, sendo amostra cilíndrica de diâmetro igual a 5 cm e 6 cm de altura. Este mesmo procedimento de moldagem foi utilizado para as amostras utilizadas no ensaio de absorção por imersão, absorção por Arquimedes, módulo de elasticidade e porosimetria por intrusão de mercúrio.

Com o ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos não foi possível observar diferença no comportamento mecânico para os dois substratos. Por outro lado, os resultados de capilaridade para o sub_B, moldados sob o mesmo procedimento, apresentaram maior coeficiente de capilaridade em menor porosidade.

O menor módulo de elasticidade foi obtido para o substrato com maior porosidade, sub_A.

No ensaio de resistência à tração na compressão diametral, o sub_B apresentou uma resistência de 2,13 vezes maior em relação ao sub_A.

A porosidade aberta, obtida pelo método de Arquimedes, foi de 34,43% para o sub_A e 18,72% para o sub_B. Ao comparar os resultados de resistência à tração na compressão diametral com a porosidade, percebe-se que o sub_A com maior porosidade obteve menor resistência, o contrário foi verificado para o sub_B.

A figura 2.9 apresenta os resultados de caracterização para os dois substratos nos ensaios de resistência à tração na compressão diametral, coeficiente de capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade aberta. Foi sobreposto na figura um retângulo cujos vértices são os resultados do sub_A e um quadrado com vértices localizados nos resultados do sub_B.

Ao comparar o retângulo com o quadrado, em outras palavras, sub_A com sub_B, percebe-se que a menor resistência apresentou menor coeficiente de capilaridade, assim como menor modulo de elasticidade, o qual por sua vez, está correlacionado com maior porosidade do substrato, que conseqüentemente diminui a resistência.

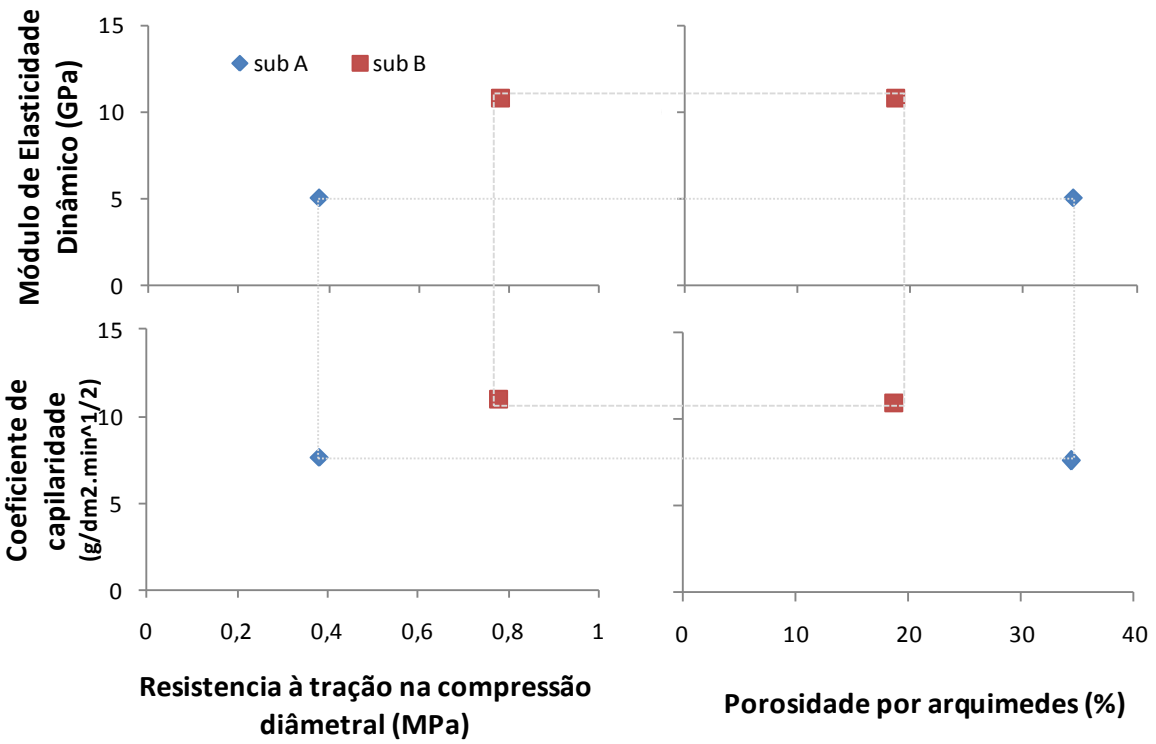


Figura 2.9 – Resultados de resistência à tração na compressão diametral, coeficiente de capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico e porosidade por Arquimedes para os substratos: sub_A e sub_B.

Conforme Carasek (1996), a porosidade aberta dos substratos usualmente utilizados varia entre 25% e 40%, mas há casos extremos que podem atingir 5% e 50% de porosidade. A autora ainda cita a possibilidade de utilizar o valor de porosidade obtido a partir do ensaio de intrusão de mercúrio.

A porosidade obtida a partir do ensaio de intrusão de mercúrio foi de 39,74% para o sub_A e 28,03% para o sub_B. Pode-se observar que quando comparado com a porosidade aberta obtida pelo método Arquimedes (sub_A igual a 34,43% e 18,72% para o sub_B), a partir da massa de material seco e massa de material saturado e submerso, observa-se que ocorreu um aumento considerável, da ordem de 1,15 vezes para o sub_A e 1,49 vezes para o sub_B.

Isto pode ser justificado devido à ruptura de poros fechados quando submetido a altas pressões de intrusão de mercúrio, o que acarreta em um aumento de poros na estrutura interna do material. Conforme Diamond (2000) existem poros fechados que não estão conectados a estrutura porosa dos materiais, esse poros não são intrudidos por mercúrio até que ocorra o rompimento devido à alta pressão aplicada no ensaio, os diâmetros destes poros são da ordem de 0,1 µm. Se observarmos o volume de intrusão de mercúrio (ml/g) na Figura

2.10, concluí-se que o sub_B possui maior quantidade de poros inferiores a 0,1 µm em relação ao sub_A.

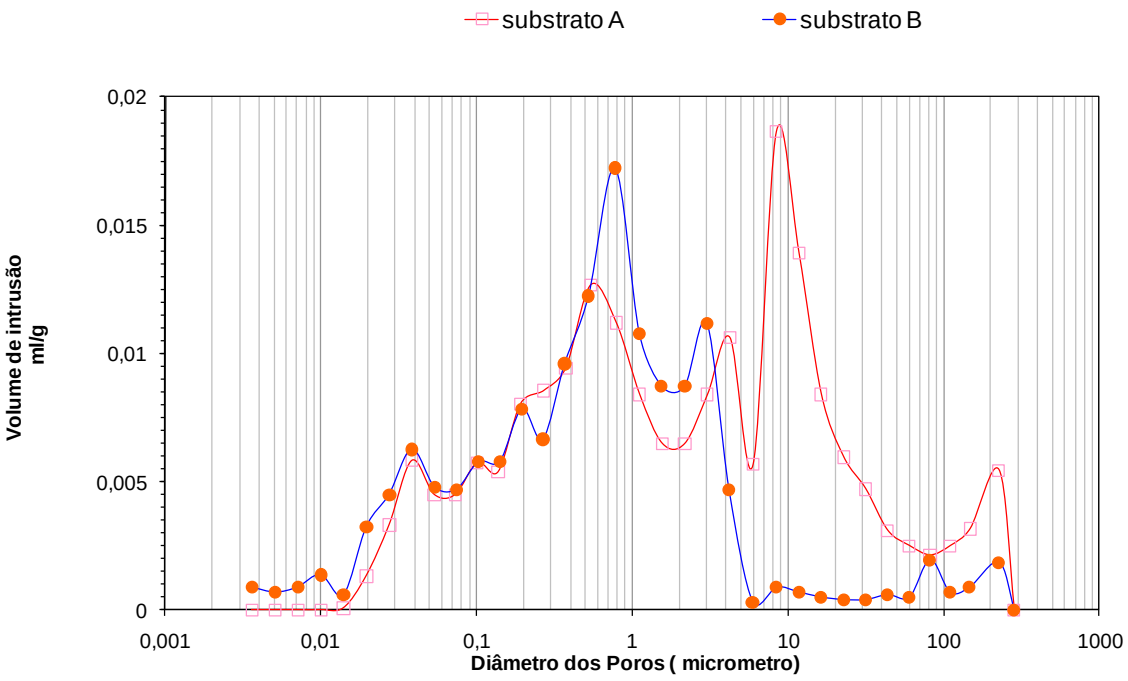


Figura 2.10 – Resultado de porosimetria por intrusão de mercúrio.

Com a ressalva de que o ensaio de porosidade por intrusão mercúrio promover a ruptura de poros com diâmetro inferior a 0,01 µm, seu resultado pode ser utilizado como parâmetro de comparação entre materiais ensaiados sob mesmas condições. Com a premissa desta observação, pode-se agora discutir os resultados de absorção por imersão e o coeficiente de capilaridade.

Se considerarmos que o diâmetro médio dos poros capilares do sub_A é em torno de 2,138 µm e do sub_B de 0,579 µm, resultado obtido por intrusão de mercúrio, entende-se que o sub_B possui maior pressão capilar, o que resulta em maior coeficiente de capilaridade, como foi verificado no ensaio de capilaridade.

O ângulo de contato também foi medido, sendo a média do ângulo de contato para o sub_B igual a 41,4° e o coeficiente de variação igual a 9,36%. Para o substrato A não foi possível medir o ângulo de contato inicial devido à rápida absorção da base. Assim,

considerando a equação 2.3, a pressão capilar para o sub_A depende apenas do raio capilar e da tensão superficial do líquido, neste ensaio foi utilizada água deionizada.

A medida quantitativa do índice de rugosidade apresentada na Tabela 2.3 indica que o sub_A possui rugosidade maior em relação ao sub_B. Tal fato deve ser considerado no *squeeze-flow* sobre distintas bases porosas.

Tabela 2.3 – Resultado do índice de rugosidade superficial

Índice de Rugosidade (mm)			
substrato	***Média***	***DesvPad***	***coef. de var.***
Sub A	1,65	0,08	4,96
Sub B	1,33	0,04	2,93

No estudo de utilização do ensaio de Índice de Rugosidade (IR) foram testados diferentes substratos, os quais foram: granito liso com 1,25 mm de IR; tijolo cerâmico com 1,24 mm de IR; tijolo de concreto rugoso com 1,58 mm de IR, conforme Apêndice A. Tais resultados indicam que os índices de rugosidade obtidos para os sub_A e sub_B são de grandezas distintas e podem influenciar no espalhamento da pasta aplicada sobre a base.

2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- A diferença no teor de ar incorporado, para argamassas de iguais matérias-primas e mesma relação líquido/solído na mistura, altera tanto o comportamento reológico como as propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido;
- O único ensaio que não foi capaz de identificar as diferenças intrínsecas dos dois substratos analisados foi o de resistência à tração na flexão, enquanto os demais ensaios apresentaram resultados capazes de identificaram diferenças entre as bases;
- Os dois substratos possuem propriedades físicas e mecânicas distintas que podem promover diferentes alterações no comportamento reológico da pasta cimentícia.

A partir dos resultados apresentados neste capítulo, foi possível comprovar que os dois substratos possuem propriedades físicas e mecânicas diferenciadas, e podem influenciar nas análises da alteração do comportamento reológico de pastas cimentícias devido ao contato com bases porosas, seja pela diferença de sucção por capilaridade, seja pela diferença no ângulo de contato ou rugosidade, ou ainda por diferença na resistência mecânica.

Distintos substratos podem promover distintas sucções de água da pasta em função do tempo de contato, e alterar a facilidade de compressão da pasta sobre estes substratos. Antes de testar os dois substratos porosos no squeeze-flow, é necessário realizar adequação do método, a qual foi descrito no próximo capítulo com uso de uma base porosa (sub_A) e base metálica.

3 SQUEEZE-FLOW

3.1 INTRODUÇÃO

Os mecanismos de interação da argamassa com uma superfície porosa podem ser divididos em etapas bem definidas: molhagem do substrato pelo contato com a argamassa e ocorrência de sucção capilar; transporte de materiais finos para a interface devido ao fluxo capilar; equilíbrio de umidade entre substrato e argamassa; hidratação do cimento e formação de uma fase sólida coesiva entre substrato e argamassa (SUGO, 2000; ANTUNES, 2005). Entre a etapa de molhagem até o equilíbrio da umidade ocorre o mecanismo de absorção com perda de água[1] da pasta[2] para a base, devido ao tamanho dos poros da base responsáveis pelo fluxo capilar, assim como perda por evaporação.

As técnicas empregadas para caracterizar argamassas no estado fresco indicam o perfil reológico, porém, não são capazes de avaliar as alterações que ocorrem devido à perda de água para a base. Tendo em vista que a argamassa após sua aplicação interage com o substrato e com o meio ambiente, e esta interação determina o tempo de espera para a realização do sarrafeamento e acabamento, que, por conseguinte afeta diretamente a produtividade do aplicador, é de suma importância a existência de uma técnica que avalie a interação argamassa/substrato.

Desta forma, o **objetivo** do presente capítulo **é a adequação do *squeeze-flow* como método de avaliação da alteração do comportamento reológico de pastas aplicadas sobre substratos porosos**.

A escolha da pasta ao invés da argamassa se deve principalmente a dois fatores: primeiramente, a pasta cimentícia é a parcela mais susceptível aos efeitos de sucção capilar; e o outro fator, é que, este estudo é apenas o primeiro passo na tentativa de avaliar a aplicação do squeeze-flow, na caracterização da alteração do comportamento reológico de um fluido

---

[1] Esta água refere-se à solução aquosa com presença de íons proveniente da dissolução das partículas de cimento, com alta concentração de Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, SO_4^{2-} e OH^{-} (TAYLOR, 1990).

[2] A pasta pode ser composta através da mistura de água e aglomerantes, além de partículas minerais e uso de aditivos. A dimensão máxima das partículas é 100 μm, o que constitui um sistema de elevada área superficial específica gerando forças de superfície (ANTUNES, 2005).

com partículas em suspensão, quando submetido ao efeito da sucção através do contato com base porosa.

3.2 ENSAIO SQUEEZE-FLOW

O ensaio *squeeze-flow* é realizado em diversas configurações e recebe diferentes denominações (ENGMANN et al., 2005), assim como é aplicado em distintos ramos, tais como indústria de alimentos, farmacêutica e cerâmica. Desde 1994 o ensaio tem sido aplicado em pastas cimentícias e argamassas de revestimento (MIN et al., 1994; ANTUNES, et al. 2005; CARDOSO et al., 2005; TOUTOU et al., 2005; BETIOLI, 2007).

Independentemente da configuração e do material analisado o principio básico do ensaio é o mesmo, comprimir a amostra entre duas placas paralelas. Para a execução deste ensaio, diferentes equipamentos podem ser elaborados, contudo as máquinas universais são as utilizadas por diversos autores (ADAMS et al., 1994; ÖZKAN et al., 1999; HOFFNER et al., 2001; TOUTOU et al., 2005; CARDOSO et al., 2005).

Desta forma, o squeeze-flow pode ser realizado com diferentes taxas de cisalhamento, seja por controle do deslocamento de uma ou das duas placas[3], ou através da força aplicada para a compressão, assim como oscilação e parâmetros de relaxação, fatores que contribuem para o mapeamento das propriedades reológicas (CARDOSO et al., 2005).

Porém, os efeitos no fluxo da pasta (ou argamassa) devido aos parâmetros do processo de ensaio não são facilmente investigados, pois existem complicadas interações nas condições de contorno e na característica reológica intrínseca do material analisado (ÖZKAN et al., 1999). No item seguinte, diferentes condições de contorno e suas influências nos resultados serão apresentadas.

3.2.1 Condições de Contorno

Pode-se atribuir às condições de contorno os fatores que determinam na execução do ensaio e influenciam na resposta final da amostra, os quais são: características das placas

[3] O deslocamento pode ser realizado apenas pela placa superior, sendo este mais usual, ou através das duas placas conforme Winther et al. (1991) e Toutou et al. (2005).

paralelas, diâmetro e rugosidade da superfície em contato com a amostra; dimensões da amostra, altura e diâmetro; e tipo de solicitação imposta na compressão da amostra.

3.2.1.1 Placas Paralelas

Existem diversas possibilidades relativas à escolha dos diâmetros das placas paralelas utilizadas no *squeeze-flow*, bem como a rugosidade da superfície destas placas.

A compressão da amostra entre duas placas paralelas de maior diâmetro, Figura 3.1, é uma das configurações mais recorrentes na literatura. O resultado é a diminuição da espessura da amostra, por conseguinte há o aumento da área submetida à compressão, mas o volume permanece constante (SHERWOOD; DURBAN, 1998; ÖZKAN et al., 1999; ENGMANN et al., 2005).

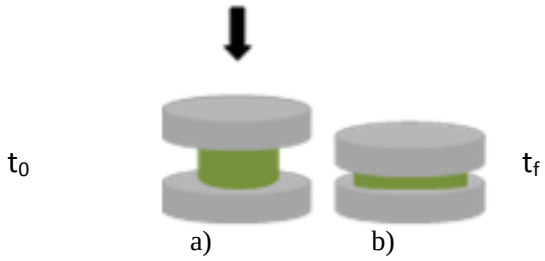


Figura 3.1 – Configuração do *squeeze-flow* que resulta em volume constante de amostra submetida à compressão: a) instante inicial do ensaio, t_0; b) instante final, t_f.

Esta configuração possibilita visualizar a deformação na região lateral da amostra, mas o contato entre placas, amostra e ar pode influenciar no resultado final (ENGMANN et al., 2005). O autor refere-se à tensão superficial da amostra, da placa e do ar, além da rugosidade da superfície que pode restringir a deformação lateral da amostra. Um exemplo é a deformação não homogênea devido à ausência de escorregamento, provocando linhas de fluxo diferenciadas nas regiões próximas às placas.

Adams et al. (1991) apresentam um esquema típico de deformação não homogênea através da ausência de escorregamento mostrado na Figura 3.2, resultando em uma zona estática devido ao atrito, e uma região de maior fluxo, com surgimento de dois efeitos:

1. Ocorre variação do diâmetro na borda da amostra deformada, cujo maior diâmetro localiza-se na metade da amostra, ocasionando uma deformação em forma de barril (*barrelling*);
2. A amostra dobra-se em direção as placas de contorno (*folding*).

Este estudo foi realizado para fluxo turbulento em cilindros, mas pode ser reportado para o *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, tendo em vista que este tipo de fenômeno pode ocorrer devido à compressão entre as placas e/ou a presença de atrito (ADAMS et al., 1991).

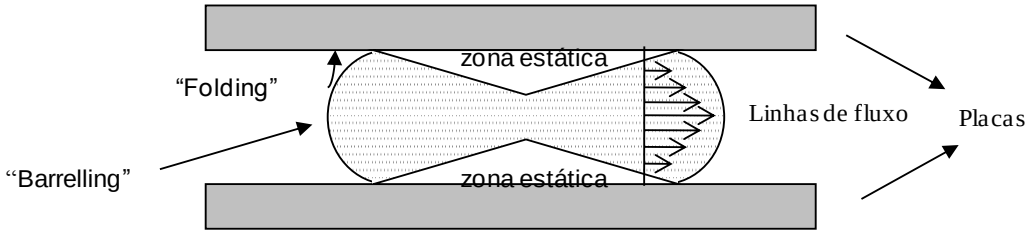


Figura 3.2 – Apresentação do esquema típico de deformação não homogênea devido à ausência de lubrificante com base no desenho apresentado por Adamas et al. (1991).

Esta deformação das linhas de fluxo, na lateral das amostras comprimidas entre placas paralelas de maior diâmetro, também foi observada por outros autores (SHERWOOD; DURBAN, 1998; ÖZKAN et al., 1999; ENGMANN et al., 2005). Em relação à argamassa de revestimento, esta configuração pode auxiliar na análise de medidas como compactação e compressibilidade (CARDOSO, 2009).

Outra configuração empregada é a compressão por placas paralelas com diâmetro iguais ao da amostra, Figura 3.3, sendo constante a área de contato entre placas e amostra (WINTHER et al., 1991; TOUTOU et al., 2005).

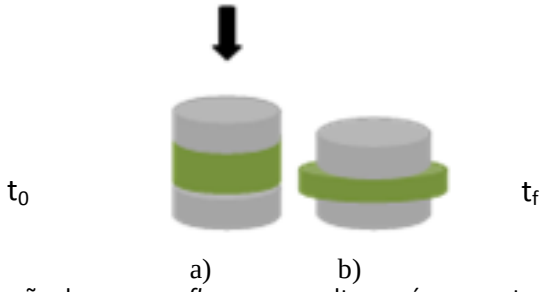


Figura 3.3 – Configuração do *squeeze-flow* que resulta em área constante da amostra submetida à compressão. O diâmetro inicial da amostra é igual ao diâmetro das placas paralelas: a) instante inicial do ensaio, t_0; b) instante final, t_f.

A desvantagem desta configuração é a dificuldade de determinar a pressão adicional provocada pela borda da amostra que se deforma com a compressão das placas paralelas (ENGMANN et al., 2005). Outro fator relevante é que o coeficiente de atrito entre placa e amostra pode alterar as linhas de fluxo. Entretanto, esta alteração não pode ser observada,

pois a borda da amostra deformada não permanece em contato com as placas durante e ao término do ensaio.

A Figura 3.4 representa uma combinação entre as duas configurações anteriores, cuja amostra possui diâmetro igual à placa superior e é comprimida sobre uma placa de maior diâmetro. Desta forma a área da amostra que recebe o carregamento permanece constante, mas a área da amostra em contato com a placa inferior é variável (ANTUNES et al., 2005; CARDOSO et al., 2005).

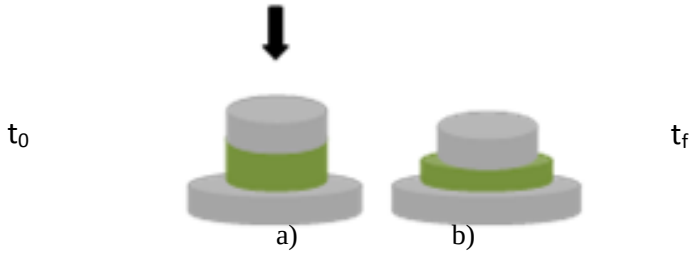


Figura 3.4 – Configuração do *squeeze-flow* que resulta em área constante da amostra submetida à compressão. A amostra possui diâmetro igual ao da placa superior e é comprimida sobre placa de maior diâmetro: a) instante inicial de ensaio, t_0; b) instante final, t_f.

Cardoso (2009) considera esta configuração a mais semelhante com o espalhamento na aplicação da argamassa de revestimento, além de propiciar o cálculo dos níveis de tensão, pois a área submetida à compressão é constante.

A configuração apresentada na Figura 3.5 é indicada para pastas com baixa viscosidade. O ensaio é realizado a partir do confinamento da amostra, sendo a carga aplicada por um punção de diâmetro inferior ao material confinado (MIN et al., 1994; AGOPYAN et al., 2005; BETIOLI, 2007; CARDOSO et al., 2009). Percebe-se que, ao término do ensaio, com o punção penetrado na amostra, pode ocorrer transbordamento da pasta, assim como o diâmetro da amostra pode ocasionar fluxo turbulento devido à compressão na parede de confinamento.

Min et al. (1994) verificaram que diâmetros semelhantes entre o anel de confinamento e a placa superior (ou punção) proporcionam forças de compressão nas paredes laterais devido à restrição do fluxo radial. Os autores obtiveram uma relação de 1,7 entre os diâmetros do punção e do anel de confinamento. A partir deste valor as forças do fluxo radial, devido ao confinamento, podem ser negligenciadas.

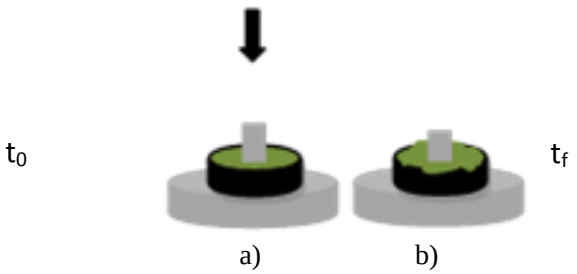


Figura 3.5 – Configuração do *squeeze-flow* com confinamento da amostra e punção de diâmetro inferior ao anel de confinamento: a) instante inicial do ensaio, t_0; b) instante final, t_f.

A imersão do punção além de causar forças de compressão na pasta, provoca também uma sobrecarga devido à penetração, representando aumento de aproximadamente 15% na carga medida (MIN et al.,1994). Outros autores desconsideram este efeito de sobrecarga (AGOPYAN et al., 2005; BETIOLI, 2007; CARDOSO et al, 2009), tal fato pode ser explicado devido as amostras analisadas estarem sujeitas à mesma configuração de ensaio, ou seja, submetidas ao mesmo efeito de sobrecarga.

Visto que diferentes configurações do *squeeze-flow* podem proporcionar distintas deformações nas linhas de fluxo, sendo estas geradas devido ao deslocamento das placas, as quais provocam a deformação radial da amostra, assim, o resultado do comportamento reológico depende das dimensões das placas, cujas geometrias diferentes podem resultar em distintas deformações. Entretanto, as dimensões da amostra é outro fator que também deve ser considerado.

3.2.1.2 Dimensões das Amostras

O diâmetro (D) e a altura (h) da amostra influenciam no comportamento reológico, sendo verificado que diferentes relações de D/h geram distintos níveis de tensões em um mesmo material. Quanto maior o valor de D/h, verifica-se aumento na resistência ao fluxo para um mesmo deslocamento (TOUTOU et al., 2005; CARDOSO, 2009).

Com o aumento do diâmetro da amostra pode ocorrer acréscimo na carga medida, o qual, por sua vez, pode ser atribuído à dificuldade que a partícula, posicionada na região central da amostra, encontra para se locomover devido ao aumento do percurso, quando comparada com a amostra de menor diâmetro. Esta dificuldade de movimentação da partícula no interior da amostra pode gerar um aumento de carga, com maior enrijecimento dificultando as linhas de fluxo.

Todavia, não são apenas a relação D/h e o diâmetro das placas que alteram a resposta reológica do material, a variação da taxa de deformação imposta também promove diferentes comportamentos.

3.2.1.3 Taxa de Deslocamento

Além da geometria, outro fator que altera as condições de contorno são os parâmetros de aplicação da solicitação, tais como: carga constante, velocidade de deslocamento constante e relaxação de tensão, entre outras (ENGMANN et al., 2005).

Dentre as distintas solicitações, a taxa de deslocamento constante possibilita a comparação de diferentes materiais sob mesma condição de movimentação da placa superior, por esta razão foi a configuração escolhida no presente trabalho. Porém, diferentes taxas de deslocamento podem acarretar modificação no comportamento da amostra.

Para pastas de cimento e argamassas o comportamento reológico é dependente da velocidade de compressão da placa superior, sendo maior a deformação da amostra para maiores velocidades. Em pequenas taxas de deslocamento, a amostra é solicitada por tempo prolongado, possibilitando a drenagem da parte fluída para fora do esqueleto granular, ocorrendo à separação de líquido e sólido, ou seja, segregação. Em contrapartida, maiores taxas de deslocamento não fornecem tempo suficiente para esta segregação, propiciando lubrificação no sistema, desta forma, facilitando o fluxo radial, o que resulta em menores cargas para um mesmo deslocamento da placa superior (TOUTOU et al., 2005; CARDOSO, 2009).

Na determinação da distância máxima de deslocamento da placa superior, para a compressão de uma amostra, deve-se considerar a distribuição granulométrica presente na suspensão, principalmente o diâmetro máximo, a fim de identificar quando ocorre o esmagamento da maior partícula, o qual gera aumento significante na carga medida.

Os resultados obtidos através do *squeeze-flow* com velocidade de deslocamento constante tendem a apresentar um perfil típico na curva de carga x deslocamento, sendo dividido em três estágios (MIN et al., 1994; BETIOLI, 2007; CARDOSO et al., 2009):

I. No primeiro estágio a amostra apresenta pequena deformação, comportando-se como um material sólido, cuja deformação é elástica e linear, o que pode ser devido à própria tensão de escoamento do material;

II. Posteriormente, ocorre pequeno aumento na força aplicada e o material apresenta grandes deformações, sendo uma deformação plástica ou fluxo viscoso;

III. O último estágio indica um enrijecimento da amostra, sendo necessário um aumento de carga considerável, cuja resposta pode ser um pequeno deslocamento.

A figura 3.6 demonstra o perfil típico da curva obtida no *squeeze-flow* (carga *versus* deslocamento) para os três estágios de deformação.

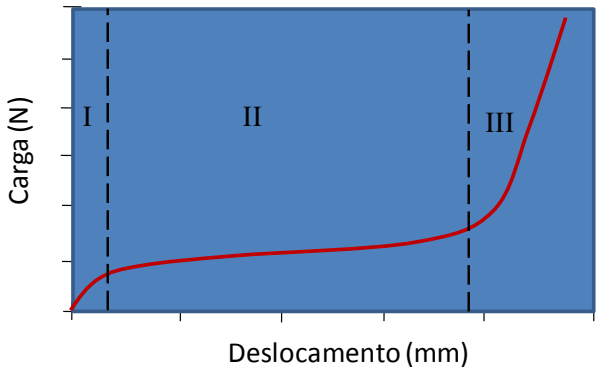


Figura 3.6 – Perfil típico de uma curva obtida no *squeeze-flow*, carga x deslocamento. Três estágios de deformação: I) deformação elástica; II) deformação plástica ou fluxo viscoso; III) enrijecimento por deformação.

Considerando as diferentes possibilidades de condições de contorno, deve-se escolher a que melhor se adéqua ao material analisado. Cardoso (2009) não recomenda a comparação direta de resultados com geometrias distintas, mas a variação na taxa de deslocamento pode contribuir na análise do material submetido a diferentes solicitações.

Com base nos fatores que influenciam nas condições de contorno do *squeeze-flow*, foi elaborado o procedimento experimental, tendo em vista que as amostras analisadas possuem elevada fluidez e devem ser analisadas quanto à aplicação sobre placa metálica e substrato poroso.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos foram escolhidas duas condições de contorno. A partir das duas configurações adotadas as amostras podem ser analisadas sob diferentes deformações e linhas de fluxo, sendo que a absorção do substrato poroso entra como uma variável adicional neste processo de análise. Desta forma, foram utilizados dois tipos de

substrato: base porosa (sub A), que neste capítulo será denominado apenas como base porosa; e base metálica. Neste último, os efeitos de sucção e fluxo capilar são nulos, o qual foi utilizado apenas como parâmetro de comparação da influência da base porosa. As condições de contorno adotadas para o ensaio *squeeze-flow* foram:

1. Amostra confinada radialmente e comprimida por punção de diâmetro inferior ao diâmetro de confinamento, ***squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial.** Esta configuração foi escolhida devida elevada fluidez das pastas analisadas;
2. Amostra comprimida entre placas de diâmetro superior ao da amostra, denominado como ***squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial**. A solicitação desta configuração permite o espalhamento da amostra sobre o substrato, metálico ou poroso, sendo toda a área da amostra submetida à mesma carga de compressão. Este fato possibilitou a análise da interface no estado endurecido.

As duas condições de contorno estão detalhadas na seqüência, assim como os procedimentos e aparatos utilizados na realização dos experimentos. Para validar a aplicação de ambas as configurações foram utilizadas pastas de diferentes materiais e distintas consistências.

3.3.1 *Squeeze-Flow*

As duas configurações adotadas foram realizadas na máquina universal de ensaios, marca INSTRON, modelo 5569, capacidade 50 kN e célula de carga de 1000 N. A Figura 3.7 apresenta um desenho esquemático do ensaio *squeeze-flow* para as duas configurações e as adaptações necessárias para o uso do substrato poroso.

Para a realização do ensaio sobre base porosa foi necessário a confecção de duas peças:

1. Cilindro metálico com *o-ring* (anel de vedação) de borracha de espessura de 2 mm localizado a uma altura de 3 mm da superfície do cilindro metálico, facilitando o encaixe do substrato. O cilindro possui uma chapa metálica na metade da sua altura, assim o substrato permanece apoiado em uma superfície rígida;
2. Placa metálica com uma reentrância que permite a fixação do cilindro, travando o movimento lateral da peça, bem como permitindo o encaixe no suporte da máquina universal.

A Figura 3.8 apresenta um desenho esquemático de duas peças.

Como a amostra permanece num sistema rígido e é a placa superior que se desloca para comprimir a amostra, foi atribuída uma velocidade de deslocamento cuja carga obtida representa a resistência de deformação da amostra em relação à taxa de deslocamento aplicada.

Tendo em vista que o objetivo do presente capítulo é adequar o *squeeze-flow* para sua realização sobre substrato poroso, optou-se, nesta pesquisa, por não utilizar mais de uma taxa de deslocamento, com intuito de simplificar as análises dos resultados. A velocidade de deslocamento adotada foi de 0,1 mm/s.

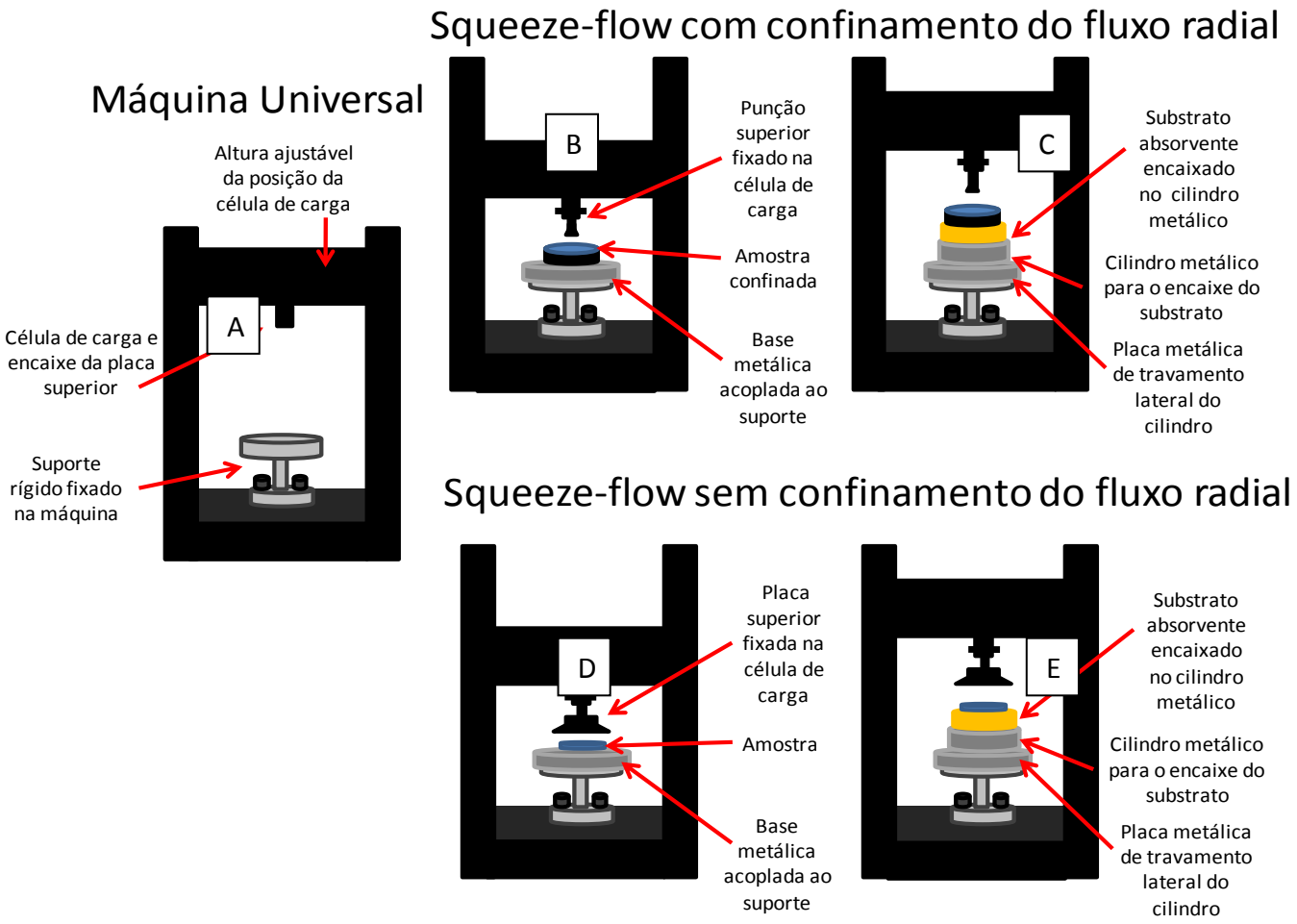


Figura 3.7 – Desenho esquemático: A) máquina universal; B) *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial; C) *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial e adaptação para substrato absorvente; D) *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial; E) *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial com adaptação da configuração para o substrato absorvente;

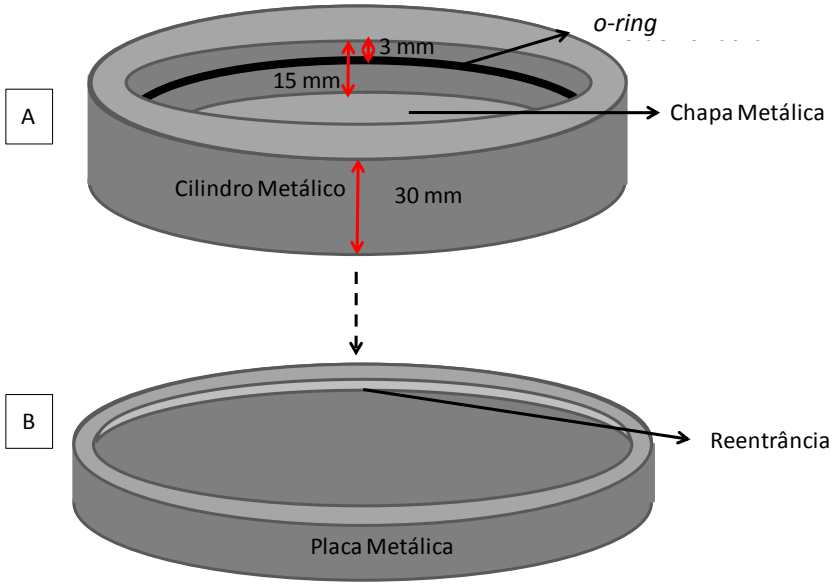


Figura 3.8 – Desenho esquemático das peças confeccionadas para o uso do substrato poroso: A) Cilindro metálico de encaixe do substrato; B) Placa metálica de fixação tanto do cilindro metálico como da máquina universal.

O diâmetro máximo das partículas nas pastas utilizadas foi da ordem de 100 µm, o que significa que o ensaio poderia ser encerrado quando a placa superior atingisse a distância de 0,1 mm da base, seja a base metálica ou porosa. Contudo, em teste prévios, na busca de adequar a configuração, observou-se que distâncias finais menores que 3 mm provocavam ruptura do substrato, devido sua baixa resistência. Desta forma foi adotada a distância final entre placa e base igual a 5 mm para ambas as configurações utilizadas.

As pastas foram aplicadas sobre os substratos e ensaiadas no *squeeze-flow* em dois tempos, 5 e 10 minutos, contados a partir do contato pasta/substrato. Para tanto, as condições de temperatura e umidade foram controladas, garantindo as condições do ambiente constante de 23°C ± 2°C e umidade relativa de 55% ± 5%. As pastas foram aplicadas sobre as bases instantes após a mistura.

3.3.1.1 Com confinamento do fluxo radial

A configuração de contorno utilizada foi embasada nos trabalhos de Min et al. (1994), Agopyan et al. (2005), Betioli (2007) e Cardoso et al. (2009).

O diâmetro do punção de aço inox foi de 24,5 mm e o diâmetro do anel de PVC utilizado para o confinamento da amostra foi de 76,2 mm com altura de 10 mm. A relação

entre os diâmetros Danel/Dpunção foi igual a 3, sendo superior a 1,7, valor recomendado pela literatura. O ensaio *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial foi realizado três vezes para cada amostra e cada tipo de substrato.

A Figura 3.9 apresenta o instante inicial e final para os dois tipos de substrato. O punção é colocado na posição inicial, ou seja, encostado na amostra a uma distancia de 10 mm da placa inferior. Ao iniciar o ensaio o punção se desloca a uma velocidade de 0,1 mm/s, comprimindo a amostra. Quando o punção atinge uma profundidade de imersão de 5 mm o ensaio é automaticamente encerrado.

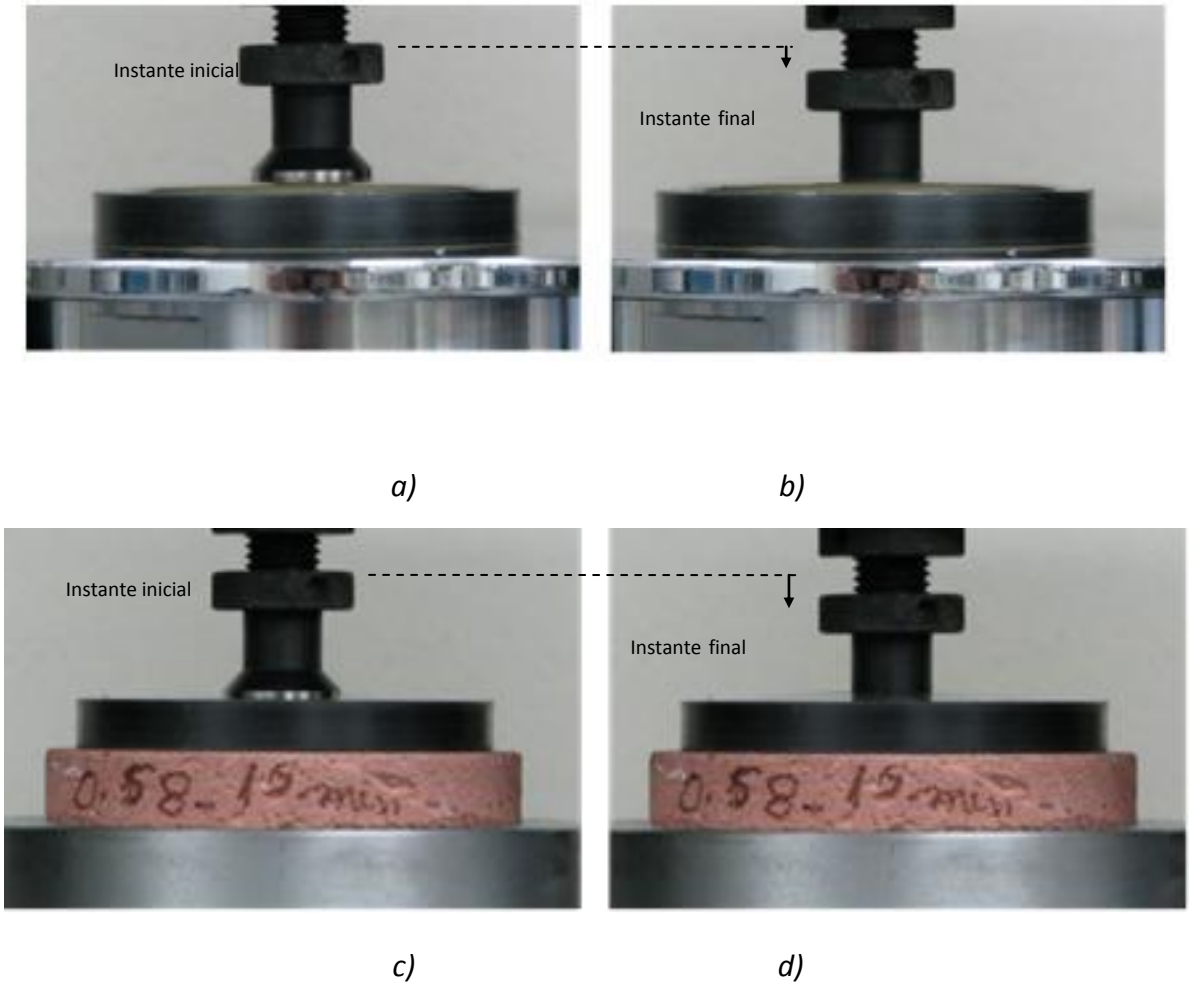


Figura 3.9 – Ensaio *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial: a) instante inicial, punção encostado na amostra, ensaio sobre a base metálica; b) instante final, punção imerso na amostra, ensaio sobre a base metálica; c) instante inicial, punção em contato com a amostra, amostra sobre substrato absorvente; d) instante final, punção encostado na amostra, amostra sobre substrato absorvente.

3.3.1.2 Sem confinamento do fluxo radial

O diâmetro do anel de PVC utilizado foi de 50,8 mm e altura de 10 mm. O diâmetro da placa superior foi de 101,60 mm. O diâmetro da placa superior é duas vezes maior que o diâmetro do molde da amostra, este fato possibilita que a amostra permaneça sob a área da placa superior no término do ensaio. A Figura 3.10 apresenta o ensaio nos instantes iniciais e finais para os dois substratos.

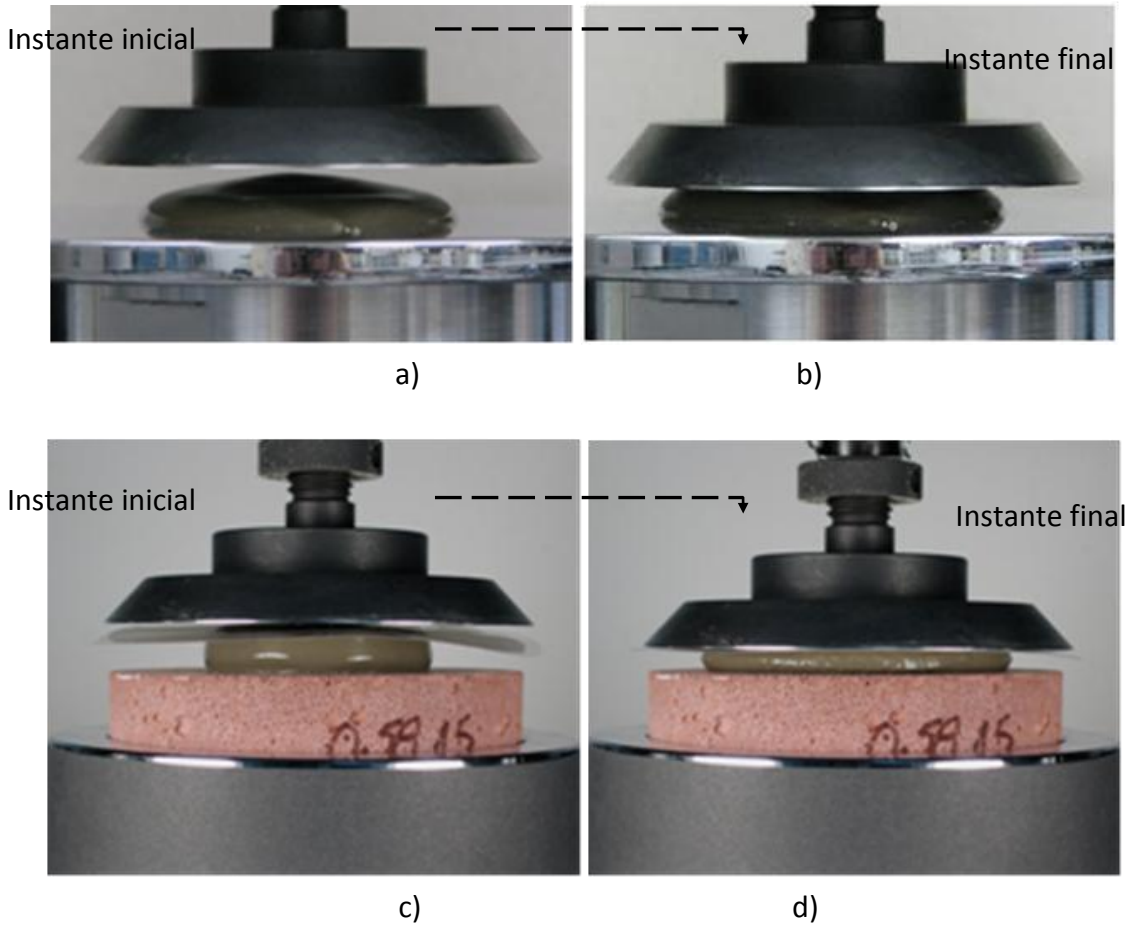


Figura 3.10 – Ensaio *squeeze-flow* sem confinamento de fluxo radial: a) instante inicial, amostras sobre base metálica, deslocamento lateral devido à retirada do molde; b) instante final do ensaio, amostra sobre base metálica; c) instante inicial, amostra sobre substrato absorvente; d) instante final, amostra comprimida sobre substrato absorvente.

Percebe-se que sobre base metálica, Figura 3.10 (a) as pastas apresentaram um abatimento com a retirada do molde. Já a mesma pasta aplicada sobre substrato absorvente pouco se deforma. Entretanto, a base porosa provoca um decréscimo na altura da amostra, no instante inicial do ensaio, devido à perda de água da pasta para a base.

Com o intuito de garantir o mesmo tratamento para todas as amostras, a placa superior foi posicionada a uma distância fixa da placa inferior, igual a 10 mm, a qual equivale à altura do anel. Na ausência dos efeitos de escoamento da pasta e sucção do substrato, a placa superior estaria em contato com a amostra. Desta forma, ao iniciar o ensaio, o deslocamento da placa superior pode ocorrer sem estar em contato com a amostra, deslocamento livre.

Um filme de polietileno foi colocado sobre a amostra após a retirada do anel para anular o efeito do empuxo devido à retirada da placa superior no final do ensaio. Tal fato possibilitou a análise da microestrutura na interface, bem como os resultados de resistência de aderência realizados no estado endurecido.

Previamente à moldagem de cada amostra, foi passada vaselina no anel de PVC para facilitar sua retirada antes da realização do ensaio.

3.3.2 Desenvolvimento do Substrato Poroso

Na produção da base porosa foi utilizada uma argamassa industrial de densidade anidra igual a 2,79 g/cm3. O teor de água empregado foi o sugerido pelo fabricante, 16,25% em relação à massa de sólidos. O teor de ar incorporado obtido foi de 25%, conforme NBR 13278/95. Os procedimentos de moldagem e cura das bases, bem como a caracterização no estado endurecido foram apresentados no capítulo 2.

3.3.3 Pastas

Foram utilizados três materiais, cimento, cal e calcário. Para as pasta com cimento utilizou-se três relações água/aglomerante, 0,58; 0,60 e 0,62. A relação água/aglomerante para cal foi de 1,5 e 0,48 para o *filler* calcário. A caracterização anidra, reológica e do fluxo de calor liberado no contato com água para os três materiais encontram-se no capítulo 1.

A utilização de diferentes pastas foi devido à cinética diferenciada para cada material, assim as duas configurações adotadas do *squeeze-flow* puderam ser testadas por material reagente, o qual está sujeito a alteração através do processo de hidratação e por materiais inertes.

A quantidade de água em relação à quantidade de partículas foi diferente para cada material, o que ocorreu devido à influência da área superficial específica, como no caso da cal

que exigiu uma demanda de água elevada. Entretanto, o procedimento de mistura e aplicação foi padronizado para ambas as suspensões.

3.3.4 Mistura e Aplicação

As pastas foram misturadas a partir da adição do pó na água através de uma calha vibratória e misturador com rotação de 900 rpm por 2 minutos e 30 segundos. Posteriormente, a rotação foi aumentada para 1500 rpm por mais 2 minutos e 30 segundos. Por fim, o uso de um dispersor a 9500 rpm por mais 2 minutos e 30 segundos. Na aplicação da pasta sobre a base porosa utilizou-se um suporte com funil à distância de 8 cm do substrato, garantindo assim, que todas as amostras de pastas fossem aplicadas com mesma energia de lançamento.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 *Squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial

Os resultados das pastas cimentícias com o confinamento do fluxo radial, sobre base metálica, estão apresentados na Figura 3.11. O perfil da curva foi semelhante para ambas as pastas nos dois tempos de contato entre pasta/substrato.

As cargas resultantes das pastas cimentícias sobre base metálica foram pequenas, entretanto a célula de carga possuiu sensibilidade nas leituras do ensaio, sendo que as repetições resultaram em curvas semelhantes, as quais não foram colocadas na figura para facilitar a visualização do gráfico.

Conforme observado na Figura 3.11, a diferença nas relações água/cimento (0,58; 0,60 e 0,62) não influenciaram de forma significativa no perfil das curvas obtidas dentro de cada intervalo de tempo. Apesar disto, percebe-se que a pasta com maior quantidade de água (0,62) possui menor resistência à penetração do punção em relação às demais.

As amostras ensaiadas com 5 minutos apresentaram menores cargas em relação aos ensaios com 10 minutos, apesar do aumento ser relativamente pequeno. Tal fato pode ser atribuído a segregação das partículas devido ao maior tempo de espera, o que favorece a separação liquido – sólido.

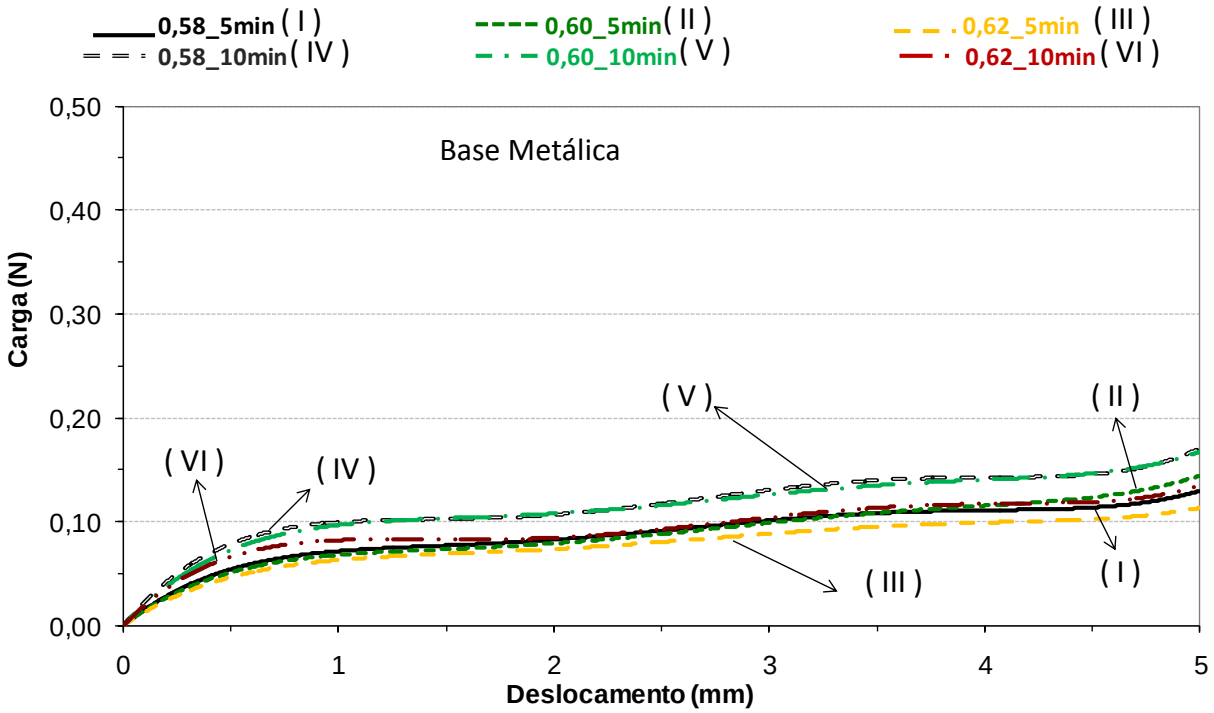


Figura 3.11 – Resultados do *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial sobre a base metálica, carga (N) em função do deslocamento (mm). Relação água/cimento de 0,58; 0,60 e 0,62, e tempo de contato com a base antes da realização do ensaio de 5 e 10 minutos.

As amostras não apresentaram os três estágios de deformação sugerido por Min et al. (1994), o que pode ser atribuído ao fato de que o deslocamento máximo da placa superior foi de apenas 5 mm, metade da altura da amostra. Desta forma, o perfil de deformação obtido para as amostras pode ser considerado como deformação plástica, ou seja, pequeno aumento na carga aplicada para a deformação imposta. O mesmo foi verificado para as amostras ensaiadas sobre base porosa, Figura 3.12, porém as cargas obtidas para estas pastas, para o mesmo deslocamento da placa superior, foram maiores em relação à base metálica.

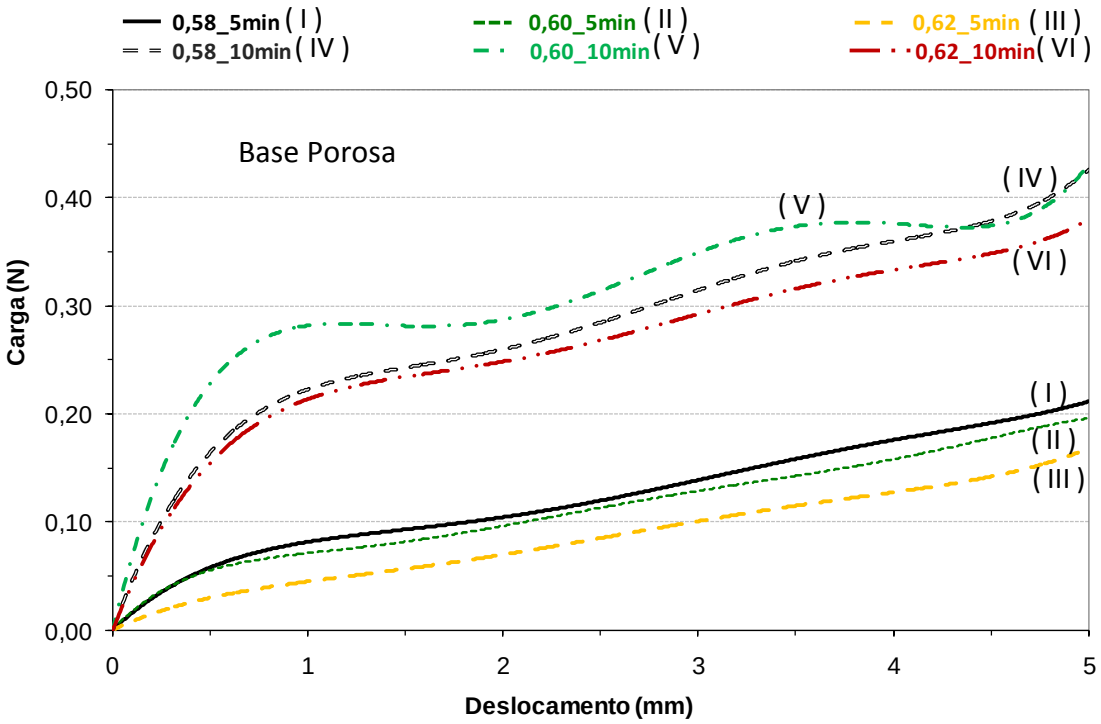


Figura 3.12 – Resultados do *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial para base porosa, carga (N) em função do deslocamento (mm). As pastas foram denominadas pela relação água/cimento, 0,58; 0,60 e 0,62, e o tempo de contato com a base antes da realização do ensaio, 5 e 10 minutos.

A influência da base porosa provocou aumento nas cargas medidas tanto para 5 minutos quanto para 10 minutos de contato. O tempo prolongado de contato, 10 minutos, propiciou um acréscimo entorno de 100% na carga para todas as pastas, quando comparados ao tempo de 5 minutos. Este efeito, maiores cargas para o deslocamento de 5 mm, era esperado, devido à característica intrínseca da base, promovendo a retirada de água da pasta por sucção capilar, o que acarreta em uma redução de água da pasta e aumenta a viscosidade, por conseguinte maior resistência ao fluxo.

Para as amostras ensaiadas com 5 minutos de contato com a base porosa foi possível observar a relação entre quantidade de água e carga medida, sendo que a mais fluida apresentou menores cargas.

A Figura 3.13 apresenta a carga final em relação ao tempo de contato com a base, seja porosa ou metálica, para as três pastas cimentícias, obtidos com o deslocamento máximo de 5 mm.

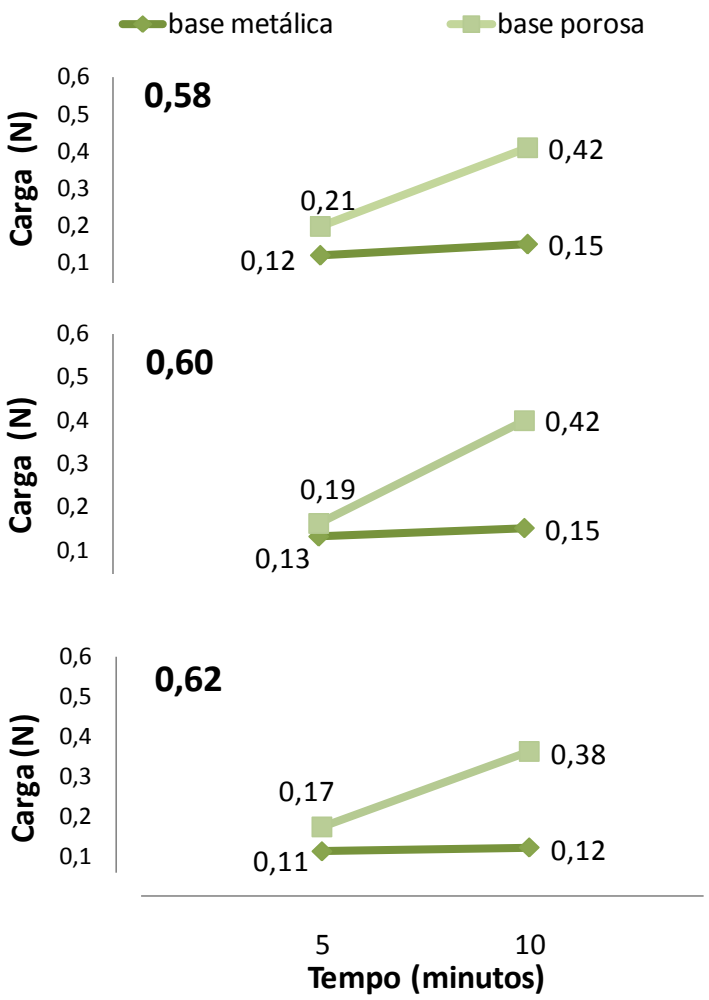


Figura 3.13 – Carga final em relação ao tempo de contato de 5 e 10 minutos com a base metálica e porosa, para as três pastas cimentícias, 0,58; 0,60 e 0,62.

Ao comparar as cargas finais para os tempos de 5 e 10 minutos de contato com a base metálica, percebe-se que a pasta com 0,62 de água/cimento resultou menor acréscimo na carga final em relação ao aumento no tempo de contato, sendo o acréscimo na carga entorno de 9%. Na seqüência, as pastas com 0,60 e 0,58 de água/cimento apresentaram aumento na carga final de aproximadamente 15 e 25%, respectivamente.

Quando analisado as pastas cimentícias sobre base porosa, percebeu-se que ocorreu uma inversão, ou seja, a pasta com maior água/cimento, 0,62, quando ensaiada aos 10 minutos, apresentou o maior acréscimo na carga em relação ao ensaio com 5 minutos, para o mesmo deslocamento, sendo este acréscimo entorno de 123%. Posteriormente, as pastas com

relação água/cimento de 0,60 teve um aumento na carga de 121%, e 0,58 de água/cimento com aproximadamente 100% de acréscimo na carga em relação à carga média aos 5 minutos.

Ao comparar a diferença na carga final em função da base, no ensaio realizado aos 5 minutos, percebe-se a influência da sucção da base porosa, cuja relação água/cimento de 0,58 apresentou maior variação na carga final, sendo em torno de 75% maior para a base porosa em relação à base metálica. A mesma comparação foi realizada para os ensaios com 10 minutos de contato entre pasta e base, sendo verificado que o maior aumento na carga final foi para a pasta cimentícia de água/cimento 0,62, cujo acréscimo na carga final da amostra sobre base porosa em função à carga final sobre base metálica resultou em 216%.

Ainda utilizando a configuração do *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial foram ensaiadas outras pastas com distintos materiais, cal CH I e *filler* calcário, cujas concentrações de sólidos, área específica, distribuição granulométrica e cinética de reação são diferentes das pastas cimentícias. Tais amostras foram acrescentadas a fim de avaliar a aplicabilidade desta condição de contorno quando ensaiados sobre bases porosas.

A cal, Figura 3.14, devido à sua capacidade de retenção de água, foi menos sensível à absorção da base porosa em função do tempo, perdendo menor quantidade de água e mantendo maior fluidez.

O maior teor de água, relação água/cal de 1,5, foi necessário devido à elevada área superficial. O resultado do perfil de deformação obtido para os dois tempos de ensaio foi de pequenas cargas para o deslocamento imposto. Se o deslocamento do punção fosse superior a 5 mm é possível que em algum momento a amostra apresentasse um enrijecimento elevando consideravelmente a carga final.

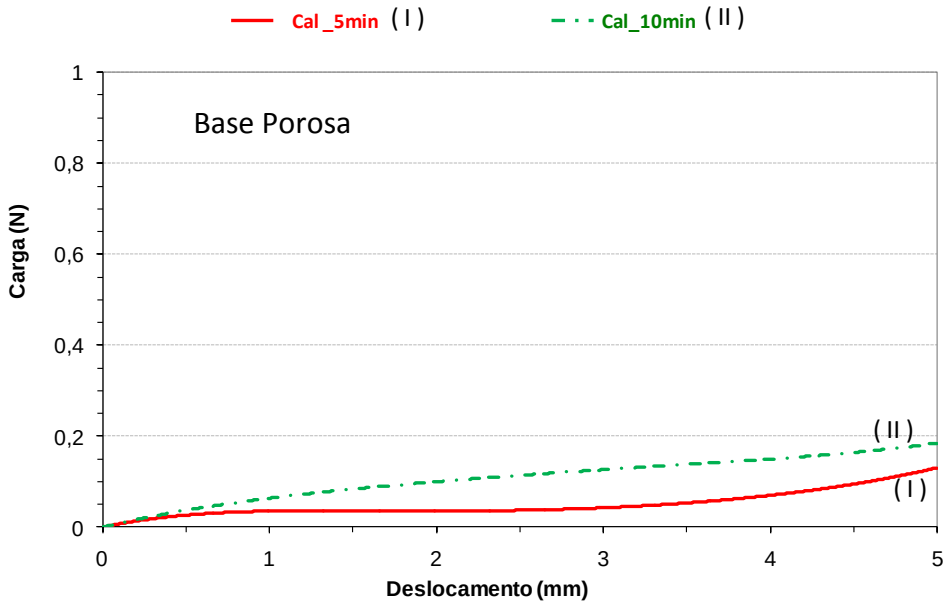


Figura 3.14 – Resultados de cargas *versus* deformação para pastas com cal CH I, ensaios realizados com 5 e 10 minutos de contato pasta substrato.

A menor relação de água/material sólido foi para a pasta com *filler* calcário, sendo a relação água/calcária de 0,48. A Figura 3.15 apresenta a curva carga *versus* deslocamento do punção para os tempos de contato de 5 e 10 minutos, para a base porosa.

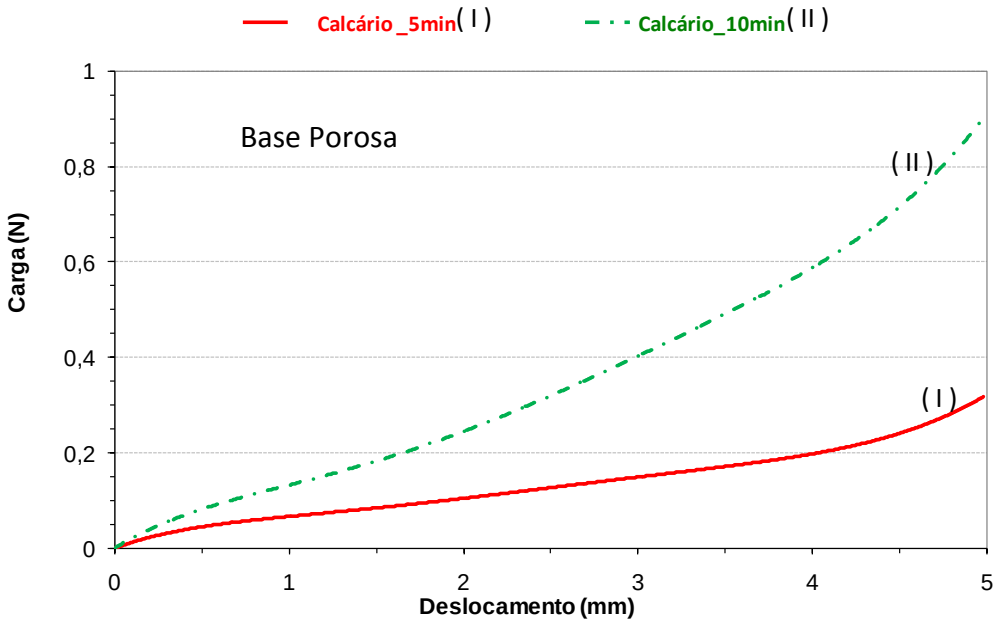


Figura 3.15 – Resultados do *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial da pasta com calcário com relação água/calcário de 0,48, aplicado sobre base porosa e ensaiados nos tempos de 5 e 10 minutos.

O calcário apresentou cargas elevadas, o que pode ser atribuído a alguns fatores, mas o principal é a relação água/aglomerante. Tal fato influencia na distância de separação das partículas (IPS) aumentando a viscosidade do sistema, como foi discutido no capítulo 1.

Na Figura 3.16 estão apresentadas as cargas finais obtidas sobre substrato absorvente no intervalo de 5 e 10 minutos de contato para as pastas de cal e *filler* calcário.

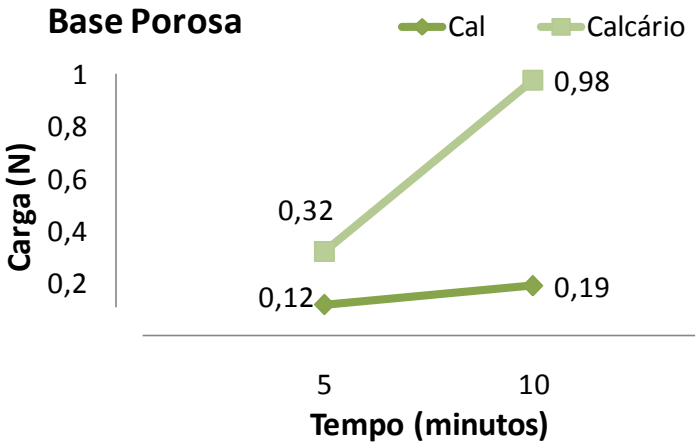


Figura 3.16 – Resultados de carga final em relação ao tempo de contato entre pasta e substrato poroso, paras as duas pastas: suspensão de cal CH I com relação água/cal de 1,5; pasta com *filler* calcário com relação água/calcário de 0,48.

Observa-se que o aumento na carga final para a pasta de cal aos 10 minutos de contato em relação ao ensaio com 5 minutos foi pequeno quando comparados com as pastas cimentícias. Claro que devemos considerar a diferença nas relações água/material anidro, mas tal resultado pode ser um indicativo da capacidade de retenção de água da cal. Em contrapartida, a pasta com *filler* calcário teve um acréscimo na carga final aos 10 minutos de aproximadamente 206% em relação à carga final obtida aos 5 minutos.

Desta forma, pode-se concluir que o comportamento da pasta de cimento depende da base utilizada, sendo o método sensível para medir pequenas variações de cargas, resultantes da alteração da reológica das pastas. Outro ponto relevante é que o ensaio mostrou-se capaz de identificar as diferenças entre as relações água/cimento, principalmente sobre base porosa, assim como de pastas com outros materiais.

As mesmas pastas foram testadas utilizando o ensaio squeeze-flow sem o confinamento do fluxo radial e estão apresentadas no item seguinte.

3.4.2 *Squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial

O procedimento do ensaio sem confinamento do fluxo radial influenciou no perfil das curvas resultantes, principalmente devido ao deslocamento da placa superior que apresentou dois estágios bem definidos: uma parcela do deslocamento foi realizada sem estar em contato com a amostra; e no segundo estágio o deslocamento exerceu compressão efetiva na amostra, conforme mostra a figura 3.17.

O efeito do deslocamento da placa superior sem compressão da amostra, ou deslocamento livre, foi verificado para todas as pastas, sendo proporcional ao escoamento lateral da amostra ocasionado pela retirada do molde instantes antes ao de se iniciar o ensaio. Por outro lado, sobre base porosa o efeito do deslocamento livre pode estar correlacionado tanto ao escoamento lateral como a perda de água da pasta para a base.

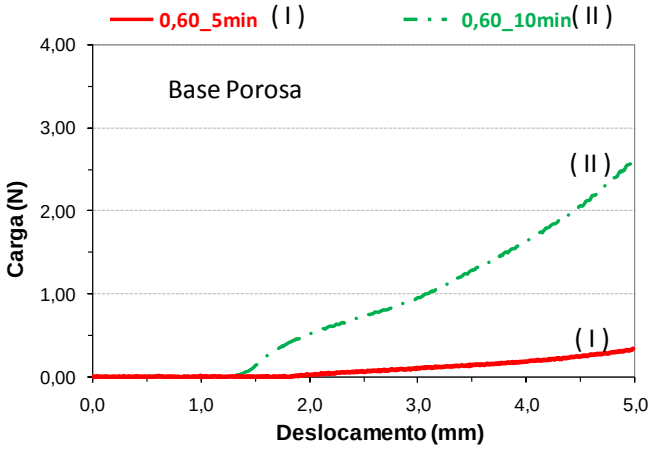


Figura 3.17 – Perfil da curva de deslocamento da placa superior apresentando duas regiões: cargas nulas, deslocamento da placa superior sem encostar na amostra; e o aumento crescente na carga com o aumento, compressão da amostra em contato com a placa superior. Pasta cimentícia com relação água/cimento de 0,60 e tempos de ensaio de 5 e 10 minutos, amostra sobre substrato poroso.

Na figura 3.17 pode-se observar que a pasta cimentícia com 0,60 de água/cimento, ensaiada aos 5 minutos, apresentou maior região de deslocamento da placa superior sem estar em contato com a amostra. A mesma pasta ensaiada aos 10 minutos apresentou maior deslocamento da placa superior em contato com a amostra. Para analisar a influência do escoamento lateral e o fluxo radial da amostra comprimida, os dados resultantes do ensaio foram separados. Desta forma, nos próximos gráficos deste capítulo, as curvas de carga versus

deslocamento apresentam apenas a parcela do resultado referente ao deslocamento da placa em contato com a amostra, conforme Figura 3.18.

As curvas I, II e III da figura 3.18 representam as pastas cimentícias ensaiadas com 5 minutos de contato com a base metálica, percebe-se que a pasta cimentícia de relação água/cimento 0,58 apresentou maior deslocamento, isto indica que na retirada do anel a amostra obteve menor escoamento lateral entre as três pastas.

Tendo em vista que o deslocamento total da placa superior é de 5 mm, independente de estar ou não em contato com a pasta, percebe-se que o deslocamento em contato com a pasta foi pequeno para as três amostras ensaiadas aos 5 minutos, isto se deve a baixa viscosidade, que com a retirada do molde proporcionou elevado escoamento lateral. A altura deste escoamento radial pode ser representada pelo deslocamento livre da placa superior.

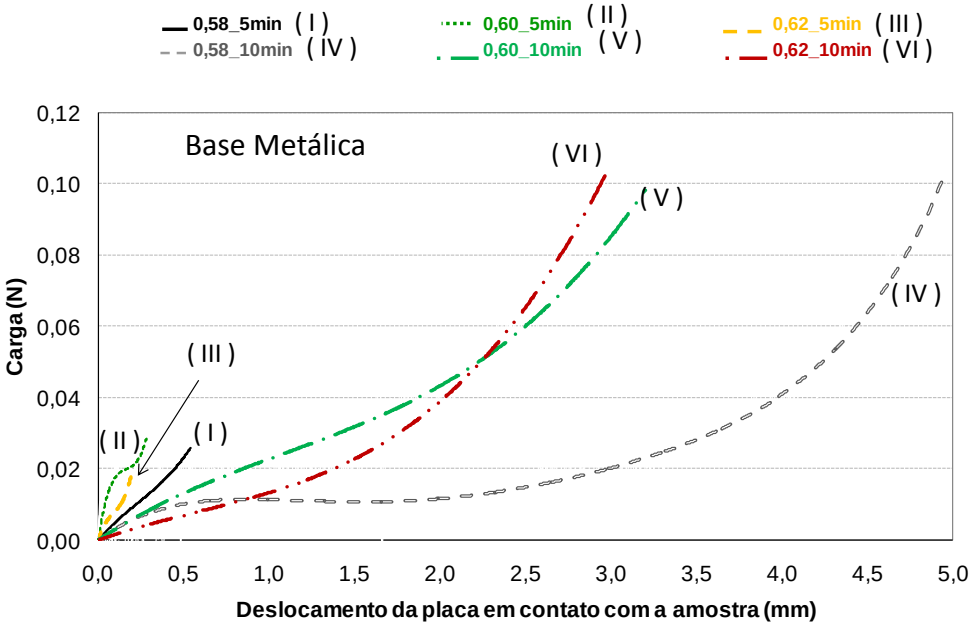


Figura 3.18 - Resultado do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial para as pastas cimentícias de relação água/cimento de 0,58; 0,60 e 0,62, ensaio sobre base metálica.A figura apresenta a carga resultante para o deslocamento da placa superior em contato com a amostra, ensaios realizados com 5 e 10 minutos de contato entre pasta e substrato.

Aos 10 minutos de contato, as amostras apresentaram menor escoamento lateral com a retirada do molde, tal fato possibilitou maior deslocamento da placa superior em contato com as pastas. Apesar das cargas finas terem sido similares, o deslocamento para a pasta cimentícia de relação água/cimento de 0,58 foi maior do que deslocamento obtido para as

demais, indicando menor escoamento radial devido à retirada do molde instante antes do início do ensaio.

Assim, o maior tempo de espera promoveu um pequeno enrijecimento das pastas, diminuindo o abatimento e proporcionando maior deformação da amostra. Este enrijecimento pode ser atribuído a uma separação de fase. Devido à elevada relação água/cimento, uma parcela da água tende a migrar para fora da amostra no decorrer do tempo, formando uma estrutura mais viscosa. Tal fato pode ser responsável pelo menor escoamento das pastas na retirada do molde quando ensaiadas aos 10 minutos.

Ainda que as cargas sejam pequenas, foi possível observar a influência do tempo de contato entre pasta e base metálica, cujo maior tempo de espera promoveu redução do abatimento da amostra com a retirada do anel, o que, por sua vez, influenciou na deformação final da amostra. Em contrapartida, a parcela do deslocamento da placa superior até encostar-se à amostra, denominado aqui de deslocamento livre, é também uma informação relevante. A Figura 3.19 apresenta o resultado da carga final para o deslocamento da placa superior, sendo este divido em dois eixos: deslocamento livre e deslocamento referente à compressão da amostra.

Com intuito de facilitar a visualização dos resultados, as cargas finais foram multiplicadas por 100. Nesta figura (3.19) o efeito tempo no resultado da carga final é facilmente observado, assim como sua influência no deslocamento da placa superior seja no deslocamento livre ou em contato com a amostra.

Para a amostra com relação água/cimento de 0,58 o abatimento devido a retirado do molde foi igual a 4,34 mm, quando ensaiada aos 5 minutos. Para a amostra 0,60 esse abatimento foi aproximadamente 4,5 mm e de 4,8 mm para a pasta com 0,62. Como o abatimento das amostras foi elevado, tendo em vista o deslocamento máximo da placa superior, ocorreram pequenas deformações nas amostras ao término do ensaio, o que resultou em cargas excessivamente baixas.

Nos ensaios realizados aos 10 minutos de contato, o deslocamento livre da placa superior foi menor para ambas as amostras, o que possibilitou maior deslocamento da placa em contato com as pastas, por conseguinte, maiores cargas.

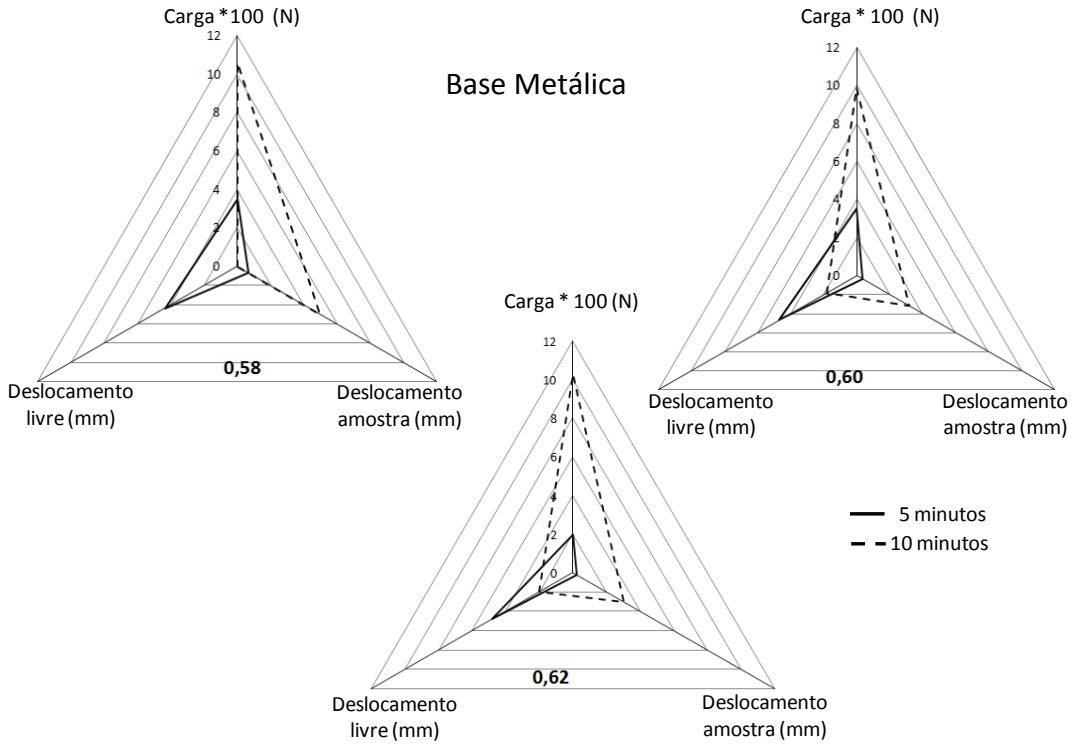


Figura 3.19 - Resultado do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial para as pastas cimentícias de relação água/cimento de 0,58; 0,60 e 0,62, ensaio sobre base metálica. A Carga final (N) foi multiplicada por 100 para facilitar a visualização do resultado em relação ao deslocamento livre (mm) e o deslocamento da amostra (mm), para ambos os tempos de 5 e 10 minutos de contato entre pasta e substrato.

A partir dos resultados pode-se observar a seguinte tendência: quanto menor a relação água/cimento maior pode ser o deslocamento da placa superior em contato com a amostra, conseqüentemente, menor o deslocamento livre. Tal tendência era esperada, contudo não havia o conhecimento se esta configuração de ensaio teria sensibilidade para obtenção destes resultados, isto devido à baixa viscosidade das pastas utilizadas. Desta forma, partiu-se então à análise das pastas sobre substrato poroso, sendo os resultados apresentados na Figura 3.20.

As pastas apresentaram perfis semelhantes de carga *versus* deformação para as amostras ensaiadas com 5 minutos de contato entre pasta e substrato poroso. A pasta com 0,58 de relação água/cimento apresentou maior deslocamento da placa superior em contato com a amostra, assim como a maior carga final. Já as amostras com relação água/cimento 0,60 e 0,68 tiveram tanto carga final como deslocamento semelhante.

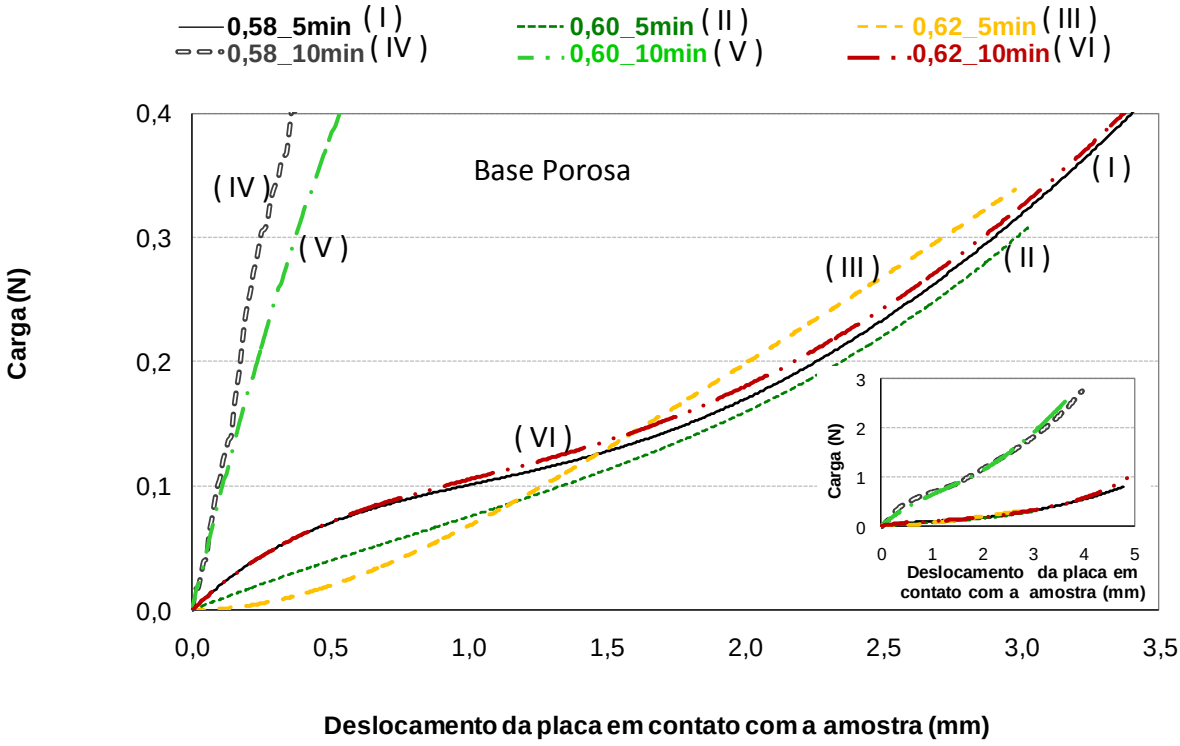


Figura 3.20 - Resultado do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial para as pastas cimentícias de relação água/cimento de 0,58; 0,60 e 0,62, ensaio sobre base porosa. Apresenta a carga resultante para o deslocamento da placa superior em contato com a amostra, ensaios realizados com 5 e 10 minutos de contato entre pasta e substrato.

As pastas com 0,58 e 0,60 de água/cimento ensaiadas aos 10 minutos de contato apresentaram deslocamento e cargas semelhante, porém o deslocamento da placa superior em contato com a amostra foi maior para a pasta com 0,58 de água/cimento, o que poderia indicar maior abatimento para a pasta com relação de 0,60. Contudo, percebe-se que o abatimento não é a única variável que influencia na altura inicial da amostra, pois também ocorre perda de água da pasta para a base, sendo este, mais um fator que contribui no deslocamento livre da placa superior. Tal fato explica o aumento no deslocamento livre para a pasta com 0,58 de água/cimento sobre base porosa com o acréscimo no tempo de contato, o inverso ocorreu para a mesma pasta sobre base metálica.

O tempo de contato foi mais significativo para as pastas com relação água/cimento de 0,58 e 0,60, cuja carga apresentou um acréscimo considerável, conforme Figura 3.20 e 3.21. A amostra com 0,62 de água/cimento sofreu menor influência dos tempos de ensaio, sendo um pequeno aumento na carga final para o ensaio com 10 minutos.

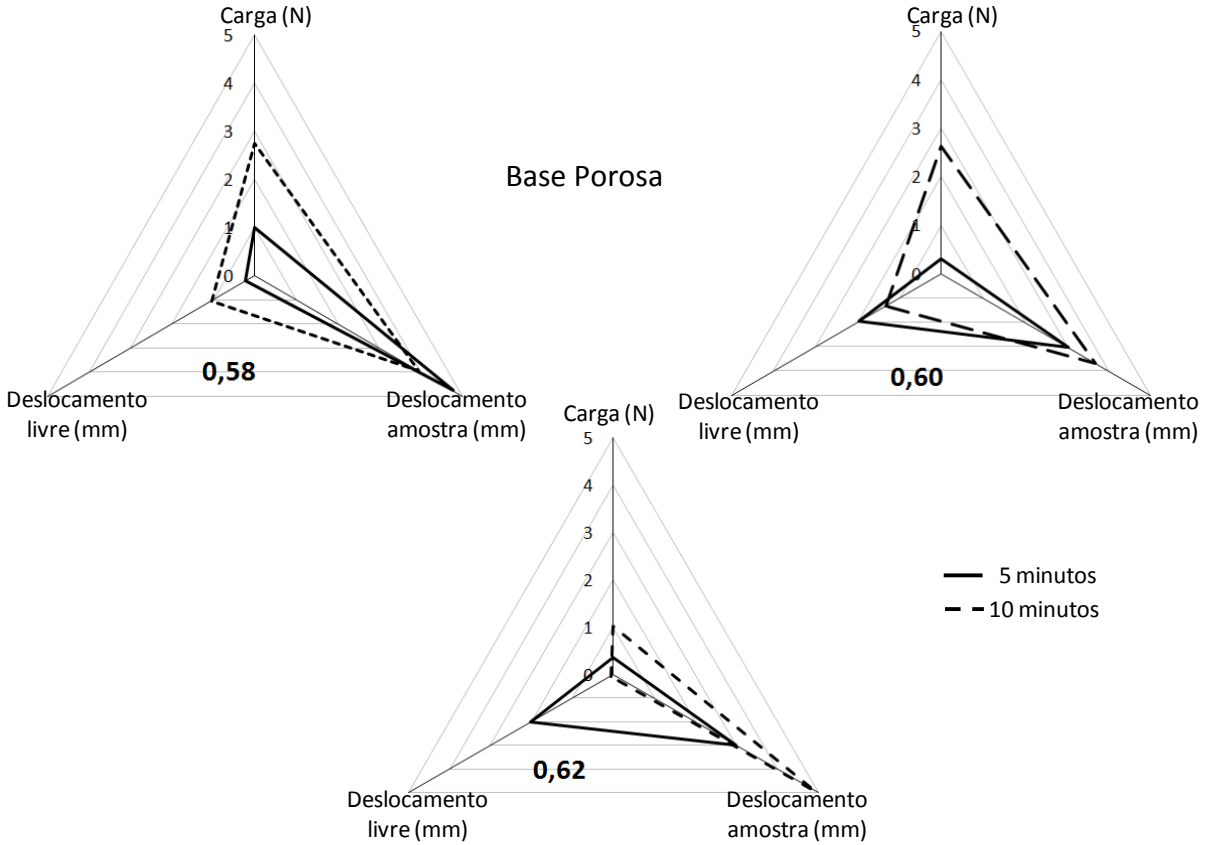


Figura 3.21 - Resultado do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial para as pastas cimentícias de relação água/cimento de 0,58; 0,60 e 0,62, ensaio sobre base porosa. Carga final (N) em relação ao deslocamento livre (mm) e o deslocamento da amostra (mm), para ambos os tempos de 5 e 10 minutos de contato entre pasta e substrato.

Na Figura 3.21 é possível observar que nos primeiros 5 minutos de contato das pastas com a base porosa, a perda de água da pasta reduziu o abatimento na retirada do molde se compararmos com os resultados sobre base metálica, cujo deslocamento livre foi superior a 4 mm para todas as três pastas cimentícias. Como ocorre redução na quantidade de água, a viscosidade aumenta e diminui o escoamento lateral com a retirada do molde, causando elevação da carga medida nos ensaios.

Aos 10 minutos de contato a pasta com menor quantidade de água provocou uma diminuição considerável na altura da amostra, elevando o deslocamento livre da placa superior. Este efeito foi verificado para a pasta com 0,58 e 0,60 de relação água/cimento. A pasta com relação de 0,62, apesar de ter perdido água para o substrato, apresentou o menor abatimento, próximo de 0,1 mm. Tal fato indica que a quantidade de água desta pasta

proporcionou menor viscosidade mesmo com 10 minutos de contato, em relação às demais pastas cimentícias, o que gerou pequeno acréscimo de carga.

As pastas com cal e *filler* calcário também foram ensaiadas com *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, conforme Figura 3.22.

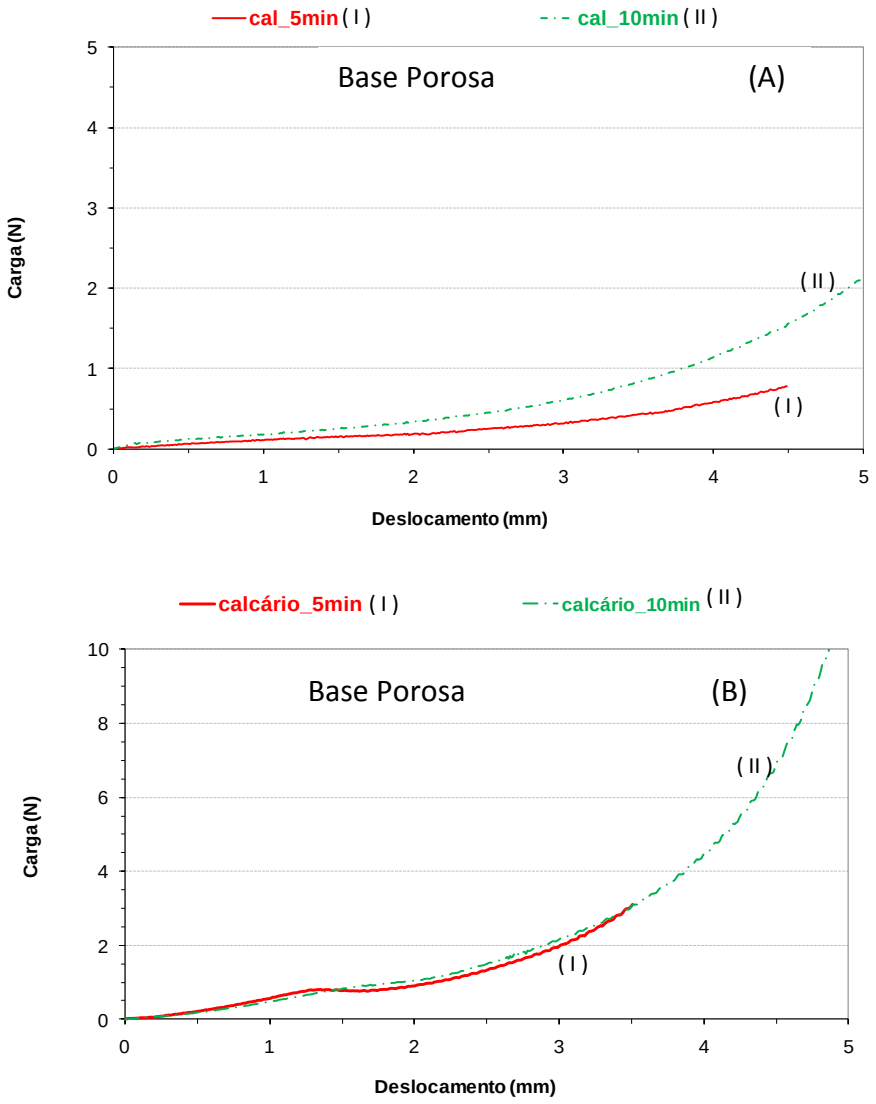


Figura 3.22 – Resultados do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, nos tempos de 5 e 10 minutos: A) pasta de cal ensaiada sobre base porosa; B) pasta de *filler* calcário ensaiada sobre base porosa.

A Figura 3.22 (A) apresenta as duas curvas de cal para os tempos de 5 e 10 minutos. O maior período de contato entre a pasta de cal e a base porosa proporcionou um acréscimo de mais de 100% na carga final, além de promover um aumento na viscosidade, o qual pode ser atribuído devido à perda de água para a base.

Os ensaios com a pasta de *filler* calcário estão apresentados na Figura 3.22 (B). Percebe-se que o perfil das curvas, carga *versus* deformação, ensaiadas com 5 e 10 minutos são muito semelhantes, sendo a diferença entre elas o deslocamento livre da placa superior, o qual está relacionado ao escoamento lateral devido à retirada do anel instantes antes do início do ensaio.

Na Figura 3.23 está apresentada a parcela do deslocamento correspondente ao deslocamento livre e deslocamento da placa superior em contato com a amostra em função, assim como a carga fina.

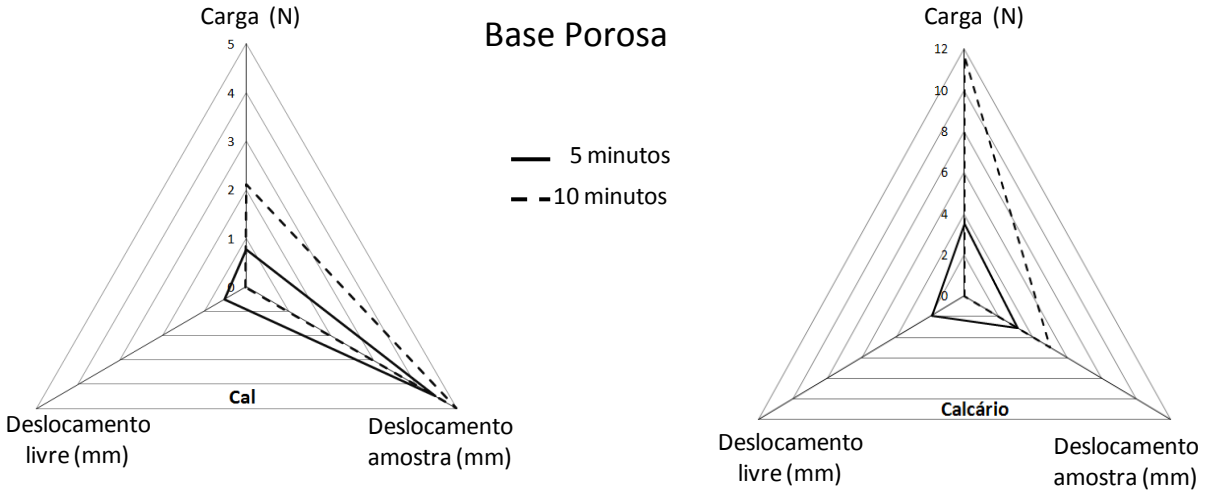


Figura 3.23 – Resultados do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, nos tempos de 5 e 10 minutos sobre base porosa para as amostras de cal e *filler* calcário. A figura apresenta a carga final (N) do ensaio em função dos deslocamentos da placa superior: deslocamento livre; e deslocamento da placa em contato com a amostra.

Tanto a pasta de cal como a com calcário demonstraram ser sensível ao tempo de contato com a base porosa, cuja perda de água em relação ao tempo alterou o deslocamento livre, sendo mais significativo para a pasta com calcário, conforme Figura 3.23, a qual obteve carga final aos 5 minutos próximo de 4 N e, aos 10 minutos, a carga final resultou aproximadamente 3 vezes maior.

Uma forma de tentar quantificar o efeito da rugosidade da base para esta configuração de ensaio, *squeeze-flow* sem confinamento de fluxo radial, é a medida de alteração das linhas de fluxo. Conforme apresentados na revisão bibliográfica deste capítulo, a compressão entre placas paralelas de mesmo material e ausência de escorregamento tende a apresentar linhas de fluxo bem definidas (figura 3.2). A partir disso, foram captadas algumas imagens com intuito de observar a alteração nas linhas de fluxo, devido o contato com a base porosa.

A figura 3.24 apresenta uma foto com aumento da imagem que registra o término do ensaio. Conforme Adams et al. (1991) o efeito de deformação no formato de barril tende a se formar no centro da amostra quando ensaiadas entre placas de materiais iguais, os quais proporcionam regiões de zona estática semelhantes.

Ao ser trocada a base metálica por um base porosa foi possível observar o efeito da absorção somado com o aumento do atrito, proporcionado pela superfície de maior rugosidade. A altura final da amostra foi de 0,5 mm. Conforme Adams (1991) o maior diâmetro das linhas de fluxo radiais deveria estar no centro da altura da amostra, 2,5 mm, caso as placas tivessem o mesmo coeficiente de atrito. A imagem demonstra que o contato da pasta com a base porosa deslocou o maior diâmetro do fluxo lateral à altura de 0,3 mm.

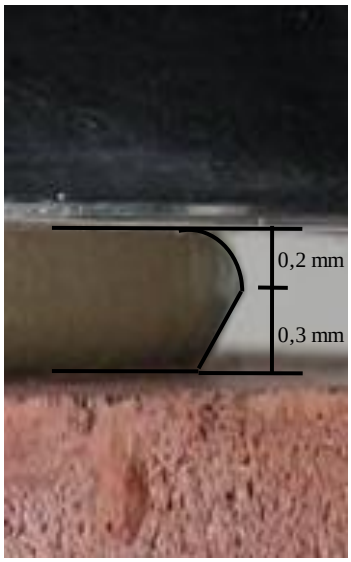


Figura 3.24 – Deformação não homogênea com alteração nas linhas de fluxo devido à sucção de água e a rugosidade do substrato absorvente.

A figura 3.25 apresenta um esquema semelhante ao demonstrado por Adams et al. (1991) adequando as possíveis alteração das linhas de fluxo provocadas pela sucção e a alteração da rugosidade da base inferior.

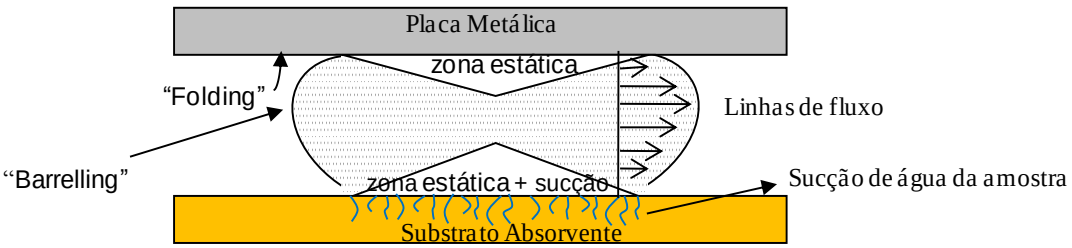


Figura 3.25 – Deformação não homogênea devido à ausência de lubrificante e a presença de sucção da base porosa.

Se não houvesse a absorção da base, seria possível calcular o ângulo formado entre a pasta e as placas, e, por conseguinte obter o coeficiente de atrito. Apesar deste estudo não ter tido continuidade na presente pesquisa, acredita-se na possibilidade de futuros estudos exploratórios voltados para esta aplicação, visto que a característica da superfície do substrato influenciou no escoamento lateral e, por conseguinte, no resultado do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial.

O fator tempo de contato entre base e amostra demonstrou-se relevante, cujas amostras com 5 minutos possuíram cargas menores em relação às ensaiadas aos 10 minutos, tal efeito foi verificado tanto para a base metálica como para o substrato poroso. É importante ressaltar que as cargas medidas para o ensaio sobre base metálica foram muito baixas, contudo os resultados são confiáveis, devido à elevada precisão do equipamento utilizado, conforme testes previamente realizados[4].

Desta forma, a configuração *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial apresentou-se capaz de identificar a alteração do comportamento reológico de diferentes pastas devido ao contato com duas bases distintas. Mesmo que efeitos de sucção capilar e rugosidade não sejam mensurados.

[4] Alunos do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Laboratório de Microestrutura da Universidade de São Paulo, efetuaram teste para verificar a eficiência de medidas em cargas menores que 1 N nos ensaios realizados na máquina universal, sendo comprovado que o equipamento possui sensibilidade para realizar medições em pequenas cargas.

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

- A adequação do método *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial sobre substrato absorvente é capaz de identificar a influência do substrato e do material sobre ele aplicado, demonstrando ser um método aplicável para a avaliação de diferentes substratos e distintas suspensões. Portanto, o método foi considerado adequado para ser aplicado no capítulo seguinte desta dissertação;
- O mesmo foi verificado para o *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial;
- Observou-se que, independentemente da configuração do *squeeze-flow* utilizada, foi verificada uma tendência para as pastas de cimento, cal e *filler* calcário, ou seja, as pastas que tiveram maiores cargas em uma configuração também apresentaram maiores cargas na outra. Obviamente que se deve considerar a solicitação de cada configuração que proporciona magnitude de valores distintos, porém, os comportamentos reológicos das suspensões mantiveram-se coerentes para ambas as configurações;
- A captação de imagens fotográficas do ensaio *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial pode contribuir para verificar a influência da característica do substrato poroso nas linhas de fluxo, porém futuras pesquisas devem ser desenvolvidas nesta nessa área de conhecimento.

As duas configurações de ensaios utilizadas neste capítulo foram sensíveis para identificar a diferença dos substratos utilizados, base porosa com absorção de água da pasta e base metálica sem absorção.

O próximo passo, capítulo 4, foi utilizar estas duas configurações de *squeeze-flow* sobre as bases porosas caracterizadas no capítulo 2, sub_A e sub_B. A partir do uso dos dois substratos, ambos com efeito de sucção de água da pasta, é possível avaliar a aplicação das condições de contornos estudadas neste capítulo, bem como averiguar se elas podem identificar alterações do comportamento reológico das pastas devido a diferença físico-mecânica dos substratos.

4 SQUEEZE-FLOW SOBRE SUBSTRATOS POROSOS

4.1 INTRODUÇÃO

As características do substrato, principalmente rugosidade e sucção capilar, possuem um papel fundamental na adesão inicial da argamassa, a qual, por sua vez, governa a resistência de aderência final do revestimento. Contudo, o comportamento reológico da argamassa é tão importante quanto o substrato, tendo em vista que, tanto a adesão como a aderência dependem da interação entre estes dois materiais.

A partir do momento em que a argamassa entra em contato com o substrato sua estrutura é modificada, a principal causa das alterações instantâneas é a perda de água para a base. Sabe-se que a porosidade e o diâmetro dos poros influenciam nesta alteração da estrutura, assim como as condições do ambiente. Entretanto, não foram encontrados na literatura ensaios capazes de medir a alteração do comportamento reológico de argamassas de revestimento devido ao contato com a base.

Como ponto de partida para compreender o fenômeno da interação entre argamassa e substrato, optou-se por avaliar apenas a pasta de cimento e sua interação com substratos de diferentes porosidades. Desta forma, o **objetivo** do presente capítulo **é analisar a alteração do comportamento reológico de pasta cimentícia aplicada sobre substratos porosos a partir do *squeeze-flow***.

4.1.1 Etapas de interação da argamassa (ou pastas) com o substrato

A movimentação da água da argamassa devido à pressão capilar provocada pelo substrato é necessária para que ocorra a adesão na interface (VOSS, 1933). Entretanto, a perda de água da argamassa não é atribuída somente ao contato com o substrato.

A partir dos primeiros instantes após a mistura, a perda de água inicia-se por evaporação devido a condições do ambiente (DAVISON, 1961; DETRICHÉ; MASO, 1986; ANTUNES, 2005). Contudo, Davison (1961) analisou a influência da perda de água por

evaporação logo após a mistura e concluiu que até os 5 primeiros minutos esta perda pode ser negligenciada. As condições de ensaio utilizadas pelo autor foram: temperatura 21,11 °C; e umidade relativa de 50%.

Sugo (2000) e Antunes (2005) sintetizaram um modelo que apresenta 4 estágios de interações decorrentes do contato entre argamassa e substrato:

1. (segundos) Molhagem da superfície do substrato através do contato com a argamassa e início da sucção capilar;
2. (segundos → minutos) A possibilidade de transporte do material fino da argamassa e formação de uma camada na interface, a qual é decorrente do fluxo capilar. Este transporte é influenciado tanto pelas características do substrato como da argamassa;
3. (minutos → horas) Equilíbrio hidrostático. Isto acontece quando o potencial de sucção capilar entre argamassa e base aproximar-se de zero, ou seja, ocorre a redução dos poros capilares da argamassa através da perda de água para a base, e por evaporação, encerrando o fluxo entre argamassa e substrato. Além disso, pode ser observado melhoria do empacotamento, retração plástica e o término do período de indução;
4. (horas → dias → anos) Hidratação dos componentes cimentícios e, por conseguinte, a formação de uma nova fase coesiva na interface substrato/argamassa em toda extensão do revestimento. Outros fatores podem ser citados, tais como retração química e por secagem, formação de fissuras e carbonatação.

A Figura 4.1 apresenta um desenho esquemático relacionado aos estágios 1 e 2, sendo que nos primeiros instantes ocorre a molhagem do substrato pela água disponível na argamassa, posteriormente iniciando o fluxo capilar, que dependendo da força de sucção pode conduzir as partículas mais finas para o interior dos poros, ao mesmo tempo que inicia-se o processo de perda de água por evaporação.

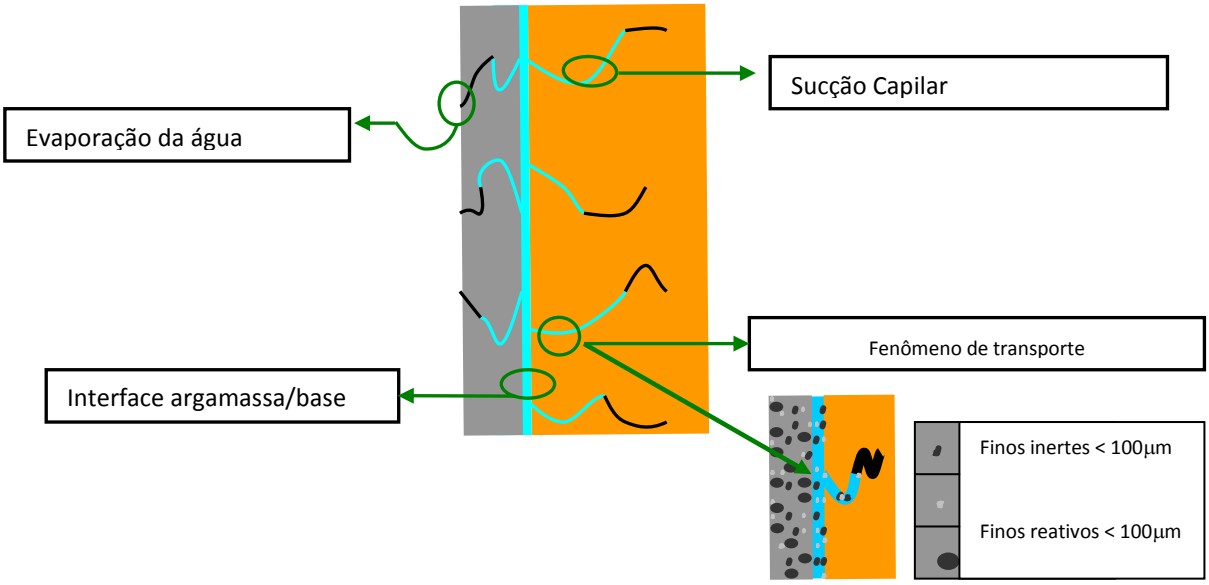


Figura 4.1 – Desenho esquemático das interações entre argamassa e substrato nos primeiros momentos de contato.

Neste capítulo apenas as etapas 1, 2 e o início da etapa 3 serão analisadas com o auxílio do *squeeze-flow*, assim como medidas de absorção de água da pasta para os dois substratos porosos, conforme descrito no procedimento experimental.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A avaliação da influência das características do substrato no comportamento reológico da suspensão cimentícia, em função do tempo, foi realizada utilizando duas configurações de ensaio do *squeeze-flow*, conforme o capítulo 3.

No presente capítulo foi utilizada apenas a suspensão cimentícia com 0,58 de relação água/cimento. Todos os ensaios foram realizados com condições de ambientes controladas, sendo 27 °C ± 2°C de temperatura e umidade relativa de 40% ± 5%.

Antes da utilização dos substratos foi realizado uma caracterização em relação a aspectos físicos e mecânicos, a qual está descrita no capítulo 2. A partir de tal caracterização foi possível comprovar a diferença entre os substratos, sendo classificados como substrato com alta porosidade (sub_A) e baixa porosidade (sub_B), os resultados da pasta sobre a base metálica não serão demonstrados neste capítulo, visto que os mesmos já foram apresentados no capítulo anterior.

Com intuito de obter a porcentagem de água absorvida da suspensão pelo substrato poroso foi utilizado um procedimento semelhante ao apresentado por Póvoas (1999), o qual foi executado paralelamente ao ensaio *squeeze-flow,* conforme descrito no item 4.2.3. É relevante ressaltar que todos os experimentos tiveram no mínimo 3 repetições.

4.2.1 Suspensão cimentícia

A pasta de cimento foi confeccionada com cimento CP II F – 32, de densidade igual 3,00 g/cm^3, o teor de água da pasta foi de 0,58. A distribuição granulométrica do cimento, assim como propriedades reológicas da pasta e o fluxo de calor liberado na hidratação encontram-se no capítulo 1.

4.2.2 Procedimento de mistura e aplicação

O cimento foi, através de uma calha vibratória, adicionado na água em um misturador com rotação de 900 rpm. Após 2 minutos e 30 segundos a rotação foi aumentada para 1500 rpm, sendo mantido nesta intensidade de mistura por mais 2 minutos e meio. Para garantir a eficiência de dispersão das partículas, a suspensão foi submetida a um dispersor com rotação de 9500 rpm por mais 2 minutos e 30 segundos.

A aplicação da pasta sobre os substratos foi realizada com o auxílio de um funil sobre um suporte metálico, desta forma, padronizou-se a altura de 8 cm para aplicação da pasta sobre os substratos.

4.2.3 Método de obtenção da absorção de água do substrato absorvente

O presente trabalho optou por realizar um método de absorção que pudesse ser diretamente correlacionado com o ensaio *squeeze-flow*.

Povoas (1999) elaborou um procedimento para medir a absorção de água do azulejo em contato com argamassa colante. Com base no procedimento elabora pela autora foi desenvolvido o procedimento de ensaio utilizado neste trabalho, o qual consistiu em medir a absorção de água da pasta pelo substrato absorvente após o ensaio de *squeeze-flow*.

Os tempos de medida foram 5, 10 e 20 minutos a fim de obter uma tendência de absorção em função do tempo.

Antes da aplicação da pasta, pesou-se a base obtendo a massa seca do substrato (M_{ss}), e ao término do ensaio *squeeze-flow*, a pasta foi retirada e o substrato pesado novamente, denominada de massa úmida (M_u). A M_u pode ser desmembrada em: massa seca do substrato; massa de água absorvida; e massa de partículas de cimento depositada na superfície.

A massa devido à deposição de partículas de cimento na superfície do substrato foi denominada de massa de cimento remanescente (M_{cr}). Para obtenção da M_{cr} o substrato permaneceu na estufa a 60 °C até obter massa constante, posteriormente o substrato foi pesado novamente para obter a massa do substrato seco após ensaio *squeeze-flow* (M_{se}). Através da subtração da M_{se} pela M_{ss} obteve-se a M_{cr}.

A temperatura de secagem foi de 60°C, a mesma temperatura utilizada na secagem das bases antes de serem submetidas ao ensaio *squeeze-flow*.

A massa de água absorvida (M_{aa}) referente apenas à água absorvida pelo substrato, a qual foi obtida a partir da seguinte equação:

$$M_{aa} = M_u - M_{ss} - M_{cr} \qquad \text{Equação (3.1)}$$

O cálculo da porcentagem de absorção de água para cada substrato levou em consideração o volume da amostra ensaiada (V = 45,60 cm^3), a densidade aparente da suspensão (δ_m = 1,71 g/cm^3), e a porcentagem de massa de água na amostra em função do volume ensaiado e da relação a/c de 0,58. Os valores detalhados encontram-se no APÊNDICE C e E.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Influência do substrato no ensaio de absorção de água

A Figura 4.2 apresenta a absorção de água da suspensão cimentícia para cada substrato. A absorção nos 5 primeiros minutos foi maior para o sub_A, contudo, aos 10 e 20 minutos o sub_B apresentou maior absorção de água em relação ao sub_A.

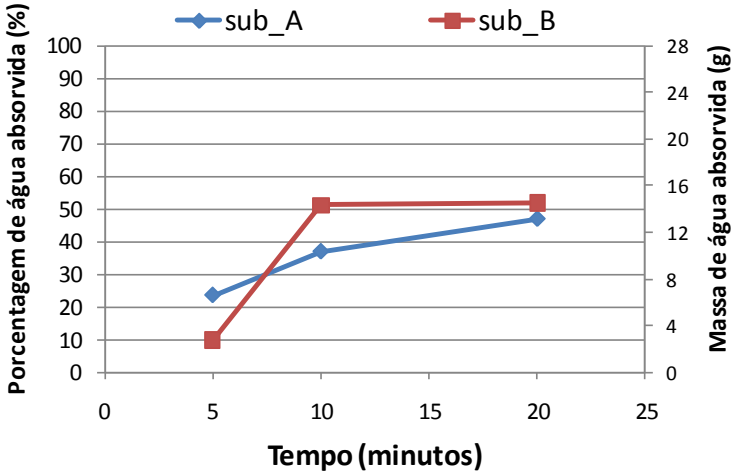


Figura 4.2 – Porcentagem de água absorvida e massa de água absorvida em função do tempo para os substratos A e B.

A maior absorção para o sub_A nos primeiros minutos pode ser atribuída ao fato do ângulo de contato ser igual a zero, para medidas com água, indicando maior facilidade de molhagem deste substrato, enquanto o ângulo de contato para o sub_B foi de 41,4°.

Contudo, este efeito de maior absorção para o sub_A é apenas inicial, pois o sub_B absorveu maior quantidade de água da pasta no decorrer do tempo. Tal fato pode ser atribuído a maior pressão capilar do sub_B, o qual possui coeficiente de capilaridade igual a 10,95 $g/dm^2.min^{1/2}$, em relação à 7,60 $g/dm^2. min^{1/2}$ para o sub_A,.

Esta maior absorção para o sub_B é verificado no período entre 5 e 10 minutos. A partir de 10 minutos ocorre estabilidade entre fluxo capilar da pasta e o substrato, praticamente encerrando a sucção do sub_B, prevalecendo perda de água por evaporação.

O aumento de absorção da água do sub_A é gradual, sendo que aos 20 minutos o resultado de absorção de água aproxima-se ao obtido para o sub_B. Todavia, não é possível afirmar que a absorção é máxima aos 20 minutos para o sub_A, pois seria necessário a realização de ensaios em tempos superiores a 20 minutos, a fim de verificar a estabilização da absorção.

O passo subseqüente foi analisar como a perda de água influenciou no comportamento reológico da pasta aplicada sobre ambos os substratos e ensaiados nas duas configurações do *squeeze-flow*, conforme os resultados seguintes.

4.3.2 Influência do substrato no comportamento reológico das pastas

Foram utilizadas as duas configurações testadas no capítulo 3, *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial e *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial.

Os resultados do *squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial ensaiados sobre o sub_A e sub_B encontram-se na figura 4.3. Observou-se que para os 5 primeiros minutos, Figura 4.3 (a), as cargas obtidas foram baixas e o comportamento para ambos os substratos foram semelhantes, ou seja pequenos valores de carga durante todo o deslocamento do punção, para penetração máxima do punção de 5 mm. O sub_B apresentou cargas superiores ao sub_A, sendo a carga final próxima de 0,35 N e 0,25 N, respectivamente.

As amostras ensaiadas aos 10 minutos sobre os sub_A e B tiveram comportamento muito distintos, figura 4.3 (b). Para o sub_A o tempo de 10 minutos de contato entre pasta e substrato proporcionou um aumento na carga final de 6,4 vezes em relação à carga final do ensaio realizado aos 5 minutos. Porém o perfil da curva foi semelhante, pequenas cargas para o deslocamento imposto. Tal fato significa que com o aumento do tempo de contato, mesmo a pasta perdendo água para o substrato, manteve-se fluida o bastante para deformar-se sem prover elevada resistência à penetração do punção. O contrário foi observado para o sub_B, cujo tempo de contato foi relevante para alterar o perfil da curva e enrijecer o fluxo da pasta à medida que esta foi comprimida.

O enrijecimento da pasta sobre o sub_B inicia-se entre 2,5 mm e 3 mm, quando ocorre alteração na inclinação da curva e a carga aumenta expressivamente, para pequena penetração do punção. Tal fato evidencia a influência da absorção do sub_B, que proporcionou um comportamento diferenciado com elevada resistência ao fluxo, devido ao maior potencial de sucção capilar.

Os ensaios realizados aos 20 minutos de contato pasta/substrato apresentaram elevadas cargas para ambos os substratos, Figura 4.3 (c). Contudo, o sub_A apresentou baixa resistência a penetração do punção até aproximadamente 2 mm. Entre 2 mm e 3 mm a curva começa mudar alterar a inclinação, o que indica a elevação da carga medida até entrar no estágio de enrijecimento para o deslocamento superior a 3 mm.

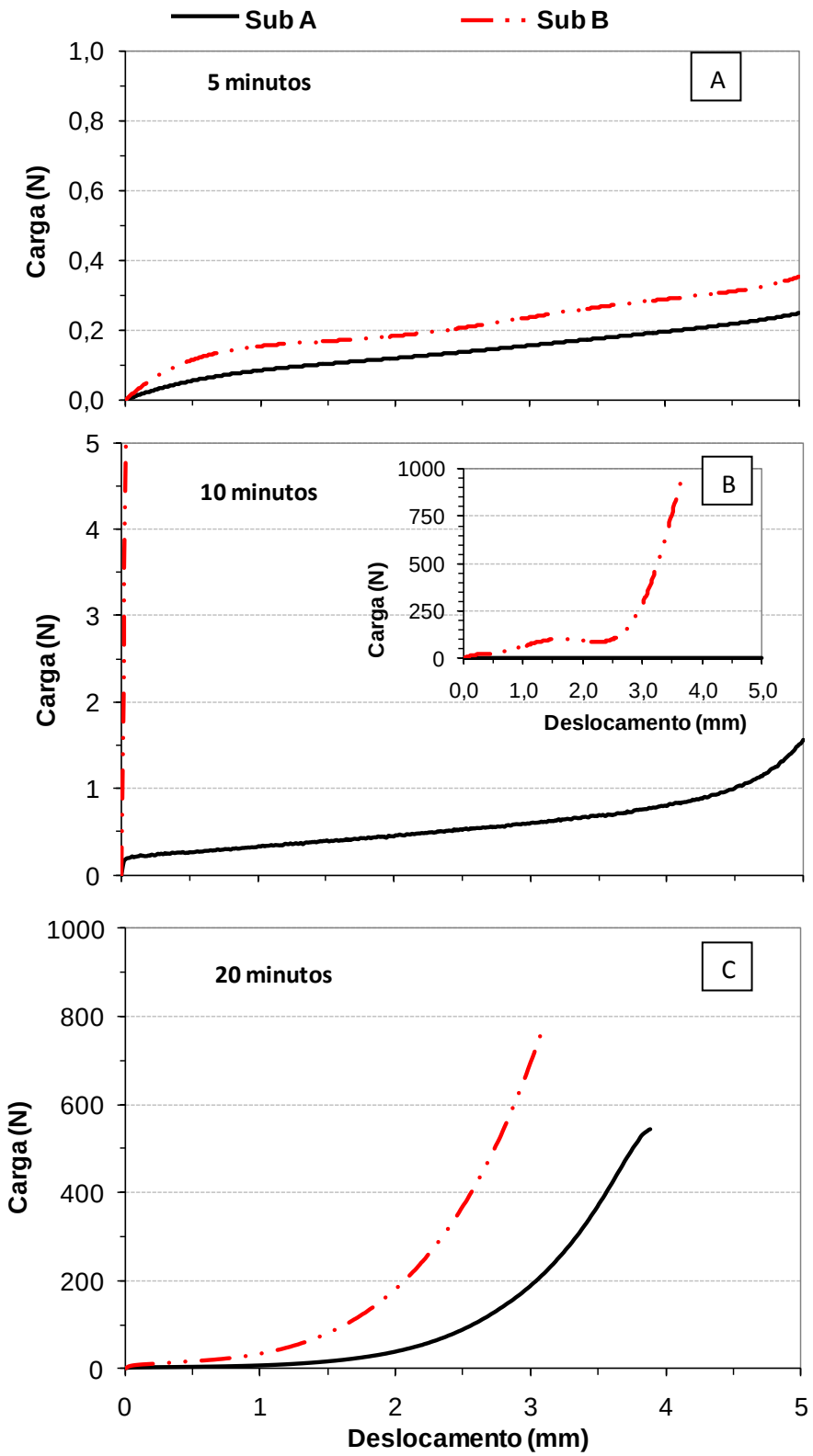


Figura 4.3 – *Squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial, carga (N) em função do deslocamento (mm) do punção para pasta de cimento aplicada sobre os substratos A e B (sub_A e sub_B): A) 5 minutos de contato entre pasta e substratos; B) 10 minutos de contato; C) 20 minutos de contato.

Para o sub_B, a pesar da massa de água absorvida ter aumentado apenas 0,16 g, entre o intervalo de 10 a 20 minutos, ocorreu uma antecipação do enrijecimento no fluxo, que, por sua vez, ocasionou diferença na deslocamento final do punção de 0,5 mm. Tal fato indica que a amostra teve maior dificuldade de fluxo com o aumento no tempo de espera, o que pode ser atribuído a perda por evaporação que continua retirando água da pasta.

Percebe-se, na Figura 4.3 (c), que a carga máxima obtida não foi à capacidade máxima da célula de carga, isto ocorreu porque a compressão imposta para penetração do punção na pasta sobre os substratos foram superiores à resistência dos materiais ocorrendo ruptura da base. Ao comparar os valores de resistência e porosidade (capítulo 2) com os valores de carga máxima obtida antes da ruptura dos substratos, observa-se que o sub_A em ambos os casos apresentou menor resistência e maior porosidade, o contrário foi verificado para o sub_B.

Ao analisar o deslocamento do punção na pasta em função da carga para os dois substratos, Figura 4.3 (c), é notório que a pasta ensaiada sobre o sub_A obteve menores cargas para a mesmo deslocamento do punção no sub_B, além de apresentar maior deslocamento. Ao correlacionar com os valores de absorção a diferença entre ambos foi inferior a 5% ou 1,36 g, sendo que o sub_B absorveu maior quantidade de água. Tal fato significa que a pasta sobre o sub_A, aos 20 minutos, possuiu maior facilidade de fluxo.

Na Figura 4.4 estão apresentados os resultados dos ensaios no *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial. A pasta de cimento aplicada sobre os substratos A e B obtiveram menores cargas nas amostras analisadas aos 5 minutos, sendo a carga final da pasta sobre o sub_A de aproximadamente 2,50 vezes maior que a carga final obtida no sub_B.

O deslocamento da placa superior sem estar em contato com as amostras (deslocamento livre) foi superior para a pasta sobre o sub_B, conforme Figura 4.5. Correlacionando com os valores de absorção, menor absorção para o sub_B aos 5 minutos, o que indica maior quantidade de água na suspensão cimentícia, pode-se atribuir o resultado de maior deslocamento livre devido ao fato da pasta apresentar maior escoamento com a retirada do anel.

Outro fator que pode corroborar para o maior escoamento lateral é a menor rugosidade da superfície do sub_B, conforme a Tabela 2.3 (capítulo 2) que apresenta o índice de rugosidade superficial.

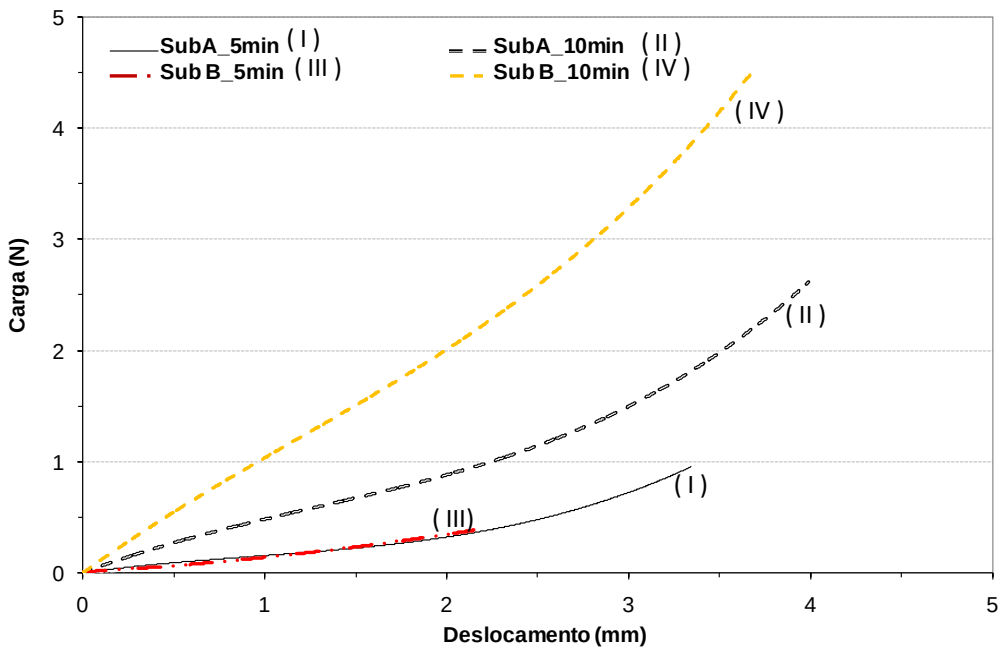


Figura 4.4 – *Squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, carga (N) em função do deslocamento (mm) do punção para pasta de cimento aplicada sobre os substratos A e B (sub_A e sub_B) para os tempos de contato de 5 e 10 minutos.

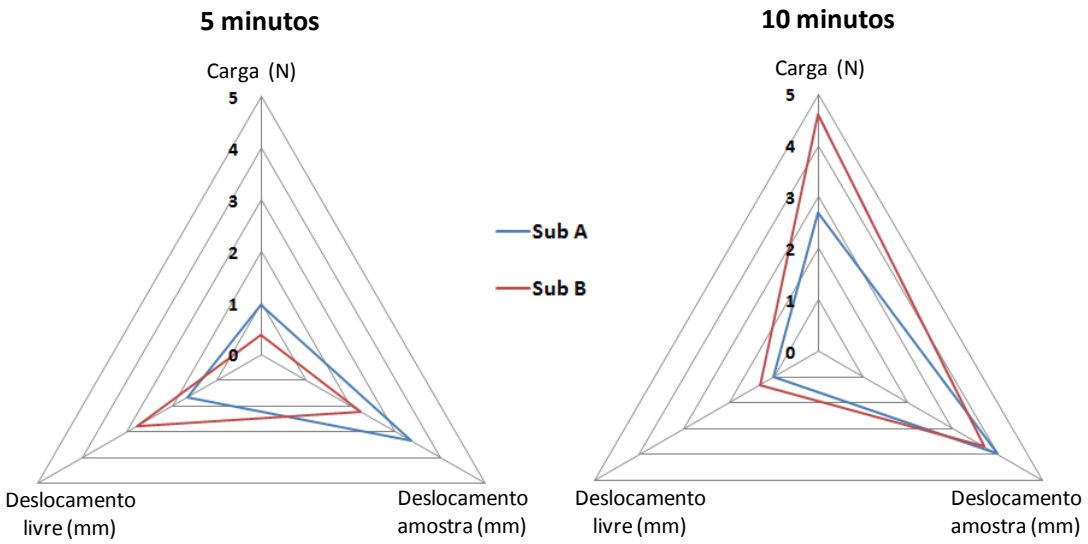


Figura 4.5 – Resultados do *squeeze-flow* sem confinamento do fluxo radial, nos tempos de 5 e 10 minutos sobre sub_A e sub_B para a pasta de cimento. A figura apresenta a carga final (N) do ensaio em função dos deslocamentos da placa superior: deslocamento livre; e deslocamento da placa em contato com a amostra.

Ao analisar o tempo de contato de 10 minutos, a suspensão cimentícia passou a apresentar maior dificuldade de fluxo, resultando em aumento nas cargas. Sobre o sub_B ocorre aqui uma inversão em relação ao tempo de 5 minutos, sendo maior a carga para o mesmo deslocamento em relação ao sub_A. Isto significa que, devido à maior pressão capilar

exercida pelos poros de menores diâmetros, o sub_B apresentou maior capacidade de retirar a água da pasta, proporcionando linhas de fluxo radial mais resistentes à compressão da placa superior, ocasionando então, um acréscimo na carga medida. A diferença em relação à carga final do sub_B para o sub_A, aos 10 minutos de ensaio, foi de 1,70 vezes.

O deslocamento livre da placa superior foi menor para o sub_A, o que indica que a pasta permaneceu maior tempo sobre compressão do que a pasta sobre sub_B. Tal fato pode ser novamente reportado ao ensaio de absorção, cuja perda de água foi mais expressiva para o sub_B, indicando uma redução no volume da amostra, e conseqüentemente, maior deslocamento livre.

Diante dos resultados pode-se dizer que o procedimento experimental adotado foi sensível à identificação da alteração do comportamento reológico da pasta cimentícia aplicada sobre substrato com distintas porosidades.

Em contrapartida, ensaios complementares, como quantificação de água evaporada em relação ao tempo e o efeito da temperatura e umidade relativa, poderiam ter agregado informações que auxiliariam nas discutições, principalmente em relação à alteração dos poros capilares da pasta em contato com o substrato.

O Apêndice D apresenta resultados dos ensaios de absorção e *squeeze-flow* sobre o sub_A e pasta cimentícia com 0,58 de relação água/cimento, submetidos a duas condições de temperatura e umidade relativa. Tais resultados não foram colocados neste capítulo pois não foi realizado um procedimento experimental focado na influência das condições do ambiente.

Ao correlacionar o fluxo capilar entre pasta e substrato com os modelos propostos por Détriché e Maso (1986) e por Gallegos (1995) para fluxo capilar entre argamassa e substrato, foi possível encontrar alguns pontos que convergência e divergência, os quais estão descritos na Tabela 4.1. Considerando conceitos dos modelos destes autores e os dados experimentais obtidos nesta pesquisa, foi elaborada uma hipótese que está descritas nas Figuras 4.6 e 4.7.

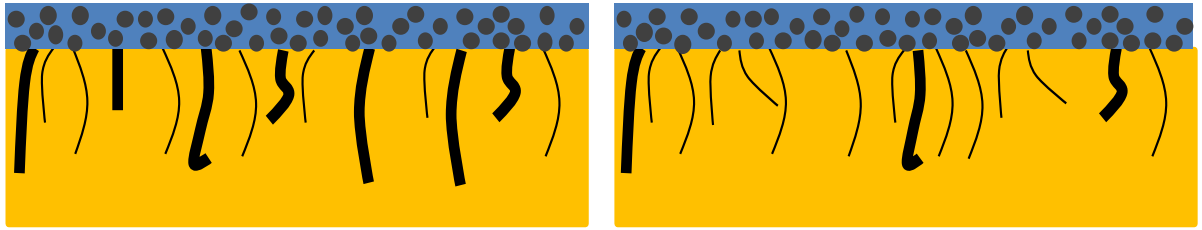
Tabela 4.1 – Modelos de fluxo capilar entre argamassa e substrato com a aplicação dos conceitos direcionados para interações entre pasta cimentícia e substrato.

Modelos de fluxo capilar entre argamassa e substrato		Détriché e Maso (1986) Interação de dois sistemas porosos	Gallegos (1995) Teoria dos poros ativos e inativos
		ra > *rs* → fluxo no sentido do substrato; perda de água da argamassa para o substrato diminui o *ra;* *ra* < *rs* → perda de água por evaporação;	Faixa de poros ativos responsável pela absorção da argamassa → 0,001 μm até 0,5 μm
Aplicação dos modelos para argamassa nos resultados com suspensões cimentícias	Com base nos resultados do coeficiente de capilaridade e de porosimetria por intrusão de mercúrio[1]	➔ O raio médio dos capilares da pasta são, no instante de contato t = 0, iguais sobre ambos os substrato; ➔ O raio médio para o sub_A é maior do que o do sub_B, esse, por sua vez, proporciona maior redução do raio médio da pasta; ➔ O sub_A possui menor potencial de sucção, e por conseguinte, maior tempo para reduzir o raio médio da pasta; ➔ Com a redução do raio médio da pasta, em relação ao raio médio dos substratos, a perda de água tende ocorrer predominantemente por evaporação;	➔ O sub_A possui menor potencial de sucção capilar que o sub_B; ➔ Ambos apresentaram raios médios dentro da faixa de poros ativos; ➔ O sub_B apresentou pequena freqüência de poros inativos (> 5 mm), enquanto o sub_A apresentou elevada freqüência deste poros;
	Comparação com os resultados do *squeeze-flow* aliada às medidas de absorção	➔ Nos primeiros minutos o sub_A, com menor sucção capilar apresentou maior absorção, enquanto o sub_B com maior potencial de sucção apresentou menor quantidade de água absorvida, estes resultados são contrários aos esperados por esta teoria. Contudo, a perda de água para os 5 primeiros minutos não alterou o comportamento reológico da pasta aplicada sobre os substratos; ➔ Com o aumento do intervalo de tempo, 10 minutos, pode-se verificar a tendência de maior sucção para o menor raio médio, sendo a pasta reologicamente alterada pela perda de água, apresentando dificuldade de fluxo e penetração do punção, com elevação na carga medida, devido ao enrijecimento da estrutura; ➔ Com 20 minutos foi possível observar o equilíbrio hidrostático para o sub_B, enquanto o sub_A ainda estava absorvendo água da pasta; ➔ Infelizmente medidas de perda de água por evaporação não foram realizadas, caso este procedimento tivesse sido executado seria possível estimar o raio médio da pasta em função da perda de água para o ambiente e para base.	➔ Nos primeiros 5 minutos o substrato com maior quantidade de poros ativos não obteve maior absorção, sendo o sub_A, maior quantidade de poros inativos, o qual apresentou maior absorção de água; ➔ Para os intervalos acima de 5 minutos a teria dos poros ativos pode ser correlacionada; ➔ Entretanto, é válido ressaltar que a quantidade de poros ativos para o sub_A também é expressiva, o que levaria a crer, de acordo com este modelo, que a sucção deveria ser mais semelhante entre ambos os substratos (conforme Figura 2.10).

[1] A porosidade obtida pela intrusão mercúrio é apenas comparativa, pois a pressão exercida na amostra ensaiada pode provocar ruptura de poros fechado inferiores 0,1 μm, conforme discutido no capítulo 2.

A

Primeiro instantes de contato

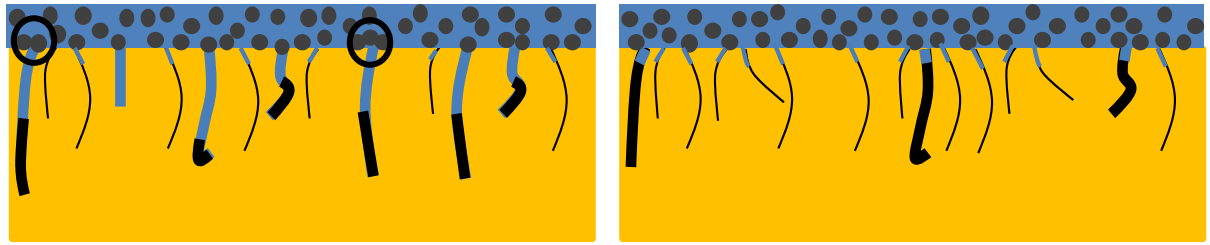


Sub_A sub_B

- ➔ Para ambos os substratos, no primeiro instante de contato, as partículas da pasta estão dispersas devido ao recente estado de agitação proporcionado pela mistura;
- ➔ Logo se inicia o processo de molhagem, o qual depende do ângulo de contato e das tensões superficiais entre sólido e líquido;
- ➔ A rugosidade do substrato e a viscosidade do líquido são importantes para que não ocorra histerese no ângulo de contato, diminuindo o potencial de sucção da base.

B

Entre 0 e 5 minutos



sub_A sub_B

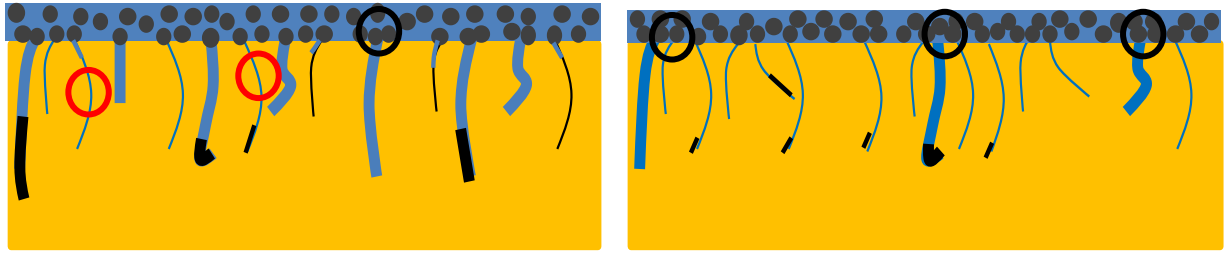
○ Partículas carregadas para interface dificultando o fluxo da água para o substrato

- ➔ O substrato com menor ângulo de contato (sub_A), mesmo possuindo menor sucção capilar, inicialmente absorve maior quantidade de água da pasta, carreando as partículas para a superfície do substrato, o que proporciona a formação de uma barreira que diminui a intensidade do fluxo no sentido da base. Considerando que nos primeiros minutos a perda por evaporação é pequena (DAVISON, 1961), a pasta apresenta facilidade de deformação, com pequena influência no comportamento reológico;
- ➔ Para o substrato que possui maior ângulo de contato (sub_B), a pasta apresenta maior dificuldade de penetrar nos poros, o que retarda a absorção inicial. Vencida essa barreira o fluxo pasta substrato inicia-se;

Figura 4.6 – Hipótese elaborada com base nos resultados experimentais e na revisão bibliográfica: a) primeiros instantes de contato; b) período de contato entre o instante inicial até 5 minutos;

A

Entre 5 e 10 minutos



sub_A sub_B

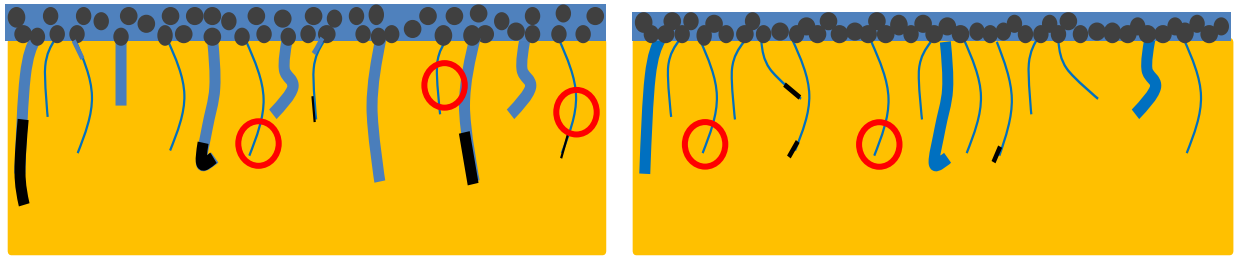
Partículas carregadas para interface dificultando o fluxo da água para o substrato

Preenchimento dos poros capilares

- ➔ Com o aumento no tempo de contato entre pasta e substrato, a força de sucção capilar exerce maior influência no substrato que possui maior coeficiente de capilaridade, assim como, o que não apresentou partículas carreadas para a interface, gerando um bloqueio parcial da sucção;
- ➔ Para o substrato parcialmente bloqueado (sub_A), a sucção é mais lenta, porém contínua, tal fato mantém a pasta com maior fluidez e menos resistente à deformação;
- ➔ Para o substrato com forte pressão capilar a água é succionada rapidamente (Sub B), transportando as partículas para a interface e gerando uma redução na altura da amostra, do ponto de vista reológico ocorre um enrijecimento elevado, dificultando o fluxo da pasta.

B

Entre 10 e 20 minutos



sub_A sub_B

- ➔ Redução na altura da pasta para ambos os substratos, devido à perda de água tanto por sucção como por evaporação;
- ➔ Indicativos de estabilidade hidrostática para o substrato com elevada absorção capilar;
- ➔ Quanto ao comportamento reológico, a base com menor sucção ainda possui maior facilidade de deslocamento, contudo ambas apresentam dificuldades no fluxo com o aumento do tempo.

Figura 4.7 – Hipótese elaborada com base nos resultados experimentais: a) período de contato entre 5 e 10 minutos; b) período de contato entre 10 e 20 minutos.

4.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- A metodologia de absorção de água da suspensão cimentícia pelo substrato poroso corroborou na identificação da influência dos fatores como: pressão capilar dos substratos e tempo de contato entre pasta e substrato;
- O fator tempo, 5, 10 e 20 minutos foi relevante para compreender o processo de absorção de água, e a diferença inerente a estrutura porosa do substrato;
- A utilização do *squeeze-flow* sobre substratos porosos foi fundamental para correlacionar com os efeitos de absorção e, compreender como a pasta se comporta à medida que sua estrutura vai enrijecendo;
- Os procedimentos utilizados possuem elevado potencial para aplicação de estudos relacionados ao tempo de consolidação da pasta, podendo ser realizado em diferentes tipos de substratos e diferentes pastas cimentícias;
- O estudo deve ser estendido para argamassas de revestimento, assim como outros fatores que influenciam na etapa de interação do substrato com a argamassa ou pasta no estado fresco, tais como: condições do ambiente; quantificação de água evaporada no período de contato; uso de aditivos; influência da distribuição granulométrica, entre outros.

A hipótese elaborada neste capítulo foi com base em uma pasta misturada com alta energia, o que propicia elevada dispersão das partículas, sem a presença de aglomerados e exsudação. Baixas energias de mistura podem alterar as linhas de fluxo devido a presença de aglomerados, bem como ocorrência à segregação destes aglomerados.

Desta forma, outros sistemas de mistura podem interferir no processo pelo qual ocorre a sucção do substrato. Pensando nisto, o próximo capítulo avalia a influência da intensidade de mistura no comportamento reológico da pasta aplicada sobre substratos porosos.

5 INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE MISTURA

5.1 INTRODUÇÃO

As argamassas são compostas por materiais finos de elevada área superficial, bem como areias mais graúdas, as quais possuem forças mássicas, tendência a sedimentação. Assim, a energia de mistura aplicada para dispersar totalmente o sistema deve ser capaz de quebrar as forças atrativas dos finos, causando desaglomeração, além de manter um fluxo que não permita a segregação de partículas grosseiras.

Desta forma, a intensidade de mistura deve ser tal que garanta a homogeneidade, porém seu efeito também depende do tempo de mistura, sendo que as duas condições de mistura representam a forma pela qual a argamassa foi cisalhada, histórico de cisalhamento e podem influenciam no comportamento reológico das argamassas após a mistura.

No contexto do presente trabalho, diferentes misturas podem proporcionar diferentes estruturas na pasta, que, por conseguinte, podem influenciar na perda de água por sucção capilar do substrato, alterando o comportamento reológico da pasta com o tempo.

Portanto, o **objetivo** do presente capítulo é **identificar a influência da energia de mistura no comportamento reológico da pasta em contato com os substratos porosos a partir do método *squeeze-flow*.**

5.1.1 Energia de Mistura

A mistura opera no sentido de reduzir ou eliminar a não–homogeneidade através da ação de uma força mecânica (YANG; JENNINGS, 1994).

Na molhagem, primeiro estágio de interação líquido-pó, ocorre à formação de película de água ao redor das partículas. Rapidamente, o líquido forma pequenos grânulos contidos na mistura, ou aglomerados, sendo esses compostos por líquido, sólido e ar. O processo de remoção dos aglomerados ocorre durante a mistura e o ar pode ser expulso com o choque entre partículas devido ao cisalhamento imposto. Quando o líquido ocupa os espaços entre as

partículas, envolvendo e separando, ocorre a coalescência da mistura (JÉZÉQUEL; COLLIN, 2007; CAZACLIU; ROQUET, 2009; HUNGER; BROUWERS, 2009).

Em relação à taxa de cisalhamento aplicada para diminuir a aglomeração de pastas cimentícias, Williams et al. (1999) apresentaram um estudos com diferentes métodos de mistura e taxas de cisalhamento, realizaram também medidas de viscosidade e área de histerese obtidos a partir do ensaio de fluxo com aceleração e desaceleração. Os autores concluíram que elevadas taxas de cisalhamento na mistura possibilita maior desaglomeração, menores viscosidade, bem como maior facilidade de fluxo. Yang e Jennings (1994) realizaram um trabalho semelhante, contudo eles acrescentaram o ensaio reológico com intuito de verificar a influência da mistura na consolidação e no tempo de hidratação. Os resultados indicam que baixas energias de mistura antecipam e aumentam os picos de tensão; sendo também prováveis causas de defeitos na microestrutura da pasta hidratada.

Ao pensar na pasta de cimento fresca como um sistema com poros capilares, conforme proposto por Détriché e Maso (1986), é levantada a seguinte hipótese: a energia de mistura altera a distribuição de poros capilares na pasta de cimento fresca e influencia na perda de água, seja para o ambiente seja para a base. Para verificar tal hipótese, foi elaborado um plano experimental o qual se encontra no item subseqüente.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesse capítulo serão utilizados os mesmos substratos do capítulo anterior, sendo duas energias de mistura. Os ensaios de absorção e squeeze-flow com confinamento do fluxo radial também foram realizados neste capítulo, conforme os procedimentos descritos nos capítulos anteriores. Para avaliar a perda de água independentemente da estrutura capilar do substrato, foram realizados testes de sucção denominados de ensaio de retenção de água. Ensaios de resistência de aderência foram realizados para a pasta em contato com os dois substratos e ambas as energias de mistura.

Na análise reológica da pasta, com 0,58 de relação água/cimento, foi medido o tempo de consolidação para as misturas, no reômetro rotacional através do ensaio oscilatório, conforme descritos no capítulo 1. Contudo o ensaio para este capítulo foi realizado até 120 minutos.

5.2.1 Procedimento de mistura e aplicação

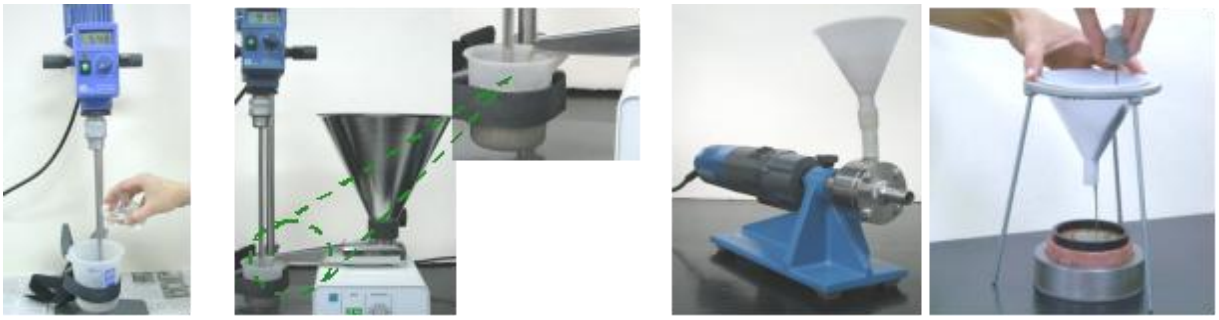
Antunes (2005) afirma que uma forma de melhorar a resistência de aderência à tração dos revestimentos é o domínio das propriedades do comportamento reológico de argamassas,

com formulações menos suscetíveis ao processo de aplicação em canteiros de obra. Outro ponto ressaltado pela autora é a necessidade de padronização da energia de impacto despendida no processo de aplicação do revestimento, a qual influenciou significativamente nos resultados obtidos para aderência à tração.

Tendo em vista estes dois fatores foram estabelecidos dois procedimentos de mistura para analisar o comportamento reológico da suspensão cimentícia. A aplicação da pasta foi padronizada. Assim, todas as amostras obtiveram mesma energia de impacto ao serem lançadas aos substratos.

As pastas foram misturadas segundo dois procedimentos: alta energia de mistura (AEM); e baixa energia de mistura (BEM). Na BEM, a água foi adicionada ao pó durante 1 minuto com rotação de 500 rpm, Figura 5.1 (a), na seqüência, aumentou-se a rotação para 900 rpm durante 3 minutos.

Na AEM foi adicionado o pó na água através de uma calha vibratória e misturador com rotação de 900rpm, Figura 5.1 (b), por 2 minutos e 30 segundos. Posteriormente, a rotação foi aumentada para 1500 rpm por mais 2 minutos e 30 segundos. Finalmente, com o uso de um dispersor a 9500 rpm, Figura 5.1 (c), a amostra foi submetida a altas taxas de dispersão durante 2 minutos e 30 segundos.



a) *b)* *c)* *d)*

Figura 5.1 – Procedimento de mistura e aplicação: a) baixa energia de mistura, rotação inicial de 500 rpm, água no pó; b) alta energia de mistura, rotação inicial de 900 rpm, pó na água; c) dispersor utilizado no procedimento de AEM; d) aplicação da pasta sobre o substrato absorvente.

Devido à dificuldade de padronizar a energia de impacto, a qual é despendida pelo pedreiro na aplicação do revestimento, e de analisar sua influência na aderência alguns pesquisadores aplicaram o conceito de *controle de energia de impacto por altura de queda livre* (CARASEK, 1996; PAES, 2004; e ANTUNES, 2005). Com energia de impacto constante é

possível avaliar sua influência na adesão inicial e na aderência, diminuindo sensivelmente o empirismo do processo de aplicação. Por esta razão, na aplicação da pasta sobre o substrato absorvente utilizou-se um suporte com funil localizado a distância de 8 cm do substrato, garantindo assim, que todas as amostras de pastas fossem aplicadas com mesma energia de lançamento, Figura 5.1 (d).

5.2.2 Ensaio de retenção de água

As amostras misturadas através dos procedimentos descritos acima foram submetidas a diferentes pressões de sucção a fim de analisar a influência da mistura na perda de água da pasta. Para o procedimento de filtragem foram utilizados dois papeis filtros: um de filtragem lenta e outro de filtragem rápida. As pressões utilizadas foram 0,07 Bar, 0,13 Bar e 0,2 Bar. Entretanto, os resultados serão apresentados em relação à coluna de mercúrio, sendo então 50 mmHg, 100 mmHg e 150 mmHg, respectivamente.

A pasta com 150 g foi adicionada ao recipiente com o papel filtro, o qual estava conectado a uma bomba a vácuo e a um recipiente para recebimento da água succionada. Esse recipiente estava posicionado sobre uma balança, a qual, por sua vez, estava conectada a um computador. Desta forma, à medida que a balança pesava a massa de água succionada, o resultado estava sendo processado e armazenado. Foram realizadas três repetições para cada amostra. O papel filtro foi previamente umedecido antes do início de cada ensaio, e a bomba a vácuo foi ligada por 30 segundos para retirar o excesso de umidade do papel filtro. A temperatura de ensaio e umidade relativa foram as mesmas utilizadas no capítulo anterior, 27°C e 40%. Na figura 5.2 encontra-se fotos do ensaio de retenção de água da pasta.

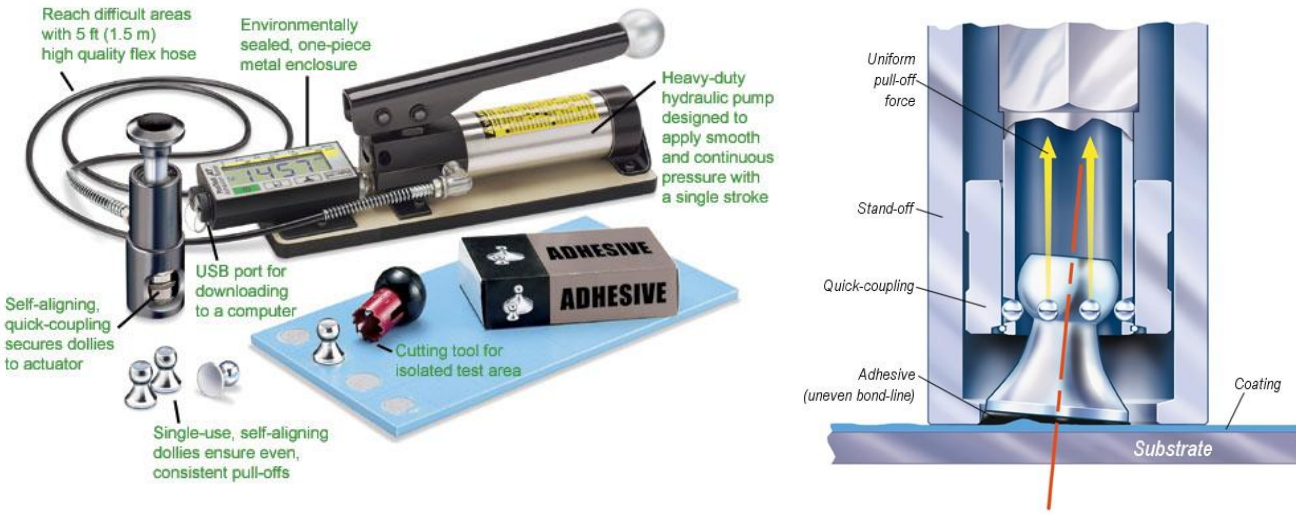
a) b)

Figura 5.2 – Ensaio de retenção de água para obter a porcentagem de sucção em relação ao método de mistura utilizado: a) bomba, funil com filtro e computador; b) balança conectada ao computador e recipiente coletor de água sob vácuo.

5.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com o equipamento *PosiTest Adhesion Teste*, Figura 5.3 (a). O teste é realizado através de pressão hidráulica, o qual promove o arrancamento da peça colada na superfície ensaiada. A vantagem desse equipamento é possibilidade de transferência uniforme da força de tração sobre a superfície testada, figura 5.3 (b).

A peça metálica foi colada à superfície da pasta em contato com o substrato. Para obter o diâmetro da pasta igual ao mesmo diâmetro da peça metálica para o arrancamento, a área a ser testada foi isolada com uma ferramenta de corte ainda no estado fresco. As amostras permaneceram por 28 dias em uma câmera climática com temperatura de 23°C ± 2°C e umidade relativa superior a 80 %.



a) b)

Figura 5.3 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência de aderência à tração: a) equipamento e acessórios; b) força uniformemente transferida para a superfície de arrancamento.

Foram realizadas 6 medidas de resistência de aderência à tração para cada conjunto (pasta AEM + sub_A; pasta AEM + sub_B; pasta BEM + sub_A; pasta BEM + sub_B), mas apenas 4 resultados foram validados, sendo excluídos dois valores de cada conjunto o menor e o maior valor.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Efeito da mistura na retenção de água

Na Figura 5.4 encontram-se os resultados de porcentagem de água absorvida para papel filtro de rápida filtragem e lenta, sendo três níveis de pressão, que em coluna de mercúrio representam 50 mmHg, 100 mmHg e 150 mmHg. Estas condições de ensaios foram realizadas para as duas intensidades de mistura estudadas.

O papel filtro de filtragem rápida, independente da pressão aplicada, proporcionou maior porcentagem de água retirada da pasta, o contrário foi verificado para o papel filtro de lenta filtragem, sendo que para ambos os papéis, a menor pressão a vácuo aplicada apresentou maior tempo para a retirada da massa de água da pasta, aproximadamente 2 minutos. Isso enquanto as maiores pressões retiraram toda a quantidade de água possível em aproximadamente 1 minuto.

Relacionando a perda de água com a energia de mistura percebe-se a seguinte tendência:

- A pasta com AEM perde menor quantidade de água do que a pasta com BEM, independente do papel filtro utilizado, exceto em um sistema – papel de lenta filtragem com coluna de mercúrio igual a 50 mmHg – cujas duas misturas apresentaram resultados semelhantes;
- Para filtragem lenta e pasta misturada em AEM, com o aumento da pressão de 100 mmHg para 150 mmHg, apresentaram-se curvas de porcentagens de água succionada muito parecidas, exceto no inicio da entre 0 e 1 minuto, no qual a maior pressão proporcionou maior taxa de retirada de água;
- A BEM perdeu maior quantidade de água na filtragem rápida, porém em ambos os papeis filtros ela tendeu a apresentar maior porcentagem de água retirada por sucção.

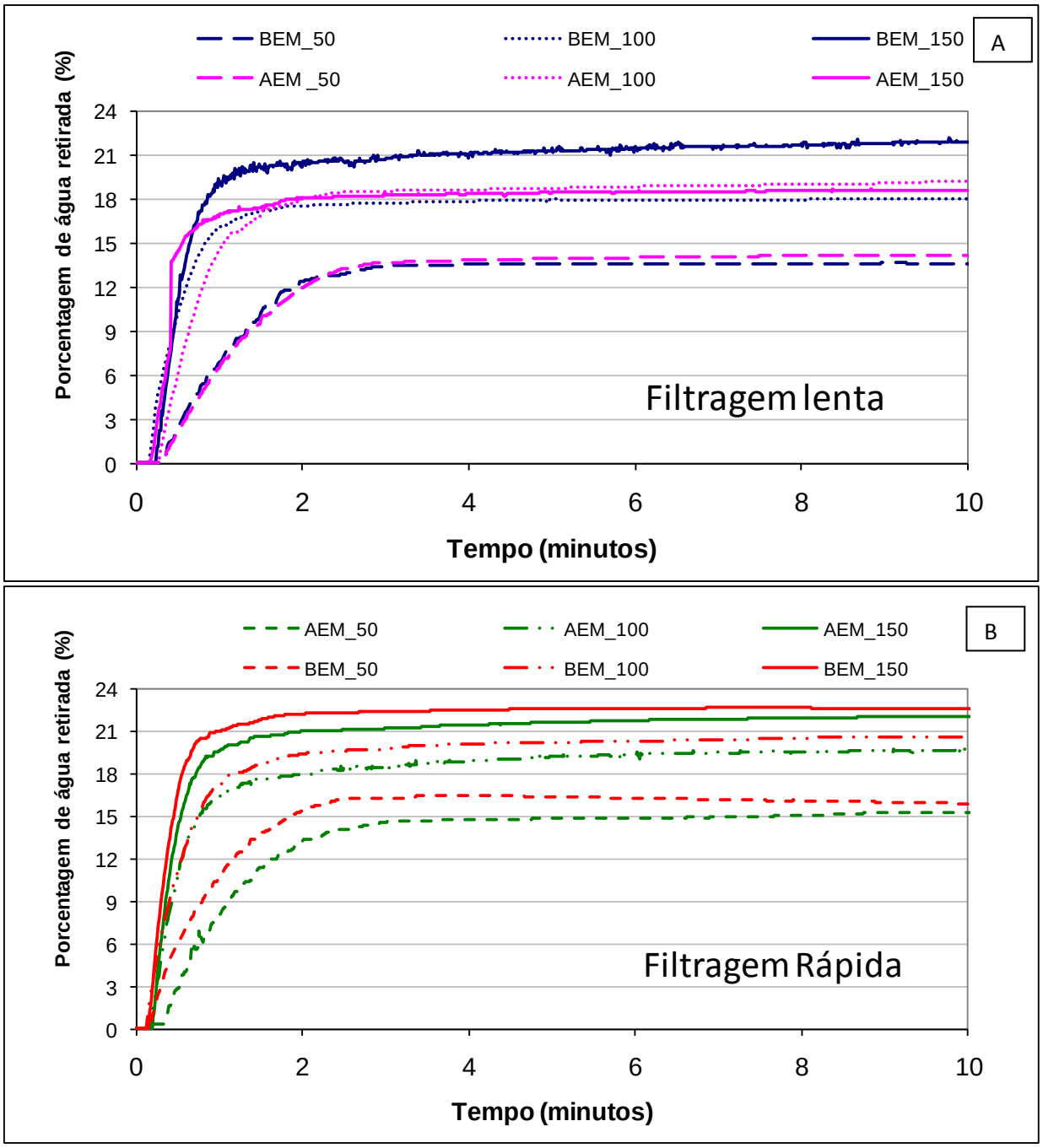


Figura 5.4 – Resultado do ensaio de retenção de água para a porcentagem de água retirada pela sucção a vácuo em função do tempo, para os dois procedimentos de mistura e coluna, e pressão controladas, três níveis de coluna de mercúrio 50 mmHg, 100 mmHg e 150 mmHg: a) papel de lenta filtragem; b) papel de rápida filtragem.

Com base nestes resultados, pode-se dizer que o sistema menos disperso pode perder maior quantidade de água quando submetido à sucção dentro das faixas de pressão ensaiadas.

O tempo de duração do ensaio foi de 20 minutos, porém a partir de 4 minutos a quantidade de água succionada praticamente não aumentou.

5.3.2 Efeito da mistura: ensaio de absorção de água dos substratos

A Figura 5.5 apresenta a perda de água em porcentagem (eixo y principal) e em gramas (eixo y secundário) em função do tempo para as duas energias de mistura. Observa-se que a BEM proporcionou maior perda de água nos primeiros 5 minutos independente do tipo de substrato.

A pasta com BEM aplicada sobre o sub_A perdeu maior quantidade de água do que a pasta com AEM aplicada sobre o mesmo substrato. Ligando os pontos de medida do ensaio é possível observar uma tendência na curva de absorção para o sub_A em relação aos dois procedimentos de mistura. Desta forma, o substrato com menor coeficiente de capilaridade (sub_A) absorveu maior quantidade de água nos primeiro minutos, com aumento do tempo a absorção foi gradual.

Para o sub_B, a pasta com BEM proporcionou maior quantidade de água succionada aos 5 minutos de ensaio em relação a pasta com AEM. Tal fato indica que a estrutura da pasta submetida a BEM facilita a perda de água para o substrato. Este resultado também foi verificado para o ensaio de retenção de água no item anterior.

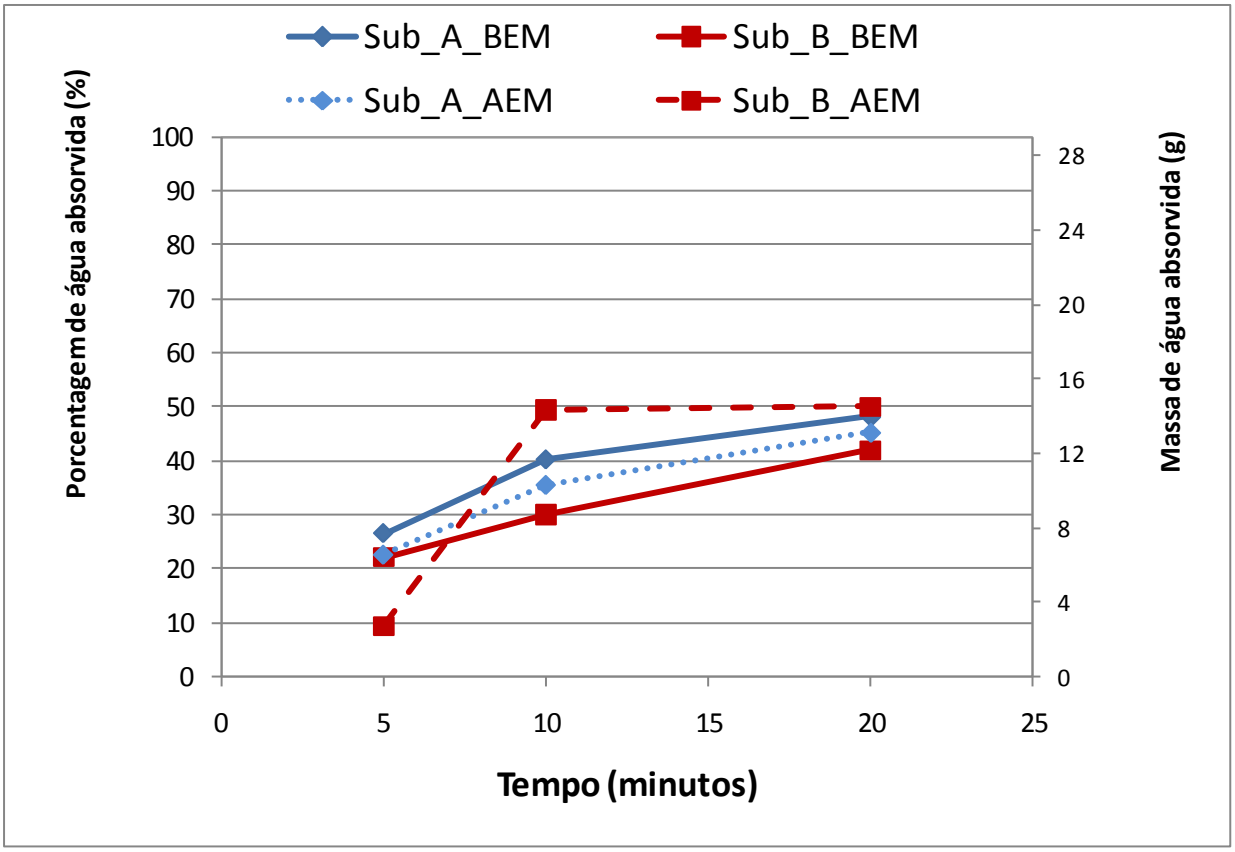


Figura 5.5 – Porcentagem de água absorvida e massa de água absorvida em função do tempo, para os substratos A e B: linha cheia representa as pastas misturadas com baixa energia (BEM); e linha pontilhada representa as pastas com alta energia de mistura (AEM).

5.3.3 Efeito da mistura: ensaio squeeze-flow

Com 5 minutos de contato entre pasta e substrato, Figura 5.6 (a), a energia de mistura pouco influenciou, sendo observado um pequeno aumento de carga para as pasta com BEM aplicada sobre os dois substratos, contudo as cargas foram muito semelhantes para ambas as misturas.

Para a BEM, o sub_A succionou maior quantidade de água do que o sub_B. No squeeze-flow podem ser observado maiores cargas para a pasta sobre sub_A, apresentando enrijecimento com aproximadamente 3 cm, no ensaio realizado com 10 minutos, Figura 5.6 (b). Essa mesma pasta sobre o sub_B começa a apresentar enrijecimento quando o punção atinge o deslocamento máximo de 5 mm.

Aos 20 minutos, a BEM aplicada sobre o sub_B apresenta maior facilidade de fluxo do que a pasta com AEM aplicada sobre o mesmo substrato. Tal fato pode ser explicado pela quantidade de água perdida aos 5 primeiros minutos, a qual carrega partículas para interface bloqueando parceladamente a sucção.

Se comparar a curva sub_B_BEM e sub_A AEM, e sabendo que a quantidade de água absorvida para o sub_B_BEM foi menor do que para o sub_A_AEM, e que a rugosidade do sub_B é menor do que a do sub_A, era de se esperar que o primeiro (sub_B_BEM) tivesse maior facilidade de fluxo do que o segundo (sub_AAEM). Contudo, o sub_B_BEM apresentou-se mais resistência ao fluxo, tanto para o ensaio com 10 e 20 minutos. Uma explicação pode ser em relação à evaporação de água, cuja amostra com BEM pode perder mais água para o ambiente do que a amostra com AEM. Infelizmente, tal fato não pode ser comprovado devido ao fato de não ter sido realizado medições para quantificar a perda de água por evaporação.

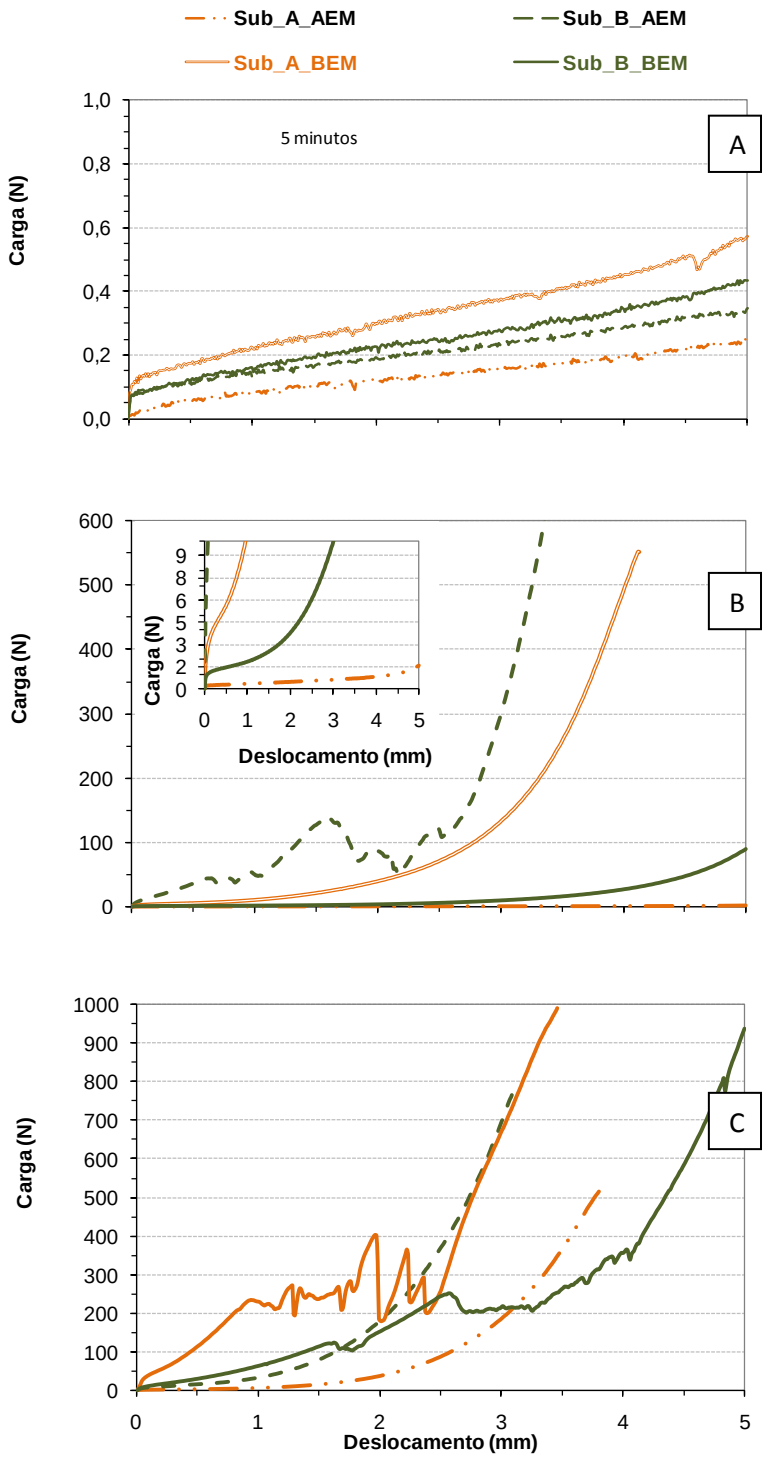


Figura 5.6 – *Squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial, carga (N) em função do deslocamento (mm) do punção. Pasta de cimento com AEM e BEM, aplicada sobre os substratos A e B (sub_A e sub_B): A) 5 minutos de contato entre pasta e substratos; B) 10 minutos de contato; C) 20 minutos de contato.

5.3.4 Efeito da mistura: comportamento reológico

O ensaio de fluxo com a variação da taxa de cisalhamento de aceleração (0 s^{-1} a 150 s^{-1}) e desaceleração (150 s^{-1}a 0 s^{-1}) em função da tensão de cisalhamento foi realizada para a pasta com 0,58 de relação água/cimento sob duas condições de mistura, AEM e BEM, ver Figura 5.7 (a) . Pode-se observar que a baixa energia de mistura proporcionou área de histerese em relação ao fluxo ascendente e descendente. Isto ocorre provavelmente porque à medida que se eleva a taxa cisalhamento os aglomerados vão se rompendo, quando a taxa de cisalhamento decresce os aglomerados já foram destruídos e a tensão de cisalhante, por conseguinte, também diminui.

Ao observar o resultado de fluxo para a pasta com AEM percebe-se que a curva resultante da taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento é praticamente constante tanto na aceleração quanto na desaceleração do fluxo.

Na Figura 5.7 (b) é possível observar a consolidação das pastas com AEM e BEM em função do tempo. A pasta com BEM apresenta valores do módulo elástico e viscoso superior em relação a pasta com AEM, mas com o decorrer do tempo, estes valores tendem a aproximar. Isto indica que a baixa energia de mistura antecipa a consolidação da estrutura, assim como apresenta maior rigidez.

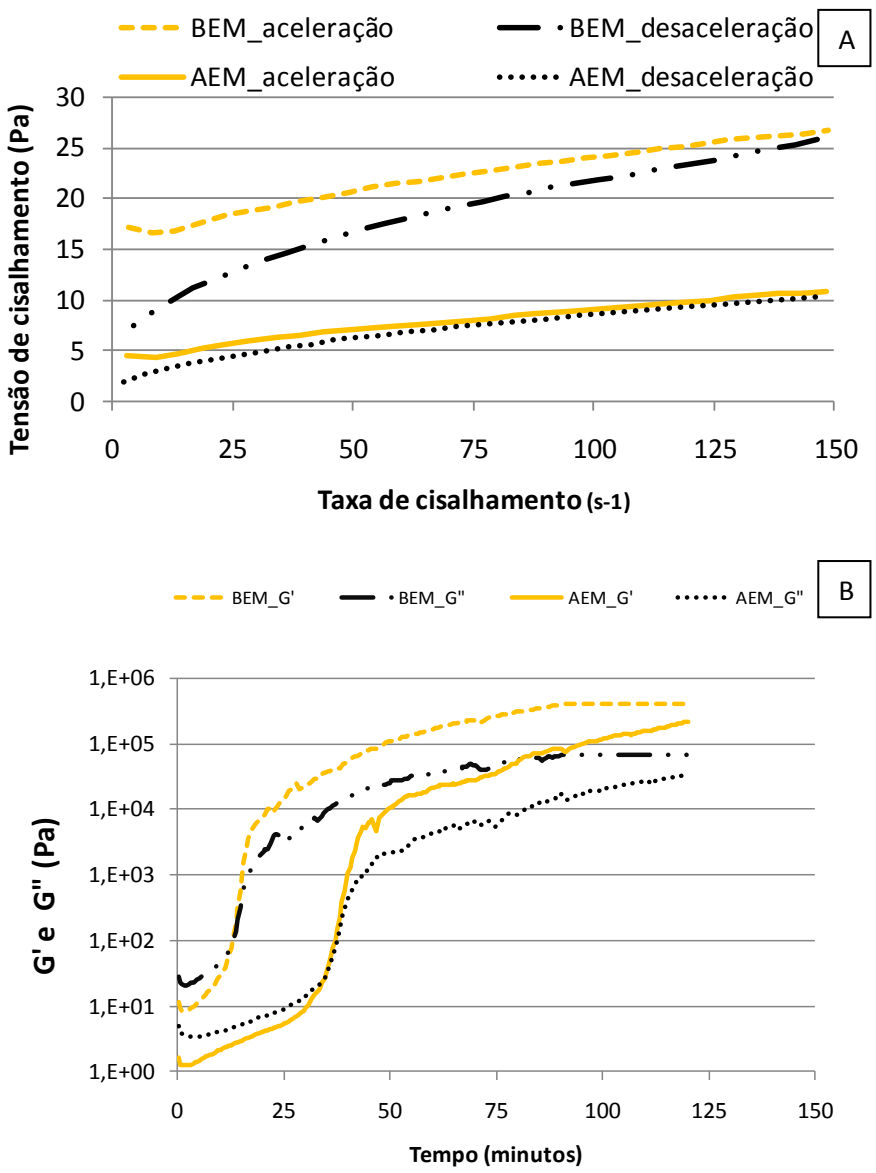


Figura 5.7 – Ensaios reológicos para a pasta com 0,58 de relação água/cimento misturadas com AEM e BEM; A) ensaio de fluxo – taxa de cisalhamento com aceleração e desaceleração em função da tensão de cisalhamento; B) Ensaio oscilatório com freqüência de 1 Hz e deformação 1E-4, resultado do módulo elástico (G') e viscoso (G") em função do tempo (minutos).

5.3.5 Efeito da mistura: resistência de aderência à tração

Na Figura 5.8 encontram-se os valores de resistência de aderência para as pastas com AEM e BEM aplicadas sobre os sub_A e sub_B. A reta vertical preta sobre cada conjunto de dados indica o valor máximo e mínimo de resistência de aderência à tração para cada valor médio apresentado. Na tabela 5.1 estão apresentados os valores das resistências de aderência à tração para cada amostra ensaiada, as médias, desvio padrão e o coeficiente de variação.

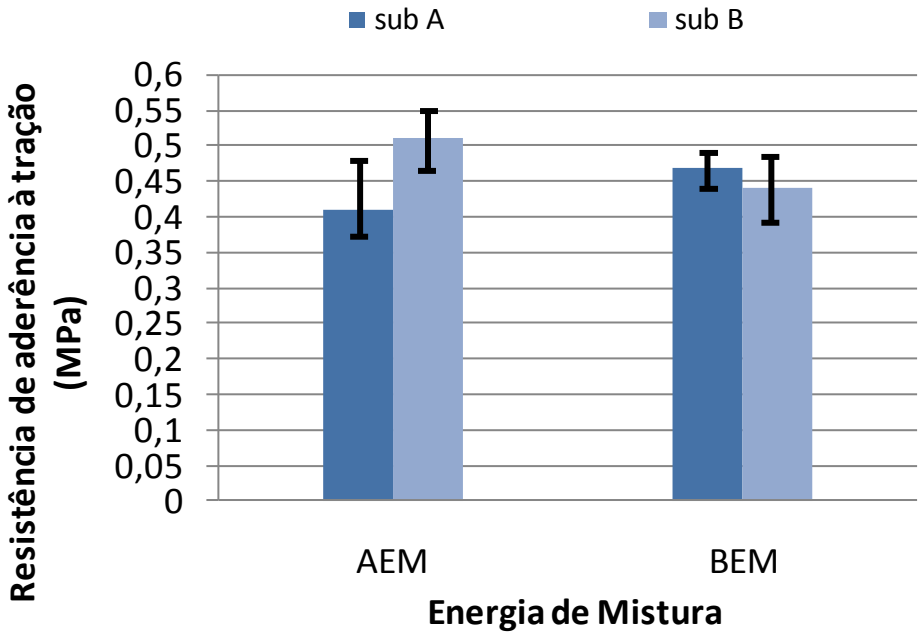


Figura 5.8 – Ensaios de resistência de aderência para a pasta misturada com AEM e BEM, aplicada sobre sub_A e sub_B. A reta preda localizada sobre o centro de cada conjunto de resultados indica o maior e o menor valor de aderência obtido para o grupo.

Estes resultados são apenas ilustrativos, tendo em vista o pequeno número de repetição, mais ensaios deveriam ter sido realizados, assim como uma análise da interface, para poder correlacionar os resultados no estado fresco e no estado endurecido. Contudo, o foco do presente trabalho foi os estudos no estado fresco.

Tabela 5.1 – Resultados de resistência de aderência para as pastas com AEM e BEM sobre os sub_A e sub_B

Resistência de aderência à tração					
Mistura	**Substrato**	**MPa**	**Média (MPa)**	**Desvio Padrão**	**Coef. Variação**
AEM	*sub A*	0,48	0,41	0,05	12,10
		0,42			
		0,37			
		0,38			
	sub B	0,46	0,51	0,04	7,54
		0,51			
		0,53			
		0,55			
BEM	*sub A*	0,44	0,46	0,02	4,79
		0,45			
		0,47			
		0,49			
	Sub B	0,38	0,44	0,05	10,33
		0,43			
		0,47			
		0,48			

5.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

- As duas energias de mistura aplicadas neste capítulo resultaram em propriedades reológicas distintas que puderam ser observadas nos demais ensaios no estado fresco;
- O ensaio de retenção de água foi capaz de distinguir a diferença de água succionada em relação à energia de mistura utilizada na pasta ensaiada;
- Relacionando os resultados de BEM com AEM sobres os dois substrato com a hipótese gerada no capitulo anterior, percebe-se que as amostras que apresentaram maior sucção inicial, valor superior a 20% da água total da pasta, tendem a desacelerar a intensidade de absorção no decorrer do tempo, o que reforça a hipótese de bloqueio ou entupimento parcial dos poros, fenômeno que ocorre devido ao transporte de partículas para interface.

- Em relação à hipótese sugerida no início deste capítulo com base na teoria de Détriché e Maso (1985) – "*a energia de mistura altera a distribuição de poros capilares na pasta de cimento fresca e influencia na perda de água, seja para o ambiente seja para a base*" –, a partir dos ensaios realizados pode-se concluir que a energia de mistura influencia na quantidade de água absorvida. Em relação à evaporação, o ensaio squeeze-flow indica que as pastas com BEM e menores quantidade de água perdida para o substrato apresentaram maior resistência ao deslocamento do punção, o que pode ser um indício de maior perda de água por evaporação. Mas para afirmar tal fato seria necessário realizar medidas quantitativas de perda de água por evaporação.

6 CONCLUSÕES

A determinação de características dos materiais empregados na pasta, assim como o seu comportamento reológico é o primeiro passo a ser dado na busca de entender como a pasta pode ser reologicamente alterada devido ao contato com substratos porosos.

A caracterização das pastas de cal hidratada, *filler* calcário e pasta de cimento contribuíram para compreender e solidificar os conceitos vistos no capítulo 1. Além disso, essas pastas foram aplicadas sobre substrato poroso no capítulo 3, o que corroborou na análise dos resultados obtidos através das adequações de configurações realizadas para o *squeeze-flow*.

Mapear as características físicas e mecânicas dos substratos porosos é o segundo passo a ser executado, na tentativa de compreender como a estrutura do sólido pode atuar quando em contato com pastas cimentícias.

A adequação das duas configurações do *squeeze-flow* demonstrou serem capazes de identificar alterações na estrutura da pasta devido à interação com o substrato, seja base metálica ou absorvente. O procedimento adotado mostrou-se sensível a aplicação de diferentes pastas, tal fato pode possibilitar o uso da técnica para outros processos de interação entre líquido e bases porosas.

Com a definição das configurações do *squeeze-flow,* com e sem confinamento do fluxo radial, foi possível comparar o uso de dois distintos substratos porosos. Esta técnica pode ser empregada para vários substratos e o seu uso, a partir de estudos prévios, pode ser estendido para argamassas de revestimento. Deste modo, num futuro próximo será possível controlar o a consolidação da argamassa, na tentativa de elevar a produtividade, aumentar a durabilidade e evitar fissuras no estado fresco das argamassas de revestimentos.

O método utilizado para quantificar a absorção de água da pasta foi de suma importância para relacionar com os resultados obtidos no *squeeze-flow.* No capítulo 4, foi elaborada uma hipótese com base nos resultados e na tentativa de descrever o processo de interação entre pasta e substrato, sendo descritas em 4 estágios distintos, para o período de 0 a 20 minutos.

Os dois substratos porosos utilizados nesta pesquisa possuem características distintas, porém, dependendo do comportamento da pasta sobre eles aplicadas, além de condições de temperatura e umidade, resultaram em absorção de água da pasta semelhante para ambas as bases. Por outro lado, estas pastas dependem principalmente da condição de dispersão das partículas e a interação com o substrato nos primeiros minutos de contato.

Visto que as pastas que perderam maior quantidade de água aos 5 primeiros minutos, porcentagem de água absorvida pelo substrato superior a 20% da massa total de água da pasta, pode ocorrer o transporte de material particulados para a interface, o que reduz a absorção nos períodos de tempos seguintes.

A baixa energia de mistura pode ter apresentado maior de perda de água por evaporação. Considerando que a porcentagem de água da pasta com BEM absorvida pelo sub_B foi semelhante à pasta com alta energia de mistura aplicada no sub_A, a pesar desta semelhança, o resultado das cargas no *squeeze-flow* foram superiores para a pasta com BEM, isto pode ser um indicativo de enrijecimento por perda de água para o ambiente. Em contrapartida, pode ser apenas aglomerados dificultado o fluxo da pasta e aumentando a resistência ao deslocamento do punção. Por esta razão à perda de água por evaporação deve ser acrescida aos ensaios de absorção e *squeeze-flow*.

O método de retenção de água foi importante para relacionar a energia de mistura com a perda de água inicial devido sucção da bomba a vácuo, a única relação obtida com o ensaio de absorção é que pastas com baixa energia de mistura, de forma geral, perdem maior quantidade de água em curtos períodos de tempo, quando comparada com pastas com alta energia de mistura.

O presente trabalho pode ser estendido para outras variáveis que busquem a compreensão de como ocorre o fenômeno de interação entre substrato e argamassa, e sua influência na consolidação da argamassa, na microestrutura formada no estado endurecido, a qual por sua vez, influencia na resistência de aderência.

Sugestões para trabalhos futuros:

1. Avaliar a utilização das duas configurações do squeeze-flow para argamassa de revestimento;

2. Estudar a influência de substratos com diferentes porosidades na alteração do comportamento reológico de pastas e argamassas;
3. Estudo do efeito da temperatura e umidade relativa na alteração do comportamento reológico de pastas e argamassas aplicadas sobre substratos porosos;
4. Influência dos aditivos incorporadores de ar no comportamento reológico de pastas e argamassas aplicadas sobre substratos porosos;
5. Estudo do efeito de aditivos retentores de água no comportamento reológico de pastas e argamassas em contado com substratos poroso;
6. Influência da distribuição granulométrica no comportamento reológico de pastas e argamassas em contato com substratos porosos;
7. Mapeamento de propriedades que influenciam no tempo de consolidação de argamassas de revestimento;
8. Estudo das interações entre argamassa e substrato no estado fresco e a influência na microestrutura no estado endurecido;
9. Avaliar as relações entre resistência de aderência dos revestimentos com os fenômenos de interação entre substrato e argamassa no estado fresco.

7 REFERÊNCIAS

ADAMS, M. J.; BISWAS, S. K.; BRISCOE, B. J.; KAMYAB, M. The effects interface constraints on the deformation of pastes. Power Technology, 65 (1991), p. 381-392.

ADAMS, M. J.; EDMONDSON, B.; CAUGHEY, D. G.; YAHYA, R. An experimental and theoretical study of squeeze-film deformaition and flow of elastoplastic fluids. Journal of Non-Newtnian Fluid Mechanics, 39 (1994), p. 119-136.

AÏTCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. Copyright Editora Pini LTDA, 2000, São Paulo, p. 106-132.

AGOPYAN, A. K.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.; CARBONE, C. Análise reológica de pastas para revestimentos à base de gesso por squeeze-flow. VISBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis, Brasil, p.144-157.

ANTUNES, R. P.N. Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimento de argamassa. Escola Politécnica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2005, São Paulo, 247p.

ANTUNES, R. P. N; JOHN,V.; PILEGGI, R. G. Influência da mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliadas por squeeze-flow. VISBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis, Brasil, p. 158 -179.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. NBR 9778/1887.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – Método de ensaio. NBR 13278/1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade – Método de Ensaio. NBR 15259/2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – Método de ensaio. NBR 13279/2005.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do modulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. NBR 15630/2008.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete - A Review. In: 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, may 2003.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh mortar - A Review. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS,VI. Florianópolis: Anais, 2005. p. 73-82

BASTOS, P. K. X.; Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento. Escola Politécnica. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, 172p.

BETIOLI, A. M. Influência dos Polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007, Florianópolis, p. 81-83 e 89-90.

BROCKEN, H. J. P.; SPIEKMAN, M. E.; PEL, L.; KOPINGA, K.; LARBI. J. A. Water extraction out of mortar during brick laying: a NMR study. Scientific Reports, 31, (1998), p. 45-57.

BS EN – 1766, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Reference concretes for testing, 2000, p. 16.

CARASEK, H. Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. Escola Politécnica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996, 285p.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de argamassa pelo rmétodo de squeeze-flow. VISBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 2005, Florianópolis,Brasil, p.121-143.

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

CARDOSO, F.A.; CAMPORA, F. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V.M. Caracterização Reológica de Argamassas Pelo Método de Squeeze Flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI. Florianóplis: Anais, 2005. p. 121-143.

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. Escola Politécnica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009, São Paulo, 138p.

CASALI, J. M. Estudo da interação entre argamassa de assentamento e bloco de concreto para alvenaria estrutural: transporte de água e aderência. Programa de pós-graduação em engenharia civil. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008, 324p.

CAZACLIU, B. ROQUET, N. Concrete mixing kinetics by means of power measurement. Cement and Concrete Research, 39 (2009) p. 182-194.

COURARD, L. Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation. Université de Liège Ingénieur civil de constructions. Thèse de Doctorat. Université de Liège. Liège (Belgique), 1999, 198p.

COURARD, L. Parametric study for the creation of the interface between concrete and repair products. Materials and Structures, volume 33, 2000, pg. 65-72.

CRUZ, S. A.; FARAH, M.; ZANIN, M.; BRETAS, R. E. S. Avaliação das propriedades reológicas de blendas de PEAD virgem/PEAD reciclado. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 18 (2008), 2, p. 144-151.

DAVISON, J. I. Loss of moisture from fresh mortars to bricks. Materials research & Standards, 1, 5, (1961), p. 385-388.

DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J. C. Differential hydration in rendering mortars. Cement and concrete research, 16, (1986), p. 429-439.

DIAMOND, S. Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cemment-based materials. Cement and Concrete Research, 30, 2000, p. 1517-1525.

ENGMAM, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. Journal of Non-Newtnian Fluid Mechanics, 132 (2005), p. 1-27.

EUROPEAN STANDARD, BS EN – 1766, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Reference concretes for testing, 2000, p. 16.

GALLEGOS, H. Adhesión entre el mortero y las unidades de albañilería. I SBTA - Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, 1995, p. 117-133.

GARBACZ, A.; Górka, M.; COURARD, L. Effect of Concrete Surface Treatment on Adhesion Repair Systems. Materials of Concrete Research, volume 57, 2005. pg. 46-60.

GARBACZ, A.; COURARD, L.; KOSTANA, K. Characterization of Concrete Surface Roughness and its Relation to Adhesion in Repair Systems. Materials Characterization, volume 56, 2006. pg. 281-289.

GENNES, P. G. Wetting: statics and dynamics. Reviews of modern physics, 57, 3, (1985), p. 827-863.

GRIESSER, A. Cement-Superplasticizer Interations at ambient temperatures – rheology, phase composition, pore water and heat of hidration of cementitious systems. Doctor of Technical Sciences. Swiss Federal Institute of Technology, 2002, Zurich, 147p.

GROOT, C. Effects of water on mortar-brick Bond. Thesis Technische Universiteit Delft. Universiteitsdrukkerij TU Delft, Delft, The Netherlands, 1993, 185p.

GROOT, C.; LARBI, J. The interface of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. Heron, 44, 2, (1999), p. 63-77. 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).

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).

HOFFNER, B.; CAMPANELLA, O. H.; CORRADINI, M. G.; PELEG, M. Squeezing flow of a highly viscous incompressible liquid pressed between slightly inclined lubricated wide plates. Rheol Acta 40 (2001), p.289-295.

HUNGER, M. BROUWERS, H.J.H. Flow analysis of water-power mixtures: Application to specific surface area and shape factor. Cement and Concrete Composites 31 (2009), p. 39-59.

IOPPI, P. R.; PRUDÊNCIO, L. R.; IRIYAMA, W. J. Estudo da absorção inicial de concreto: metodologia de ensaio e influência na aderência de revestimento. I SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 1995, Goiânia, Brasil, p. 93-102.

JÉZÉQUEL, P.H., COLLIN, V. Mixing oh concrete or mortars: dispersive aspects. Cement and Concrete Research 37 (2007), p. 1321-1333.

JUNG, E. The binding between mortar and brick. 8th International brick and block masonry conference, Dubin, 1988, 1, p. 182-193.

LAWRENCE, S. J.; CAO, H. T. Microstructure of the interface between brick and mortar. 8th International brick and block masonry conference, Dubin, 1988, 1, p. 194-204.

MALKIN, A. Y. Rheology Fundamentals. Chem Tec Publishing, 1994. Canada, 308p.

MCGINLEY, W. M. IRA and the flexural bond strength of clay brick masonry. Ed. Masonry, Components Assemblages, Philadelphia, 1990, p. 217-234.

MELLO NETO, A. A. Estudo da retração em argamassas com cimento de escória ativa. Escola Politécnica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 2002, São Paulo, p. 21 – 22, 161p.

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Histeresis loops of cement paste measured by oscillatory shear experiments. The Korean Journal of Rheology 5, 2 december (1993), p. 99 – 108

MIN, B. H.; ERWIN, L.; JENNINGS, H. M. Rheological behaviour of fresh cemente pastes as measured by squeeze flow. Journal of Materials Science 29 (1994), p. 1374 – 1381. .

NÄGELE, E. The zeta potential of cement. Cement and Concrete Research 15 (1985), p. 453-462.

NÄGELE, E. W. The transient zeta potential of hydrating cement. Chemical Engineering Science 8 (1989), p. 1637-1645.

NEUBAUER, C. M.; YANG, M.; JENNINGS, H. M. Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspensions: effects of admixtures. Adsn Cem Bas Mat 8 (1998), p. 17- 27.

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

PAES, I. N. L. Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. Faculdade de Tecnologia. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2004, p. 9-47.

PALMER, L. A.; PARSONS, D. A. A study of properties of mortars and bricks and their relation to bond.

PAPO, A.; PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement paste. Cement and Concrete Research 34 (2004), p. 2097-2101.

PEL, L. Moisture transport in porous building materials. Technische Universiteit Eindhoven, Graad van Doctor, Eindhoven, Netherlands, 1995, 127p.

PHAN, T. H.; CHAOUCHE, M.; MORANVILLE, M. Influence of organic admixtures on the rheological behaviour of cement paste. Cement and Concrete Research 36 (2006) p. 1807-1813 PILEGGI, R. G. Efeitos da distribuição granulométrica sobre o comportamento reológico de concretos refratários. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996, São Paulo, 210p.

PILEGGI, R. G. Ferramentas para o Estudo e Desenvolvimento de Concretos Refratários. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001, São Paulo, 187p.

PÓVOAS, Y. V. Tempo em Aberto da Argamassa Colante: Método de Medida e Influência dos Aditivos HEC e Resina PVAc. Escola Politécnica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999, 156p.

ÖZKAN, N.; OYSU, C.; BRISCOE, J. B.; AYDIN, I. Rheological analysis of ceramic pastes. Journal of the European Ceramic Society 19 (1999), p. 2883-2891.

RAMACHANDRAN V. S.; BEAUDOIN, J. J. Handbook of analytical techiniques in concrete science and technology. Institute for research in construction. National research Council Canada. Noyes publications, 2001, Canada, p. 584-600.

SAAK, A.W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste. Cement and Concrete Research 31 (2001) p. 205-212.

SCARTEZINI, L. M. B. Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da argamassa fresca. CMEC, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2002, 286p.

SCHARMM, G. Reologia e reometria – fundamentos teóricos e práticos. Artliber Editora. Segunda edição, 2006, São Paulo, 232p.

SCHULTZ, M. A.; STRUBLE, L. L. Use of ocilatory shear to study flow behavior of fresh cement paste. Cement and Concrete Research 23 (1993), p. 273-282.

SHERWOOD, J. D.; DURBAN, D. Liquid-solid relative motion during squeeze-flow of paste. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 140 (2002), p. 1-32.

SOUZA, R. B.; LIMA, F. S. S.; JOHN, V.M. Influência da cal e do filito na cinética de hidratação do cimento. VIII Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, Curitiba, 2009, Paraná, 14p.

STEFFE, J.F. Rheological Methods In Food Process Engineering. Freeman Press, 1996. Second Edition, USA, 428p.

STRUBLE, L. J.; JI, X.: 9 - Rheology. Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology. Noyes Publications. USA, 2001, pg 333-367.

SUGO, H. O. Strength and microstructural characteristics of brick/mortar bond. Department of Civil, Surveying and Environmental Engineering. Tese de Doutorado. University of Newcastle, 2000, Austrália, 501p.

SUN, Z.; VOIGT, T. SHAH, S. P. Rheometric and ultrasonic investigations of viscoelastic properties of fresh Portland cement paste. Cement and Concrete Research 36 (2006), p. 278-287.

TAHA, M. M. R.; EL-DIEB, A. S.; SHERIVE, N. G. Sorptivity: a reliable measure for absorption of masonry brinck units. Technical Reports. January 9, (2001), p. 438-445.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. Academic Press, London, (1990), 475p.

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

VOSS, W. C. Permeability of brick masonry walls - an hypothesis. American society for testing materials, Proceedings, Philadelphia, 33, 2, 1933, p. 670-691.

WALLEVIK, J. E. Rheology of particle suspensions – fresh concrete, mortar and cement paste with various types of lignosulfonates. Doctor of Technical Sciences. Department of structural engineering. The Norwegian University of Science and techonology, Trondheim, 2003, Norway, 413p.

WILLIAMS, D. A.; SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M. The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste. Cement and Concrete Research 29 (1999), p. 1491-1496.

WINTHER, G.; ALMDAL, K.; KRAMER, O. Determination of polymer melt viscosity by squeezing flow with constant plate velocity. Journal of Non-Newtnian Fluid Mechanics, 39, (1991), p. 119-136.

YANG, M.; JENNINGS, H.M. Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste. Advn Cem Bas Mat 2 (1995), p. 70-78.

YANG, M.; NEUBAUER, C. M.; JENNINGS, H.M. Interparticle potential and sedimentation behavior of cement suspension – Review and results from paste. Advn Cem Bas Mat 5 (1997), p. 1-7.

APÊNDICE A - Roteiro do ensaio para obtenção do índice de rugosidade superficial

Este roteiro foi escrito com base nas normas: BS EN13036-1:2002 e BS EN1766:2000.

A partir do diâmetro médio de espalhamento da areia sobre uma superfície obtém-se o grau de macro-textura. Este método macroscópico foi utilizado por Gabazac (2001), o qual correlacionou os resultados com técnicas microscópicas tais como laser profilometry e mechanical profilometry, observando alta correlação entre ambos.

Objetivo

Determinar a profundidade média da macro-textura da superfície através do espalhamento de um volume conhecido sobre a área a ser testada. Medindo-se o diâmetro médio da área coberta obtém-se o grau de macro-textura [1] ou rugosidade [2].[1]

Equipamentos necessários

- Um aparato contra vento portátil – com utilidade de evitar com que passagem de trafego ou vento possa interferir no ensaio [1], não será necessário utilizar nos ensaios realizados em laboratório [2];
- Ferramenta dispersante – formada por dois cilindros sólidos um de madeira e outro de borracha, com uma alça para manuseio;
- 2 Escovas para limpar a superfície – uma escova rígida de aço e uma escova de cerdas macias;
- Amostra cilíndrica – com volume de 25ml [1], e com diâmetro interno no máximo de 20 ml, mas volumes entre 25 ml até 5 ml [2] também podem ser utilizados, apenas deve-se utilizar a tabela de conversão, a qual encontra-se na seqüência deste texto;
- Régua – parar medir os diâmetros das amostras testadas, no mínimo de três [2] a quatro [1] medidas por teste, utiliza-se à média das medidas.

[1] [1] refere-se à norma EN13036-1, pavimentação, e [2] EN1766, sistemas de reparos em estruturas de concreto.

Procedimento

1. Adicionar a areia no cilindro – um mínimo de 90% passante na peneira 0,25 mm e retidas na peneira 0,18 mm conforme a ISSO 565;

2. Bater o cilindro suavemente sobre uma superfície rígida para acomodamento das partículas sem que ocorra o empacotamento, e em seguida completar o cilindro com o material (areia);

3. Limpar a área selecionada para o ensaio com a escova de aço e posteriormente passar a escova com cerdas macias para garantir a retirar das partículas de agregados soltas na superfície;

4. Se necessário utilizar o aparato contra o vento, localizando-o entorno da superfície limpa;

5. Despejar a amostra do cilindro sobre a superfície;

6. Utilizar a ferramenta dispersante sobre a amostra para espalhar a areia na superfície, através de movimentos circulares, com uma pressão desprezível, apenas o suficiente para garantir o espalhamento da areia;

7. Medir o diâmetro, de três a quatro medidas e efetuar a média;

Obtenção dos Resultados

O resultado pode ser obtido em função do **M**eam **T**exture **D**epth (profundidade de textura média) [1] ou **R**oughness **I**ndex (índice de rugosidade) [2]. Em ambos os métodos são utilizados o diâmetro medido e o volume de amostra utilizada no ensaio.

Cálculo através de MTD [1]:

- Calculo do volume:

$$V = (\pi\, d^2 / 4)*h$$

V - volume interno do cilindro (mm^3); d – diâmetro interno do cilindro (mm); h – altura do cilindro (mm).

- Calculo do MTD – profundidade de textura média:

$$MTD = 4V / D^2 * \pi$$

V – volume da amostra (mm^3); D – diâmetro médio da superfície coberta pela amostra (mm).

O desvio padrão obtido no ensaio, quando realizado por um mesmo operador, deve ser de no máximo 1% em relação à média de profundidade na textura. Quando realizada por diferentes operadores este desvio padrão pode chegar ao máximo de 2%. A norma recomenda ainda a realização de no mínimo 2 testes na mesma superfície.

Cálculo através de RI [2]:

- Cálculo usa somente a média do diâmetro de espalhamento da areia sobre a superfície, para volume igual a 25 ml:

$$RI = 31800/d^2$$

- Caso utilize outro volume de areia, desde que esteja entre 25 e 5 ml, utilizar a seguinte formula:

$$RI = (V * 1272)/d^2$$

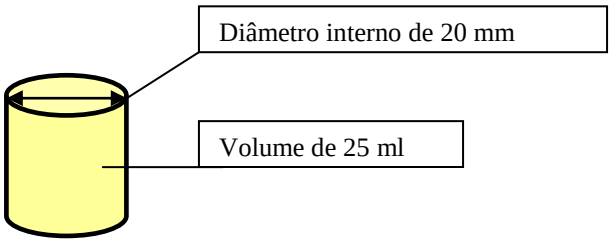
V – volume da amostra (ml); d – diâmetro médio da superfície coberta pela amostra (mm).

Na tabela abaixo os volumes e seus coeficientes para obtenção do RI.

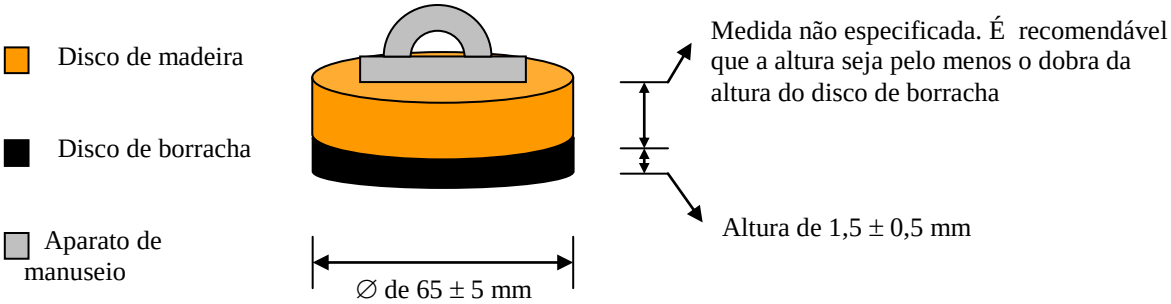
V em ml	**Coeficiente C V*1272**	**RI c/d^2, mm**
5	6360	$6360/ d^2$
10	12720	$12720/ d^2$
15	19080	$19080/ d^2$
20	25440	$25440/ d^2$
25	31800	$31800/ d^2$

Informações relevantes quanto ao formato das peças

- Recipiente cilindro para amostra das esferas de vidro pode ser de plástico ou metal:



- Ferramenta dispersante composta por dois materiais madeira e borracha:



- Os demais materiais dispensam comentários.

Teste de aplicação do ensaio em diferentes superfícies

Os substratos utilizados foram granito polido, granito levemente rugoso, tijolo cerâmico liso e tijolo concreto rugoso, também foi realizado o ensaio utilizando duas faixas de diâmetro de areias: diâmetro entre 0,25 a 0,18mm; e diâmetro menor que 0,15mm. O material utilizado como areia foram esferas de vidro.

Indice de Rugosidade - método da Areia								
		medidas						
diametro areia	material	1	2	3	média 1	média 2	desvio padrão	Indice de rugosidade
< 0,25 mme > 0,18mm	granito polido	9,2	9,3	9,2	92,33	91,67	0,52	1,25
		9,1	9,2	9,3	92,00			
		8,8	9,2	9,2	90,67			
	granito rugoso	8,8	8,9	8,8	88,33	88,56	0,02	1,34
		8,8	8,8	9	88,67			
		8,8	8,9	8,9	88,67			
	tijolo cerâmico liso	9,2	9,2	9,3	92,33	91,89	0,40	1,24
		9,2	9,2	9,3	92,33			
		9,1	9,2	9	91,00			
	tijolo concreto rugoso	8,2	8,2	8,1	81,67	81,33	0,52	1,58
		8	8,1	8	80,33			
		8,2	8,3	8,1	82,00			
< 0,15mm	granito polido	8,6	8,8	8,6	86,67	87,22	2,40	1,38
		8,9	8,9	9	89,33			
		8,6	8,6	8,5	85,67			
	granito rugoso	8	8	8	80,00	79,44	0,17	1,66
		8	7,9	7,9	79,33			
		7,9	7,8	8	79,00			
	tijolo cerâmico liso	8,9	9	9	89,67	89,11	0,62	1,32
		9,1	8,9	8,9	89,67			
		8,8	8,9	8,7	88,00			
	tijolo concreto rugoso	7,9	8,1	8	80,00	76,67	5,56	1,78
		7,5	7,4	7,6	75,00			
		7,5	7,4	7,6	75,00			

Com as duas distribuições foi possível verificar a influência do tamanho das partículas no índice de rugosidade, sendo demonstrado que diâmetros inferiores á 0,15 mm pode resultar em alto desvio padrão, além de alterar o resultado do índice de rugosidade em relação ao ensaio executado dentro da faixa de diâmetro sugerida pelas normas de referencia deste ensaio. Por esta razão o diâmetro da areia deve ser rigorosamente controlado, a fim de evitar erros na execução do ensaio.

Este ensaio é qualitativo, permitindo a comparação da macro-rugosidade entre diferentes superfícies, mas isso somente pode ser possível se realizado conforme o procedimento padrão, caso contrário as medidas podem variar significativamente.

Conclusão

O método da areia pode ser facilmente empregado para obter o índice de rugosidade, embora a medida seja macroscópica pode-se utilizar como um parâmetro quantitativo para avaliar a rugosidade da superficies de diferentes substratos.

Referencias

GARBACZ, A.; COURARD, L.; KOSTANA, K. Characterization of Concrete Surface Roughness and its Relation to Adhesion in Repair Systems. Materials Characterization, volume 56, 2006. pg. 281-289.

European Standard, BS EN - 13036-1, Road and airfield surface characteristics. Test methods. Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique 2002, p. 14.

European Standard, BS EN – 1766, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Reference concretes for testing, 2000, p. 16.

APÊNDICE B – Resultados complementares de caracterização no estado endurecido

Absorção por imersão

Substrato	*Amostras*	*Absorção por Imersão* (%)	Média	*DesvPad*	*coef. de var.*
Sub A	1	14,15	14,14	0,32	2,27
	2	13,99			
	3	14,87			
	4	14,13			
	5	14,42			
	6	14,13			
Sub B	*1*	12,23	12,26	0,15	1,22
	2	12,48			
	3	12,35			
	4	12,08			
	5	12,10			
	6	12,29			

Coeficiente de capilaridade

Substrato	*Amostras*	*Coeficiente de Capilaridade* g/dm2.min^1/2	Média	*DesvPad*	*coef. de var.*
Sub A	1	7,56	7,58	0,17	2,21
	2	7,68			
	3	7,58			
	4	7,88			
	5	7,43			
Sub B	*1*	*10,78*	10,95	0,90	8,19
	2	11,53			
	3	10,95			
	4	11,91			
	5	9,56			

Resistência à tração na compressão diametral

Substrato	*Amostras*	*Compressão Diametral* Mpa	Média	*DesvPad*	*coef. de var.*
Sub A	1	0,35	0,37	0,04	9,91
	2	0,38			
	3	0,36			
	4	0,43			
Sub B	*1*	0,71	0,79	0,06	7,40
	2	0,81			
	3	0,85			
	4	0,76			

Resistência à Tração na Flexão

Substrato	*Amostras*	*Resistência à Tração na Flexão* Mpa	Média	*DesvPad*	*coef. de var.*
Sub A	1	1,02	1,02	0,03	3,44
	2	1,02			
	3	0,96			
Sub B	*1*	1,05	0,98	0,05	5,36
	2	0,98			
	3	0,95			

Ângulo de contato

Ângulo de Contato		Sub B		
Amostras	**Graus (°)**	**média**	**desvio**	**coef. de var.**
1	38,1	41,4	3,88	9,36
2	41			
3	47,5			
4	47,6			
5	47,5			
6	41,8			
7	39,9			
8	40,9			

Não foi possível realizar a medida do ângulo de contato no substrato A devido á rápida sucção da gota

APÊNDICE C – Dados complementares para o calculo da absorção de água dos substratos porosos

Determinação do volume da amostra, densidade aparente da suspensão, volume total da mistura, volume da amostra ensaiada, para obtenção da massa de água na amostra sobre o substrato.

Volume do molde de PVC		
Diâmetro	7,62	Cm
Altura	1,00	Cm
Área	45,60	cm2
Volume	45,60	cm3

	Massa (g)	*Densidade (g/cm3)*	*Volume para a mistura (cm3)*	*Volume da amostra ensaiada (cm3)*	*Massa da amostra ensaiada (g)*
cimento	100,00	3,00	33,33	16,64	49,93
água	58,00	1,00	58,00	28,96	28,96
pasta	158,00	1,73	91,33	45,60	78,89

Densidade aparente da suspensão:

$$\rho_m = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{m_f + m_s}{V_m}$$

sub_A

Tempo (minutos)	*Amostra*	*Mss (g)*	*Mu (g)*	*Mse (g)*	*Mcr (g)*	*Mai (g)*	*Maa (g)*	*Média (g)*	*Absorção (%)*	*Média (%)*	*DesvPad*	*Coef. De var.*
5	1	276,58	283,36	276,90	0,32	28,95	6,46	6,56	22,31	22,65	0,33	1,45
	2	283,45	290,55	283,99	0,54		6,56		22,66			
	3	273,96	281,26	274,61	0,65		6,65		22,97			
10	1	285,14	295,58	285,85	0,71		9,73	10,32	33,61	35,65	1,83	5,12
	2	283,60	294,97	284,22	0,62		10,75		37,13			
	3	279,14	290,28	279,80	0,66		10,48		36,20			
20	1	289,15	302,19	289,49	0,34		12,70	12,65	43,87	43,71	1,97	4,52
	2	276,41	289,77	277,71	1,30		12,06		41,66			
	3	275,73	289,74	276,54	0,81		13,20		45,60			

sub_B

Tempo (minutos)	*Amostra*	*Mss (g)*	*Mu (g)*	*Mse (g)*	*Mcr (g)*	*Mai (g)*	*Maa (g)*	*Média (g)*	*Absorção (%)*	*Média (%)*	*DesvPad*	*Coef. De var.*
5	1	348,07	350,92	348,16	0,09	28,85	2,76	2,73	9,57	9,45	0,73	7,77
	2	335,37	338,44	335,52	0,15		2,92		10,12			
	3	339,54	342,16	339,66	0,12		2,50		8,67			
10	1	345,45	360,81	345,93	0,48		14,88	14,33	51,58	49,68	1,94	3,91
	2	342,31	356,65	342,89	0,58		13,76		47,69			
	3	332,16	346,87	332,51	0,35		14,36		49,77			
20	1	336,18	350,92	336,42	0,24		14,50	14,50	50,26	50,25	2,17	4,31
	2	339,60	353,85	339,98	0,38		13,87		48,08			
	3	333,15	349,13	334,01	0,86		15,12		52,41			

Informações: Pasta com 0,58 de relação água/cimento; Mss - massa seca do substrato; Mu - massa unida do substrato; Mse - massa seca em estufa após o ensaio; Mcr - massa de cimento remanescente no substrato após o ensaio; Mai - massa de água inicial na pasta de cimento ensaiada; Maa - massa de água absorvida pelo substrato; Absorção - porcentagem da massa de água absorvida da pasta de cimento pelo substrato.

APÊNDICE D – Estudo exploratório do efeito das condições do ambiente para a pasta com 0,58 de relação água/cimento

Estes resultados não foram incluídos no capítulo 4 por não ter sido realizado um processo experimental direcionado à influência das condições do ambiente na alteração do comportamento reológico de pastas cimentícias aplicadas sobre substrato poroso.

A Figura 1 apresenta a absorção do sub_A nos tempos de 5 e 10 minutos e a figura 2, as curvas do *squeeze-flow* com o confinamento do fluxo radial para mesmo período de ensaio.

As duas condições de temperatura e umidade relativa testadas foram: 1) 23°C ± 1°C e 50% ± 5%; 2) 27°C ± 2°C e 40% ± 5%, respectivamente.

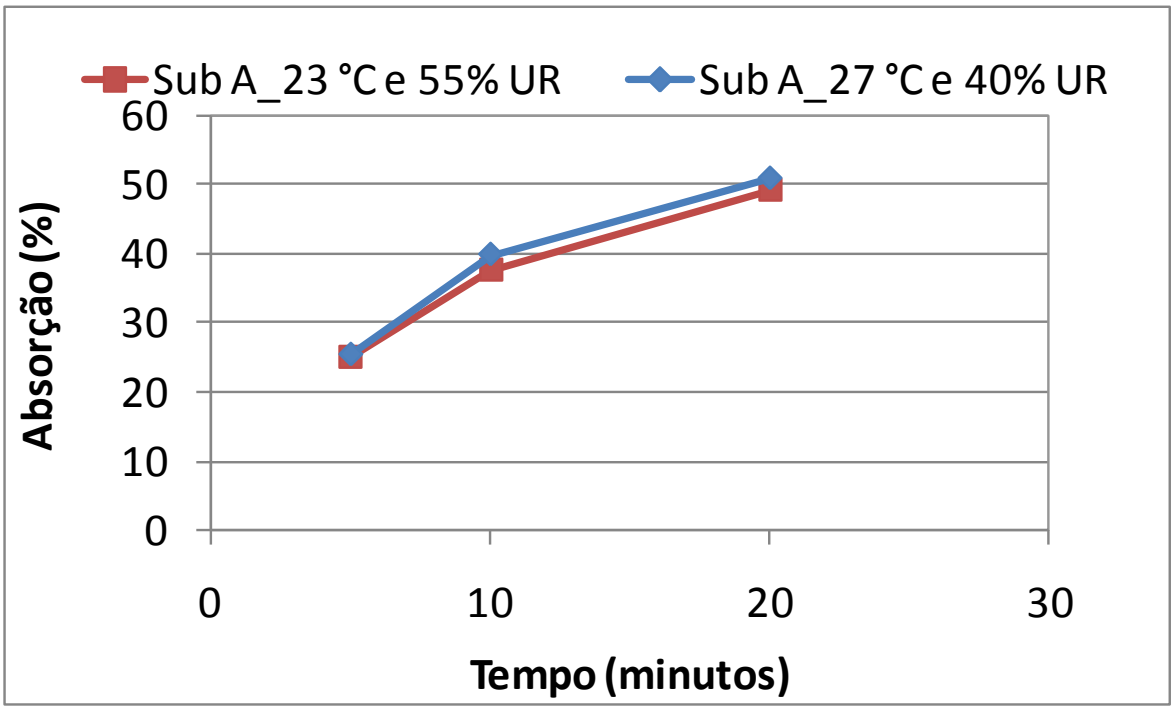


Figura 1 – porcentagem de água absorvida d a pasta com 0,58 de relação água/cimento sobre o substrato poroso (sub_A) em duas condições de ambiente.

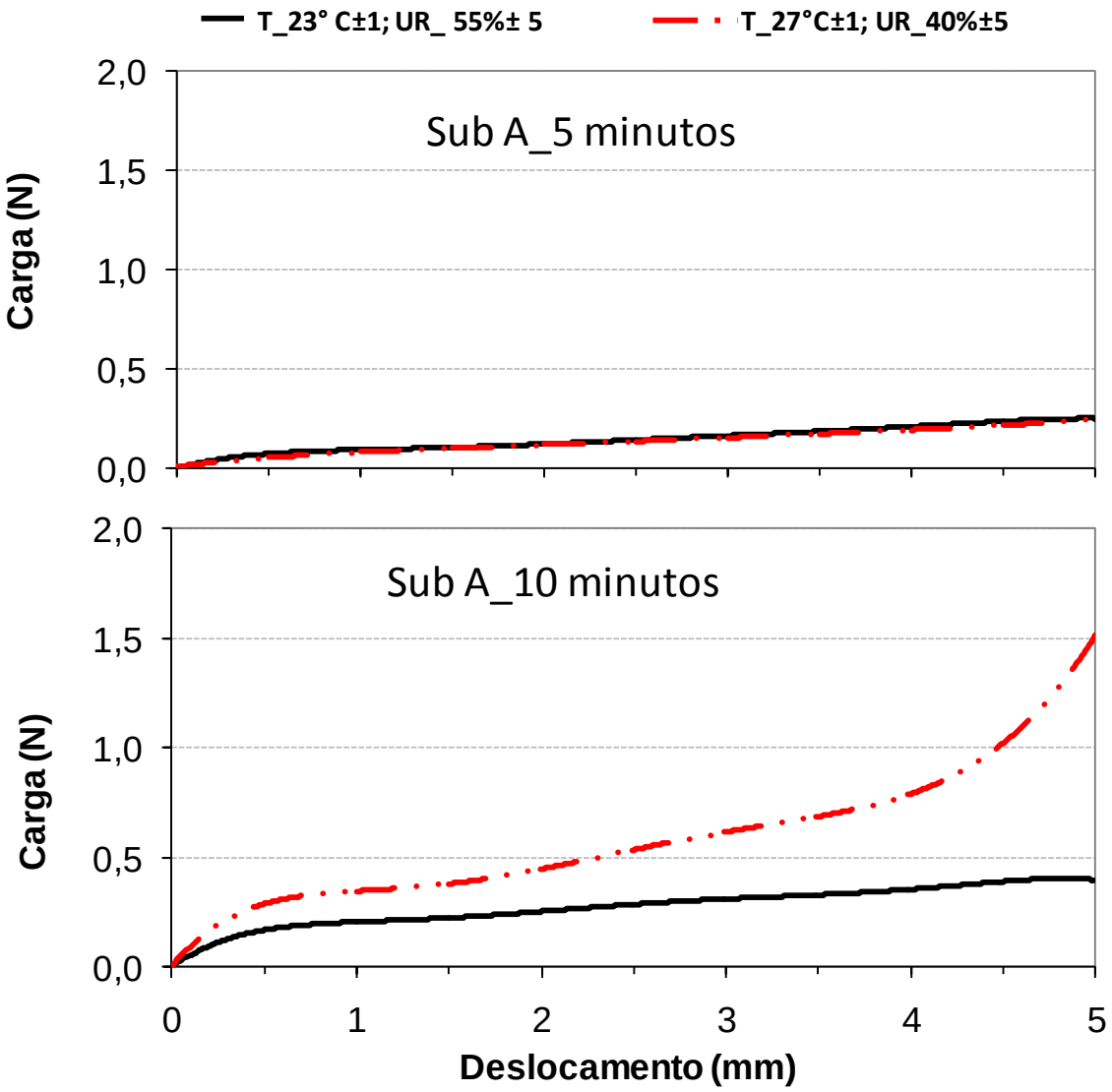


Figura 2 – *Squeeze-flow* com confinamento do fluxo radial para a pasta com 0,58 de relação água/cimento e substrato poroso (sub_A) para duas condições de ambiente.

APÊNDICE E – Dados complementares para o calculo da absorção de água dos substratos porosos para a pasta misturada com baixa energia de mistura

Volume da amostra ensaiada		
Diâmetro	7,62	Cm
Altura	1,00	Cm
Área	45,60	cm2
Volume	45,60	cm3

	Massa (g)	*Densidade (g/cm3)*	*Volume para a mistura (cm3)*	*Volume da amostra ensaiada (cm3)*	*Massa da amostra ensaiada (g)*
cimento	100,00	3,00	33,33	16,64	49,93
água	58,00	1,00	58,00	28,96	28,96
pasta	158,00	1,73	91,33	45,60	78,89

Densidade aparente da suspensão:

$$\rho_m = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{m_f + m_s}{V_m}$$

sub_A Baixa Energia de Mistura

Tempo (minutos)	Amostra	Mss (g)	Mu (g)	Mse (g)	Mcr (g)	Mai (g)	Maa (g)	Média (g)	Absorção (%)	Média (%)	DesvPad	Coef. De var.
5	1	275,82	284,32	276,19	0,37	28,95	8,13	7,66	28,08	26,47	1,72	6,49
	2	288,30	296,12	288,98	0,68		7,14		24,66			
	3	286,27	294,55	286,83	0,56		7,72		26,67			
10	1	279,30	291,64	280,05	0,75		11,59	11,66	40,03	40,26	2,91	7,22
	2	274,61	287,58	275,05	0,44		12,53		43,28			
	3	283,98	294,91	284,06	0,08		10,85		37,48			
20	1	286,21	301,01	286,82	0,61		14,19	13,95	49,02	48,20	0,80	1,65
	2	281,14	295,28	281,55	0,41		13,73		47,43			
	3	272,23	286,57	272,63	0,40		13,94		48,15			

sub_B Baixa Energia de Mistura

Tempo (minutos)	Amostra	Mss (g)	Mu (g)	Mse (g)	Mcr (g)	Mai (g)	Maa (g)	Média (g)	Absorção (%)	Média (%)	DesvPad	Coef. De var.
5	1	348,34	355,52	349,04	0,70	28,85	6,48	6,41	22,46	22,21	1,37	6,17
	2	339,57	347,18	340,42	0,85		6,76		23,43			
	3	341,21	347,91	341,93	0,72		5,98		20,73			
10	1	340,44	350,11	340,89	0,45		9,22	8,68	31,96	30,09	1,79	5,95
	2	335,69	344,65	336,46	0,77		8,19		28,39			
	3	342,17	350,98	342,35	0,18		8,63		29,91			
20	1	344,14	356,45	344,30	0,16		12,15	12,17	42,11	42,18	2,63	6,25
	2	340,63	354,32	341,38	0,75		12,94		44,85			
	3	339,88	351,84	340,42	0,54		11,42		39,58			

Informações: Pasta com 0,58 de relação água/cimento; Mss - massa seca do substrato; Mu - massa unida do substrato; Mse - massa seca em estufa após o ensaio; Mcr - massa de cimento remanescente no substrato após o ensaio; Mai - massa de água inicial na pasta de cimento ensaiada; Maa - massa de água absorvida pelo substrato; Absorção - porcentagem da massa de água absorvida da pasta de cimento pelo substrato.