

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA  
ÁREA DE CONTATO SUBSTRATO/ARGAMASSA DE  
REVESTIMENTO**

Carina Mariane Stolz

Orientadora: Angela Borges Masuero

Porto Alegre  
2015

Carina Mariane Stolz

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA  
ÁREA DE CONTATO SUBSTRATO/ARGAMASSA DE  
REVESTIMENTO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia na modalidade Acadêmica. Orientação: Profa. Dra. Angela Borges Masuero.

Porto Alegre

2015

#### CIP - Catalogação na Publicação

Stolz, Carina Mariane

Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento / Carina Mariane Stolz. -- 2015. 204 f.

Orientadora: Angela Borges Masuero.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

1. Argamassa. 2. Área de contato. 3. Tensão superficial. 4. Scanner tridimensional a laser. 5. Reologia. I. Masuero, Angela Borges, orient. II. Título.

**CARINA MARIANE STOLZ**

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA  
ÁREA DE CONTATO SUBSTRATO/ARGAMASSA DE  
REVESTIMENTO**

Porto Alegre, 27 de abril de 2015

Prof. Angela Borges Masuero  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

Prof. Dr. Armando Miguel Awruch  
Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa (UA)**  
Dra. pela Universidade de Aveiro- Portugal

**Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Helena Carasek (UFG)**  
Dra. pela Universidade de São Paulo

**Prof. Vasco Manuel Araújo Peixoto de Freitas (FEUP)**  
Dr. pela Universidade do Porto- Portugal

Dedico este trabalho ao meu marido Daniel e aos meus amigos, professores e colegas de NORIE pelo apoio na concretização deste sonho.

## AGRADECIMENTOS

Não poderia iniciar este trabalho sem agradecer a Deus. Foi Nele que me apoiei em todos os momentos difíceis e de dúvidas e foi Ele que me deu forças e sabedoria para seguir em frente.

À minha amiga e orientadora Angela Masuero. Agradeço por todo carinho e conhecimento repassado a cada dia de convivência. A ela que mesmo com milhões de coisas para fazer sempre dá um “jeitinho” de me socorrer nos momentos de dúvidas ou simplesmente dizer palavras de carinho nos momentos de “pânico”. Angela, MUITO OBRIGADA! Faltam-me palavras para dizer o quanto te admiro e o quanto sou grata a ti pela contribuição no meu crescimento profissional e pessoal. Tu és um grande exemplo de pessoa, profissional e mulher!

Ao meu grande amigo, companheiro, “co-orientador” e marido Daniel. A ti meu amor, agradeço por me ajudar todos os dias nesta caminhada que ao teu lado torna-se muito mais prazerosa e fácil. Obrigada pelo carinho, compreensão, pelas ajudas com relação ao meu trabalho e por ter me ajudado a amadurecer como pesquisadora e como pessoa. Este amadurecimento não foi fácil, mas ao teu lado tudo ficou mais ameno. Você é meu exemplo!

A toda a minha família: Fê, Lê, Dudu, Vera, Ampélio, Tetê e, em especial, a meu pai Luiz e minha mãe Marisa pelo apoio incondicional e por terem possibilitado que eu chegasse até aqui. Muito obrigada por tudo!

Aos colegas e amigos do GMAT: Laís, Sílvia, Anderson, Mauro, Lu Cordeiro, Fernanda, Ariane, Ana Paula Maran, Maria Fernanda, Gabi, Natália e Fabio, Rafa, Giselle, Carolzinha, Ju, Cris, Eugênio, Abrahão, Simone, Lucília, Lucas, Thiago, Márlon, Muri, Cesar, Eduardo, Dóris e Ana Pasuelo, muito obrigada pela companhia nas longas tardes de laboratório e chimarrão na sala de Materiais, por todos os momentos de descontração e por tornarem até a fila do RU divertida. Obrigada amigos pelas contribuições a este trabalho, que sempre contavam com as teorias mirabolantes do Anderson e geravam grandes, boas, divertidas e produtivas discussões. Sem vocês isso tudo não faria sentido e seria muito menos divertido! Vocês são demais! Certamente contribuíram muito para meu crescimento pessoal e profissional. Nossa amizade não acaba com o término desta tese, mas com certeza persistirá ao longo de muitos anos!

Aos professores do GMAT/NORIE: Denise, Bonin, Ana Paula e João Masuero que sempre contribuem de uma forma ou outra, mesmo que em conversas no corredor ou durante os churrascos de sexta-feira no laboratório. E aos demais professores: Isatto, Satler, Formoso e Ana Luiza: obrigada pela dedicação e apoio de sempre!

Ao Airton (dindo querido), ao Sr. Gilmar e ao Demétrius, pela amizade, dedicação e auxílio nas tarefas de laboratório, sem contar os deliciosos e divertidos churrascos de sexta-feira! Obrigada pelo apoio e por tornarem nossos dias no laboratório mais divertidos.

Aos queridos amigos e bolsistas de iniciação científica: Führ, Puglia, Gabriela, Juliana, Gui Masuero, Alexandre, Formiga, Gustavo, Allan, Luiz, Vanessa, Állisson, Anne, Josi, Bruno Stafford e em especial ao Mika, ao Leonardo e ao Bruno Lansini, que participaram ativamente do desenvolvimento deste trabalho. Sem o auxílio de vocês este trabalho nunca sairia do papel. Muito obrigada pela ajuda e pela dedicação! Torço muito por todos vocês!

Aos colegas e amigos do NORIE, em especial à Ju Brito, Rosana, Dietz, Amanda, Santi, Bruninho e Clarissa, obrigada pela amizade e carinho de sempre!

Aos amigos ijuienses, em especial Gika, Bruninha, Camis, Manu e minha irmãzinha Laura, compadre Zizo e afilhadinha Anandinha, obrigada pelo apoio mesmo à distância!!! Obrigada por fazerem parte da minha vida sempre e por estarem ao meu lado nesta caminhada. É muito importante para mim o apoio de vocês.

Aos queridos Daiane, Fábio e Guilherme Schramm, muito obrigada pela amizade e apoio de sempre.

Aos funcionários e amigos do NORIE e do PPGEC, em especial a Carmen, a Ana Luiza, a Michele e a Rosi que sempre estão à disposição para nos auxiliar em todos os “probleminhas de última hora”.

Aos laboratórios LdSM/UFRGS (Laboratório de Design e Seleção de Materiais), em especial ao professor Wilson Kindlein Jr e LACER/UFRGS (Laboratório de Materiais Cerâmicos) da UFRGS, em especial aos professores Annelise Alves e Carlos Bergmann, pelo apoio na disponibilização de equipamentos e na realização de ensaios.

À Votoran pela doação do cimento utilizado nesta pesquisa.

Ao CNPQ e a Capes pelo auxílio através de bolsa de pesquisa.

Ao PPGEC/UFRGS por todo o suporte e apoio à pesquisa.

*“Transformei meus medos em descobertas.  
Traduzi meus erros em experiência.*

*Percebi que sou pequena e, justamente por isso, compreendi como sou grande”.*

*Lígia Guerra*

## RESUMO

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A importância do aprofundamento dos estudos sobre argamassas de revestimento justifica-se por este ser um material muito utilizado internamente e externamente em edificações brasileiras, no entanto, ainda apresentar grande quantidade de manifestações patológicas. Estudos sobre os mecanismos envolvidos no desenvolvimento da aderência das mesmas vêm sendo realizados por pesquisadores nacional e internacionalmente, com o intuito de compreender as interações que ocorrem entre a argamassa e os substratos. Neste contexto, o principal objetivo desta pesquisa consiste em determinar a influência dos parâmetros reológicos de argamassas, da energia de aplicação e da tensão superficial dos substratos na área de contato na interface argamassa/substrato. Os objetivos secundários consistem em caracterizar diferentes argamassas através do squeeze-flow e reometria rotacional, verificar a influência da distribuição granulométrica nos parâmetros reológicos, verificar a influência da energia de aplicação no desenvolvimento da área de contato da interface argamassa/substrato e desenvolver metodologia para a quantificação da área de contato da interface argamassa/substrato. Para atingir estes objetivos, foi montada uma matriz experimental com argamassas de três diferentes proporcionamentos, quais sejam: 1:0:3 (A3), 1:1:6 (A6), e 1:2:9 (A9) (cimento:cal:areia, materiais secos, em volume). Estes proporcionamentos foram confeccionados com cimento Portland CPIV, cal hidratada CHI e três composições granulométricas (CG) de agregado miúdo. As areias passantes nas peneiras, 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15mm foram compostas com 25% de cada uma das frações para a CG1, 10% das frações extremas e 40% das frações intermediárias para a CG2 e 40% das frações extremas e 10% das frações intermediárias para a CG3. Por fim, cada uma das argamassas proporcionadas com as diferentes CG foram dosadas para o índice de consistência de 240 mm. Depois de caracterizadas quanto as suas propriedades no estado fresco e endurecido, as argamassas foram submetidas a ensaios reológicos de squeeze-flow (NBR 15839/2010) e reometria rotacional. Para a avaliação da área de contato das argamassas sobre os substratos, foram escolhidos três substratos com acabamento superficial liso e sem absorção significativa e com diferentes ângulos de contato: o vidro, o acrílico e o polietileno. Cada uma das argamassas dosadas foi lançada sobre estes substratos, dispostos em gabaritos de madeira, a alturas de queda de 30 e 100 cm, através da caixa de queda. Por fim, as argamassas foram descoladas dos substratos e foi realizada a digitalização tridimensional a laser, através de scanner 3D, onde as áreas sem contato das argamassas foram quantificadas com a utilização dos softwares Geomagic Studio e Photoshop. Os resultados mostraram que o uso do scanner 3D associado à análise de imagens através de softwares de fácil manuseio e interpretação mostra-se como uma boa técnica de análise da área de contato. Quanto aos proporcionamentos de argamassas propostos, a alteração da faixa granulométrica da areia demonstrou-se uma boa estratégia no sentido de alterar a reologia das argamassas. A seleção dos substratos mostrou-se eficaz no sentido de reproduzir superfícies com ângulos de contato distintos, potencialmente hidrofóbicas e potencialmente hidrofílicas e pode-se notar através das alturas de queda escolhidas influenciam nos demais parâmetros de avaliação em função desta alteração da energia de lançamento. Todos as variáveis controláveis foram significativamente influentes na área de contato na interface argamassa/substrato, sendo que a mais significativa foi o proporcionamento das argamassas. Além disso, constatou-se que maiores energias de aplicação resultam em maiores áreas de contato desde que o substrato aonde a argamassa for aplicada seja favorável ao espalhamento, por fim, foi possível concluir que o empacotamento das partículas e o coeficiente de uniformidade exercem grande influência na viscosidade das argamassas, sendo que área de contato da interface mostrou ser inversamente proporcional à viscosidade.

**Palavras-chave:** reologia, área de contato, argamassa, tensão superficial, scanner tridimensional a laser, composição granulométrica, energia de aplicação

## ABSTRACT

STOLZ, C. M. **Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

### **Analysis of main parameters affecting substrate/mortar renderings contact area**

This study assesses the influence of the granulometric composition of sand, application energy and the superficial tension of substrates on the contact area of rendering mortars. Three substrates with distinct wetting behaviors were selected through preliminary analysis, three non-absorbent substrates with different wettability ratings were chosen: glass, acrylic, and polypropylene. Mortars were prepared with different proportioning and sand compositions. The compositions of 1:0:3 (A3), 1:1:6 (A6) and 1:2:9 (A9) (cement: hydrated lime: dry sand) were produced according to the Brazilian Standard NBR 13276/2005, for a 240 mm consistence index, all of them, with grains retained in sieves #1.2; 0.6; 0.3 and 0.15 mm. The first composition (CG1, unitary mass 1.51 g/cm<sup>3</sup>) consists of equal fractions of each sieve, 25% for each. The second (CG2, unitary mass 1.48 g/cm<sup>3</sup>), with 10%, 40%, 40% and 10% from sieve respectively, and third (CG3, unitary mass 1.54 g/cm<sup>3</sup>) with 40%, 10%, 10% and 40% from sieve, respectively. Characterization tests were performed on fresh and hardened mortars, as well as a rheological characterization. Mortars were applied on substrates with two different energies. The interfacial area was then digitized with a 3D scanner. Results show that 3D scanning proved to be an appropriate method for real contact area measurement. Additionally, all variables have interfacial contact influence, in terms of the contact area development, among which the most significant was mortar proportioning. Furthermore, it was found that higher applying energy results in larger interfacial contact areas since substrate where the mortar is applied has favorable wettability. Finally, it was concluded that the particles packing and uniformity coefficient greatly influence the mortar viscosity, and interface contact area was found to be inversely proportional to viscosity.

**Keywords:** Rheology, contact area, mortar rendering, superficial tension, 3D laser scanner, granulometric composition, application energy

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LISTA DE FIGURAS .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>   | <b>19</b> |
| <b>LISTA DE SIGLAS .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>22</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 26        |
| 1.1.1 Objetivos Específicos .....   | 26        |
| 1.2 HIPÓTESE.....   | 26        |
| 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....  | 26        |
| <b>2 PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES QUE INFLUENCIAM NO MOLHAMENTO</b>             | <b>28</b> |
| 2.1 TENSÃO SUPERFICIAL.....   | 29        |
| 2.1.1 Equação de Young-Laplace .....  | 36        |
| 2.2 POROSIDADE.....   | 37        |
| 2.3 RUGOSIDADE .....  | 40        |
| <b>3 REOLOGIA.....</b>  | <b>46</b> |
| 3.1 CONCEITUAÇÃO .....  | 46        |
| 3.2 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS PARA O ESTUDO DE REOLOGIA .....                   | 48        |
| 3.3 MODELOS REOLÓGICOS .....  | 51        |
| 3.4 REOLOGIA DAS ARGAMASSAS.....  | 54        |
| 3.4.1 Relação entre a Reologia e a Aderência.....                               | 56        |
| 3.4.2 Parâmetros que influenciam no comportamento reológico de argamassas ..... | 57        |
| 3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS .....                     | 60        |
| 3.5.1 Mesa de consistência .....  | 61        |
| 3.5.2 <i>Dropping ball</i> .....  | 61        |
| 3.5.3 <i>Squeeze-flow</i> .....   | 62        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 3.5.4      | <i>Vane test</i> ou ensaio de palhetas .....  | 65         |
| 3.5.5      | Mensuração do escoamento de fluidos por reometria rotacional .....                        | 67         |
| <b>4</b>   | <b>ENERGIA DE APLICAÇÃO .....</b>   | <b>72</b>  |
| <b>4.1</b> | <b>DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE APLICAÇÃO .....</b>   | <b>74</b>  |
| <b>5</b>   | <b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>   | <b>76</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>76</b>  |
| 5.1.1      | Escolha das variáveis do programa experimental.....                                       | 76         |
| <b>5.2</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>78</b>  |
| 5.2.1      | Materiais utilizados na produção das argamassas .....                                     | 78         |
| 5.2.1.1    | Cimento .....   | 78         |
| 5.2.1.2    | Cal .....   | 79         |
| 5.2.1.3    | Agregado miúdo .....  | 79         |
| 5.2.1.4    | Água .....  | 81         |
| 5.2.2      | Escolha dos substratos .....  | 81         |
| 5.2.3      | Dosagem e produção das argamassas.....  | 83         |
| 5.2.3.1    | Aplicação das argamassas sobre o substrato.....   | 86         |
| <b>5.3</b> | <b>ENSAIOS REALIZADOS .....</b>   | <b>90</b>  |
| 5.3.1      | Caracterização e controle das argamassas .....  | 90         |
| 5.3.2      | Ensaio de avaliação reológica .....   | 91         |
| 5.3.2.1    | <i>Squeeze-flow</i> .....   | 91         |
| 5.3.2.2    | Reometria Rotacional .....  | 92         |
| 5.3.3      | Digitalização tridimensional a laser .....  | 93         |
| <b>6</b>   | <b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>                             | <b>98</b>  |
| <b>6.1</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....</b>   | <b>98</b>  |
| 6.1.1      | Caracterização no estado fresco.....  | 98         |
| 6.1.2      | Caracterização no estado endurecido.....  | 101        |
| <b>6.2</b> | <b>ENSAIOS DE AVALIAÇÃO REOLÓGICA.....</b>  | <b>107</b> |
| 6.2.1      | <i>Squeeze-flow</i> .....   | 107        |
| 6.2.2      | Reometria rotacional .....  | 115        |
| <b>6.3</b> | <b>ANÁLISE DOS FATORES CONTROLÁVEIS SOBRE A VARIÁVEL DE RESPOSTA ÁREA DE CONTATO.....</b> | <b>126</b> |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>7</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>             | <b>147</b> |
| <b>7.1</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>                      | <b>149</b> |
| <b>7.2</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | <b>150</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: tipos de molhamento: a) por espalhamento; b) por adesão; c) por imersão (adaptado de ROSEN, 1978).....  | 28 |
| Figura 2: área de contato interfacial de uma superfície rugosa, evidenciando as falhas de contato e as diferentes magnitudes das rugosidades que devem ser analisadas em diferentes escalas. Fonte: Yang e Persson, 2008.....   | 29 |
| Figura 3: molhabilidade das superfícies (ALHANATI, 2013).....   | 31 |
| Figura 4: comportamento das diferentes superfícies quanto à molhabilidade: a) superfície normal b) superfície hidrofílica c) superfície com irregularidades (adaptado de QUÉRÉ, 2002) .....   | 32 |
| Figura 5: forças atuantes na molhabilidade (adaptado de ALHANATI, 2013).....  | 32 |
| Figura 6: medição de ângulos de contato a) Tinta Lotusan (aplicada com rolo) – 115° b) Verniz Antipichação (aplicado por gravidade)- 90° c) Vidro – 30° (adaptado de KINDLEIN JR. <i>et al.</i> , 2012).....  | 33 |
| Figura 7: medida do ângulo de contato de blocos cerâmicos submetidos à diferentes temperaturas de queima (PAGNUSSAT, 2013).....   | 34 |
| Figura 8: ângulo de contato de uma gota de água sobre um substrato cerâmico com parafina (PAGNUSSAT, 2013).....   | 34 |
| Figura 9: relação entre a resistência à compressão e a hidrofobicidade a) concreto b) pasta (Fonte: STOLZ, 2013).....   | 36 |
| Figura 10: ângulo de contato sólido/líquido (adaptado de HANSEN, 2013).....   | 37 |
| Figura 11: elementos que compõem uma superfície (adaptado de ROSA, 2007).....   | 41 |
| Figura 12: influência do apalpador no perfil efetivo de rugosidade (BET, 1999 apud SILVA, 2002) .....   | 42 |
| Figura 13: tratamentos superficiais realizados por Pretto (2007).....   | 43 |
| Figura 14: aspecto superficial dos substratos de concreto estampados com diferentes rugosidades. a) rugosidade 1 – forma de arroz inclinada; b) rugosidade 2- forma de arroz alinhada; c) rugosidade 3- ondulada com bordas a 90°; d) rugosidade 4: ondulada com bordas arredondadas e mais afastadas; e) rugosidade 5: ranhuras irregulares; f) rugosidade 6- forma de moeda (STOLZ, 2011) ..... | 43 |
| Figura 15: tipos de chapisco (Adaptado de SALGADO, 2011).....   | 44 |
| Figura 16: formatos dos dentes da desempenadeira estudados por Oliveira, Carasek e Cascudo (2009).....  | 44 |
| Figura 17: face de gotas em uma superfície rugosa (adaptado de ADAMSON e GAST, 1997) ..   | 45 |
| Figura 18: gráfico reológico sugerido por Bilmes em 1942 (adaptado de TANNER e WALTERS, 1998).....  | 48 |
| Figura 19: fluxo entre duas placas paralelas: “modelo de placas paralelas” (SCHRAMM, 2006)  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 20: variação da viscosidade em função da taxa de deformação para um fluido<br>(viscosidade diferencial: $\tan(B)$ ; viscosidade aparente: $\tan(A)$ ), (MACIEL, 2012 <sup>3</sup> ) .....  | 51 |
| Figura 21: tipos de comportamento de fluxo (HOPPE <i>et al.</i> , 2007).....  | 53 |
| Figura 22: extensão de aderência da argamassa ao chapisco (PRETTO, 2007).....   | 57 |
| Figura 23: representação esquemática da mesa de consistência (CARDOSO, 2009).....   | 61 |
| Figura 24: equipamento dropping ball. a) foto do equipamento (SILVA <i>et al.</i> , 2005), b) desenho<br>esquemático do princípio de funcionamento do equipamento, (CARDOSO, 2009).....   | 62 |
| Figura 25: ensaio <i>squeeze-flow</i> (CARDOSO <i>et al.</i> , 2005) .....  | 62 |
| Figura 26: perfil típico de carga versus deslocamento do ensaio de <i>squeeze-flow</i> (Cardoso <i>et al.</i> ,<br>2005) .....  | 64 |
| Figura 27: determinação da carga de escoamento através do gráfico carga vs deslocamento<br>(COSTA, 2006).....   | 65 |
| Figura 28: desenho esquemático do ensaio de <i>vane test</i> (adaptado de BAUER <i>et al.</i> , 2007) ....  | 66 |
| Figura 29: diferentes tipos de fluxo em função da solicitação aplicada: a) fluxo entre duas placas<br>paralelas; b) fluxo circular no gap anular entre dois cilindros coaxiais; c) fluxo através de<br>capilares, orifícios, tubos e canais; d) fluxo entre um cone e uma placa ou Fluxo entre duas<br>placas (adaptado de SCHRAMM, 2006) ..... | 67 |
| Figura 30: exemplos de reômetros utilizados para argamassas. a) reômetro Viskomat, b)<br>reômetro utilizado por FRANÇA <i>et al.</i> (2012), c) reômetro Brookfield .....   | 68 |
| Figura 31: tipos de reômetros rotacionais (adaptado de SCHRAMM, 2006).....  | 69 |
| Figura 32: geometria de palhetas, cilíndrica adaptada para evitar o deslizamento e cilíndrica lisa<br>(BARNES e NGUYEN, 2001) .....   | 71 |
| Figura 33: simulação computacional do aumento da área de contato devido ao aumento de<br>pressão aplicada (a-e) e uma sobreposição dos gráficos de contorno(f) ( YASTREBOV <i>et al.</i> , 2015), sendo A: área de contato real, $A_0$ : área de contato nominal, E: módulo de Young<br>e $p_0$ : pressão externa.....                          | 73 |
| Figura 34: caixa de queda ou lançador de argamassa .....  | 74 |
| Figura 35: matriz experimental representando os fatores controláveis – Argamassas (A),<br>Composições Granulométricas (CG), energias de aplicação e substratos de diferentes<br>tensões superficiais .....  | 78 |
| Figura 36: composições granulométricas: a) porcentagem retida, b) porcentagem retida<br>acumulada.....  | 81 |
| Figura 37: vista geral do goniômetro .....  | 82 |
| Figura 38: ensaio de densidade de massa das argamassas: a) ensaio por gravidade com cone<br>apoiado em tripé; b) mesa vibratória.....   | 85 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 39: caixa de queda: a) representação gráfica do dispositivo b) representação gráfica da vista inferior do gabarito de madeira com o sistema de guilhotina c) vista inferior do gabarito de madeira com o sistema de guilhotina d) vista geral do dispositivo e seus componentes   | 87 |
| Figura 40: representação gráfica dos gabaritos: a) vista superior da argamassa envolta pelo gabarito de madeira b) vista geral da argamassa aplicada no gabarito de madeira c) vista em corte da argamassa aplicada sobre as superfícies não porosas envoltas pelo gabarito de madeira   | 88 |
| Figura 41: passo-a-passo da aplicação da argamassa sobre os substratos com a utilização da caixa de queda: a) colocação do substrato não poroso no gabarito de madeira e posicionamento do gabarito inferior, b) preenchimento do gabarito superior com argamassa, c) adensamento da argamassa, d e e) abertura da guilhotina para queda da argamassa, f) argamassa logo após a queda sobre o gabarito, g) retirada do excesso de argamassa, h) aspecto final da argamassa   | 89 |
| Figura 42: ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco: a) Densidade de massa e teor de ar incorporado (NBR 13278/05), b) Teor de ar incorporado (NBR NM 47/02), c) Retenção de água (NBR 13277/05)  | 90 |
| Figura 43: ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido: a) Resistência à tração na flexão e Resistência à compressão - 28 dias (NBR 13279/05); b) Absorção de água por capilaridade - 28 dias (NBR15259/05); c) Densidade de massa aparente no estado endurecido - 28 dias (NBR 13280/05); d) Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias (NBR 15630/08)   | 91 |
| Figura 44: vista geral do reômetro   | 92 |
| Figura 45: rotina utilizada no reômetro  | 93 |
| Figura 46: scanner tridimensional a laser  | 93 |
| Figura 47: etapas de desforma da argamassa: a) desforma b) argamassa aderida à base c) remoção da base d) aspecto final da interface   | 94 |
| Figura 48: choque térmico para descolar a argamassa do vidro a) conjunto congelado b) conjunto em água fervente  | 95 |
| Figura 49: passo-a-passo do tratamento das imagens digitalizadas: a) a nuvem de pontos é transformada em uma malha de triângulos no Geomagic Studio; b) a imagem do Geomagic é salva como arquivo PNG; c) a imagem é aberta no Photoshop, selecionada, anotando-se a quantidade de pixels; d) com a “varinha mágica” a área de contato (azul mais clara é selecionada; e) inverte-se a seleção para selecionar as falhas de contato (azul mais escuro) e anota-se a quantidade de pixels das falhas, deletando-as posteriormente, deixando transparecer o fundo preto de outro layer | 96 |
| Figura 50: tratamento de imagens digitalizadas nos softwares: a) 3D no Geomagic Studio 10 b) 2D no Geomagic Studio 10 c) Photoshop CS5   | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 51: relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) dos proporcionamentos dosados e as suas propriedades no estado fresco: a)relação entre a densidade de massa e o $V_v$ ; b) relação entre a retenção de água e o $V_v$ ; c) relação entre o teor ar mensurado pelo método da NBR 13278 e o $V_v$ ; d) relação entre o teor de ar mensurado pelo método da NBR NM 47 e o $V_v$ ..... | 101 |
| Figura 52: relação entre a absorção de água por capilaridade e a relação a/c das argamassas .....  | 102 |
| Figura 53: relação entre densidade de massa aparente no estado endurecido e teor de ar .....   | 103 |
| Figura 54: relação entre módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) e a relação água/cimento .....  | 105 |
| Figura 55: relação entre o teor de cal dos proporcionamentos e a resistência mecânica das argamassas aos 28 dias: a) resistência à tração na flexão; b) resistência à compressão...  | 106 |
| Figura 56: comportamento das argamassas A31, A32 e A33 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos.....   | 108 |
| Figura 57: comportamento de suspensões pseudoplásticas sujeitas a baixas taxas de cisalhamento (adaptado de OLHERO, FERREIRA, 2004).....   | 109 |
| Figura 58: comportamento das argamassas A61, A62 e A63 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos.....   | 110 |
| Figura 59: comportamento das argamassas A91, A92 e A93 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos.....   | 111 |
| Figura 60: ensaio de squeeze flow das argamassas A3, A6 e A9 ensaiadas aos 10 e 60 minutos, com velocidade de 3 mm/s .....   | 113 |
| Figura 61: ensaio de squeeze flow das argamassas A3, A6 e A9 ensaiadas aos 15 e 65 minutos, com velocidade de 0,1 mm/s .....   | 114 |
| Figura 62: relação entre o deslocamento máximo no ensaio de squeeze-flow e a relação a/lig   | 115 |
| Figura 63: análise reológica por reometria rotacional: a) tensão x taxa de cisalhamento A3; b) viscosidade x taxa de cisalhamento A3; c) tensão x taxa de cisalhamento A6; d) viscosidade x taxa de cisalhamento A6; e) tensão x taxa de cisalhamento A9; f) viscosidade x taxa de cisalhamento A9.....  | 116 |
| Figura 64: ANOVA do efeito do proporcionamento da argamassa sobre a viscosidade .....  | 119 |
| Figura 65: ANOVA do efeito da interação entre o proporcionamento da argamassa e a composição granulométrica sobre a viscosidade.....   | 120 |
| Figura 66: relação entre a viscosidade das argamassas e o coeficiente de uniformidade das areias .....   | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 67: imagens de corte transversal realizado nas argamassas no estado endurecido, obtidas em Microscópio Estereoscópio com objetiva de 1x e ocular de 10 vezes .....   | 123 |
| Figura 68: reometria rotacional de argamaassas com diferentes teores de cal. a) viscosidade vs. taxa de cisalhamento, b) tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento.....   | 125 |
| Figura 69: ANOVA do efeito do proporcionamento da argamassa sobre a área de contato .....   | 131 |
| Figura 70: relação entre o percentual de contato médio das argamassas e a massa específica da argamassa seca .....  | 133 |
| Figura 71: ANOVA da composição granulométrica (CG) da argamassa sobre a área de contato .....   | 134 |
| Figura 72: relação entre o coeficiente de uniformidade (Cu) e o volume de vazios (Vv) das areias com o percentual de contato médio .....  | 135 |
| Figura 73: ANOVA dos substratos sobre a área de contato .....   | 136 |
| Figura 74: correlação entre o percentual de contato médio e o ângulo de contato que uma gota de água forma com o substrato .....  | 136 |
| Figura 75: ANOVA da altura de lançamento sobre a área de contato.....   | 137 |
| Figura 76: ANOVA da interação entre a CG e o proporcionamento da argamassa sobre a área de contato.....   | 138 |
| Figura 77: ANOVA da interação entre a altura de lançamento e a tensão superficial do substrato sobre a área de contato .....  | 140 |
| Figura 78: ANOVA da interação entre a argamassa, a composição granulométrica (CG) e o substrato sobre a área de contato .....   | 141 |
| Figura 79: ANOVA da interação entre a argamassa, a altura de lançamento e o substrato sobre a área de contato.....  | 143 |
| Figura 80: relação entre a viscosidade máxima e a área de contato das argamassas com os diversos substratos aplicados com as energias de aplicação propostas, quais sejam: polietileno – 100cm; polietileno – 30cm; acrílico -100cm; acrílico – 30cm; vidro – 100cm; vidro – 30cm .....   | 145 |
| Figura 81: dispersão de valores, correlacionando área de contato com viscosidade: a) para o substrato de polietileno, lançada a 100cm de altura; b) para o substrato de polietileno, lançada a 30cm de altura; c) para o substrato de acrílico, lançada a 100cm de altura; d) para o substrato de acrílico, lançada a 30cm de altura; e) para o substrato de vidro, lançada a 100cm de altura; f) para o substrato de vidro, lançada a 30cm de altura ..... | 146 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1: classificação das superfícies conforme o ângulo de contato (adaptado de OLHARNANO, 2013).....  | 30  |
| Tabela 2: hidrofobicidade de concretos com diferentes resistências à compressão através do ângulo de contato interno de uma gota de água (STOLZ, 2013).....            | 35  |
| Tabela 3: hidrofobicidade de pastas com diferentes resistências à compressão através do ângulo de contato interno de uma gota de água (STOLZ, 2013) <sup>7</sup> ..... | 35  |
| Tabela 4: principais modificações que ocorrem em materiais cerâmicos submetidos a elevadas temperaturas (adaptado de NAVARRO, 1998 <sup>6</sup> apud DUTRA, 2007)..... | 39  |
| Tabela 5: tipos de superfícies (Adaptado de ALVES, 2002).....  | 41  |
| Tabela 6: propriedades que influenciam na reologia de argamassas.....  | 55  |
| Tabela 7: diferentes formas de realização do ensaio de <i>squeeze-flow</i> (adaptado de CARDOSO <i>et al.</i> , 2005).....   | 63  |
| Tabela 8: diferenças entre o sistema de cilindros coaxiais e o cone-placa adaptada de Schramm (2006).....  | 70  |
| Tabela 9: caracterização física e química do cimento CPIV F32.....   | 79  |
| Tabela 10: características químicas e físicas da cal hidratada CH-I.....   | 79  |
| Tabela 11: porcentagem retida nas peneiras e suas características físicas.....   | 80  |
| Tabela 12: ângulo de contato médio das superfícies.....  | 83  |
| Tabela 13: valores de tensão superficial nas interfaces dos substratos escolhidos.....   | 83  |
| Tabela 14: nomenclatura das argamassas produzidas.....   | 84  |
| Tabela 15: dosagem das argamassas.....   | 84  |
| Tabela 16: valores médios obtidos através da caracterização das composições granulométricas quanto ao empacotamento.....   | 86  |
| Tabela 17: densidade de massa média no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9.....   | 99  |
| Tabela 18: retenção de água média no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9.....   | 99  |
| Tabela 19: teor de ar incorporado médio no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9.....   | 99  |
| Tabela 20: coeficiente de capilaridade médio das argamassas A3, A6 e A9.....   | 102 |
| Tabela 21: densidade de massa aparente no estado endurecido, aos 28 dias.....  | 103 |
| Tabela 22: módulo de elasticidade dinâmico das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias.....  | 104 |
| Tabela 23: resistência à tração na flexão das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias.....   | 105 |
| Tabela 24: resistência à compressão das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias.....   | 106 |
| Tabela 25: resumo das características das argamassas no estado fresco e caracterização das composições granulométricas.....  | 117 |
| Tabela 26: ANOVA da argamassa e da CG sobre a viscosidade das argamassas ensaiadas por reometria rotacional.....   | 118 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 27: comparação múltipla de médias pelo método de Fisher da influência do<br>proporcionamento das argamassas e da CG sobre a viscosidade.....  | 122 |
| Tabela 28: dosagem da argamassa A122 .....   | 124 |
| Tabela 29: influência do teor de cal na viscosidade e na tensão de cisalhamento das<br>argamassas .....  | 125 |
| Tabela 30: exemplos de imagens resultantes da digitalização tridimensional a laser tratadas nos<br>softwares Geomagic Studio 10 e no Photoshop C5S e a área de contato real medida .....   | 127 |
| Tabela 31: percentual médio de área de contato das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9<br>(1:2:9) lançadas a 30cm de altura sobre diferentes substratos .....   | 128 |
| Tabela 32: percentual médio de área de contato das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9<br>(1:2:9) lançadas a 100cm de altura sobre diferentes substratos .....  | 129 |
| Tabela 33: ANOVA dos fatores controláveis propostos sobre a variável de resposta: área de<br>contato.....  | 130 |
| Tabela 34: análise múltipla de médias pelo Método de Fisher do efeito isolado dos<br>proporcionamentos das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05,<br>indicam que as propriedade avaliadas são estatisticamente iguais) ..... | 132 |
| Tabela 35: análise múltipla de médias do efeito isolado das composições granulométricas sobre<br>a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedade avaliadas são<br>estatisticamente iguais) .....                            | 134 |
| Tabela 36: análise múltipla de médias do proporcionamento das argamassas e da coposição<br>granulométrica sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedade<br>avaliadas são estatisticamente iguais).....              | 139 |
| Tabela 37: análise múltipla de médias do substrato e da altura de lançamento das argamassas<br>sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedade avaliadas são<br>estatisticamente iguais) .....                        | 140 |
| Tabela 38: análise múltipla de médias dos substratos e das composições granulométricas e das<br>argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedade<br>avaliadas são estatisticamente iguais).....             | 142 |
| Tabela 39: análise múltipla de médias do substrato, da altura de lançamento e do<br>proporcionamento das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05,<br>indicam que as propriedade avaliadas são estatisticamente iguais) .....   | 144 |
| Tabela 40: resumo dos principais resultados obtidos na pesquisa .....  | 148 |

## LISTA DE SIGLAS

A31: Argamassa de proporcionamento 1:0:3 e composição granulométrica- CG 1

A32: Argamassa de proporcionamento 1:0:3 e composição granulométrica- CG 2

A33: Argamassa de proporcionamento 1:0:3 e composição granulométrica- CG 3

A61: Argamassa de proporcionamento 1:1:6 e composição granulométrica- CG 1

A62: Argamassa de proporcionamento 1:1:6 e composição granulométrica- CG 2

A63: Argamassa de proporcionamento 1:1:6 e composição granulométrica- CG 3

A91: Argamassa de proporcionamento 1:2:9 e composição granulométrica- CG 1

A92: Argamassa de proporcionamento 1:2:9 e composição granulométrica- CG 2

A93: Argamassa de proporcionamento 1:2:9 e composição granulométrica- CG 3

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA: Análise de variância

ANSI: *American National Standards Institute*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CG: composição granulométrica

Cu: Coeficiente de Uniformidade

IRA: Inicial Rate Absorption

LAMTAC: Laboratório de materiais e do ambiente construído

LdSM: Laboratório de design e seleção de materiais

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NM: Asociación Mercosur de Normalización

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

RS: Rio Grande do Sul

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SBTA: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas

Vv: Volume de vazios

## 1 INTRODUÇÃO

A importância do aprofundamento dos estudos sobre argamassas de revestimento justifica-se pelo fato destes materiais serem muito utilizados como revestimento interno e externo nas edificações brasileiras e além disso, por se observar o recorrente aparecimento de manifestações patológicas nos mesmos.

Estudos sobre a aderência de argamassas de revestimentos vêm sendo desenvolvidos por vários pesquisadores nacional e internacionalmente (HALL, 1977; HALL e YAU, 1987; CARASEK, 1996; COURARD, 1998; PRUDÊNCIO *et al.*, 1999; SUGO *et al.*, 2001; GONÇALVES, 2004; PRETTO, 2007; RUDUIT, 2009; ROMERO, 2010; STOLZ, 2011; PAGNUSSAT, 2013; entre outros) com o intuito de compreender as interações que ocorrem entre a argamassa e os substratos porosos e evitar o aparecimento de manifestações patológicas, melhorando assim o desempenho dos revestimentos e conseqüentemente das edificações.

Estimuladas pelo trabalho considerado pioneiro neste assunto no Brasil, desenvolvido por Carasek (1996), novas teorias passaram a ser discutidas no tocante à questão da aderência substrato/argamassa. Busca-se compreender os fenômenos que exercem maior influência na resistência de aderência, sejam estes resultantes da formação de microaderência devido, basicamente, à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou retidos entre a rugosidade da base de aplicação (CARASEK *et al.*, 2001) ou de macroaderência, resultante da ancoragem pela penetração do adesivo nas irregularidades do substrato (GONÇALVEZ, 2004).

A aderência mecânica das argamassas ao substrato resulta da conjunção de três propriedades da interface argamassa-substrato atuantes no sistema, sendo elas (CARASEK *et al.*, 2001 e GONÇALVES, 2004):

- a) a resistência de aderência à tração, devido aos esforços normais gerados na utilização de um sistema de revestimento;
- b) a resistência de aderência ao cisalhamento, pelos esforços verticais e tangenciais ao revestimento gerados com a atuação da gravidade na argamassa aderida ao substrato;

- c) a extensão de aderência, que evidencia a possível existência de falhas de contato com espaços vazios na interface.

Pode-se dizer que entre as três propriedades citadas pelos autores, a extensão de aderência pode ser considerada como uma condição necessária ao desenvolvimento da aderência, visto que sem contato não haverá aderência da argamassa aos substratos.

Segundo Paes (2004) a extensão de aderência corresponde à razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de se obter contato na interface argamassa/substrato. A autora afirma que esta propriedade se mostra importante no desenvolvimento de uma aderência mais resistente e duradora e depende da trabalhabilidade da argamassa, das características do substrato e do preparo da base.

Provavelmente, as grandes variações nos resultados de resistência de aderência à tração obtidos em canteiros de obra estão relacionadas às falhas de contato da interface argamassa/substrato, estando as argamassas pontualmente aderidas (PAES, 2004). Os fatores que influenciam na formação desta extensão de aderência são justamente o foco do trabalho em questão.

Antunes (2010) propôs um modelo para resistência de aderência à tração, onde considerou como parâmetros que influenciam no desenvolvimento da aderência, a resistência mecânica da argamassa e a quantidade de defeitos na camada de revestimento (equação 1). Quanto aos defeitos, a autora os considerou função da relação entre a reologia da argamassa e a energia de impacto (equação 2).

$$R_{ad} = f(R_{mecânica} - Defeitos - k(\text{interação base/argamassa})) \quad \text{Equação 1}$$

$$Defeitos = f(\text{Reologia} - \text{Energia} - k(\text{interação base/argamassa})) \quad \text{Equação 2}$$

Por fim, Antunes (2010) afirma que “a aderência do revestimento depende diretamente de uma correta associação entre a reologia do material e a energia de impacto, para cada tipo de base e composição de argamassa”.

Neste contexto, verifica-se que há alguns anos atrás, a maioria das pesquisas tinha foco apenas nas propriedades do estado endurecido das argamassas, ficando o estado fresco em segundo plano (COSTA, 2006). No entanto, com o passar do tempo, observou-se que para se obter sistemas de revestimento com desempenho adequado, deveria haver uma compatibilização entre a argamassa e o substrato onde a mesma será aplicada. Nesta interação diversas propriedades estão envolvidas, como a trabalhabilidade das argamassas que irá facilitar ou não o molhamento da superfície e a porosidade e rugosidade do substrato em que ela será aplicada, que irão influenciar na facilidade com que esta argamassa irá se espalhar e aderir sobre ele.

Buscando estudar as propriedades das argamassas e dos substratos intervenientes na aderência foram desenvolvidos alguns trabalhos, como o realizado por Groot e Larbi (1999). Os autores estudaram a aderência entre argamassas e blocos, concluindo que os efeitos do fluxo de água e as condições de hidratação na interface argamassa/substrato devem ser levados em consideração para explicar o desenvolvimento da resistência de aderência. Os autores acrescentam que não só o fluxo de água da argamassa para o bloco, que ocorre imediatamente após o contato da argamassa com o bloco, mas também o fluxo de água reverso do bloco para a argamassa, que ocorre antes da compactação e hidratação inicial, podem influenciar significativamente no desenvolvimento da resistência de aderência.

No entanto, o conhecimento deste fenômeno complexo ainda está incompleto (GROOT e LARBI, 1999).

Um exemplo de que não somente no Brasil, mas em outros países existe uma preocupação relativa à aderência de revestimentos de fachada, está no trabalho de Mahaboonpachai *et al.* (2008), realizado no Japão, a fim de entender os descolamentos ocorridos em fachadas de substratos de concreto revestidos por argamassas e pastilhas cerâmicas. Os autores expuseram o referido sistema de revestimento ao aquecimento, que simulou a radiação solar, visando induzir o cisalhamento na interface entre as camadas do sistema de revestimento. Por fim, os sistemas foram submetidos à solução fluorescente de sódio, de forma que as regiões com propagação de fissuras, que poderiam gerar descolamentos, foram identificadas.

Pagnussat (2013) verificou que ao cobrir parcialmente e de forma alternada 50% da superfície de blocos cerâmicos com parafina e após raspar o excesso da mesma, deixando apenas os poros impregnados com a substância, os valores de resistência de aderência à tração das argamassas de revestimento aplicadas sobre estes blocos diminuíram consideravelmente. Isto mostra que por melhor que seja a argamassa aplicada sobre o bloco, se sua porosidade não for adequada ou, como neste caso, estiver parcialmente obstruída, não haverá uma interação adequada entre o conjunto, prejudicando o desempenho do sistema. Além disso, os blocos com parafina apresentaram um considerável aumento da tensão superficial, o que pode ter dificultado o molhamento da superfície dos mesmos.

Stolz (2011) avaliou a influência da macrorugosidade do substrato e de argamassas de diferentes características reológicas na área de contato e, conseqüente, aderência do conjunto e verificou que a extensão de aderência decorrente da área de contato da argamassa aplicada sobre o substrato está diretamente relacionada com as resistências de aderência à tração e ao cisalhamento. Para que se tenha um aumento desta área de contato é necessário que a reologia da argamassa seja compatível com o substrato onde ela será aplicada, sendo que rugosidades

criadas visando aumentá-la podem, ao contrário, reduzi-la se a reologia da argamassa aplicada não for adequada para penetrar nestas rugosidades, gerando assim falhas de contato.

Pretto (2007) avaliou o efeito das diferentes rugosidades dos substratos, geradas através de tratamentos superficiais do concreto, na resistência de aderência do sistema. A autora concluiu que são diversos os fatores influentes nesta propriedade. Em seu trabalho verificou a influência da rugosidade do substrato bem como da sua sucção capilar. Em relação à argamassa de revestimento, verificou a influência significativa da relação água/materiais secos e da sua forma de aplicação, assim como a forma de aplicação do chapisco.

Costa e John (2013) avaliaram a influência da absorção inicial da base de substratos cimentícios de mesma rugosidade e porosidade na aderência de argamassas. Os substratos foram tratados com hidrofugante à base de silano para alterar seu nível de absorção, avaliando-se um substrato referência, um substrato com hidrofugante e um substrato com hidrofugante tratado com lixamento de superfície. Ao final da pesquisa os autores verificaram que não houve correlação entre a absorção de água (afetada pela presença ou não de hidrofugante) e a resistência de aderência. Além disso, atribuíram o acréscimo da resistência de aderência encontrado em superfícies tratadas com silano ao aumento do contato das partículas da argamassa com estes substratos, no entanto, a pesquisa não avaliou possíveis interações químicas na interface entre o hidrofugante silano e os compostos da argamassa.

A partir dessas pesquisas verifica-se que de nada adianta produzir uma argamassa com excelentes características quando analisada por si só, da mesma forma que não há vantagens em se ter um bloco cerâmico ou de concreto com ótimas propriedades, quanto à absorção, rugosidade e tensão superficial, por exemplo, quando analisados individualmente. Em termos de aderência, é essencial uma compatibilidade entre a argamassa e o substrato. Esta compatibilidade seria decorrente de uma extensão de aderência mais próxima de 100%, resultante de uma argamassa que possui facilidade em se espalhar sobre a superfície do bloco, ao mesmo tempo em que o bloco deve possuir rugosidade e porosidade adequadas para facilitar este espalhamento sem comprometer o desempenho deste sistema de revestimento.

Neste contexto, pretende-se com esta pesquisa contribuir para o entendimento da influência das propriedades reológicas das argamassas de revestimento no desenvolvimento da área de contato das mesmas quando aplicadas sobre substratos de tensões superficiais distintas através de diferentes energias de aplicação.

## 1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa consiste em determinar a influência dos parâmetros reológicos de argamassas de revestimento e da tensão superficial dos substratos no desenvolvimento da área de contato na interface dos mesmos.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- a) analisar a influência do proporcionamento e da composição granulométrica na reologia das argamassas;
- b) verificar a influência da reologia da argamassa no desenvolvimento da área de contato da interface argamassa/substrato;
- c) verificar a influência da energia de aplicação no desenvolvimento da área de contato da interface argamassa/substrato;
- d) verificar a influência da tensão superficial do substrato no desenvolvimento da área de contato da interface argamassa/substrato;
- e) desenvolver metodologia para a quantificação da área de contato da interface argamassa/substrato.

## 1.2 HIPÓTESE

A hipótese a ser verificada com este trabalho é: conhecendo-se as características reológicas de uma argamassa de revestimento, a energia com que ela será aplicada e as propriedades de tensão superficial do substrato onde ela será aplicada, é possível prever seu desempenho quanto ao molhamento do substrato, ou seja, a área de contato da interface argamassa/substrato.

## 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se uma introdução e justificativa ao tema bem como os objetivos e hipótese que regem esta pesquisa. No capítulo 2 inicia-se a revisão bibliográfica onde são abordadas as propriedades das superfícies que influenciam no molhamento. No terceiro capítulo os diversos aspectos sobre a reologia são discutidos. Dando continuidade à revisão bibliográfica, no capítulo 4 estão abordados os principais conceitos sobre a energia de aplicação. O programa experimental, onde se definiram as variáveis, materiais e métodos de pesquisa, está descrito no capítulo 5. No capítulo 6, estão os resultados,

sua análise e discussões. Por fim, no capítulo 7 estão as considerações finais, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 PROPRIEDADES DAS SUPERFÍCIES QUE INFLUENCIAM NO MOLHAMENTO

“O fenômeno do molhamento consiste na expansão espontânea de uma fase sobre a superfície de outra” (ISAIA, 2010). Segundo o mesmo autor, em contato com um sólido, o líquido pode se espalhar total ou parcialmente ao longo da superfície sólida, ou mesmo não se espalhar. De acordo com o princípio da minimização de energia em processos espontâneos, o líquido se espalhará com maior facilidade quanto menor a tensão superficial na interface líquido/sólido (CARASEK, 2010).

O termo molhamento é aplicado quando nos referimos ao deslocamento do ar em uma superfície sólida ou líquida pela água ou outra solução aquosa. Os tipos de molhamento podem ser divididos em três, quais sejam (ROSEN, 1978):

- molhamento por espalhamento: um líquido em contato com um substrato se espalha e expulsa outro fluido, como o ar, da superfície. Para este molhamento acontecer espontaneamente, a energia livre do substrato deve diminuir durante o espalhamento (figura 1 a);
- molhamento por adesão: um líquido que originalmente não estava em contato com o substrato passa a fazer contato e adere a ele pela ação de uma “força propulsora” dependente das tensões sólido/ar, líquido/ar e sólido/líquido (figura 1 b);
- molhamento por imersão: um substrato que inicialmente não estava em contato com um líquido é imerso completamente pelo líquido (figura 1 c).

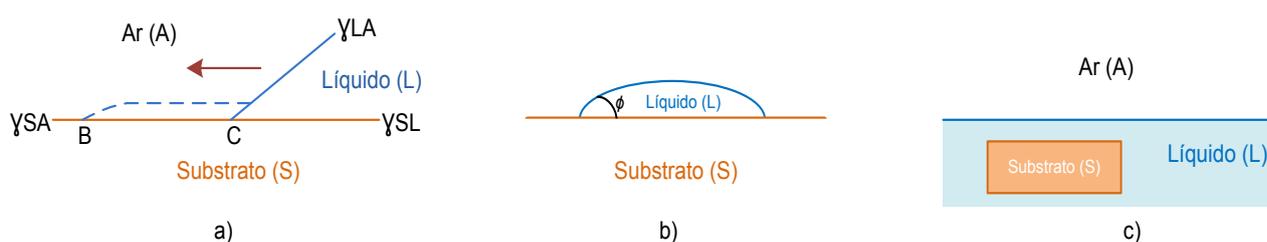


Figura 1: tipos de molhamento: a) por espalhamento; b) por adesão; c) por imersão (adaptado de ROSEN, 1978)

Nos sistemas de revestimentos argamassados, não se pode pensar no desempenho da argamassa isoladamente, mas avaliar a compatibilidade entre ela e o substrato no qual será aplicada, além de fatores climáticos e de aplicação. Ao serem aplicadas sobre um substrato poroso, as argamassas sofrerão uma alteração de sua reologia inicial, entre outros fatores, decorrente da perda de água e das interações com este substrato em sua interface.

“As interfaces são regiões do espaço onde ocorrem interações entre sólidos, gases e/ou líquidos de naturezas distintas, ou diferentes estados de uma mesma substância, como é o caso de um sólido em contato com seu vapor” (ISAIA, 2010).

A área de contato não é igual à área da interface, uma vez que não há superfície perfeitamente plana. Qualquer superfície em escala microscópica possui muitas rugosidades, de forma que a área de contato entre duas superfícies é muito menor do que a área de contato aparente (possível), como mostra a figura 2 (YANG e PERSSON, 2008; SOMORJAI e LI, 2010).

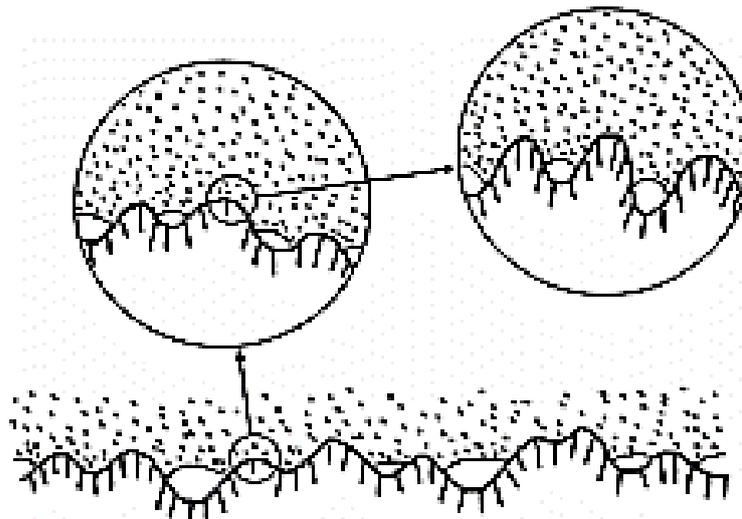


Figura 2: área de contato interfacial de uma superfície rugosa, evidenciando as falhas de contato e as diferentes magnitudes das rugosidades que devem ser analisadas em diferentes escalas. Fonte: Yang e Persson, 2008.

Yang e Persson (2008) ressaltam a importância de se analisar a interface em diferentes escalas (aumentos), de forma que uma análise macro pode gerar a falsa impressão de haver um contato total na interface, quando há falhas em nível micro.

São diversas as características do substrato que irão influenciar no comportamento da argamassa aplicada sobre ele e algumas delas serão abordadas neste capítulo.

## 2.1 TENSÃO SUPERFICIAL

Para que ocorra a interação da argamassa com o substrato é necessário que exista contato entre eles. A facilidade ou não da argamassa se espalhar vai depender, entre outros fatores, das suas propriedades reológicas e da tensão superficial do substrato.

O comportamento das superfícies e do material do interior do volume considerado são sempre diferentes devido ao fato de que, comumente nas fronteiras, o empilhamento dos átomos é parcialmente diferente. Na superfície, os átomos não se encontram em estado de equilíbrio, pois não tem os mesmos vizinhos dos átomos que compõem o interior do volume (AGUILAR, 2010).

A tensão superficial é uma medida direta das forças intermoleculares. A tensão nas camadas superficiais é resultado da atração de todo o material sobre a camada superficial que tende a reduzir o número de moléculas na região, gerando um aumento na distância intermolecular (ROMERO, 2010).

Embora denominada como a energia livre por unidade de área, a tensão superficial pode igualmente ser pensada como uma força por unidade de comprimento (ADAMSON e GAST, 1997).

As forças de atração mais comuns são as de van der Waals, podendo ser atribuídas a forças de dispersão e forças polares. Quando um líquido entra em contato com um sólido aparecem forças opostas: por um lado o sólido tende a ser envolto por moléculas de líquido para diminuir a energia potencial das moléculas de sua superfície, por outro, o líquido tende a permanecer agrupado para diminuir sua superfície exterior. Somente quando a energia superficial do sólido é igual ou superior à tensão superficial do líquido é possível a desagregação do líquido na superfície do sólido, produzindo-se o molhamento (ROMERO, 2010).

A molhabilidade dos substratos irá depender tanto da sua composição química quanto da sua rugosidade, a qual altera o ângulo de contato, sendo que as interações entre a argamassa e o substrato devem ter as menores tensões superficiais possíveis bem como altas pressões capilares. Desta forma, o ideal é que se obtenha um substrato com superfície hidrofílica, com boa molhabilidade, utilizado com uma argamassa compatível com suas propriedades (PRETTO, 2007).

Uma forma de se observar a molhabilidade de um substrato consiste no cálculo do ângulo de contato. Este parâmetro se define como o ângulo que a superfície do sólido forma com a superfície do líquido na zona de contato entre ambas as fases, sendo que se considera que um líquido molha um sólido quando o ângulo de contato é inferior a  $90^\circ$ . Então, verifica-se que quanto maior o ângulo de contato menor é o molhamento da superfície (ROMERO, 2010).

As superfícies podem ser classificadas como hidrófobas ou hidrofílicas, conforme a tabela 1.

Tabela 1: classificação das superfícies conforme o ângulo de contato (adaptado de OLHARNANO, 2013)

| <b>Ângulo de contato</b> | <b>Tipo de Superfície</b> | <b>Exemplo</b>                              |
|--------------------------|---------------------------|---|
| ~0                       | Superhidrofílica          | TiO <sub>2</sub> irradiado com ultravioleta |
| <30                      | Hidrofílica               | Vidro                                       |
| 30-90                    | Intermediária             | Alumínio                                    |
| 90-140                   | Hidrofóbica               | Plástico                                    |
| 140+                     | Superhidrofóbica          | Folha de Lótus                              |

Um material é considerado hidrofílico quando tem um baixo ângulo de contato ou, em outras palavras, considera-se que o líquido molha um sólido quando o ângulo de contato é inferior a  $90^\circ$ . Acima de  $90^\circ$ , considera-se que o líquido é hidrófobo ou superhidrofóbico, acima de  $140^\circ$ , não molhando a superfície (RAMÉ-HART, 2013). Através da figura 3 pode-se visualizar a relação do ângulo de contato com a molhabilidade das superfícies.

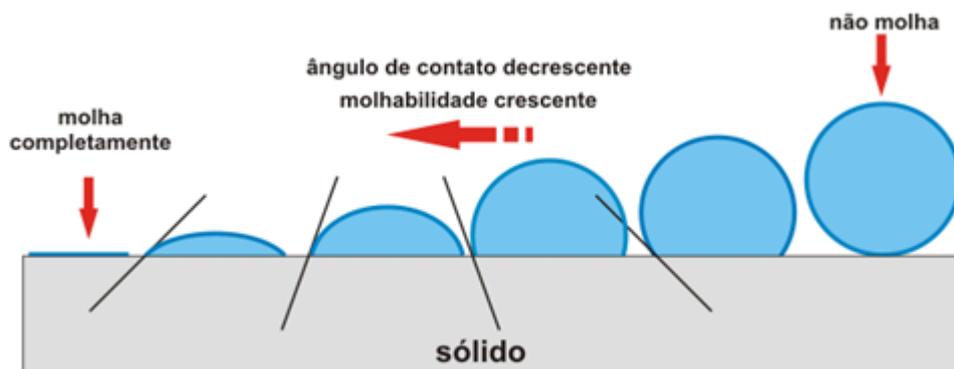


Figura 3: molhabilidade das superfícies (ALHANATI, 2013)

A figura 4 representa o comportamento de molhabilidade nos diferentes substratos, em três diferentes situações expostas por Quéré (2002):

- a) na situação “a” observa-se que uma gota de água molha uma superfície normal, formando um ângulo de contato interno pequeno;
- b) na situação “b” observa-se que se tem uma superfície muito hidrófoba, formando uma gota quase esférica em sua superfície, com um ângulo de contato interno bastante alto, não gerando molhamento;
- c) na situação “c” pode-se observar o comportamento de uma gota de água sobre uma superfície com irregularidades. Nesta situação, se tem uma superfície revestida com repelente à água e os espaços entre as irregularidades, preenchidos com ar. Este comportamento é chamado de “regime de Fakir”, onde a gota de água encontra-se com um ângulo de contato aparente maior do que  $150^\circ$  (comportamento comum em superfícies muito hidrófobas). Caso a altura das irregularidades fosse menor, o ângulo de contato seria reduzido, pois o ar não ficaria mais aprisionado abaixo da gota.

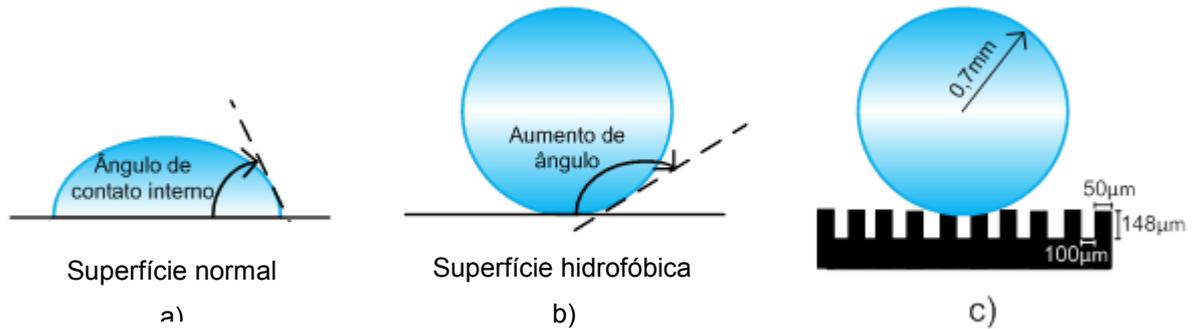


Figura 4: comportamento das diferentes superfícies quanto à molhabilidade: a) superfície normal b) superfície hidrofóbica c) superfície com irregularidades (adaptado de QUÉRÉ, 2002)

O ângulo de contato pode variar conforme a massa de líquido depositada sobre a superfície de um sólido e suas propriedades reológicas, bem como a rugosidade de um substrato pode ocasionar erros na medida deste (ROMERO, 2010). A figura 5 mostra as forças de coesão do líquido e as forças adesivas que atuam entre o líquido e o sólido (ALHANATI, 2013).

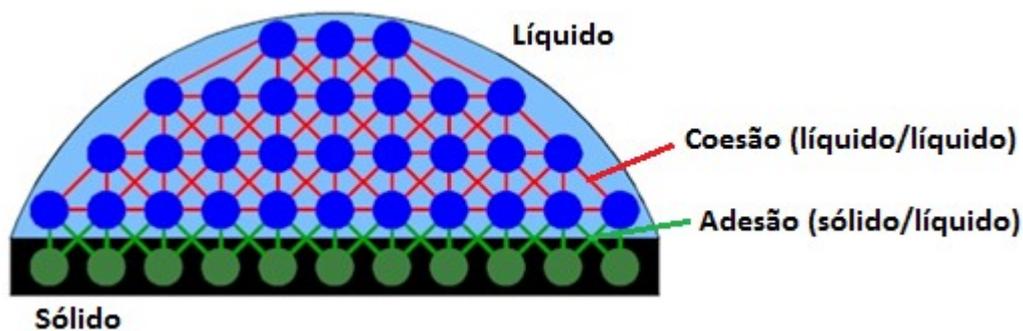


Figura 5: forças atuantes na molhabilidade (adaptado de ALHANATI, 2013)

O ângulo de contato pode ser medido através de equipamentos que permitem que uma gota de água (ou outro líquido) seja lançada sobre a superfície a ser analisada enquanto uma câmera digital de alta precisão fotografa a gota sobre a base. Com esta imagem, pode-se medir o ângulo de contato com o auxílio de softwares como o AutoCAD, por exemplo, conforme as imagens mostradas na figura 6, resultantes do artigo de Kindlein Jr. *et al.* (2012), onde o ângulo de contato de tintas auto-limpantes e vernizes foi medido e comparado com um vidro padrão.

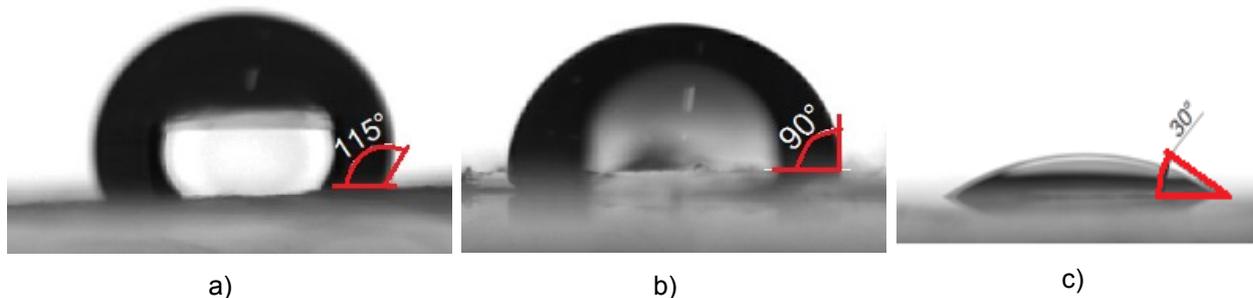


Figura 6: medição de ângulos de contato a) Tinta Lotusan<sup>1</sup> (aplicada com rolo) – 115° b) Verniz Antipichação (aplicado por gravidade)- 90° c) Vidro – 30° (adaptado de KINDLEIN JR. *et al.*, 2012)

Quanto menor for o valor de tensão superficial e a viscosidade de uma pasta aglomerante, maior será sua capacidade de molhar o substrato, fato que reduz o ângulo de contato entre as superfícies e aumenta o contato físico. Estas forças estão diretamente ligadas à reologia da argamassa e à porosidade do substrato (MORENO JUNIOR e SELMO, 2007). Neste sentido, cabe salientar que há uma limitação nesta afirmação, já que uma argamassa com viscosidade muito baixa não é desejável, pois a mesma pode escorrer na superfície aplicada, prejudicando ou não gerando a adesão e a aderência do sistema.

Este comportamento foi constatado por Paravisi (2008), quando avaliou a resistência de aderência à tração de argamassas projetadas com diferentes viscosidades. A autora verificou que nos locais aonde se aplicou argamassa excessivamente fluida, decorrente da lubrificação do mangote, ocorreu uma redução nos valores de resistência de aderência, enquanto que nos locais aonde aplicou-se argamassas com viscosidade considerada adequada para projeção os valores de resistência de aderência foram maiores.

Pagnussat (2013) avaliou a hidrofobicidade de blocos cerâmicos submetidos a quatro diferentes temperaturas de queima, por meio da medição do ângulo de contato interno de uma gota de água lançada sobre a superfície e verificou, através de análises estatísticas, que por mais que os blocos queimados a temperaturas de 700, 800, 900 e 1000°C apresentem comportamentos quanto à absorção de água distintos (porosidades distintas), a sua hidrofobicidade não foi afetada. As medidas médias do ângulo interno de uma gota de água para cada uma das temperaturas estudadas pelo autor foram de 22,57°, 25,15°, 25,94° e 30,27°, respectivamente (figura 7).

Ao tratar o substrato cerâmico com parafina, Pagnussat (2013) voltou a medir o ângulo de contato da gota de água lançada sobre o bloco e verificou que o mesmo sofreu alteração, gerando um ângulo de contato médio de 120° (figura 8), tornando a superfície hidrófoba e comprometendo a facilidade de espalhamento da argamassa no substrato.

33\_\_\_\_\_

<sup>1</sup> Tinta desenvolvida com inspiração no efeito hidrófobo da folha de Lótus, de forma que as partículas rolam sobre as superfícies pintadas com esta tinta, levando consigo as sujidades, sendo chamada por este motivo de “auto limpante”.

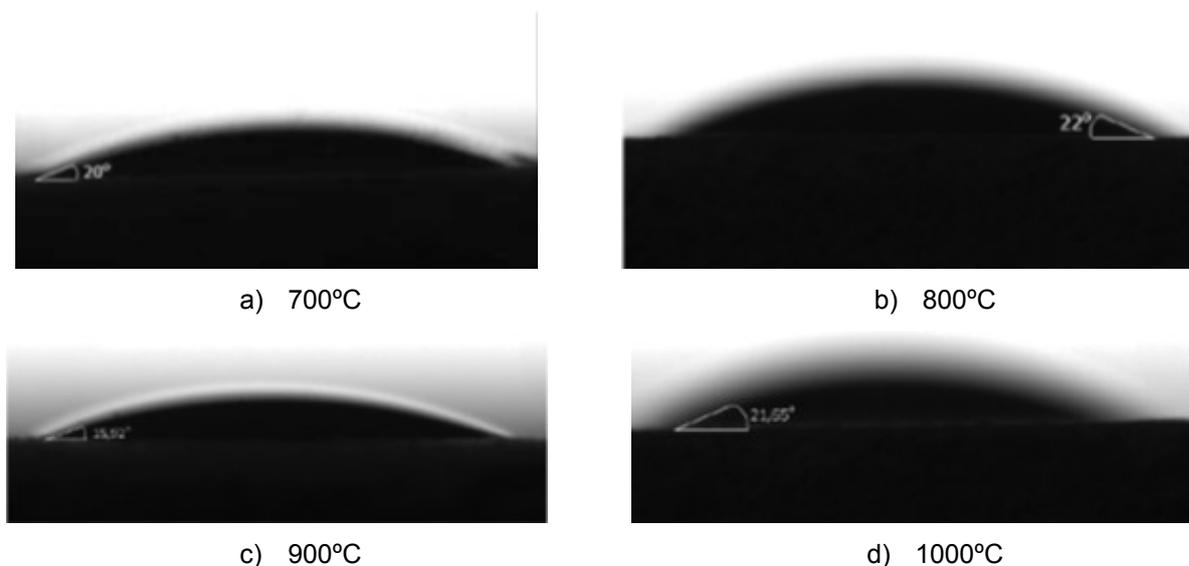


Figura 7: medida do ângulo de contato de blocos cerâmicos submetidos à diferentes temperaturas de queima (PAGNUSSAT, 2013)

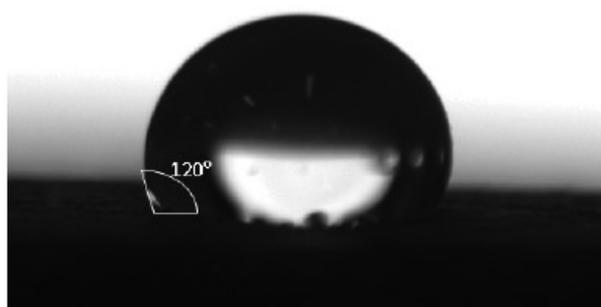


Figura 8: ângulo de contato de uma gota de água sobre um substrato cerâmico com parafina (PAGNUSSAT, 2013)

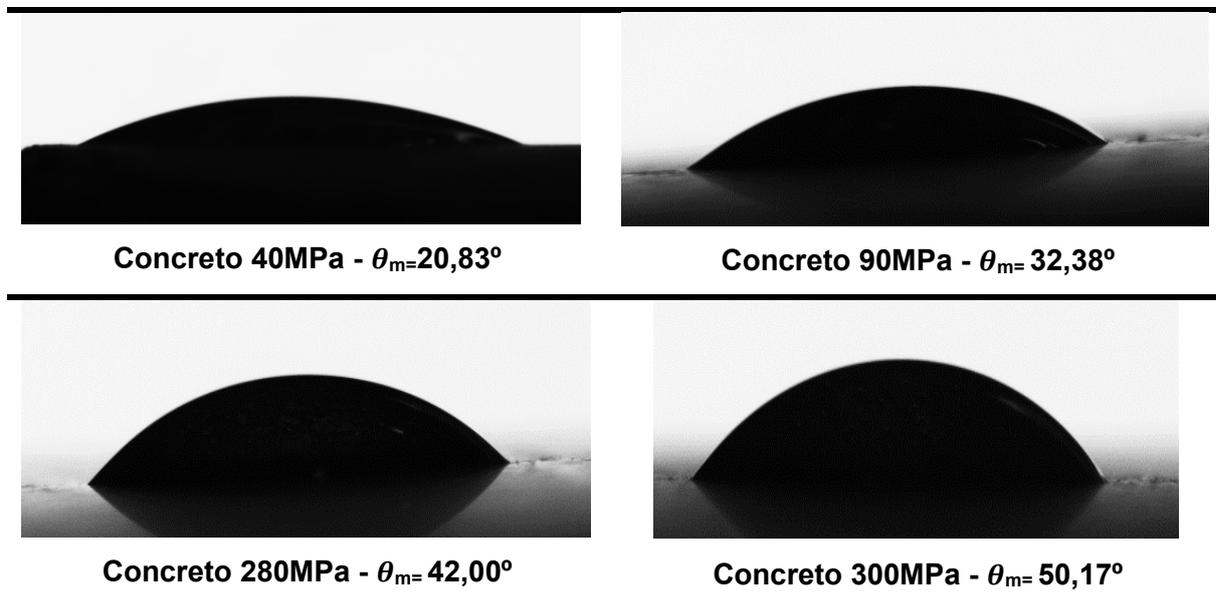
Com relação ao comportamento do concreto quanto a sua hidrofobicidade, ao ser dosado com diferentes materiais para atingir diferentes resistências à compressão não foram encontradas publicações. Desta forma, foi desenvolvido um estudo no intuito de avaliar a influência da resistência à compressão de concretos, produzidos no LAMTAC/NORIE/UFRGS, na sua hidrofobicidade superficial (STOLZ, 2013)<sup>2</sup>. Para tal, coletaram-se concretos de diferentes resistências à compressão, de diferentes trabalhos que estavam sendo desenvolvidos no laboratório, sem preocupar-se muito com sua composição, visto que o objetivo do estudo era verificar se no dia-a-dia da construção civil existem materiais que servem como substratos para argamassas de revestimento que possuem diferentes tensões superficiais.

Para cada concreto analisado, foram realizadas três medições de ângulo de contato das superfícies e uma gota de água. Na tabela 2 estão apresentadas imagens dos concretos

<sup>2</sup> STOLZ, C. M. Avaliação da hidrofobicidade de concretos com diferentes resistências à compressão. Documento interno (não publicado), 2013.

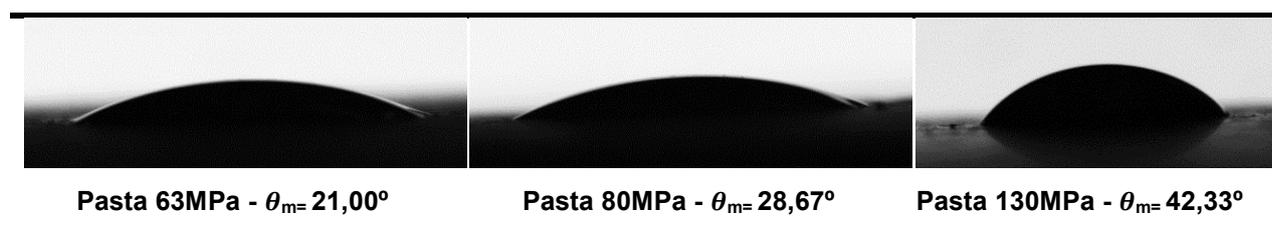
analisados e o ângulo de contato médio ( $\theta_m$ ) obtido através de medição em goniômetro e posterior análise no software AutoCAD 2013.

Tabela 2: hidrofobicidade de concretos com diferentes resistências à compressão através do ângulo de contato interno de uma gota de água (STOLZ, 2013)<sup>3</sup>



Adicionalmente, avaliou-se a hidrofobicidade de pastas de cimento Portland com diferentes resistências à compressão. As mesmas apresentaram o comportamento apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: hidrofobicidade de pastas com diferentes resistências à compressão através do ângulo de contato interno de uma gota de água (STOLZ, 2013)<sup>7</sup>



Verificou-se nas análises realizadas que existe uma relação entre a resistência à compressão e a hidrofobicidade dos concretos e pastas. Quanto maior a resistência, mais hidrofóbica a superfície, ou seja, maior a dificuldade para o molhamento (figura 9).

35

<sup>3</sup> STOLZ, C. M. Avaliação da hidrofobicidade de concretos com diferentes resistências à compressão. Documento interno (não publicado), 2013.

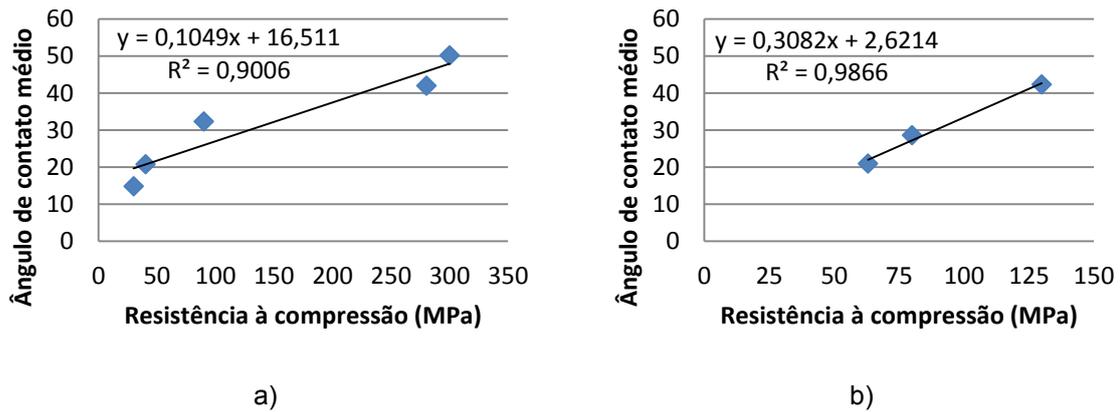


Figura 9: relação entre a resistência à compressão e a hidrofbicidade a) concreto b) pasta (Fonte: STOLZ, 2013<sup>4</sup>)  
Ainda não foi realizada uma investigação mais aprofundada sobre as variáveis que influenciaram na hidrofbicidade dos concretos e pastas visto que o estudo encontra-se em andamento.

### 2.1.1 Equação de Young-Laplace

Diferentemente das demais tensões, que são determinadas através de uma força dividida por uma área, a tensão superficial resulta da divisão de uma força por uma unidade de comprimento ou de uma energia por uma área (FOX, 2004). Observa-se que na maioria dos casos, quando um líquido é colocado sobre um sólido, ele não molha a superfície, mas permanece em forma de gota com um ângulo de contato específico entre as fases sólida e líquida (ADAMSON e GAST, 1997).

Considerando-se um líquido em repouso sobre uma superfície sólida, a diferença de pressão  $\Delta P$  entre o interior e o exterior do menisco faz com que a superfície da gota curve-se de forma que a somatória das forças resultantes da tensão superficial possua um componente normal à superfície ( $F_N$ ) e esse componente equilibre a diferença de pressões (FOX, 2004).

Define-se então, através da equação 3, tensão superficial ( $\gamma$ ) como a relação entre  $F_N$  e dobro do raio de curvatura médio ( $R_M$ ) da superfície (FOX, 2004).

$$\gamma = \frac{F_N}{2R_M} \quad \text{Equação 3}$$

Considerando-se que  $R_x$  e  $R_y$  são os raios de curvatura em cada um dos eixos paralelos à superfície, tem-se a equação 4 (FOX, 2004).

$$R_M = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad \text{Equação 4}$$

<sup>4</sup> STOLZ, C. M. Avaliação da hidrofbicidade de concretos com diferentes resistências à compressão. Documento interno (não publicado), 2013.

Sabendo-se que  $F_N = \Delta P$ , tem-se então a equação de Young-Laplace (equação 5) (ADAMSON e GAST, 1997 e FOX, 2004).

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right) \quad \text{Equação 5}$$

No caso dos ângulos de contato, a interface líquido-vapor incide sobre a sólida. Este ângulo é único para cada sistema, pois dependerá da interação entre as três interfaces (ADAMSON, 1997). Com ângulo de contato como condições de contorno, a equação de Young-Laplace fica conforme a equação 6.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde  $\gamma_{SV}$  é a energia de interface entre o sólido e o vapor,  $\gamma_{SL}$  entre o sólido e o líquido e  $\gamma_{LV}$  entre o líquido e o vapor. A energia entre o líquido e o vapor é a mesma equação 5,  $\gamma_{LV} = \gamma$  e o ângulo  $\theta$  é obtido experimentalmente. Esta equação pode ser mais bem visualizada através da figura 10. Se o espalhamento é completo, o ângulo de contato tende a zero, por outro lado, se o ângulo de contato é próximo a  $180^\circ$ , o coeficiente de espalhamento é altamente negativo.

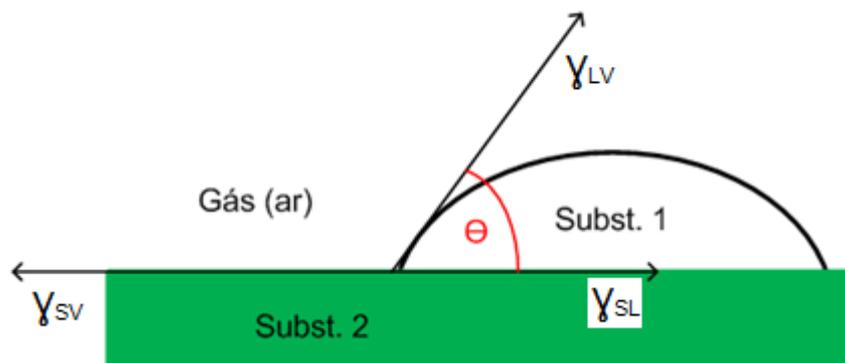


Figura 10: ângulo de contato sólido/líquido (adaptado de HANSEN, 2013)

A importância da equação de Young-Laplace é evidente, mesmo modificada visando avaliar a heterogeneidade ou a rugosidade das superfícies (ADAMSON e GAST, 1997).

## 2.2 POROSIDADE

A distribuição dos poros influencia fortemente na capacidade de absorção de água do substrato. A quantidade de poros com diâmetro superior a 50nm (macroporos) exerce grande influência na capacidade de absorção de água, uma vez que esses são os principais responsáveis pela permeabilidade da base. Os mesoporos (2 a 50 nm) e os microporos, por sua vez, estão relacionados com outras propriedades como a retração e a fluência (KAZMIERCZAK *et al.*, 2007).

Quando um tijolo seco é colocado em uma bandeja contendo uma lâmina de água limpa, ocorrem alguns fenômenos específicos: a água é absorvida para o sólido poroso pela ação de forças capilares e se distribui no seu interior, o ar que ocupa os poros do tijolo é parcialmente deslocado pela água absorvida e nas superfícies não imersas ocorre a evaporação. Por último, um equilíbrio é estabelecido entre a perda por evaporação e absorção até o fluxo e a distribuição de água dentro do tijolo se tornar estável. Gradientes de temperatura alteram o fluxo de água e sais solúveis do interior do material são dissolvidos e depositados na superfície (HALL, 1977).

A teoria do fluxo não saturado é aplicada ao fluxo do líquido no interior dos materiais porosos através de uma força capilar. A intensidade desta força é determinada pela estrutura de poros do material, mas pode ser modificada pela composição do fluido. A força de capilaridade é maior quando o material poroso está seco e torna-se muito pequena quando o material fica saturado. Além disso, depende da estrutura dos poros que determinará a permeabilidade do material (HALL e YAU, 1987).

A física do fluxo está expressa na equação de Darcy (equação 7). Onde  $q$  é o vetor velocidade de fluxo, “ $K$ ” é a permeabilidade e “ $F_c$ ” é a força capilar. Tanto “ $K$ ” quanto “ $F_c$ ” dependem da umidade “ $\theta$ ” (HALL e YAU, 1987).

$$q = K(\theta) \cdot F_c(\theta) \quad \text{Equação 7}$$

A força capilar é identificada através do gradiente potencial de capilaridade (ou sucção) “ $\psi$ ”, conforme a equação 8 (HALL e YAU, 1987).

$$F_c = -\nabla \psi(\theta) \quad \text{Equação 8}$$

Para casos unidimensionais com uma permeabilidade isotrópica “ $K(\theta)$ ”, tem-se a equação de Darcy estendida, que é a teoria centra do fluxo insaturado (equação 9) (HALL e YAU, 1987).

$$q = -K(\theta) \frac{d\psi}{dx} \quad \text{Equação 9}$$

Existem três aspectos principais que fazem com que esta teoria seja considerada um avanço significativo na análise do fluxo de água em materiais de construção. O primeiro deles é que ela trabalha juntamente com sucção e permeabilidade, que normalmente são tratadas separadamente. O segundo é a que o método explicita a dependência da permeabilidade e da sucção em relação à umidade ( $\theta$ ). E por último, esta teoria foi embasada em cálculos matemáticos baseados na teoria dos processos de difusão não-lineares (HALL e YAU, 1987).

A porosidade dos substratos pode ser alterada dependendo da matéria-prima com que foram produzidos e seu processo de fabricação.

Quanto a substratos argilosos, a queima é responsável pela obtenção de diversas características finais, como a porosidade, a resistência mecânica, entre outras. As principais transformações que ocorrem em materiais argilosos quando submetidos a elevadas temperaturas estão apresentadas na tabela 4 (NAVARRO, 1998<sup>5</sup> apud DUTRA, 2007).

Tabela 4: principais modificações que ocorrem em materiais cerâmicos submetidos a elevadas temperaturas (adaptado de NAVARRO, 1998<sup>6</sup> apud DUTRA, 2007)

| Temperatura (°C) | Transformação  |
|------------------|--|
| Até 150          | Eliminação da água livre                                 |
| 150-250          | Eliminação da água adsorvida                             |
| 350-650          | Eliminação da água estrutural                            |
| 400-600          | Decomposição de compostos orgânicos                      |
| 573              | Transformação do quartzo $\alpha$ em quartzo $\beta$     |
| 700-900          | Início da fusão dos álcalis e óxidos de ferro            |
| 1000             | Início da fusão dos CaO e FeO, com formação de silicatos |
| Até 1200         | Formação de fase vítrea com redução de tamanho de poros  |

Em blocos cerâmicos, alguns trabalhos (PINHEIRO e HOLANDA, 2010; PAGNUSSAT e MASUERO, 2011) vêm estudando a influência da temperatura de queima na porosidade.

Pinheiro e Holanda (2010) avaliaram a influência da temperatura de queima de 850°C, 950°C e 1050° nas propriedades da cerâmica vermelha utilizada na região de Campos dos Goytacazes/RJ. Os autores verificaram que aos 850°C e 950°C a superfície da peça é muito rugosa e notadamente porosa, ficando evidente um grande número de poros abertos na forma de vazios interpartículas na estrutura. Ao elevar-se a temperatura de queima para 1050 °C observou-se uma superfície com textura mais suave e menos porosa, com diminuição significativa do volume de poros abertos.

Com estes resultados, os autores afirmam que para os materiais estudados por eles, do ponto de vista prático, temperaturas de queima de até cerca de 950° resultam em uma microestrutura mais favorável para a produção de tijolos e blocos cerâmicos, produtos que devem ser mais porosos. Já para a produção de telhas e tubos, produtos que exigem menor permeabilidade, as temperaturas de queima devem ser maiores do que 950° (PINHEIRO e HOLANDA, 2010).

Pagnussat e Masuero (2011) submeteram blocos de cerâmica vermelha provenientes da região metropolitana de Porto Alegre/RS às temperaturas de queima de 700, 800, 900 e 1000°C. Os autores verificaram que os blocos queimados às temperaturas de 700 e 800 °C apresentaram baixa taxa de sucção capilar de água no ensaio de absorção e menores valores de resistência de

39\_\_\_\_\_

<sup>5</sup> NAVARRO, F. J. L. Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica, 1 ed. Castellón, Espanha: AICE, 1998. 254 p.

aderência à tração quando argamassas foram aplicadas sobre eles. Os blocos queimados a 900 e 1000 °C apresentaram maiores valores de sucção capilar e resistência de aderência à tração nos testes com aplicação de argamassa sobre eles.

Os componentes de concreto possuem, pelo menos, três componentes relativamente distintos da porosidade total: a porosidade interna do agregado, a porosidade da matriz cimentícia e os vazios resultantes do empacotamento das partículas constituintes. Adicionalmente, em alguns concretos existem bolhas de ar, resultantes da mistura e da presença de aditivos (HALL e YAU, 1987).

A absorção e o movimento de água no interior destes elementos pela ação das forças capilares dependem principalmente da geometria dos poros. Uma permeabilidade baixa é normalmente obtida através de misturas ricas, com elevadas relações cimento/agregados, além de um bom controle da relação água/cimento e o uso de agregados densos e impermeáveis. As altas permeabilidades são normalmente atribuídas à falta de compactação e a presença de fissuras, além de altas relações água/cimento e a utilização de agregados leves (HALL e YAU, 1987).

## 2.3 RUGOSIDADE

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (ALVES, 2002).

Tanto em aplicações industriais como na vida cotidiana, conhecer o grau de rugosidade das superfícies é importante, já que em algumas ocasiões é desejável se ter uma rugosidade alta e, em outras, esta condição é indesejável, principalmente quando se busca o brilho, melhor aparência e redução do atrito de uma superfície ao entrar em contato com a outra, reduzindo o desgaste e a corrosão e erosão dos materiais (RIVERA e MELO, 2001).

Por mais perfeitas que sejam, as superfícies apresentam irregularidades, sendo estas compostas por dois tipos de rugosidades: macrogeométricas e microgeométricas. As rugosidades macrogeométricas são irregularidades, verificadas por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil, entre outros. Nestas irregularidades estão incluídas divergências de ondulações, ovalização, retilineidade, planicidade, circularidade, entre outros (ALVES, 2002).

Estas irregularidades superficiais, em materiais cimentícios, podem ser geradas pela fôrma, pela vibração e consequente migração de bolhas de ar para a superfície em concretos, e pelo desempenho em argamassas, deformações durante a cura, entre outros (PRETTO, 2007).

A figura 11 apresenta a diferença entre rugosidade, ondulação e variação de forma, segundo Rosa (2007).

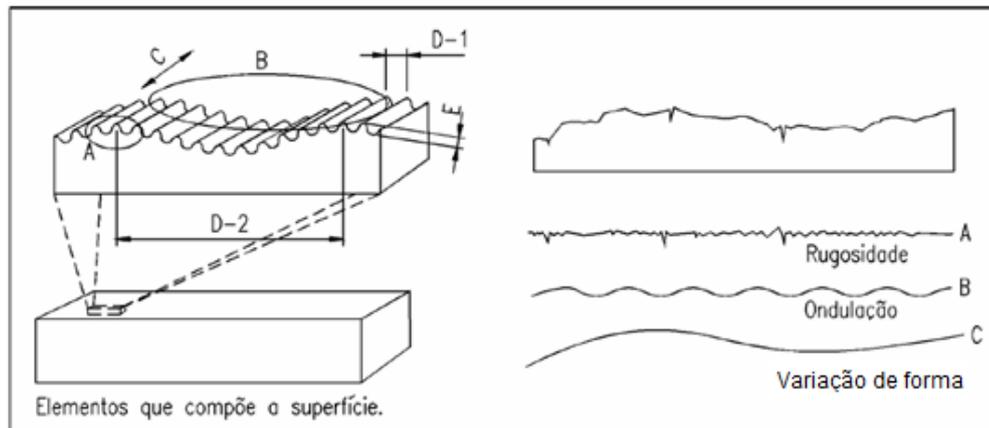
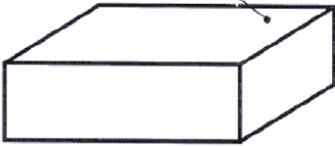
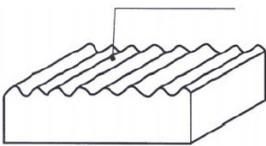
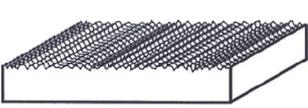
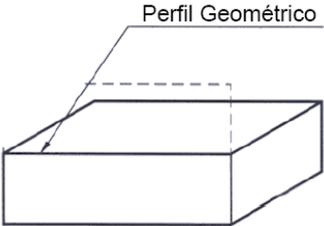
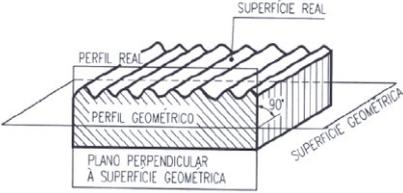


Figura 11: elementos que compõem uma superfície (adaptado de ROSA, 2007)

Conceitualmente, sobre uma mesma superfície pode-se definir três diferentes tipos de superfícies em função da precisão utilizada na análise: a superfície geométrica, a superfície real e a superfície efetiva, as quais geram os seus perfis (planos perpendiculares a elas) correspondentes (tabela 5). A superfície geométrica é apenas uma definição de projeto que diz respeito a uma superfície sem erros, perfeita; a superfície real é aquela que pode-se ver e tocar e a superfície efetiva é a resultante da medição de algum equipamento de medição, a qual é muito próxima da superfície real.

Tabela 5: tipos de superfícies (Adaptado de ALVES, 2002)

| Superfície geométrica   | Superfície Real  | Superfície efetiva  |
|---|--|---|
| Superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Na realidade isto não existe, trata-se apenas de uma definição. | Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. Superfície que podemos ver e tocar.        | Superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição |
| <p>Superfície Geométrica</p>   | <p>Superfície Real</p>  |    |
| <p>Perfil Geométrico</p>   |                        | <p>Perfil efetivo</p>    |

Conforme se observa na tabela 5, a superfície geométrica considerada ideal é algo inexistente, pois como já mencionado anteriormente, toda a superfície é composta por pequenas irregularidades superficiais. Esta pode ser correlacionada àquela especificada em projeto. Por mais precisos que sejam os equipamentos de medição, o levantamento da rugosidade superficial real não será expresso com total fidelidade, gerando uma superfície efetiva, ou perfil efetivo. Este fato também foi citado por Silva (2002) que atribui à diferença dos perfis efetivos aos perfis reais ao sistema de medição de rugosidade utilizado. A figura 12, de Bet (1999)<sup>6</sup>, citado por Silva (2002), representa a dificuldade de representação deste perfil efetivo dependendo do ângulo da agulha do apalpador utilizado.

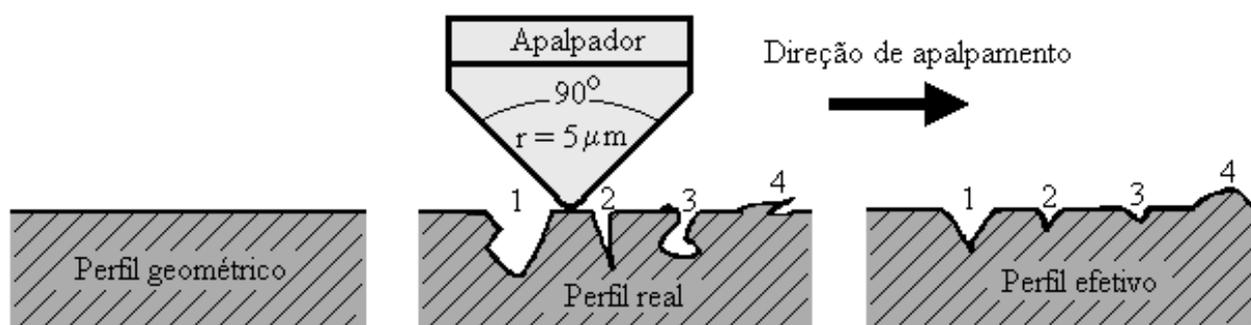


Figura 12: influência do apalpador no perfil efetivo de rugosidade (BET, 1999 apud SILVA, 2002)

Ao se realizar a medição da rugosidade, o equipamento tende a mostrar o perfil composto da rugosidade e das ondulações (PALMA, 2006). Para uma adequada medição da rugosidade esta deve ser separada das ondulações e desvios através de uma filtragem. Esta filtragem é realizada através do *cutoff*, ou comprimento de onda, determinando o que deve ou não passar através da frequência emitida, por exemplo: o sinal da rugosidade apresenta altas frequências (pequenos comprimentos de onda) enquanto as ondulações e demais desvios de forma apresentam baixas frequências (altos comprimentos de onda). Desta forma, equipamentos como o rugosímetro deixam passar sinais de altas frequências e eliminam os sinais de baixas frequências (PALMA, 2006).

Na construção civil, a rugosidade dos substratos pode ser produzida propositalmente visando o aumento da área de contato da argamassa com os mesmos. Estas rugosidades podem ser criadas através de tratamentos superficiais do concreto, com a utilização de retardadores de pega de superfície nas fôrmas, apicoamento, escovamento ou lixamento da superfície, como foi proposto por Pretto (2007). A autora avaliou o tratamento superficial de concretos com diferentes resistências à compressão, estando apresentado na figura 13 o efeito superficial de cada um dos tratamentos realizados pela autora em um concreto de 25 MPa.



Figura 13: tratamentos superficiais realizados por Pretto (2007)

Stolz (2011) criou rugosidades superficiais nos substratos de concreto através da utilização de estampas comerciais, vendidas como pisos elastoméricos, conforme mostra a figura 14.

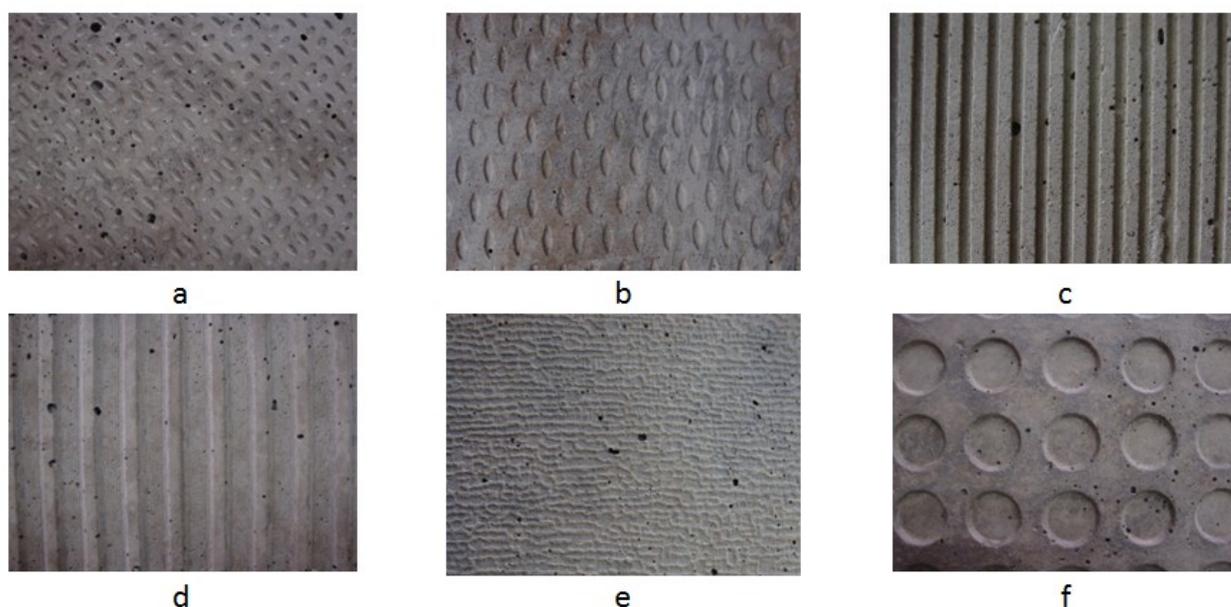


Figura 14: aspecto superficial dos substratos de concreto estampados com diferentes rugosidades. a) rugosidade 1 – forma de arroz inclinada; b) rugosidade 2- forma de arroz alinhada; c) rugosidade 3- ondulada com bordas a 90°; d) rugosidade 4: ondulada com bordas arredondadas e mais afastadas; e) rugosidade 5: ranhuras irregulares; f) rugosidade 6- forma de moeda (STOLZ, 2011)

As rugosidades superficiais também podem ser criadas na camada de chapisco, que tem como característica justamente preparar o substrato para receber o revestimento de argamassa. Dependendo da forma de aplicação do chapisco, diferentes rugosidades superficiais podem ser criadas, conforme pode ser observado na figura 15.

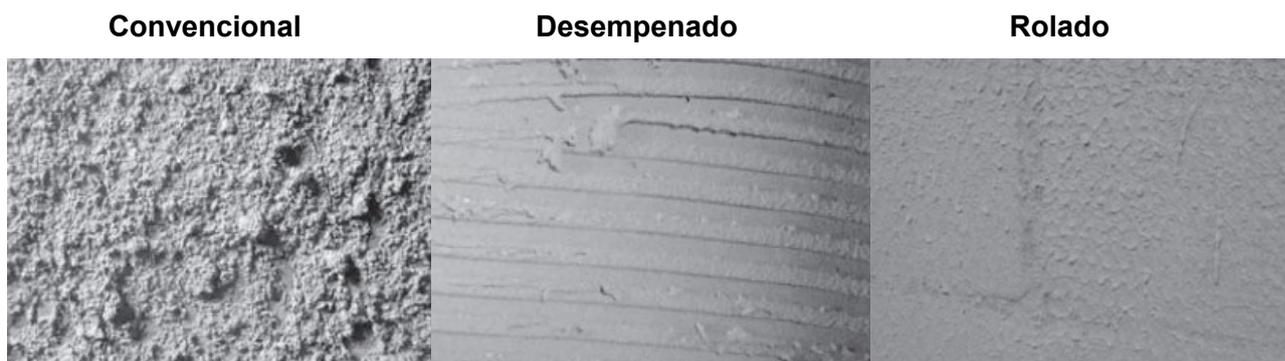


Figura 15: tipos de chapisco (Adaptado de SALGADO, 2011)

No entanto, o simples fato de criar a rugosidade não garante que a área de contato entre a argamassa e o substrato sofrerá incremento. Algumas rugosidades não são compatíveis com a reologia das argamassas aplicadas sobre elas, gerando falhas na interface pela falta de penetração da argamassa nas irregularidades criadas no substrato.

Neste contexto, Oliveira *et al.* (2009) avaliaram a influência do formato dos dentes da desempenadeira para a aplicação de chapisco colante<sup>7</sup>, bem como a maior facilidade ou dificuldade da argamassa realizar o preenchimento dos cordões formados pelos mesmos, quando aplicada a argamassa de revestimento. A figura 16 mostra os formatos que foram estudados pelos autores.

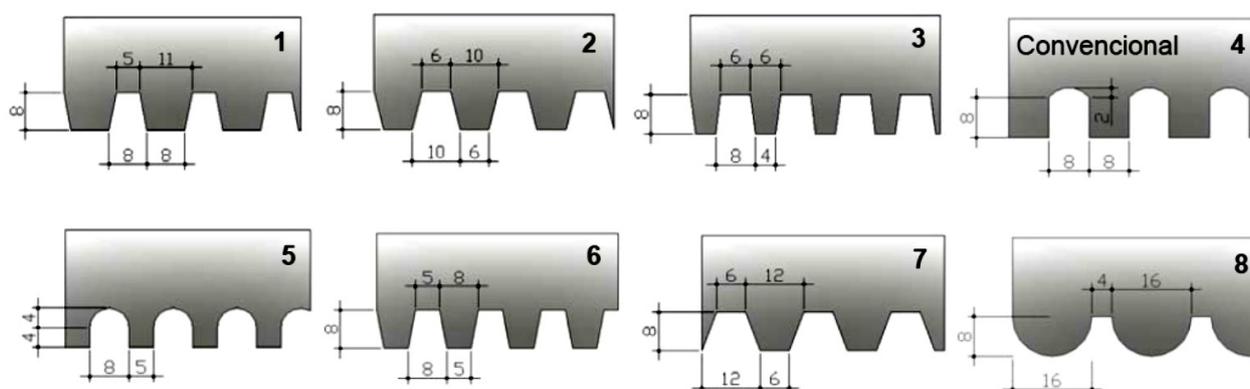


Figura 16: formatos dos dentes da desempenadeira estudados por Oliveira, Carasek e Cascudo (2009)

Ao final do estudo, identificou-se que o melhor formato de desempenadeira a ser utilizado é o 2, por ter resultado em maiores valores de resistência de aderência à tração, menores coeficientes de variação, percentual de ruptura argamassa/chapisco relativamente baixo, além de baixa incidência de falhas na interface (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

<sup>7</sup> O chapisco desempenado pode ser denominado de diferentes formas, quais sejam: chapisco industrializado, chapisco desempenado, entre outras.

É importante salientar que os resultados obtidos neste estudo devem ser analisados criticamente, pois para as condições de contorno adotadas pelos autores, quais sejam: tipo de argamassa e forma de aplicação, a melhor solução foi o formato da desempenadeira número 2. No entanto, se a energia de aplicação sofrer alteração, bem como a reologia da argamassa estudada, o resultado obtido pode ser outro, questionamento que guia o presente estudo.

Com relação à influência da rugosidade no ângulo de contato de uma gota depositada sobre a superfície rugosa, existem diversos estudos sendo realizados há mais de 70 anos. A ideia básica é representar a rugosidade através de “r”, a razão entre a área e o perfil efetivo. Assim, a equação de Young-Laplace resulta no apresentado na equação 10 (ADAMSON e GAST, 1997).

$$\cos\phi_{rug} = r \cos\phi_{real} \quad \text{Equação 10}$$

Portanto, ângulos menores que 90° são reduzidos pela rugosidade, enquanto que se o ângulo é maior do que 90°, são aumentados pela rugosidade. Se o ângulo de contato é grande e a superfície suficientemente rugosa, o líquido pode aprisionar o ar, gerando um efeito de superfície plana, como ilustrado na figura 17, e um ângulo de contato aparente conforme a equação 11 (ADAMSON e GAST, 1997).

$$\cos\phi_{aparente} = r f_1 \cos\phi_1 - f_2 \quad \text{Equação 11}$$

Onde: r é a relação entre a área da rugosidade e o perfil efetivo.

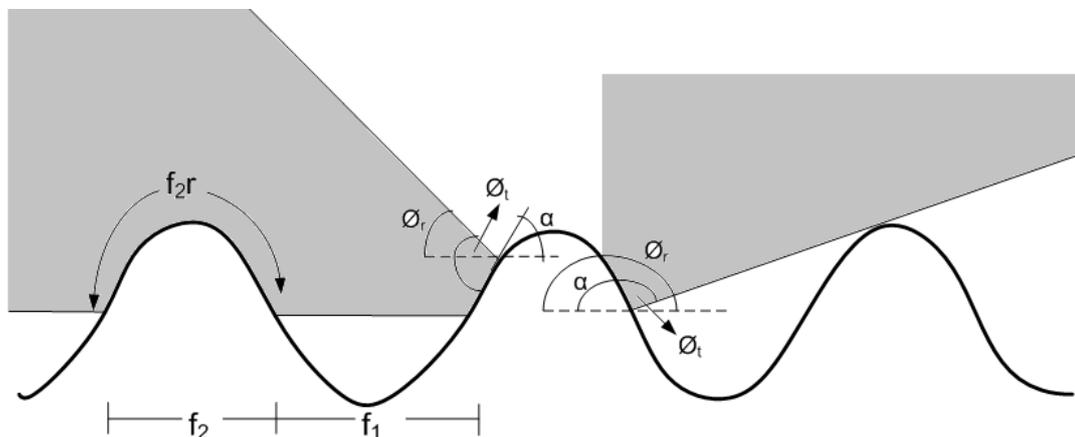


Figura 17: face de gotas em uma superfície rugosa (adaptado de ADAMSON e GAST, 1997)

A rugosidade tem implicações importantes no molhamento de superfícies. Por exemplo, uma superfície de cobre feita a partir de uma solda eutética (SnPb) eleva os ângulos de contato entre 15-20°, quando comparada a uma superfície lisa do mesmo substrato (ADAMSON e GAST, 1997).

Nesta pesquisa, não se avaliou o parâmetro rugosidade do substrato, apesar disso, sabe-se que este é um fator importante e influente no desenvolvimento da aderência e da área de contato.

### 3 REOLOGIA

A Ciência conhecida hoje como reologia é muito antiga, certamente antecede a criação formal do termo, em 1929. Há registros da presença de pensamentos sobre fluxo em contextos filosóficos de Confúcio e Heraclito (540 – 475 AC), como o famoso ditado “panta rhei”, que significa “tudo flui”, atribuído a Heraclito que foi adotado como lema da Sociedade Americana de Reologia (TANNER e WALTERS, 1998).

Neste capítulo serão revisados alguns conceitos essenciais ao estudo da reologia.

#### 3.1 CONCEITUAÇÃO

Reologia é o estudo da deformação e escoamento da matéria, a Ciência que descreve a deformação de um corpo sobre a influência de tensões. Este corpo pode ser sólido, líquido ou gasoso (SCHRAMM, 2006; KIRYU, 2006).

Segundo Nielsen (1929<sup>8</sup>) apud Costa (2006) é aquele campo da ciência que procura descrever as deformações dos materiais dependentes do tempo, quando os mesmos são expostos a ações mecânicas, como uma função de sua composição e estrutura.

Na maior parte dos casos, a reologia trata de fenômenos reversíveis, no entanto, a irreversibilidade é geralmente encontrada. Algumas substâncias podem exibir mudanças consideráveis nas propriedades reológicas ao longo do tempo ou através de uma deformação prolongada, ocasionando tanto reversibilidade como irreversibilidade (CASTRO, 2007).

Hackley e Ferraris (2001) fazem uma crítica aos conceitos “tradicionais” de reologia, pois segundo os autores, o conceito de que reologia é o “estudo das deformações e fluxo da matéria” aproxima-se muito do conceito de mecânica do contínuo e não distingue as características especiais da reologia. Entre os aspectos que os autores utilizam para justificar sua crítica, estão que os estudos de reologia não são sobre deformação e fluxo mais sim sobre as propriedades da matéria que determinam este comportamento, bem como sua reação para deformação e fluxo.

Além disso, a reologia estuda materiais com propriedades não descritas pelos modelos de Newton-Stokes e Hooke. Estuda materiais que tenham propriedades descritas por qualquer relação entre tensão e deformação, não limitando-se aos casos estudados por Newton-Stokes e Hooke (HACKLEY e FERRARIS, 2001).

46

<sup>8</sup> NIELSEN, A. Rheology of building materials. National Swedish building research. Document D6, 1929.

O primeiro conceito quantitativo de elasticidade foi desenvolvido por Robert Hooke, cuja lei foi publicada em 1676 em anagramas latinos e em 1678 de forma inteligível. Esta foi nomeada Lei de Hooke (equação 12) e estabeleceu que na deformação dos sólidos no regime elástico, a tensão é proporcional à deformação (MALKIN e ISAYEV, 2006 e TANNER e WALTERS, 1998):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{Equação 12}$$

Em que:  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $\varepsilon$  é a deformação.

Em 1687 Isaac Newton analisou o fluxo de cisalhamento constante de um fluido e chegou à famosa hipótese de que a resistência que surge a partir da falta de deslizamento das fases de um líquido é proporcional à velocidade com a qual as fases do líquido são separadas umas das outras (TANNER e WALTERS, 1998). Neste contexto, Isaac Newton foi o primeiro a expressar a lei básica da viscosimetria (equação 13), descrevendo o fluxo de um líquido ideal (SCHRAMM, 2006).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Equação 13}$$

Em que:  $T$  é a tensão de cisalhamento,  $\eta$  é a viscosidade e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento.

As ideias de Newton foram convertidas de forma mais precisa por Stokes, que formulou a lei geral do comportamento dos líquidos, conhecida como lei de Newton-Stokes. De acordo com este conceito, a taxa de deformação deve ser proporcional com a tensão e este coeficiente de proporcionalidade é chamado de viscosidade. Esta lei constata que no fluxo de líquidos, a força ou resistência ao fluxo é proporcional à velocidade aplicada (HACKLEY e FERRARIS, 2001).

Diversos estudos foram realizados ao longo dos anos onde se verificaram grandes desvios em relação à aplicação da lei de Hooke, o que não foi surpreendente, uma vez que questões de elasticidade já vinham sendo estudadas, parâmetros estes não considerados na lei de Hooke.

Através do estudo de fios de seda, Wilhelm Weber (1835, 1841) percebeu que a elasticidade das fibras ao serem tensionadas não era perfeita. Ao aplicar uma tensão sobre a fibra, verificou uma extensão elástica imediata, seguida por uma extensão contínua e lenta com o tempo e ao remover a carga percebeu que a fibra recuperou seu comprimento original. Esta observação marcou um ponto de partida para os estudos viscoelásticos (TANNER e WALTERS, 1998).

Os trabalhos de Hagen, Poiseuille e Couette deram início às preocupações com fluidos não-Newtonianos no século 20 (TANNER e WALTERS, 1998).

Para classificar a infinidade de substâncias reologicamente de forma simples, o Clube Britânico de Estudiosos em Reologia publicou um gráfico sobre comportamento reológico, que contou com

as contribuições de Bilmes em 1949, chegando à versão exposta na figura 18 (TANNER e WALTERS, 1998).

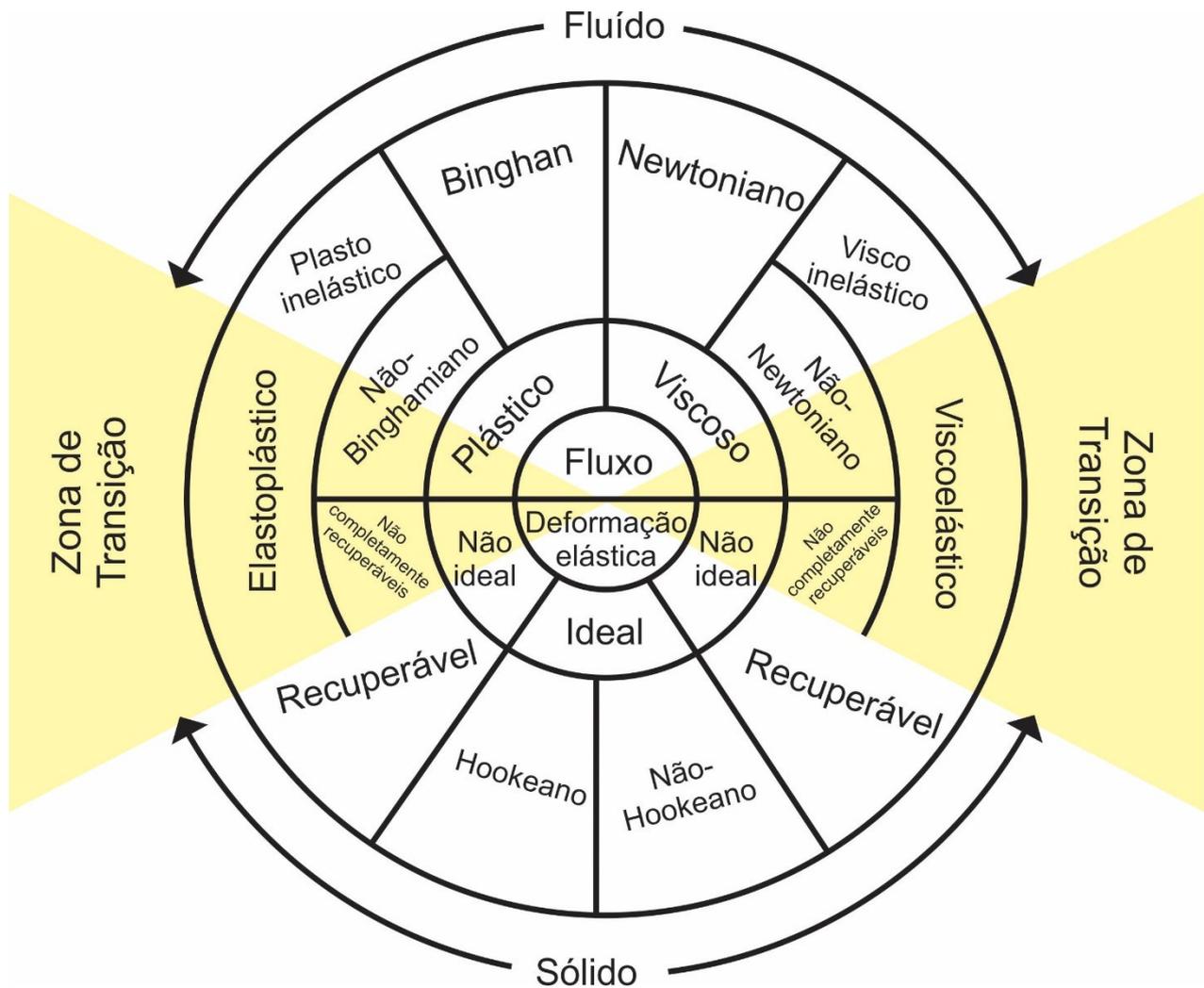


Figura 18: gráfico reológico sugerido por Bilmes em 1942 (adaptado de TANNER e WALTERS, 1998)

A reologia é uma ciência antiga, no entanto muito atual. O desenvolvimento de novas substâncias e produtos vem colocando os tradicionais conceitos desta ciência à prova e exigindo de seus pesquisadores estudos mais aprofundados e inovadores que acompanhem esta evolução.

### 3.2 PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS PARA O ESTUDO DE REOLOGIA

Segundo Castro (2007), quando se trata de fluidos, a reologia está relacionada com um sistema de forças que faz com que os mesmos escoem. Desta forma, é necessário um estudo dos conceitos de tensão, deformação e viscosidade para sua compreensão.

48

<sup>9</sup> Bilmes L, 1942, Nature 142, 432.

A tensão é uma força por unidade de área, e é amplamente conhecida através da equação 14.

$$\sigma = F/A \quad \text{Equação 14}$$

Em que:  $\sigma$  é a tensão em MPa,  $F$  é a força aplicada em N e  $A$  é a área em  $\text{mm}^2$ .

A viscosidade pode ser descrita, segundo Schramm (2006), como a propriedade física de um líquido de resistir ao fluxo induzido pelo cisalhamento, ou conforme Machado (2002), como “a resistência de um fluido contra qualquer mudança posicional do seu elemento volumétrico”.

Os parâmetros de fluxo são essenciais ao entendimento da viscosidade de um fluido. Entende-se por fluxo o aumento contínuo da deformação da estrutura de um material sobre a ação de forças finitas (HACKLEY e FERRARIS, 2001).

Segundo Betioli (2007) e Machado (2002) a viscosidade é a relação diretamente proporcional entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento. A tensão de cisalhamento é a força ( $F$ ) por unidade de área ( $S$ ) para manter o escoamento do fluido e é expressa pela equação 15. A taxa de cisalhamento é o deslocamento relativo das partículas ou planos de fluido e também é conhecida como “grau de deformação” ou “gradiente de velocidade”, podendo ser representada pela diferença das velocidades ( $\Delta v$ ) entre duas partículas ou planos vizinhos com a distância ( $\Delta y$ ) entre eles (equação 16) (Machado, 2002).

$$\tau = F/S \quad \text{Equação 15}$$

$$\gamma = \Delta v / \Delta y \quad \text{Equação 16}$$

Sendo, finalmente, a viscosidade ( $\mu$ ) representada graficamente pela equação 17.

$$\mu = \tau / \gamma \quad \text{Equação 17}$$

Considerando duas placas paralelas de área “ $A$ ”, uma estacionária e outra em movimento, e entre elas um fluido, para manter a placa móvel com velocidade constante (figura 19). A autora complementa dizendo que “do ponto de vista físico, a viscosidade é uma medida de resistência ao fluxo, podendo ser compreendida como o atrito interno do sistema”.

Na figura 19, a velocidade é máxima na camada superior e vai diminuindo até chegar na camada ligada à placa estacionária, aonde chega ao zero. O gradiente de velocidade na amostra é a chamada taxa de cisalhamento que é definida através de um diferencial de velocidade pela distância (SCHRAMM, 2006).

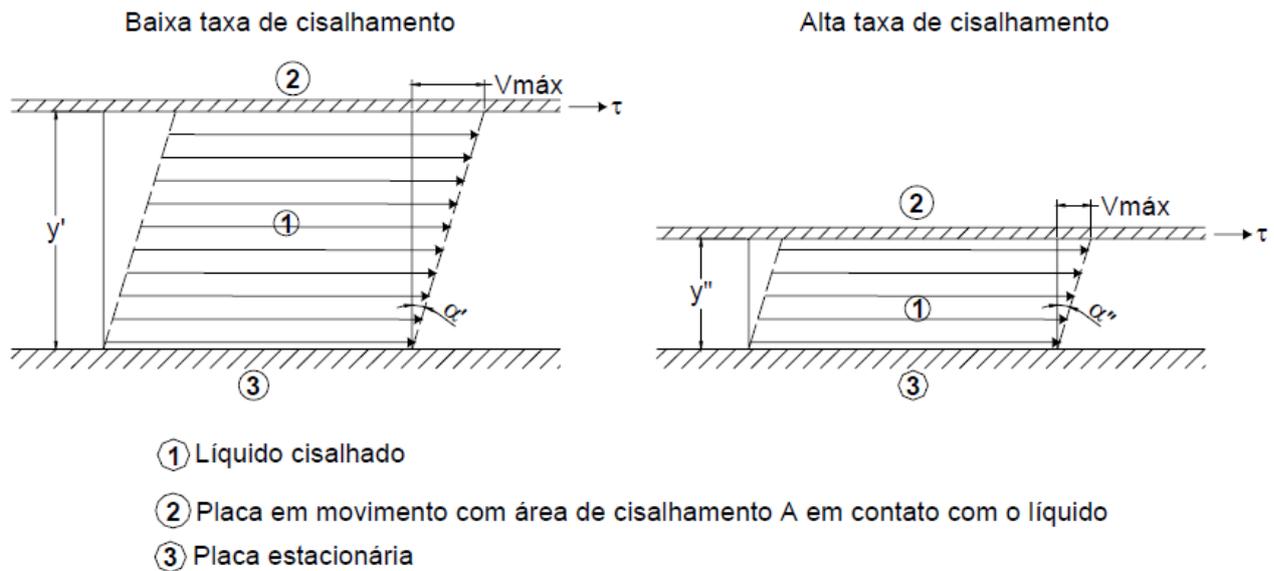


Figura 19: fluxo entre duas placas paralelas: “modelo de placas paralelas” (SCHRAMM, 2006)

Essa viscosidade pode ser conceituada tomando-se como exemplo dois fluidos diferentes escoando em um plano inclinado sob as mesmas condições. O tempo de queda desses fluidos provavelmente será diferente, pois depende da resistência interna da interação das partículas. Essa maior ou menor resistência interna das partículas está diretamente ligada à noção de viscosidade (KIRYU, 2006).

É importante salientar que dependendo do comportamento reológico do fluido pode-se trabalhar com viscosidade aparente ou diferencial. A viscosidade aparente pode ser obtida a partir da tangente de um determinado ponto da curva obtida pela relação tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento e a origem do sistema coordenado do reograma. Por outro lado, a viscosidade diferencial é aquela obtida a partir da tangente em uma determinada faixa específica. Observa-se, desta forma, que para um fluido com comportamento Newtoniano temos viscosidade aparente igual à viscosidade diferencial (MACIEL, 2012<sup>10</sup>).

A determinação da viscosidade aparente e específica de um fluido qualquer pode ser observada na figura 20.

50

<sup>10</sup> MACIEL, G. F. **Reologia dos materiais**. Notas de aula. Porto Alegre, 2012.

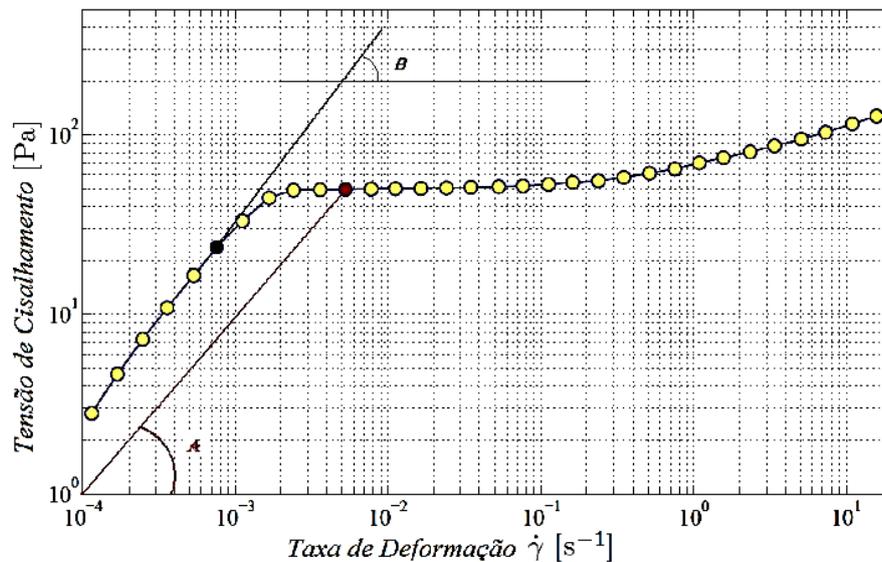


Figura 20: variação da viscosidade em função da taxa de deformação para um fluido (viscosidade diferencial:  $\tan(B)$ ; viscosidade aparente:  $\tan(A)$ ), (MACIEL, 2012<sup>3</sup>)

A adequada medição de viscosidade exige condições de teste que forneçam fluxo laminar, fluxo estacionário, ausência de deslizeamento, amostras homogêneas, sem mudanças físicas ou químicas durante o teste e sem elasticidade (SCHRAMM, 2006).

### 3.3 MODELOS REOLÓGICOS

Os principais modelos reológicos utilizados para interpretar o comportamento de argamassas no estado fresco são o Newtoniano e o Não-Newtoniano.

Materiais com comportamento Newtoniano, como descrito anteriormente, exibem uma relação linear entre tensão ( $\sigma$ ) e a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), estes apresentam viscosidade constante a uma dada temperatura e pressão (BAUER, 2005).

Nos materiais não Newtonianos a viscosidade não é constante e depende da taxa de cisalhamento aplicada a uma dada temperatura e pressão, como por exemplo: pseudoplásticos, dilatantes e viscoplásticos ou fluidos de Bingham (BAUER, 2005).

Os fluidos Newtonianos exibem um comportamento de fluxo Newtoniano em determinadas condições de tensão ou taxa de cisalhamento. Nestes líquidos, a viscosidade ( $\eta$ ) não é afetada por mudanças na taxa de cisalhamento e são considerados como fluidos com comportamento de fluxo ideal. Como exemplos de fluidos newtonianos, pode-se citar a água, óleo mineral, betume, melão, entre outros. (SCHRAMM, 2006).

A maioria dos fluidos oriundos de processos naturais e industriais apresentam comportamento reológico diferente do proposto por Newton. Assim, o comportamento reológico apresentado por estas misturas, através do parâmetro que caracteriza o fluido Newtoniano: a viscosidade; passa

a depender da taxa de cisalhamento ou taxa de deformação a que o material é submetido (KIRYU, 2006). Estes são os chamados de fluidos não-Newtonianos.

Os fluidos não-Newtonianos podem ser dependentes ou independentes do tempo. Nos dependentes do tempo suas propriedades variam com a tensão de cisalhamento e com o tempo de aplicação desta tensão (ALENCAR, 2008).

Os fluidos independentes do tempo são subdivididos em com e sem tensão inicial. Os sem tensão inicial não necessitam de uma tensão de cisalhamento para começarem o escoamento, enquanto que os com tensão inicial necessitam que uma tensão mínima, chamada tensão de escoamento ( $\sigma_0$ ), seja aplicada para o início do fluxo (ALENCAR, 2008).

Os fluidos não-Newtonianos podem ser classificados em cinco sistemas reológicos (SCHRAMM, 2006):

#### Independentes do tempo

- a. Fluidos pseudoplásticos: fluidos que sofrem diminuição da viscosidade quando a taxa de cisalhamento aumenta. Ex.: emulsões, suspensões ou dispersões;
- b. Substâncias dilatantes: aumentam a viscosidade quando a taxa de cisalhamento aumenta. Ex.: emulsões de PVC;
- c. Fluidos plásticos: líquidos pseudoplásticos com limite de escoamento. Ex.: lamas de perfuração de poços de petróleo, graxa, pasta de dentes, borrachas naturais;

#### Dependentes do tempo

- d. Fluidos tixotrópicos: definidos pelo seu potencial de ter uma estrutura de gel reversível, sempre que a substância for mantida em repouso por um longo período de tempo. A tixotropia é muito importante em tintas, produtos alimentícios, farmacêuticos, entre outros;
- e. Líquidos reopéticos: geram aumento da viscosidade durante o cisalhamento. Quando deixados em repouso, recuperam sua forma original. A reopexia verdadeira é muito rara.

Diversas equações empíricas vêm sendo propostas para elaborar o modelo matemático das relações observadas em fluidos independentes do tempo, sendo que, para muitas aplicações de Engenharia, elas podem ser corretamente representadas pelo modelo exponencial apresentado na equação 18, onde  $T$  é a tensão de cisalhamento,  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento,  $n$  é o índice de comportamento do escoamento e  $k$  é o índice de consistência. Para  $n=1$  e  $k=\mu$ , esta equação reduz-se à Lei de Newton, ou seja, aos fluidos newtonianos (CASTRO, 2007).

$$\tau = k \dot{\gamma}^n$$

Equação 18

Alguns materiais podem apresentar um comportamento de acordo com o modelo de Bingham. Este pressupõe que o fluido se comporta como um sólido ideal, ou seja, não flui até que a tensão tangencial aplicada supere a tensão de escoamento, momento no qual a mistura começa a comportar-se como um fluido que apresenta relação linear entre a tensão e a velocidade de deformação, tal como os fluidos Newtonianos (ALENCAR, 2008).

A figura 21 apresenta os vários tipos de comportamento de fluxo citados anteriormente.

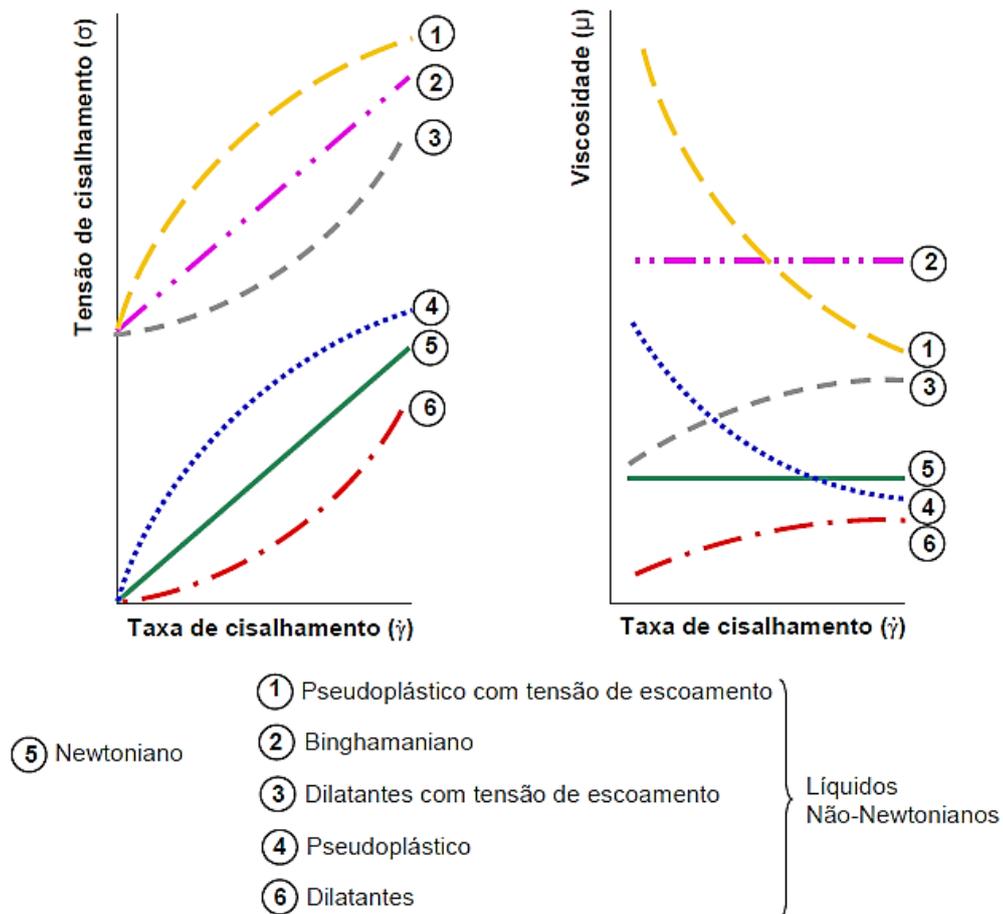


Figura 21: tipos de comportamento de fluxo (HOPPE *et al.*, 2007)

Um fluido com pequenas concentrações de sedimentos pode permanecer com propriedades newtonianas, podendo apresentar variações em sua viscosidade dependendo dessa concentração, chegando a deixar de se comportar como newtoniana e adquirindo propriedades não-newtonianas (KIRYU, 2006).

Entre as possíveis alterações apresentadas por fluidos newtonianos com presença de materiais sólidos está o aparecimento de uma tensão crítica, ou tensão de escoamento, anterior ao escoamento. Esta tensão é conhecida como sendo aquela que está abaixo da qual o fluido pode

resistir tensões superficiais sem escoar e acima da qual o material escoar como um fluido (KIRYU, 2006).

Há um grande número de trabalhos publicados que sugerem que a pasta de cimento apresenta um comportamento próximo a um fluido de Bingham, o qual pertence à classe dos fluidos não Newtonianos que são não dependentes do tempo, porém, ressalta-se que esta pode apresentar comportamento que varia desde um fluido Newtoniano viscoso até um sólido pseudoplástico (CINCOTTO e RAGO, 1995). Bauer (2005) justifica estas investigações pelo fato de que o Fluido de Bingham incorpora um segundo fator, além da viscosidade, em sua equação: a tensão de escoamento (equação 19). Esta representa a tensão necessária a ser aplicada a um determinado material para que o escoamento inicie (BAUER, 2005).

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad \text{Equação 19}$$

Onde  $\tau$  é a Tensão de cisalhamento;  $\dot{\gamma}$  é a Taxa de cisalhamento e  $\eta_p$  é a Viscosidade plástica.

Outros comportamentos de escoamento vêm sendo estudados e representados por estudiosos, entre eles o modelo de Herschel-Bulkley (equação 20 de DE LARRARD *et al.*, 1998), o qual descreve o comportamento de um fluido com tensão de escoamento ( $T_0$ ) e com uma relação não-linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. Quando  $n=1$ , o modelo resulta do modelo de Bingham, com  $k$  representando a viscosidade plástica do fluido. Quando  $0 < n < 1$ , o fluido exibe um comportamento pseudoplástico (YAHIA e KHAYAT, 2003 apud CASTRO, 2007).

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad \text{Equação 20}$$

### 3.4 REOLOGIA DAS ARGAMASSAS

As argamassas tendem a apresentar um comportamento reológico complexo, consequência de sua natureza multifásica, com formulações que podem apresentar, além dos convencionais: cimento, cal e areia, fibras e adições, bem como a presença de ar incorporado.

Por serem compostas por altas concentrações de partículas, as quais passam a interagir intensamente, as argamassas possuem um comportamento reológico diferente do modelo ideal de Newton. Quando submetidas a condições de cisalhamento, a fração de partículas grossas (areia) da argamassa é predominantemente sujeita a fenômenos mássicos (atrito e impacto), enquanto a fração fina ( $< 100\mu\text{m}$ ) é afetada por fenômenos de superfície e reações de hidratação (CARDOSO *et al.*, 2005).

Ao longo do tempo, devido principalmente à reação do cimento com a água, o comportamento deste material se modifica, passando de um estado fluido para o de sólido elástico (endurecido). Este comportamento é consequência de diversos fenômenos como a dissolução, aglomeração, precipitação de fases hidratadas ligantes, alterações no pH e ação de eventuais aditivos (CARDOSO *et al.*, 2005; ANTUNES, 2005).

A trabalhabilidade é uma propriedade complexa que está diretamente relacionada com o comportamento reológico das argamassas e que, por sua vez, é influenciada por diversas outras propriedades, como: consistência, plasticidade, retenção de água e de consistência, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial (CARASEK, 2010). O estudo destas propriedades é essencial, já que sem características satisfatórias no estado fresco é pouco provável que as propriedades desejadas no estado endurecido sejam alcançadas (BANFILL, 2003). A tabela 6 apresenta o conceito de cada uma destas propriedades que influenciam no comportamento das argamassas no estado fresco.

Tabela 6: propriedades que influenciam na reologia de argamassas

| <b>Propriedade</b>                        | <b>Conceito</b>  |
|---|--|
| <b>Trabalhabilidade</b>                   | Propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea (CARASEK, 2010). Conjunto de propriedades de aplicação de uma argamassa que caracterizam sua adequação ao uso (EN 1025-9) |
| <b>Coesão</b>                             | Propriedade da argamassa em manter seus constituintes homogêneos, sem segregação (EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ASSOCIATION, 2001)  |
| <b>Plasticidade</b>                       | Propriedade que permite que a argamassa deforme-se e absorva certas deformações após a redução das tensões que lhe foram impostas (EUROPEAN MORTAR INDUSTRY ASSOCIATION, 2001; CARASEK, 2010)  |
| <b>Consistência</b>                       | Fluidez de uma argamassa fresca (EN 1015-3 e EN 12706). É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas (CARASEK, 2010).   |
| <b>Retenção de água e de consistência</b> | Capacidade da argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água (CARASEK, 2010)  |
| <b>Exsudação</b>                          | É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, onde a pasta sobe e os agregados descem (CARASEK, 2010)   |
| <b>Densidade de massa</b>                 | Relação entre massa e volume do material (CARASEK, 2010)   |
| <b>Adesão inicial</b>                     | União inicial da argamassa com o substrato (CARASEK, 2010)   |

Uma das principais propriedades quando se fala em reologia das argamassas é a trabalhabilidade, sendo que esta é o resultado visível das características de plasticidade, coesão, consistência, viscosidade, adesão e densidade (YOSHIDA *et al.*, 1995).

A trabalhabilidade pode ser entendida como a “maior ou menor facilidade de dispor a argamassa em sua posição final, cumprindo adequadamente sua finalidade, sem comprometer o bom andamento da tarefa em termos de rendimento e uso” (RECENA, 2008). Na prática, ela interfere diretamente no trabalho do operário, na aderência da argamassa ao substrato (uma argamassa de boa trabalhabilidade proporciona maior contato entre substrato e a argamassa, melhorando as condições de extensão de aderência) e nas propriedades da argamassa no estado endurecido, podendo alterar-se completamente em função da relação água/ligante, da relação ligante /areia, da granulometria do agregado e da natureza e qualidade do ligante (YOSHIDA *et al.*, 1995).

Do Ó (2004) e Bauer (2005) afirmam que a consistência e a plasticidade são as propriedades reológicas básicas em termos de trabalhabilidade das argamassas, desta forma, estas devem ser avaliadas de forma sinérgica, pois atuam e influenciam diretamente na trabalhabilidade. Por outro lado, Recena (2008) afirma que se pode entender trabalhabilidade como sendo a interação entre consistência e coesão.

Por fim, Betioli (2007) salienta que devido à complexidade dos fenômenos reológicos e às diferentes solicitações as quais os materiais cimentícios são submetidos, a sua caracterização reológica requer uma associação de técnicas complementares, por exemplo, as argamassas colantes sofrem um cisalhamento durante a aplicação, necessitando de ensaios de fluxo para simular esta situação.

### 3.4.1 Relação entre a Reologia e a Aderência

As diversas propriedades que caracterizam a reologia das argamassas influenciam diretamente no mecanismo de aderência, uma vez que, por exemplo, sua trabalhabilidade é determinante quanto à facilidade de espalhamento da argamassa e conseqüentemente o incremento na extensão de aderência (MARANHÃO *et al.*, 2003). A reologia afeta a aderência da argamassa, pois são as deformações visco-plásticas no momento do lançamento contra o substrato que permitem a liberação ou não do ar incorporado entre as camadas de base e revestimento. Além disso, o teor de água de amassamento pode determinar uma argamassa de reologia muito fluida, fato que pode eliminar o teor de ar incorporado para determinada energia de aplicação, porém pode resultar em poros pela evaporação de água, afetando a resistência mecânica (JOHN, 2003).

Antunes (2005) verificou que argamassas que apresentam maiores valores de viscosidade, caracterizadas pela maior carga aplicada no ensaio de *squeeze-flow*, apresentaram menores valores de resistência de aderência à tração, bem como maiores taxas de macro defeitos na interface. O mesmo foi observado para os maiores valores de tensão de escoamento, medido através de reômetro rotacional.

Pretto (2007) mostrou através de imagem da interface entre a argamassa de revestimento e o chapisco desempenado que uma argamassa com propriedades reológicas desfavoráveis pode

comprometer o desempenho do sistema de revestimento por não molhar<sup>11</sup> completamente o substrato onde ela é aplicada (figura 22). Este fato pode comprometer fortemente a aderência da argamassa à camada de chapisco, gerando descolamentos e outras manifestações patológicas.



Figura 22: extensão de aderência da argamassa ao chapisco (PRETTO, 2007)

Para que se obtenha uma extensão de aderência adequada entre as camadas é necessário que exista certa uniformidade de contato, a qual é conseguida através de uma boa molhagem do substrato pela argamassa e da escassez de falhas, além da utilização de um adesivo com boa trabalhabilidade, potencializando o efeito de molhagem e consequentemente a aderência ao substrato (GONÇALVES, 2004).

O que se deseja em relação ao comportamento de uma argamassa é que tenha um comportamento pseudoplástico que facilite seu espalhamento, nivelamento e acabamento, além de uma considerável tensão de escoamento para manter-se estável após estas etapas. No entanto, não se pode generalizar um comportamento ideal para estas, de forma que cada método de aplicação e finalidade necessita de características peculiares do material (CARDOSO *et al.*, 2005 e BAUER, 2005).

### 3.4.2 Parâmetros que influenciam no comportamento reológico de argamassas

As partículas presentes na composição da argamassa influenciam diretamente nas propriedades reológicas (COSTA, 2006). No caso da argamassa, têm-se presentes em sua composição partículas finas compostas em sua maioria pelos grãos de cimento e cal, e partículas grossas (fração graúda), compostas em sua maioria pelos grãos de agregado (areia).

Dependendo se a composição granulométrica das argamassas for contínua ou descontínua, seu comportamento quanto ao escoamento pode ser alterado. As curvas contínuas apresentam grãos

57—

<sup>11</sup> Segundo Aguilar (2010) o molhamento consiste na expansão espontânea de uma fase sobre a superfície de outra.

de todos os diâmetros, por outro lado, as curvas descontínuas apresentam ausência de agregados de determinados diâmetros. Pode-se ainda ter granulometrias uniformes, aonde a maior parte das partículas são de um mesmo diâmetro.

O coeficiente de uniformidade ( $Cu$ ) é um bom parâmetro físico que pode ser utilizado para caracterizar as composições granulométricas, pois dá uma ideia da distribuição do tamanho das partículas. Este é definido pela expressão  $Cu = d_{60}/d_{10}$  (peneiras aonde a porcentagem passante acumulada corresponde a 60% e 10%), que expressa o alongamento horizontal da curva granulométrica (ISAIA, 2010). As areias são consideradas muito uniformes quando  $Cu < 5$ , de uniformidade média quando  $5 < Cu < 15$  e desuniformes quando  $Cu > 15$ , no entanto, este coeficiente não é suficiente para se definir a composição granulométrica de uma areia, pois duas areias de granulometrias diferentes podem possuir o mesmo coeficiente de uniformidade, de forma que deve-se correlacioná-lo com a continuidade da curva de distribuição granulométrica (CARNEIRO e CINCOTTO, 1999).

A quantidade de matriz e suas características reológicas (viscosidade e tensão de escoamento) exercem influência no fluxo da mistura. Para se obter um fluxo adequado, a quantidade de matriz deve ser suficiente para envolver os agregados, sendo que matriz em excesso e muito viscosa dificultará o fluxo da mistura e a mesma somente escoará se tensões superiores à tensão de escoamento da matriz forem aplicadas. Quando há pequena quantidade de matriz muito fluida pode ocorrer choque entre os agregados, resultando em uma baixa tensão de escoamento e inadequação de uso (COSTA, 2006).

Diversos pesquisadores vêm estudando vários parâmetros que influenciam no comportamento reológico de argamassas e pastas, contribuindo ao entendimento destas misturas.

Em sua pesquisa, Costa (2006) concluiu que para as argamassas colantes que estudou, a distribuição granulométrica é o fator de maior influência no comportamento reológico. Além deste parâmetro, outros como o teor de ar incorporado, a morfologia dos agregados e viscosidade da pasta também se mostraram influentes.

Westerholm *et al.* (2008) estudaram a influência do agregado miúdo na reologia de argamassas de revestimento. Os autores concluíram que estes influenciam fortemente na viscosidade das argamassas medida com viscosímetro, sendo que a presença de poucos finos no agregado miúdo pode auxiliar na redução do travamento dos agregados maiores, o que reduz a viscosidade da pasta. Por outro lado, a presença de muitos finos aumenta a viscosidade devido ao aumento da superfície específica dos agregados e consequente aumento da demanda de água.

Quanto ao formato dos agregados miúdos Westerholm *et al.* (2008) e Senff *et al.* (2009) afirmam que este fator influencia fortemente na viscosidade e em baixo grau na tensão crítica das pastas. Complementarmente, os efeitos negativos para a viscosidade ocasionados pela presença de

agregados mal graduados na pasta podem ser significativamente reduzidos com o aumento do volume de pasta na argamassa.

Quanto à presença de cal nas argamassas de revestimento, Paiva *et al.* (2007) sugerem que argamassas com a presença de cal aérea em sua composição tornam-se mais viscosas ao longo do tempo devido à absorção da água livre pelas partículas do ligante. A consequência disso é o aumento da tensão crítica, o que reflete na trabalhabilidade. As argamassas com cal hidráulica apresentam características reológicas bastante estáveis até o início da pega.

A presença de sílica ativa nas argamassas reduz a viscosidade devido a suas partículas pequenas e arredondadas que têm ação lubrificante, reduzindo o intertravamento entre agregados. Consequentemente, a tensão de escoamento em argamassas com sílica ativa mostrou-se maior do que a de argamassas sem este componente, para uma mesma consistência (SENFF *et al.*, 2009). Os autores sintetizam dizendo que a sílica ativa reduz a viscosidade plástica inicial e aumenta a tensão de escoamento, enquanto o uso de superplastificante reduz os valores de viscosidade plástica e os de tensão de escoamento. O aumento da relação água/ligante, da quantidade de sílica ativa e de superplastificante em argamassas induzem a uma redução dos valores de torque.

Romano *et al.* (2010) estudaram a influência do tipo de misturador e do tempo de mistura na incorporação de ar em argamassas industrializadas e seu efeito nas argamassas de revestimento. Os autores concluíram que as argamassas industrializadas são sensíveis ao tipo de equipamento e ao tempo de mistura, sendo que até certo limite, quanto maior o tempo de mistura, maior o volume absoluto de ar incorporado na argamassa.

Em relação ao tempo de mistura, França *et al.* (2012) avaliaram a influência do seu tempo nas características reológicas das argamassas de revestimento. Os autores verificaram que o comportamento reológico da argamassa é significativamente influenciado pelo tempo de mistura, sendo que para tempos menores de mistura obtiveram-se maiores valores de torque para a ocorrência do fluxo, enquanto que para maiores tempos de mistura, devida à melhor homogeneização do sistema, os torques obtidos foram menores.

A influência da presença de aditivos incorporadores de ar em argamassas foi avaliada por Massod e Agarwal (1994). Os autores analisaram oito diferentes tipos de aditivos superplastificantes em argamassas de cimento, onde utilizaram o parâmetro viscosidade para avaliar cada uma deles com a utilização de um viscosímetro Brookfield DV II. Verificou-se que o estudo da viscosidade é eficaz para se avaliar a influência de aditivos superplastificantes em argamassas, já que esta propriedade foi fortemente influenciada por todos os tipos de aditivos avaliados (MASSOD e AGARWALL, 1994).

Complementarmente constatou-se que, como esperado, o aumento da concentração de superplastificante nas argamassas reduziu a viscosidade. Ainda, os oito superplastificantes estudados apresentaram viscosidades muito semelhantes para uma taxa de cisalhamento de 100 rpm, indicando que ao aplicar uma vibração suficiente à pasta de cimento, a viscosidade é a mesma para todos os superplastificantes estudados (MASSOD e AGARWALL, 1994).

A respeito da relação água/ligante, para relações mais altas, ou seja, suficientes para garantir a fluidez da pasta, a adição de aditivo superplastificante tem seu efeito significativamente reduzido (MASSOD e AGARWALL, 1994).

### 3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE ARGAMASSAS

Para a caracterização reológica de argamassas é necessário aliar diversas técnicas, já que uma única técnica não é capaz de determinar as propriedades reológicas fundamentais e nem de simular todas as solicitações que os materiais podem sofrer durante sua mistura, transporte e aplicação (BETIOLI *et al.*, 2009).

A definição da quantidade de água de argamassas apenas através da mesa de consistência ou do reômetro é bastante difícil, já que em alguns casos a argamassa flui bem em um equipamento e no outro não (SEFFF *et al.*, 2009).

Os testes utilizados para a caracterização das argamassas no estado fresco geralmente se correlacionam com um dos parâmetros reológicos. Existem diversos ensaios que vêm sendo utilizados para a caracterização reológica de argamassas, como o ensaio de penetração de cone, o ensaio *K-Slump* e o *Vane test* (ou ensaio de palheta), que controlam a tensão de escoamento, e os ensaios de mesa de consistência e cone de escoamento que controlam a viscosidade (BAUER, 2005), além da reometria rotacional (ensaio de fluxo e oscilatório), a técnica *creep recovery* e os ensaios tradicionais como o *mini-slump* (BETIOLI, 2007) e os ensaios de *dropping-ball* e *squeeze-flow*.

Estes ensaios podem ser classificados como estáticos e dinâmicos, sendo que os estáticos baseiam-se apenas no fluxo do material sobre seu próprio peso, enquanto nos dinâmicos a energia é fornecida ao material através de ações como vibração, impacto ou cisalhamento (CARDOSO *et al.*, 2005).

A seguir, serão apresentados alguns dos ensaios mais utilizados para a caracterização reológica de argamassas de revestimento.

### 3.5.1 Mesa de consistência

A mesa de consistência é um ensaio muito utilizado pela sua facilidade e agilidade de execução. No Brasil é normalizado segundo a NBR 7215 (ABNT 1996), sendo que o método consiste no espalhamento horizontal de uma argamassa moldada em cone padrão ao ser submetida a sucessivos impactos após a retirada do cone (figura 23).

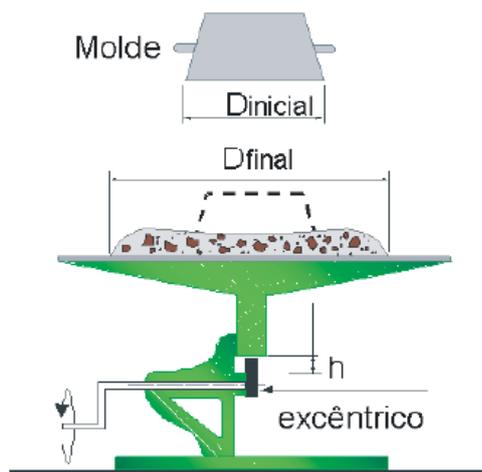


Figura 23: representação esquemática da mesa de consistência (CARDOSO, 2009)

Apresenta a vantagem de ser um teste dinâmico, considerando também a viscosidade do sistema e não só a tensão de escoamento, além de avaliar qualitativamente a tendência à segregação de fases no sistema em decorrência da aplicação dos impactos (CARDOSO, 2009).

Este ensaio é bastante criticado no meio técnico, principalmente devido a sua medição ser pontual, com valores de índice de consistência e não valores de parâmetros reológicos usualmente analisados (viscosidade ou taxa de cisalhamento). Outra desvantagem deste método, é que não reproduz as condições de aplicação práticas da argamassa, como o lançamento com alto impacto seguido de espalhamento sob intenso cisalhamento (CARDOSO, 2009).

Em 2007, Bauer *et al.* já afirmavam que é cada vez mais consensual entre os especialistas que o ensaio da mesa de consistência produz resultados insuficientes para definir a condição de trabalhabilidade para um determinado tipo de argamassa.

### 3.5.2 *Dropping ball*

O método consiste na queda livre de uma esfera padrão, a uma altura pré-estabelecida sobre uma argamassa moldada em um cilindro metálico, conforme a norma inglesa BS 4551/1998. O aparato utilizado para a realização do ensaio, bem como o seu procedimento podem ser observados na figura 24.

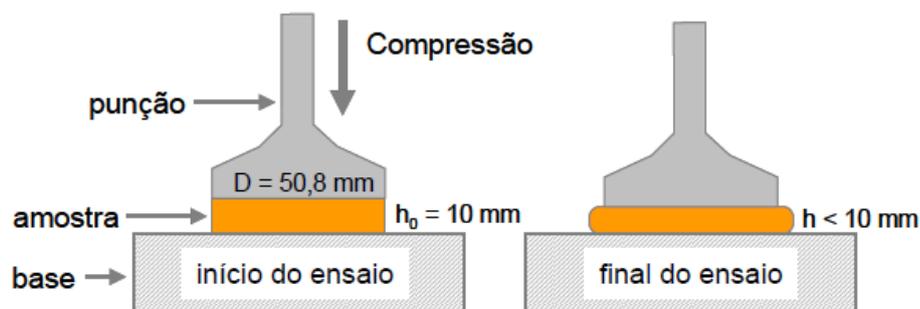
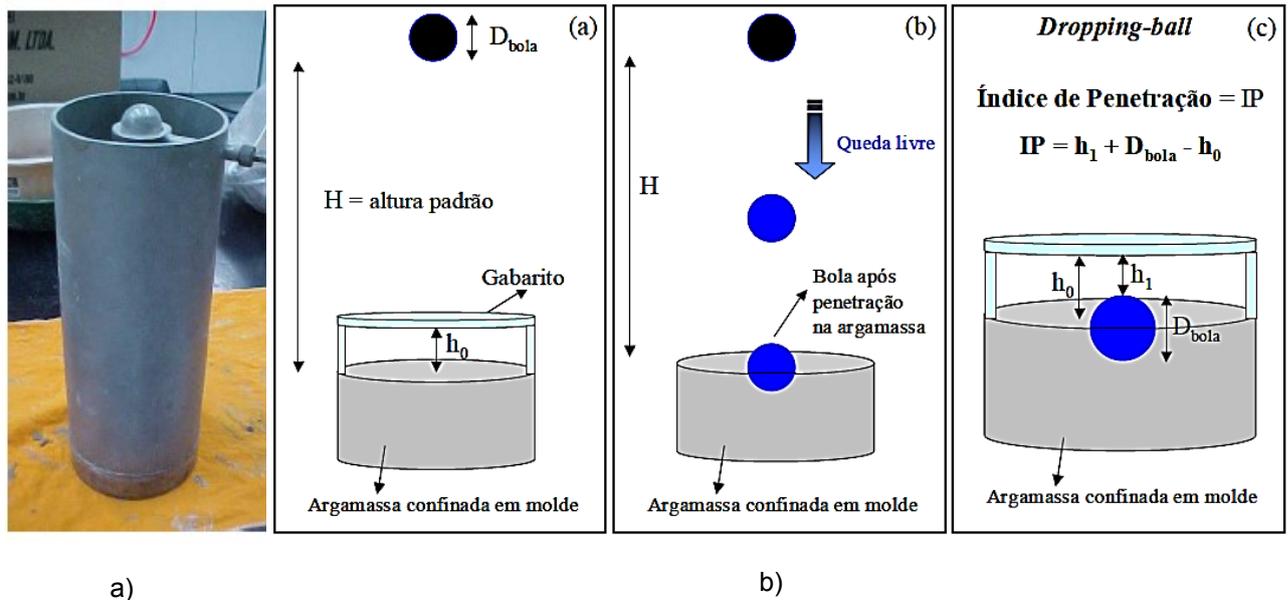
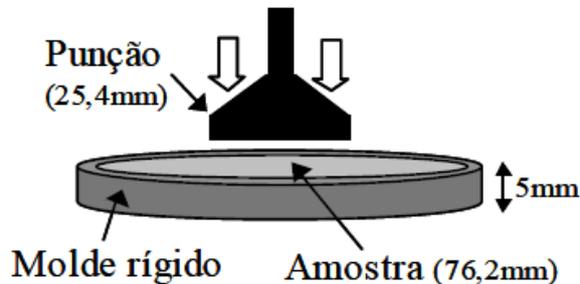


Figura 25: ensaio *squeeze-flow* (CARDOSO *et al.*, 2005)

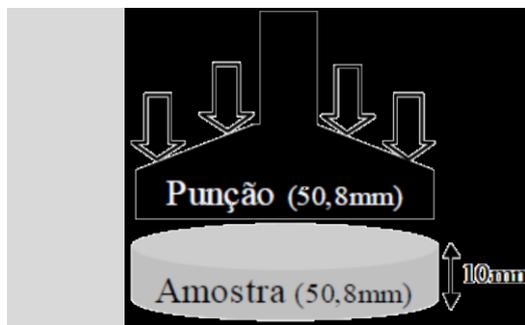
A tabela 7 apresenta algumas das diferentes formas para a realização do ensaio e suas aplicações.

Tabela 7: diferentes formas de realização do ensaio de *squeeze-flow* (adaptado de CARDOSO *et al.* , 2005)



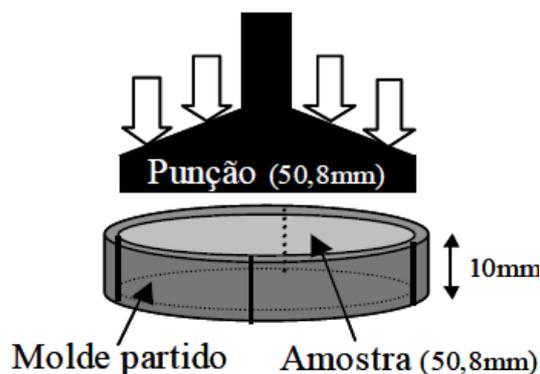
Avaliação reológica de líquidos viscosos, suspensões diluídas ou pastas com consistência inicial baixa, que apresentem pouca ou nenhuma tensão de escoamento inicial, de forma que não são capazes de manter sua forma sem o auxílio do molde restritivo.

Para minimizar o efeito do molde utiliza-se uma amostra com diâmetro três vezes maior do que o diâmetro do punção.



Avaliação reológica de revestimentos à base de cimento ou gesso e polímeros, massas corridas, composições de fibrocimento e argamassas em geral.

Materiais que apresentam tensão de escoamento suficiente para manter a forma durante o ensaio.



Avaliação reológica de argamassas colantes.

Materiais que apresentam tensão de escoamento suficiente para o manuseio e desmoldagem, mas que são altamente aderentes à superfície dos moldes, impedindo a desmoldagem adequada das amostras.

Utiliza-se um molde de PVC rígido partido em quatro pedaços que escorrem radialmente com o fluxo do material.

Os seus resultados são expressos na forma de um gráfico de carga (N) versus deslocamento (mm), sendo que este, segundo Cardoso *et al.* (2005), apresenta uma curva com três regiões bem distintas, conforme mostra a figura 26. Segundo os autores, o estágio I trata-se de um pequeno deslocamento que mostra a deformação elástica do material, o estágio II trata-se de um deslocamento intermediário mostrando a deformação plástica ou fluxo viscoso e o estágio III trata-se de um grande deslocamento e enrijecimento por deformação, influenciado pela aproximação dos agregados e o atrito formado pelos mesmos.

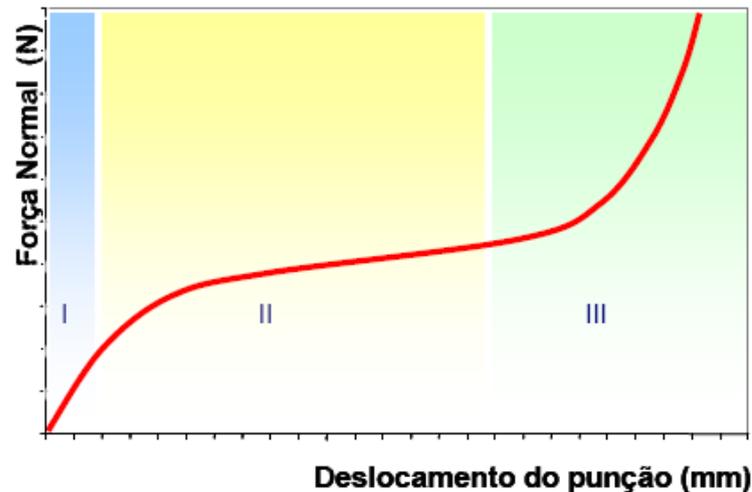


Figura 26: perfil típico de carga versus deslocamento do ensaio de *squeeze-flow* (Cardoso *et al.*, 2005)

Este ensaio pode gerar parâmetros reológicos fundamentais, como a viscosidade e a tensão de escoamento, conforme a equação 21 e a equação 22 (CARDOSO *et al.*, 2005).

$$\eta = \frac{64Ft}{3\pi(h^{-2} - h_0^{-2})D^4} \quad \text{Equação 21}$$

$$\tau_0 = \frac{12hF}{\pi D^3} \quad \text{Equação 22}$$

Onde F é a força de compressão (N), t é o tempo (s), h é a altura instantânea da amostra (m),  $h_0$  é a altura inicial (m), D o diâmetro da amostra (m),  $\eta$  a viscosidade (Pa.s) e  $T_0$  é a tensão de escoamento sob cisalhamento (Pa).

Costa (2006) sugere que a tensão de escoamento é uma medida indireta da capacidade coesiva da argamassa, sendo que quanto maior a tensão de escoamento maior será a coesão da argamassa. Esta pode ser obtida através do gráfico da carga em relação ao deslocamento, obtido no ensaio de *squeeze-flow* (figura 27). Esta é obtida pela interseção de duas retas, a primeira traçada no trecho elástico e outra reta tangente à curva seguinte. A relação entre a carga e a área de aplicação expressa à tensão de escoamento da argamassa.

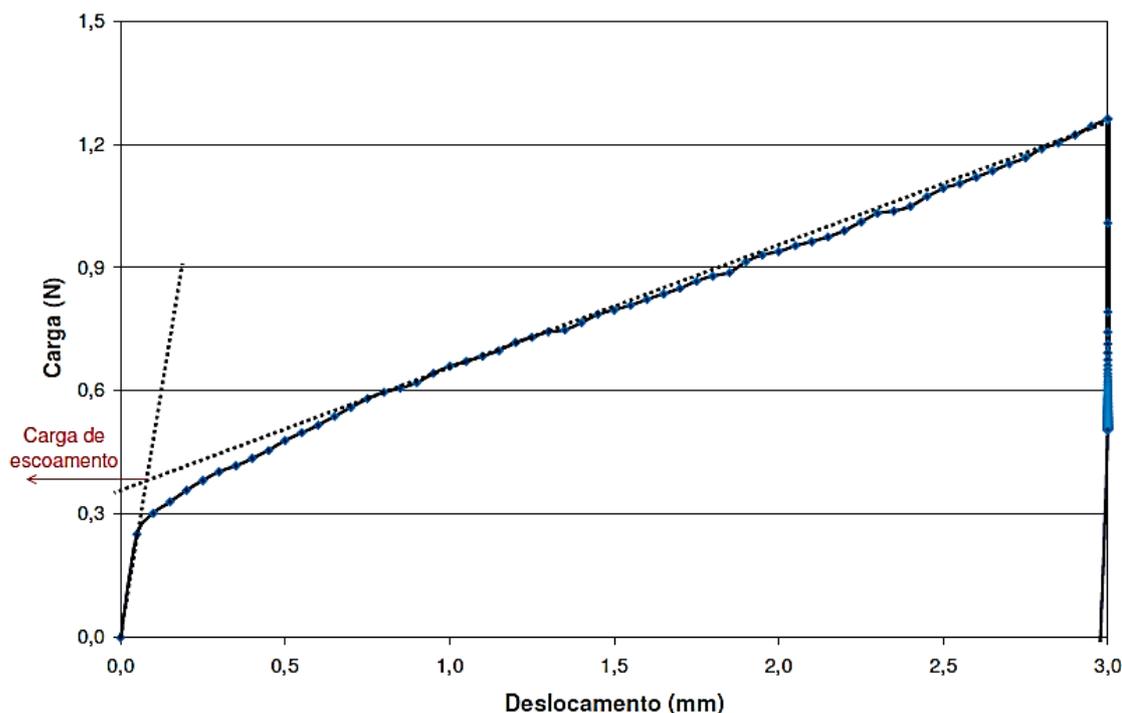


Figura 27: determinação da carga de escoamento através do gráfico carga vs deslocamento (COSTA, 2006)

Existem diversos modelos matemáticos para a determinação dos parâmetros reológicos resultantes do ensaio de *squeeze-flow*, no entanto, o resultado das curvas de carga vs. deslocamento e carga vs. tempo são suficientes para a compreensão da natureza reológica dos materiais, através das curvas e níveis de carga atingidos (CARDOSO *et al.*, 2005).

### 3.5.4 *Vane test* ou ensaio de palhetas

Este ensaio é muito utilizado na mecânica dos solos para a determinação da tensão de cisalhamento de solos argilosos e ao longo dos anos vem sendo adaptado para a utilização em pastas e argamassas.

Tem como princípio cravar uma palheta em cruz na amostra e aplicar um carregamento com uma taxa pré-determinada (figura 28), sendo que durante o ensaio a carga e a deformação impostas à amostra são determinadas, bem como sua tensão última de ruptura (SOUSA e BAUER, 2002).

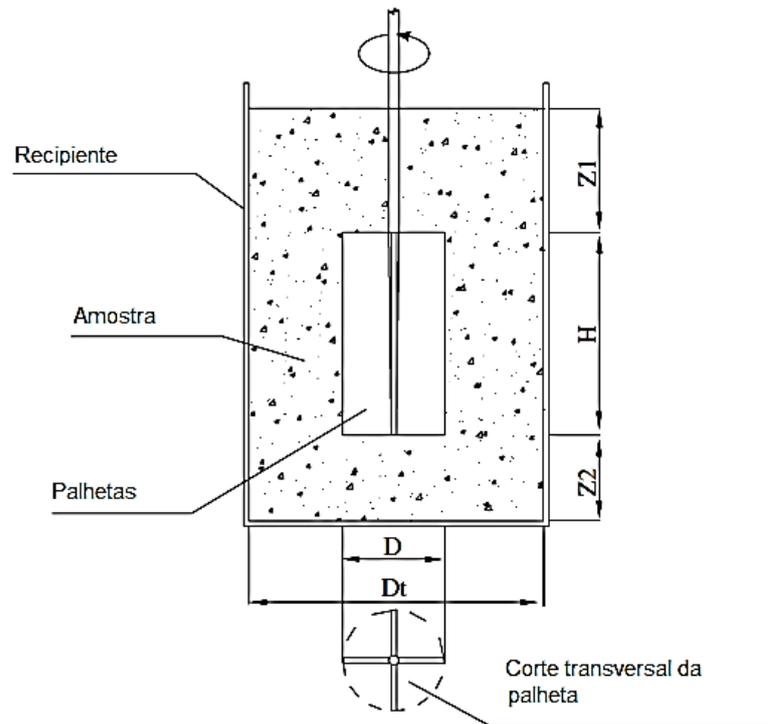


Figura 28: desenho esquemático do ensaio de *vane test* (adaptado de BAUER *et al.*, 2007)

O torque máximo obtido no ensaio pode ser obtido através da equação 23. Onde  $T_s$  é a tensão de cisalhamento exercida pela superfície lateral e  $T_e$  é a área superior e inferior das palhetas (BAUER *et al.*, 2007).

$$T = T_s + 2T_e$$

Equação 23

Em termos de tensão de cisalhamento, o torque é definido como mostra a equação 24. Onde  $T$  é o torque,  $D$  é o diâmetro do cilindro cisalhado,  $H$  é a altura do cilindro cisalhado,  $r$  é o raio do cilindro cisalhado,  $T_e$  é a tensão de cisalhamento na parte mais alta e mais baixa do cilindro e  $T_s$  é a tensão de cisalhamento na latera do cilindro (BAUER *et al.*, 2007).

$$T = \left( \frac{\pi}{2} D^2 H \right) \tau_s + 2 \left( 2\pi \int_0^{D/2} \tau_e r^2 dr \right)$$

Equação 24

Como não se conhece todas estas variáveis, permitem-se algumas aproximações para os casos onde se utilizam palhetas de pequenos diâmetros. Presumindo-se que a tensão de cisalhamento ( $T_0$ ) é distribuída uniformemente ao longo do cilindro e é igual à tensão de escoamento em que o torque é máximo ( $T_m$ ) e sabendo-se que  $H$  e  $D$  são as dimensões da palheta, tem-se a equação 25 (BAUER *et al.*, 2007).

$$T_m = \frac{\pi D^3}{2} \left( \frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0$$

Equação 25

### 3.5.5 Mensuração do escoamento de fluidos por reometria rotacional

A reometria é o estudo das técnicas que visam medir as propriedades reológicas dos fluidos.

Esta ciência tem como objetivo determinar as características do fluido a partir de medições feitas em escoamentos simples e controlados. Nestes testes, o fluido é tensionado de maneira simples de forma que poucos componentes do seu tensor de tensões sejam diferentes de zero, chegando-se a uma equação característica a partir dos componentes da tensão de cisalhamento e da taxa de deformação (KIRYU, 2006).

Os reômetros são aparelhos onde se mede a viscosidade a partir do confinamento de um fluido em alguns dispositivos em condições de bordas fixas e determinadas: dentro de um tubo, entre placas paralelas, entre cilindros concêntricos, etc. (KIRYU, 2006). A figura 29 apresenta diversas formas de fluxo que podem ser simuladas através dos reômetros.

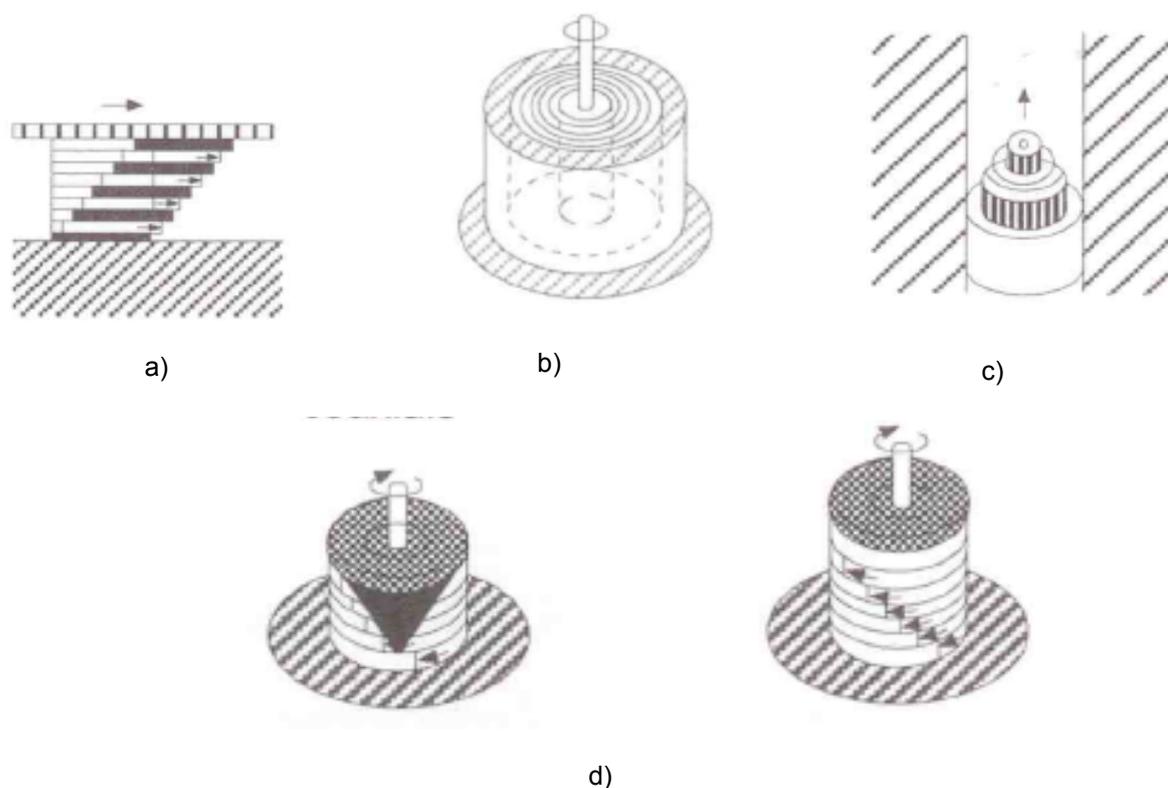


Figura 29: diferentes tipos de fluxo em função da solicitação aplicada: a) fluxo entre duas placas paralelas; b) fluxo circular no gap anular entre dois cilindros coaxiais; c) fluxo através de capilares, orifícios, tubos e canais; d) fluxo entre um cone e uma placa ou Fluxo entre duas placas (adaptado de SCHRAMM, 2006)

A reometria rotacional é um ensaio realizado com a utilização de reômetros, os quais avaliam propriedades reológicas de fluidos, suspensões, argamassas e concretos. O método fornece os dois parâmetros fundamentais para a descrição do comportamento reológico de argamassas, a viscosidade e a tensão de escoamento (BAUER, 2005). Segundo Cardoso (2009), seus princípios básicos de funcionamento são a aplicação de um torque ao fluido ou suspensão, a medida do cisalhamento resultante e o controle do cisalhamento aplicado, avaliando-se o torque necessário

para tal. A figura 30 apresenta alguns modelos de reômetros utilizados na caracterização de argamassas.

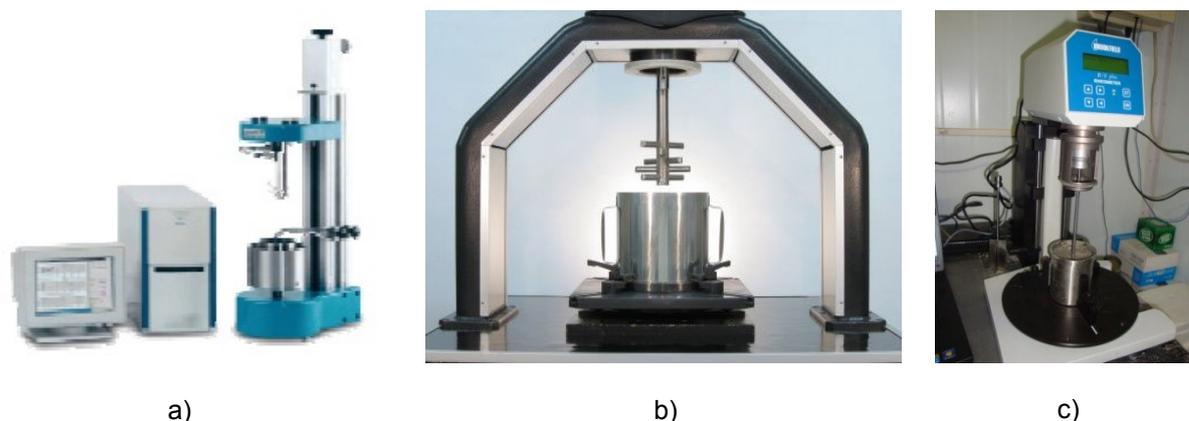


Figura 30: exemplos de reômetros utilizados para argamassas. a) reômetro Viskomat, b) reômetro utilizado por FRANÇA *et al.* (2012), c) reômetro Brookfield

Os reômetros absolutos podem trabalhar com duas alternativas básicas de funcionamento, podendo ser reômetros de tensão controlada (CS) ou reômetros de taxa controlada (CR). Ainda pode haver reômetros que trabalham com ambas as alternativas (SCHRAMM, 2006). A figura 31 exemplifica alguns tipos de reômetros.

Em reômetros rotacionais a viscosidade não pode ser medida diretamente, no entanto, pode ser calculada através da relação tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento (SCHRAMM, 2006).

A validade dos resultados obtidos em um reômetro depende do atendimento de duas condições básicas: fluxo laminar (ausência de turbulências) e aderência da camada de fluido que está em contato direto com a superfície do reômetro (NASCIMENTO, 2007). Além disso, para que se obtenha um gradiente de fluxo linear, o raio do cilindro externo deve ser pelo menos sete vezes maior do que o maior agregado que compõe a mistura, bem como a relação entre o raio do cilindro externo e do cilindro interno (gap) deve ser 1.0 a 1.1 (FERRARIS, 1999<sup>12</sup> apud KOEHLER, FOWLER, 2003). Nascimento (2007) observa que quanto maior o gap, maior o erro induzido pela não linearidade do perfil de velocidade.

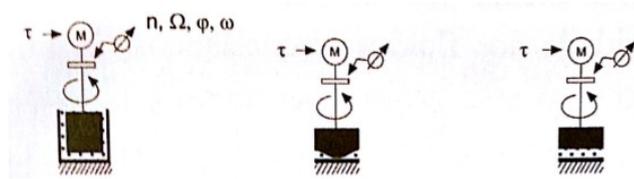
<sup>12</sup> Ferraris, C.F. (1999). "Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 104(5), 461-478.

### A. Reômetro com tensão controlada

Torque/tensão de cisalhamento fixas e deformação/taxa de deformação medidas

Sensor tipo Searle: o rotor gira

Pode ser convertido para o modo CR



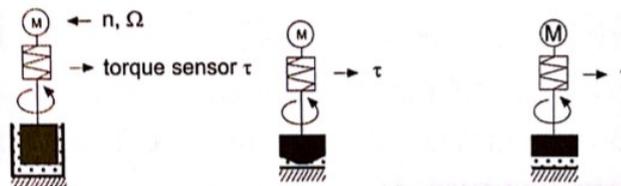
A taxa de cisalhamento é medida no eixo do rotor

O cilindro externo e as placas inferiores são estacionárias

Reômetro/Viscosímetro com taxa controlada (CR)

A taxa de cisalhamento é fixa e a tensão de cisalhamento medida

### B1. Sensores tipo Searle: o rotor gira



O torque é medido no eixo rotor

O cilindro externo e as placas inferiores são estacionárias

### B2. Sensores tipo Couette: o cilindro externo ou as placas inferiores giram

o torque é percebido no cilindro interno que não gira ou no cone

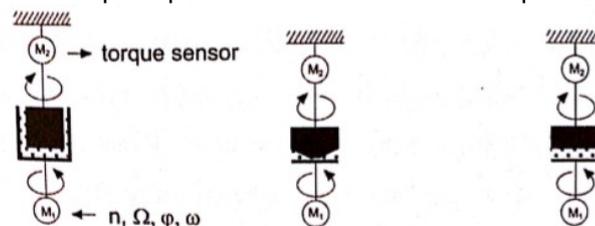


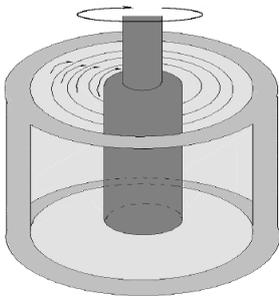
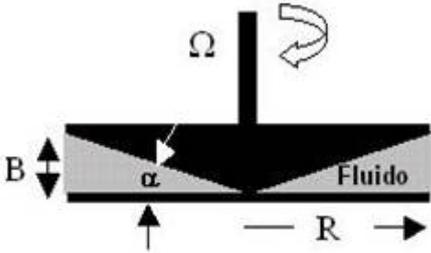
Figura 31: tipos de reômetros rotacionais (adaptado de SCHRAMM, 2006)

Dependendo das informações que se deseja obter, as medidas reológicas podem ser feitas em diferentes regimes (NASCIMENTO, 2007):

- regime permanente: rotor gira em um único sentido com velocidade constante, seu fluxo é laminar, a camada de material que está em contato com o rotor possui velocidade igual a deste e a camada que está em contato com o copo possui velocidade nula;
- regime oscilatório: rotor gira alternadamente nos dois sentidos, não sendo desejável o fluxo na maioria das vezes, apenas a deformação do material. Estes ensaios são utilizados para a determinação de propriedades viscoelásticas de um material.

Os ensaios reológicos podem ser realizados com sistemas de medição do tipo cilindro coaxial ou do tipo cone-placa. Ambos os sistemas fornecem, em teoria, resultados idênticos para líquidos Newtonianos ou não-Newtonianos existindo, entretanto algumas referências de aplicação de cada um destes sistemas (tabela 8):

Tabela 8: diferenças entre o sistema de cilindros coaxiais e o cone-placa adaptada de Schramm (2006)

|                     |  |   |
|---------------------|--|---|
| A) Cilindro coaxial |   | <p>Adequados para todo tipo de amostra e teste;<br/>Necessita de grandes volumes de amostra (5 a 50m<sup>3</sup>);<br/>Sistemas adequados para testes em baixas ou altas temperaturas, altas ou baixas taxas de cisalhamento e altas ou baixas viscosidades.</p>  |
| B) Cone-placa       |  | <p>Para testes em produtos que geram dificuldade de limpeza do equipamento;<br/>Pasta contendo metais preciosos;<br/>Quantidade de amostra requerida muito menor do que no cilindro coaxial, permitindo testes em amostras preciosas ou escassas;<br/>Aplicação em altas taxas de cisalhamento;<br/>Não é adequado para análise de dispersões com grande quantidade de partículas</p> |

O sistema de medição tipo cilindros coaxiais em reômetros rotacionais resultam da curvatura dos pratos do modelo de placas de Newton, formando um cilindro interno e um externo. A amostra fluida que preenche o espaçamento entre os dois cilindros (gap) é submetida a um cisalhamento por um tempo determinado. Estas condições permitem que os dados de tensões de cisalhamento, taxa de cisalhamento e viscosidade resultantes deste teste possam ser tratados matematicamente (SCHRAMM, 2006).

Dentre as diversas formas disponíveis, a geometria de palhetas (*vane*) vem sendo bastante utilizada para a medição reológica de fluidos não-Newtonianos. Manuais recomendam a utilização das palhetas em sistemas densos, com dispersão e se o deslizamento pode ocorrer com a utilização de cilindros lisos, além de fluidos muito tixotrópicos. A figura 32 apresenta um comparativo da geometria de palhetas com a cilíndrica lisa e a cilíndrica adaptada para evitar o deslizamento, ressaltando a maior facilidade de fabricação da do tipo palheta em comparação com a adaptada para evitar o deslizamento (BARNES e NGUYEN, 2001).

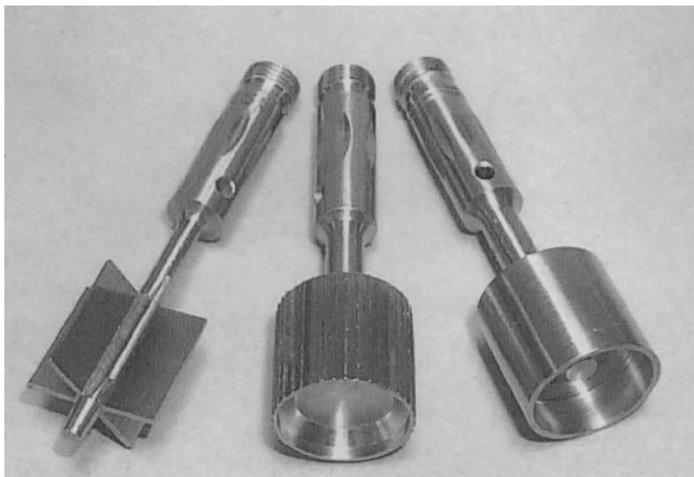


Figura 32: geometria de palhetas, cilíndrica adaptada para evitar o deslizamento e cilíndrica lisa (BARNES e NGUYEN, 2001)

Barnes e Nguyen (2001) citam as cinco áreas onde a geometria de palhetas tem sido mais utilizada para a verificação de propriedades reológicas: dispersões coloidais inorgânicas, alimentos líquidos, sistemas de Bioengenharia (caldos de fermentação, etc.), dispersões diversas, espumas, entre outros. Dentro do estudo de argamassas no estado fresco, os autores citam trabalhos realizados com este tipo de palheta com o objetivo de analisar o efeito dos parâmetros reológicos sobre seu desempenho. Complementarmente, Nascimento (2007) afirma que a geometria de palhetas é a mais indicada para suspensões com elevada tendência à sedimentação.

Os reômetros, apesar de serem muito úteis e precisos na caracterização reológica dos diversos fluidos, podem oferecer algumas limitações quando utilizados em fluidos de alta viscosidade.

Por exemplo, em argamassas com baixas relações água/cimento, com baixa plasticidade, ocorre um aumento do torque devido ao atrito entre os grãos, em consequência disso, estas argamassas não podem ser caracterizadas com a utilização de reômetros rotacionais, devido aos baixos valores de torque mensurados por estes equipamentos (SENFF *et al.*, 2009).

## 4 ENERGIA DE APLICAÇÃO

A energia de aplicação é uma variável indispensável no estudo da aderência de argamassas de revestimento. Acredita-se que esta propriedade esteja diretamente relacionada ao desenvolvimento da área de contato da argamassa com o substrato, sendo que, dependendo de sua magnitude, poderia inclusive suprir deficiências relacionadas a outras variáveis envolvidas no processo de aplicação do revestimento. A título de exemplificação, uma argamassa de alta viscosidade, quando aplicada com alta energia, pode obter bom desempenho quanto ao seu escoamento sobre o substrato, resultando em menor quantidade de falhas na interface, enquanto que quando a mesma argamassa é aplicada com baixa energia, tem maior resistência ao escoamento (molhamento do substrato), gerando mais falhas de contato, teoria estudada nesta tese.

Segundo Bauer (2005), entre os fatores que interferem na extensão de aderência das argamassas de revestimento sobre o substrato, destacam-se a textura do substrato, a trabalhabilidade da argamassa, a energia de aplicação e o aperto. Conjuntamente, a plasticidade da argamassa e a energia de lançamento são fundamentais para a penetração pelas saliências e reentrâncias do substrato, aumentando o contato na interface (BAUER, 2005). Dependendo da argamassa utilizada, a textura do substrato pode representar obstáculos ao escoamento e penetração nas cavidades, de forma que a energia de aplicação e o aperto, quando realizados com intensidade adequada, podem auxiliar na ocorrência do aumento de contato da argamassa com as reentrâncias do substrato.

Yang e Person (2008) e Yasterbov *et al.* (2015) avaliaram a influência de superfícies de diferentes rugosidades e da aplicação de pressão no desenvolvimento da área de contato interfacial através do desenvolvimento de modelos matemáticos. Os autores verificaram que o aumento da pressão aumentou também a área de contato. Yasterbov *et al.* (2015) atribuíram este aumento aos resultados da expansão da área de contato inicialmente existente, conforme pode-se observar na figura 33.

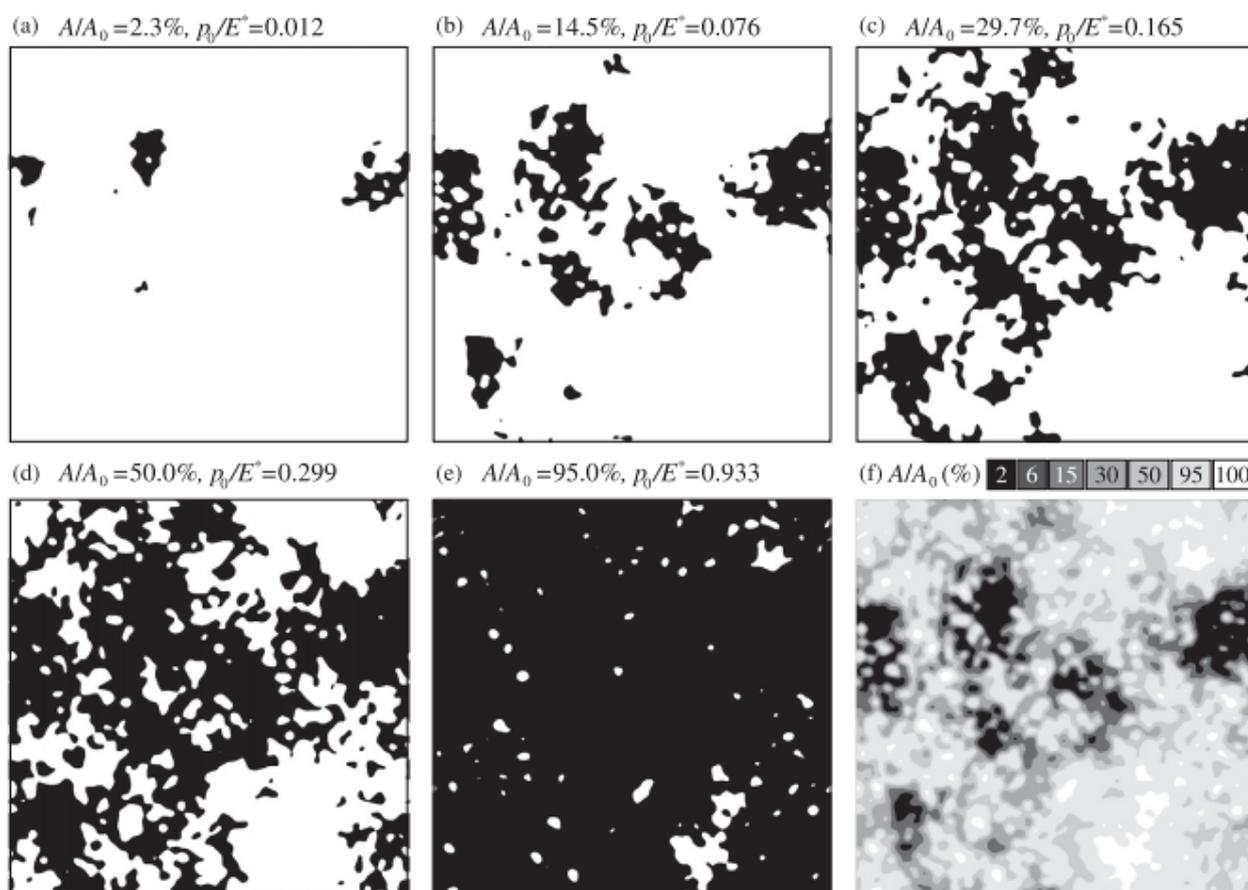


Figura 33: simulação computacional do aumento da área de contato devido ao aumento de pressão aplicada (a-e) e uma sobreposição dos gráficos de contorno (f) (YASTREBOV *et al.*, 2015), sendo  $A$ : área de contato real,  $A_0$ : área de contato nominal,  $E$ : módulo de Young e  $p_0$ : pressão externa

Apesar da importância da energia de aplicação no desenvolvimento da área de contato dos revestimentos de argamassa, esta é uma variável de difícil controle, principalmente nos canteiros de obra. Em revestimentos aplicados manualmente, técnica muito recorrente nos canteiros de obra brasileiros, são diversos os fatores que geram variabilidade na energia de aplicação, podendo-se enumerar, entre outros:

- a) horário do dia e dia da semana: cansaço do aplicador;
- b) ergonomia: locais de mais difícil acesso, como os próximos ao teto ou próximos ao piso dificultam a aplicação da argamassa;
- c) experiência do aplicador;
- d) ferramenta utilizada: colheres de pedreiro maiores, com mais material são mais pesadas e exigem maior força do aplicador, que cansa mais cedo;
- e) reologia da argamassa fornecida: influencia no esforço que o aplicador deverá fazer.

Buscando-se reduzir a variabilidade decorrente da aplicação manual, diversos canteiros de obra têm adotado sistemas automáticos de projeção de argamassas, os quais prometem ser mais homogêneos quanto à energia de aplicação.

No meio técnico, visando uniformizar a energia de aplicação das argamassas de revestimento, alguns trabalhos (CARASEK, 2006; PAES, 2004; ANTUNES, 2010; STOLZ, 2011; PAGNUSSAT, 2013) vem utilizando um dispositivo denominado caixa de queda ou lançador de argamassa (figura 34). Após estudos tentando simular a energia de aplicação de um oficial pedreiro, Carasek (2006) utilizou uma altura de lançamento de 0,15 m, enquanto Paes (2004) utilizou altura de 0,5 m, Antunes (2010) utilizou alturas de 1 m e 2 m e Stolz (2011) e Pagnussat (2013) utilizaram a altura de 1 m.



Figura 34: caixa de queda ou lançador de argamassa

A principal vantagem da caixa de queda é a facilidade de produção do dispositivo devido a sua simplicidade executiva e o controle da energia de aplicação da argamassa que ela permite em laboratório. O dispositivo não permite a total reprodução do movimento do oficial pedreiro no momento da aplicação da argamassa sobre o substrato, mas permite um controle desta variável tão difícil de ser controlada, que permite o estudo mais aprofundado das propriedades na qual ela exerce influência.

#### 4.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA DE APLICAÇÃO

O impacto da argamassa com a base é um fenômeno complexo, sendo que o balanço entre a energia de impacto na aplicação e a forma como ocorre a dissipação são os fatores mais importantes oriundos da formação de defeitos na interface (ANTUNES, 2010).

Como a argamassa de massa “m” encontra-se inicialmente em repouso a uma altura “h”, submetida a uma aceleração gravitacional “g”, a energia potencial gravitacional é dada pela equação 26.

$$E = m.g.h$$

Equação 26

Esta energia, embora não seja integralmente transformada em energia de aplicação em função da reflexão da argamassa sobre a superfície, é a energia disponível. A energia disponível é efetivamente convertida em energia de aplicação e depende de outros fatores de controle do experimento, tais como a consistência ou reologia da argamassa.

A partir do conhecimento adquirido na revisão da literatura, é possível concluir que são diversos os fatores que exercem influência no comportamento das argamassas quando aplicadas ao substrato. Entender o desempenho e comportamento da argamassa por si só não parece ser suficiente para prever seu desempenho e comportamento ao ser entendida como um sistema de revestimento. Desta forma, no próximo capítulo, será apresentado o programa experimental que foi desenvolvido, buscando esclarecer alguns aspectos relacionados às propriedades que exercem influência no desenvolvimento da área de contato na interface argamassa/substrato.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi estruturado de forma a contribuir para o entendimento do comportamento de diferentes argamassas de revestimento quando aplicadas sobre substratos com tensões superficiais distintas com duas energias de aplicação e a interação entre estas variáveis.

### 5.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na etapa do planejamento experimental são definidas as variáveis de resposta e os fatores controláveis da pesquisa. Ribeiro e ten Caten (2003) definem fatores controláveis, ou variáveis independentes, como sendo os parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados em vários níveis do experimento, enquanto os fatores constantes são os que não são prioritários na pesquisa e, portanto, são mantidos constantes no experimento. Já as variáveis de resposta, ou dependentes, são os aspectos que podem ser medidos e permitem quantificar as características de qualidade.

Complementarmente existem fatores não controláveis, que são aqueles também conhecidos como fatores de ruído, os quais não podem ser controlados e são responsáveis pela variabilidade do experimento (RIBEIRO e TEN CATEN, 2003).

#### 5.1.1 Escolha das variáveis do programa experimental

A variável de resposta avaliada neste programa experimental foi a área de contato mensurada através de scanner tridimensional a laser.

A área de contato ou extensão de aderência é a relação entre a extensão de contato efetiva (sem defeitos) e a extensão total na interface argamassa/substrato. A mensuração desta propriedade torna-se importante quando trabalhos como o realizado por Carasek *et al.* (2014) resultam na afirmação de que o contato melhor e maior entre a argamassa e substrato cria maior resistência de aderência.

Os fatores controláveis que compõem esta pesquisa são:

- a) proporcionamento das argamassas;
- b) composições granulométricas (CG) do agregado;
- c) tensão superficial do substrato;
- d) energias de aplicação das argamassas.

A escolha destas variáveis está relacionada à importância que elas possuem no comportamento dos revestimentos de argamassa no estado fresco e endurecido.

A presença de cal nos proporcionamentos de argamassas de revestimento vem sendo foco de diversos estudos (SÉBAIBI, *et al.*, 2004; ARIZZI *et al.*, 2015; PALOMAR *et al.*, 2015, XU *et al.*, 2014; QUARCIONI, 2008; LANAS, *et al.*, 2005), já que suas propriedades alteram a reologia das argamassas, influenciando no desempenho do sistema de revestimento, desde a facilidade de aplicação, até o desenvolvimento da área de contato com o substrato.

Seabra *et al.* (2007) afirmam que o comportamento reológico das argamassas no estado fresco é a característica principal para prever as características das argamassas no estado endurecido.

A dimensão das partículas de areia influencia de forma decisiva na estrutura porosa e no subsequente comportamento de uma argamassa. A granulometria da areia condiciona a estrutura porosa, devida a forma e dimensão de suas partículas, fato que determina o grau de compactação, ou seja, o volume de vazios disponível para ser preenchido pelo ligante e a água no estado fresco e pela pasta no estado endurecido (RATO, 2006). Adicionalmente, Scannell *et al.* (2014) enfatizam em seu trabalho a importância do estudo do impacto do tipo de agregado nas propriedades das argamassas, tanto no estado fresco quanto endurecido.

A energia de aplicação de argamassas aplicadas manualmente é um parâmetro de difícil controle na prática, mas que pode ser controlado em laboratório, de forma a verificar sua real influência na produção dos sistemas de revestimento.

E a tensão superficial dos substratos surge como um parâmetro que pouco tem se dado atenção no estudo do desempenho de revestimentos de argamassa, de forma que neste trabalho objetiva-se verificar sua real influência no desenvolvimento do contato interfacial da argamassa aos substratos.

Após a definição destas variáveis, formulou-se a matriz experimental onde está apresentada a estrutura desta pesquisa (figura 35).



Figura 35: matriz experimental representando os fatores controláveis – Argamassas (A), Composições Granulométricas (CG), energias de aplicação e substratos de diferentes tensões superficiais

## 5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão detalhados os materiais e a metodologia adotados para a realização da matriz experimental.

### 5.2.1 Materiais utilizados na produção das argamassas

Os materiais que foram utilizados para o desenvolvimento do programa experimental estão detalhados a seguir.

#### 5.2.1.1 Cimento

O cimento utilizado na confecção das argamassas de revestimento é um cimento Portland CPIV-32, classificado segundo a NBR 5736 (ABNT, 1991) como um cimento pozolânico. Esta escolha baseou-se na sua grande utilização na produção de argamassas em Porto Alegre/RS.

Sua caracterização está apresentada na tabela 9. A granulometria a laser do cimento foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos – LACER/UFRGS e está apresentada no anexo A.

Tabela 9: caracterização física e química do cimento CPIV F32

| Ensaio                                   | Método                | Resultados               | Exigências NBR 5736/91 |
|--|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| Superfície específica Blaine***          | NBR NM 76/98          | 4398,5cm <sup>2</sup> /g |                        |
| Massa específica*                        | NBR NM 23/01          | 2,76g/cm <sup>3</sup>    |                        |
| Diâmetro médio**                         | Granulometria a laser | 16,95µm                  |                        |
| Finura peneira nº 200***                 | NBR 11579/91          | 0,27%                    |                        |
| Início de pega***                        | NBR NM 65/02          | 243,25min                | ≥1h                    |
| Fim de pega***                           | NBR NM 65/02          | 284,80min                | ≤12h                   |
| Resistência à compressão***              | 7 dias                | NBR 7215/96              | ≥20MPa                 |
|  | 28 dias               | NBR 7215/96              | ≥32MPa                 |
| Resíduo insolúvel***                     | NBR NM 22/04          | 35,84%                   |                        |
| Anidrido Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )*** | NBR NM 146/04         | 2,28%                    |                        |
| Óxido de Magnésio (MgO)***               | NBR NM 14/04          | 4,61%                    | ≤ 6,5%                 |
| Perda ao fogo*                           |                       | 3,64%                    | ≤ 4,5%                 |

\*ensaio realizado no LAMTAC -NORIE - UFRGS

\*\*ensaios realizados no LACER - UFRGS

\*\*\*dados fornecidos pelo fabricante

### 5.2.1.2 Cal

A cal utilizada na confecção das argamassas é classificada como hidratada CH-I conforme a NBR 7175 (ABNT, 2003). Optou-se pela Cal CH-I por suas propriedades que a tornam uma cal mais pura, com menor porcentagem de óxidos de cal e magnésio não hidratados.

Para a caracterização da cal, foram realizados os ensaios químicos através de Fluorescência de Raios X (FRX), no LACER/UFRGS e físicos de massa específica conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001) no Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) do NORIE/UFRGS (tabela 10) e granulometria a laser, apresentada no anexo B, no LACER/UFRGS.

Tabela 10: características químicas e físicas da cal hidratada CH-I

| Descrição        | Ensaio realizado (%)  | Limites (%)  | Metodologia  |
|------------------|-----------------------|--------------|--------------|
| CaO total        | 67,26                 | 55,00 mínimo | FRX          |
| MgO total        | 4,02                  | 29,00 máximo | FRX          |
| Massa específica | 2,28g/cm <sup>3</sup> |              | NBR NM 23/01 |
| Diâmetro médio   | 9,03 µm               |              | Laser        |

### 5.2.1.3 Agregado miúdo

A areia utilizada tem origem quartzosa e é proveniente do Rio Jacuí/RS. A mesma foi seca e passou por peneiramento em quatro frações, quais sejam:

- passante na malha 2,4 mm e retida na malha 1,2 mm;
- passante na malha 1,2 mm e retida na malha 0,6 mm;
- passante na malha 0,6 mm e retida na malha 0,3mm e
- passante na malha 0,3 mm e retida na malha 0,15mm.

Com estas quatro frações foram produzidas três diferentes composições granulométricas (CG), baseadas nos resultados do estudo realizado por Bonin *et al.* (1999), estudo em que os autores avaliaram a influência de cinco diferentes distribuições granulométricas da areia na trabalhabilidade das argamassas. Entre as CG estudadas pelos autores, foram escolhidas para este trabalho as que apresentaram composições opostas e uma intermediária, estando as mesmas apresentadas na tabela 11.

Tabela 11: porcentagem retida nas peneiras e suas características físicas

|                                   | CG1                    |                    | CG2                    |                    | CG3                    |                    |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| Peneira (abertura)                | % retida               | % retida acumulada | % retida               | % retida acumulada | % retida               | % retida acumulada |
| 1,18mm                            | 25                     | 25                 | 10                     | 10                 | 40                     | 40                 |
| 600µm                             | 25                     | 50                 | 40                     | 50                 | 10                     | 50                 |
| 300µm                             | 25                     | 75                 | 40                     | 90                 | 10                     | 60                 |
| 150µm                             | 25                     | 100                | 10                     | 100                | 40                     | 100                |
| Módulo de finura                  | 2,50                   |                    | 2,50                   |                    | 2,50                   |                    |
| Dimensão máxima (mm)              | 2,36                   |                    | 2,36                   |                    | 2,36                   |                    |
| Massa unitária (NBR NM 45/96)     | 1,51 g/cm <sup>3</sup> |                    | 1,48 g/cm <sup>3</sup> |                    | 1,54 g/cm <sup>3</sup> |                    |
| Massa específica (NBR NM 52/02)   | 2,62 g/cm <sup>3</sup> |                    |                        |                    |                        |                    |
| Coefficiente de Uniformidade (Cu) | 3,95                   |                    | 2,48                   |                    | 6,28                   |                    |
| Volume de Vazios (%)              | 42,4                   |                    | 43,5                   |                    | 41,2                   |                    |

$$*\text{Índice de Vazios} = [(massa\ específica - massa\ unitária)/massa\ específica]*100]$$

A CG1 apresenta uma distribuição contínua, com o percentual retido em peneiras sucessivas constantes. A CG2 apresenta-se muito semelhante às areias naturais, ou seja, é uma areia uniforme com predominância de grãos de diâmetros semelhantes, e de baixa compacidade. A CG3 é um espelho da CG2, com distribuição granulométrica típica de uma mistura de duas areias naturais, com predominância de grãos retidos em peneiras com diâmetros bastante diferentes, resultando em uma areia desuniforme e de boa compacidade (BONIN *et al.*, 1999).

Quanto aos coeficientes de uniformidade (Cu) das composições granulométricas escolhidas, observa-se que a CG1 e a CG2, apesar de possuírem curvas bastante distintas (figura 36), apresentam Cu muito semelhante, considerado como muito uniforme. A CG3 apresenta Cu maior do que 5, classificando-se como uniformidade média. Além disso, quanto menos uniforme a CG, menor seu índice de vazios, como esperado.

Visando tornar mais visual as diferenças entre as composições granulométricas, foram plotados gráficos com a porcentagem retida (figura 36a) e a porcentagem retida acumulada (figura 36b) em cada uma das peneiras, bem como os limites superior e inferior estabelecidos em norma para areias médias. Apesar de o uso do gráfico com as porcentagens retidas não ser corriqueiro para apresentar as granulometrias, optou-se por apresentá-lo como uma forma de ilustrar as diferentes CG que foram compostas, que formam uma reta, uma parábola côncava e outra convexa.

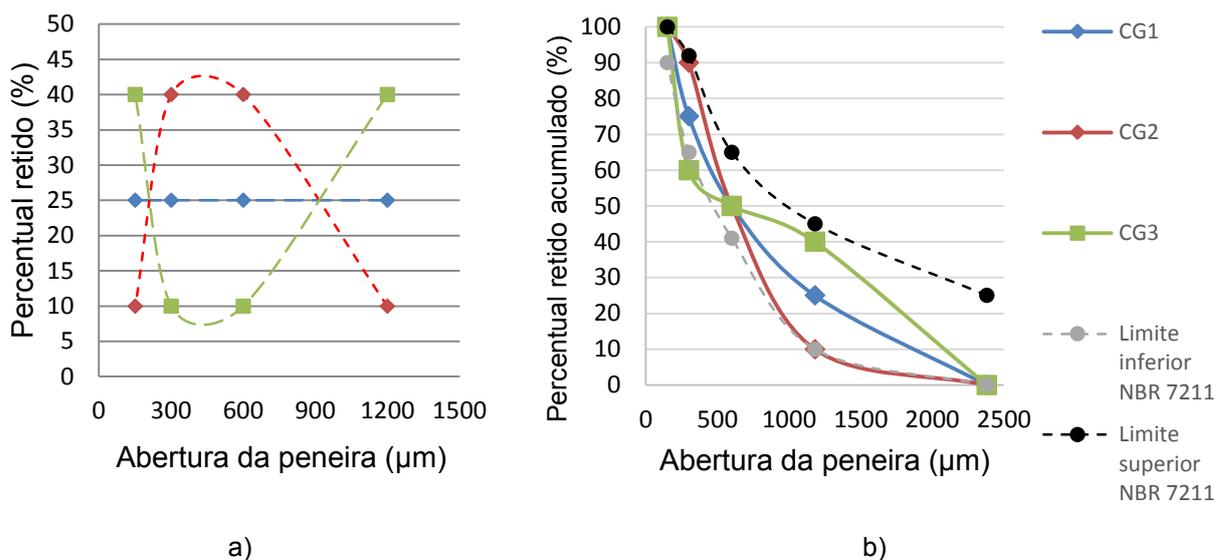


Figura 36: composições granulométricas: a) porcentagem retida, b) porcentagem retida acumulada

#### 5.2.1.4 Água

A água utilizada na confecção dos substratos de concreto e das argamassas foi a disponível para abastecimento local, fornecida pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre (DMAE).

#### 5.2.2 Escolha dos substratos

Visando isolar a variável tensão superficial, tomou-se a decisão de utilizar substratos lisos e não porosos com diferentes tensões superficiais.

A medida do ângulo de contato dos substratos foi realizada através da utilização de um equipamento medidor de ângulo de contato, conhecido como goniômetro (figura 37), marca Pixelink, disponível no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.



Figura 37: vista geral do goniômetro

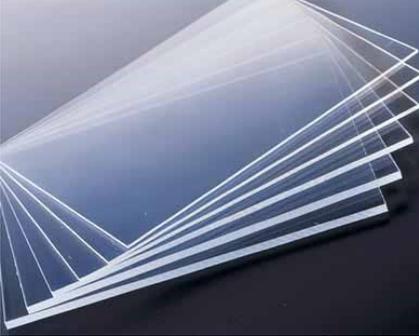
Este equipamento capta a imagem do perfil de uma gota de água quando depositada sobre a superfície sólida por meio de uma seringa. A medição do ângulo de contato então foi realizada através do software AutoCAD 2013.

Mensurou-se então o ângulo de contato de diversas superfícies lisas, entre elas o vidro, o acrílico e o polietileno, obtendo-se os ângulos de contato médios ( $\theta_m$ ) e seus respectivos coeficientes de variação (CV), conforme apresentados na tabela 12. Para cada superfície realizou-se medições de oito valores para se chegar ao ângulo de contato médio.

As espessuras do vidro, do acrílico e do polietileno utilizados como substratos, foram de, respectivamente, 3 mm, 4 mm e 0,12 micras.

Os resultados obtidos na medição do ângulo de contato destas superfícies apresentaram valores satisfatórios, visto que seus comportamentos foram diferentes entre si, podendo ser classificados como hidrofílico ( $\theta < 30^\circ$ ), intermediário ( $30^\circ < \theta < 90^\circ$ ) e hidrofóbico ( $\theta > 90^\circ$ ), conforme classificação indicada anteriormente, na tabela 1. Além disso, mostraram-se coerentes com os verificados por Adamson e Gast (1997), que encontraram ângulos de contato de  $103^\circ$  para o polietileno e ângulo não quantificado, mas denominado “pequeno” para o vidro.

Tabela 12: ângulo de contato médio das superfícies

| Vidro   | Acrílico   | Polietileno   |
|---|--|---|
|  |  |  |
|  |  |  |
| $\theta_m = 27^\circ$<br>CV= 13%  | $\theta_m = 52^\circ$<br>CV= 8%  | $\theta_m = 96^\circ$<br>CV= 3%   |

Através da equação de Young-Laplace, apresentada no capítulo 3.3.1 deste trabalho, foi possível calcular as tensões superficiais de cada um dos substratos escolhidos. Para tal, buscou-se na literatura técnica (SPECIALCHEM, 2007) os valores de tensão superficial ( $\gamma$ ) água/ar, vidro/ar, acrílico/ar e polietileno/ar. A tabela 13 apresenta os valores encontrados e os valores de tensão superficial substrato/água calculados.

Tabela 13: valores de tensão superficial nas interfaces dos substratos escolhidos

| Superfície                     | Tensão superficial                |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Água (20°C)/ar (líquido/vapor) | $\gamma_{LV} = 72,8$ dinas/cm*    |
| Vidro (sólido/vapor)           | $\gamma_{SV} = 1000$ dinas/cm*    |
| Acrílico (sólido/vapor)        | $\gamma_{SV} = 41$ dinas/cm*      |
| Polietileno (sólido/vapor)     | $\gamma_{SV} = 31$ dinas/cm*      |
| Vidro (sólido/líquido)         | $\gamma_{SL} = 935,13$ dinas/cm** |
| Acrílico (sólido/líquido)      | $\gamma_{SL} = -3,82$ dinas/cm**  |
| Polietileno (sólido/líquido)   | $\gamma_{SL} = 38$ dinas/cm**     |

\*Fonte: Specialchem (2007); \*\*Valor calculado com os ângulos de contato médios medidos no goniômetro

### 5.2.3 Dosagem e produção das argamassas

Foram compostas três argamassas, chamadas de A3, A6 e A9, com proporcionamentos de 1:0:3, 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia, materiais secos, em volume), respectivamente, dosadas em massa em laboratório. Estes proporcionamentos foram compostos por agregados miúdos com as

três composições granulométricas que foram descritas detalhadamente no item 5.2.1.3 deste trabalho. A tabela 14 apresenta cada uma das argamassas produzidas, bem como a nomenclatura utilizada para cada uma delas.

Tabela 14: nomenclatura das argamassas produzidas

|   |                       | Proporcionamentos |            |            |
|---|-----------------------|-------------------|------------|------------|
|   |                       | 1:0:3 – A3        | 1:1:6 – A6 | 1:2:9 – A9 |
| <b>Composições granulométricas:</b><br>percentuais retidos nas peneiras de malha: 0,15; 0,3; 0,6 e 1,2 mm | 25, 25, 25, 25% - CG1 | A31               | A61        | A91        |
|   | 10, 40, 40, 10% - CG2 | A32               | A62        | A92        |
|   | 40, 10, 10, 40% - CG3 | A33               | A63        | A93        |

As argamassas foram produzidas em conformidade com a NBR 13276 (ABNT, 2005) em argamassadeira automática com controlador automático digital, movimento planetário e capacidade de 5 litros. Todas as argamassas foram produzidas com 1,5 kg de material seco, para que a quantidade de material não exercesse influência sobre a mistura e, conseqüentemente, sobre o seu comportamento reológico.

As quantidades de água utilizadas para atingir o índice de consistência pré-determinado de  $240 \pm 10$  mm, bem como as quantidades de materiais em massa e os percentuais de cada componente, estão apresentadas na tabela 15.

Tabela 15: dosagem das argamassas

| Nomenclatura | Proporcionamento em volume | Composição granulométrica da areia (%)* | Quantidade de materiais (g) |         |        |       | Teor de materiais na argamassa, em massa (%) |         |       |      | Relação a/c | H (%)** | Teor de pasta (%) |
|--------------|----------------------------|---|-----------------------------|---------|--------|-------|--|---------|-------|------|-------------|---------|-------------------|
|              |                            |   | Cal                         | Cimento | Areia  | Água  | Cal  | Cimento | Areia | Água |             |         |                   |
| <b>A 31</b>  | 1:0:3                      | 25, 25, 25, 25                          | 0                           | 225     | 1275,2 | 214   | 0  | 13      | 74    | 12   | 0,95        | 14      | 26                |
| <b>A 32</b>  | 1:0:3                      | 10, 40, 40, 10                          | 0                           | 229     | 1271,0 | 237,5 | 0  | 13      | 73    | 14   | 1,04        | 16      | 27                |
| <b>A 33</b>  | 1:0:3                      | 40, 10, 10,40                           | 0                           | 221     | 1279,0 | 210   | 0  | 13      | 75    | 12   | 0,95        | 14      | 25                |
| <b>A 61</b>  | 1:1:6                      | 25, 25, 25, 25                          | 71                          | 116     | 1313,0 | 222   | 4  | 7       | 76    | 13   | 1,91        | 15      | 24                |
| <b>A 62</b>  | 1:1:6                      | 10, 40, 40, 10                          | 71,9                        | 118     | 1309,0 | 229   | 4  | 7       | 76    | 13   | 1,94        | 15      | 24                |
| <b>A 63</b>  | 1:1:6                      | 40, 10, 10,40                           | 69,5                        | 114     | 1311,0 | 215   | 4  | 7       | 77    | 13   | 1,89        | 14      | 23                |
| <b>A 91</b>  | 1:2:9                      | 25, 25, 25, 25                          | 96                          | 78      | 1326,0 | 250   | 5  | 4       | 76    | 14   | 3,21        | 17      | 24                |
| <b>A 92</b>  | 1:2:9                      | 10, 40, 40, 10                          | 97,7                        | 79,4    | 1323,0 | 261,3 | 6  | 5       | 75    | 15   | 3,29        | 17      | 25                |
| <b>A 93</b>  | 1:2:9                      | 40, 10, 10,40                           | 94,3                        | 76,7    | 1329,0 | 250   | 5  | 4       | 76    | 14   | 3,26        | 17      | 24                |

\* percentual retido nas peneiras de abertura 1,2, 0,6, 0,3 e 0,15 mm; \*\* Relação água/materiais secos;

As quantidades de água demandadas para as argamassas foram coerentes, já que o proporcionamento A3 foi o que demandou menor quantidade de água, seguido pelo A6 e pelo A9, de forma que a presença de cal aumentou a demanda de água nas misturas, como esperado.

As argamassas produzidas com a CG2 foram as que demandaram uma quantidade um pouco maior de água, por ter sua composição granulométrica menos compacta (dada pela menor massa

unitária) e alta uniformidade. Já as argamassas com CG3, opostas a CG2, foram as que demandaram menor quantidade de água para atingir a consistência desejada. As argamassas com CG1 mostraram-se intermediárias. Os valores obtidos para as mesmas foram coerentes com os encontrados por Bonin *et al.* (1999).

Visando visualizar melhor o efeito das composições granulométricas no comportamento das argamassas, alguns ensaios complementares de caracterização foram realizados.

Buscando-se estudar o empacotamento dos grãos e seu volume de vazios, realizaram-se ensaios de massa unitária de todos os grãos que compõem as argamassas (ligantes e agregados). Este ensaio foi realizado através de lançamento dos grãos por gravidade (massa unitária solta), com utilização de cone apoiado sobre tripé (figura 38a), controlando-se, desta forma, a altura e velocidade de lançamento dos grãos, rasando o excesso posteriormente. Este mesmo material, após pesado, foi submetido à vibração em mesa vibratória (figura 38b) por período de 60 segundos, de forma que mais material ia sendo acrescentado conforme a compactação ia ocorrendo, após a vibração o material foi rasado e pesado. Observa-se que estes ensaios foram realizados com um total de 1,5 kg de material seco, sendo todo o material homogeneizado e lançado no momento do ensaio.



a)



b)

Figura 38: ensaio de densidade de massa das argamassas: a) ensaio por gravidade com cone apoiado em tripé; b) mesa vibratória

Além destes ensaios, calculou-se a massa específica teórica das argamassas, através das quantidades de cada um dos materiais que compõem a argamassa inclusive a água, multiplicados pelas suas respectivas massas específicas, sendo cada um desses produtos dividido pela massa total de materiais. Com estes dados, foi possível calcular o volume de vazios das partículas sólidas da mistura, considerando o método de medição da massa unitária por gravidade e por vibração (compactação).

As médias dos valores obtidos com estes ensaios estão apresentados na tabela 16.

Tabela 16: valores médios obtidos através da caracterização das composições granulométricas quanto ao empacotamento

| Argamassa | Massa unitária da argamassa (g/cm <sup>3</sup> ) |          | Massa específica teórica da argamassa seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Volume de vazios (método gravidade - %) | Volume de vazios (método vibração - %) |
|-----------|--|----------|---|---|--|
|           | Gravidade  | Vibração |   |   |  |
| A31       | 1,57   | 1,96     | 2,61  | 40                                      | 25                                     |
| A32       | 1,52   | 1,86     | 2,61  | 42                                      | 29                                     |
| A33       | 1,57   | 1,93     | 2,61  | 40                                      | 26                                     |
| A61       | 1,52   | 1,86     | 2,64  | 42                                      | 29                                     |
| A62       | 1,49   | 1,86     | 2,64  | 43                                      | 29                                     |
| A63       | 1,56   | 1,94     | 2,64  | 41                                      | 26                                     |
| A91       | 1,52   | 1,88     | 2,61  | 42                                      | 28                                     |
| A92       | 1,48   | 1,82     | 2,61  | 43                                      | 30                                     |
| A93       | 1,54   | 1,93     | 2,61  | 41                                      | 26                                     |

Estes ensaios de caracterização permitiram observar que o volume de vazios dos materiais secos constituintes dos proporcionamentos variou pouco, embora as composições com a CG2 tenham apresentado em termos absolutos o maior valor em relação aos seus pares.

Este fato traz à tona a interação dos grãos de diferentes diâmetros entre si. A princípio, pensava-se que as argamassas com presença de cal e mais finos teriam menor quantidade de vazios, no entanto, deve-se considerar o “Efeito de Parede”.

O efeito de parede é um efeito físico que ocorre quando, em uma mistura granular com vários diâmetros, o diâmetro do grão 1 ( $d_1$ ) não é tão maior do que o diâmetro do grão 2 ( $d_2$ ), de forma que se o grão  $d_1$  entra em uma mistura de predominância da classe  $d_2$ , ocorre um afastamento dos grãos na interface de contato das duas classes (FORMAGINI, 2005).

#### 5.2.3.1 Aplicação das argamassas sobre o substrato

A aplicação das argamassas sobre os substratos foi realizada através da utilização de um dispositivo denominado caixa de queda (figura 39) inspirado nos dispositivos desenvolvidos por Carasek (1996) e Paes (2004). A partir de experiências anteriores de Pagnussat (2013) e Stolz (2011), definiram-se duas alturas de queda que representassem uma energia de aplicação baixa (0,30 m, equivalente a menor distância possível no dispositivo utilizado) e uma alta (1,00 m). Estas alturas equivalem a uma energia potencial de aplicação de, respectivamente, 3 Joules e 10 Joules (conforme Equação 26, e considerando-se  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ ).

Para manter constante e facilitar o lançamento da quantidade de argamassa produzida nesta pesquisa, foi confeccionado um gabarito de madeira com uma guilhotina horizontal de acrílico adaptada (figura 39 b e c). O gabarito superior possui dimensões de 10cmx10cm e 5cm de altura, o qual é preenchido com argamassa até sua borda e submetido a cinco golpes com martelo de borracha em cada uma de suas arestas. Este adensamento é realizado para padronizar a quantidade de argamassa a ser lançada sobre os substratos e evitar possíveis efeitos de

variações no adensamento das argamassas no desenvolvimento da área de contato das mesmas, eliminando-se assim um possível fator de ruído.

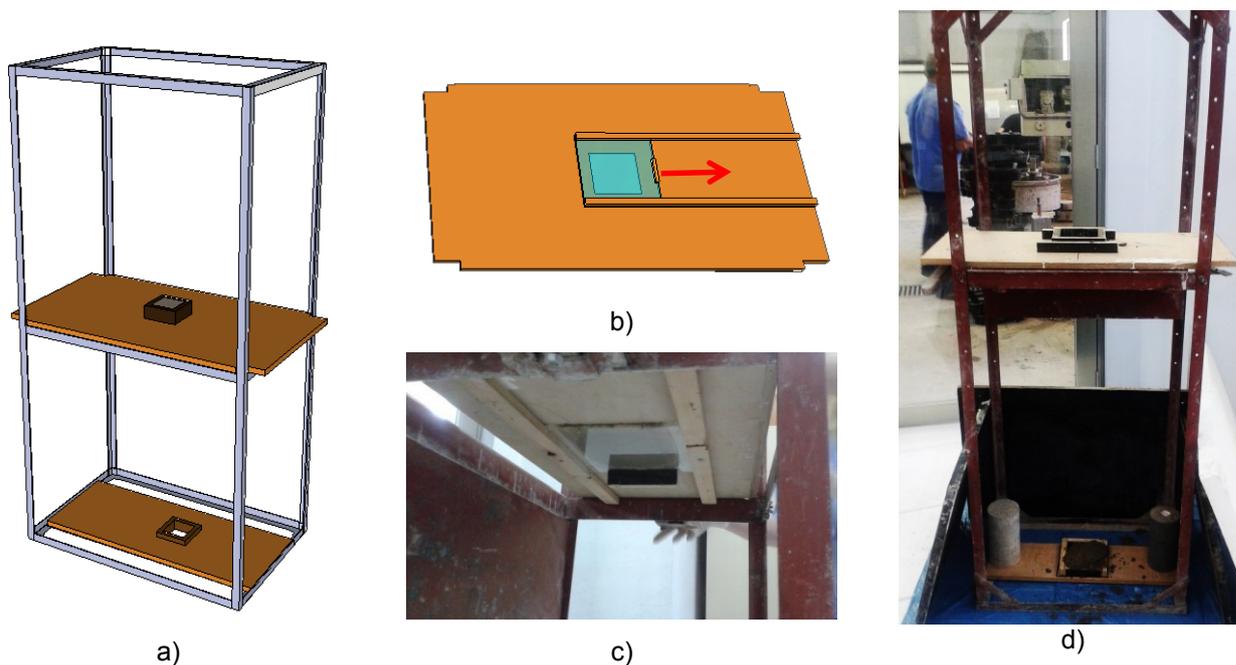


Figura 39: caixa de queda: a) representação gráfica do dispositivo b) representação gráfica da vista inferior do gabarito de madeira com o sistema de guilhotina c) vista inferior do gabarito de madeira com o sistema de guilhotina d) vista geral do dispositivo e seus componentes

Posteriormente, a guilhotina é aberta e a argamassa é lançada sobre o gabarito inferior confeccionado em madeira (figura 40), com dimensões internas de 10cmx10cm, sendo a espessura dos revestimentos fixada em dois centímetros. Visando evitar o efeito do “aperto” causado pelo sarrafeamento, o excesso de argamassa foi retirado através de régua metálica posicionada a 45°, no sentido oposto ao seu deslizamento.

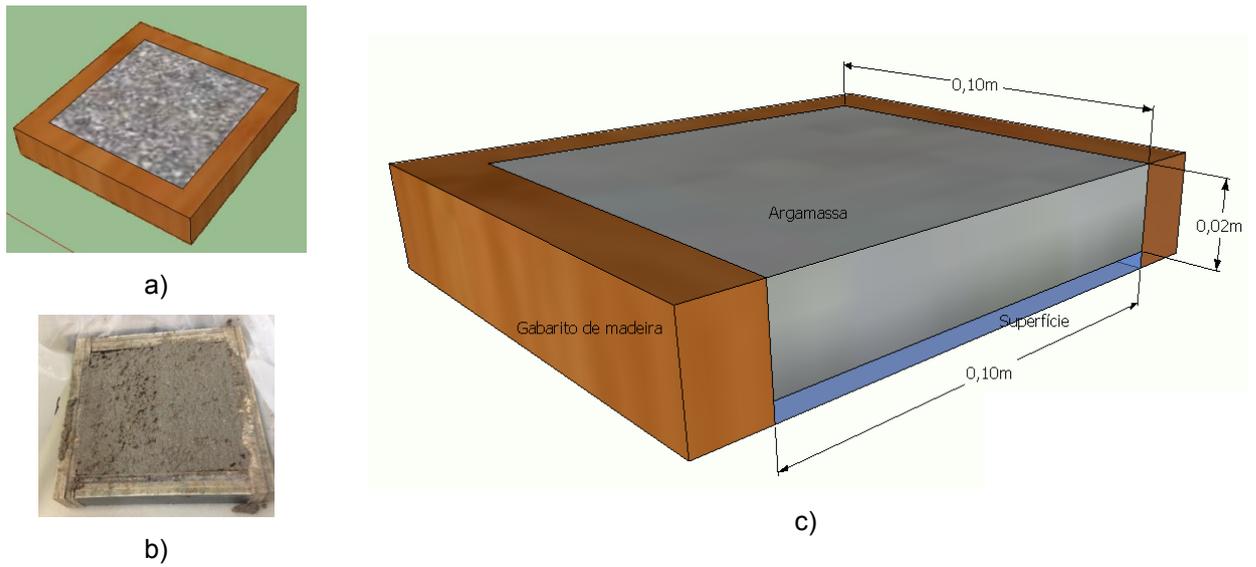


Figura 40: representação gráfica dos gabaritos: a) vista superior da argamassa envolta pelo gabarito de madeira b) vista geral da argamassa aplicada no gabarito de madeira c) vista em corte da argamassa aplicada sobre as superfícies não porosas envoltas pelo gabarito de madeira

O passo-a-passo das etapas deste procedimento está apresentado na figura 41.

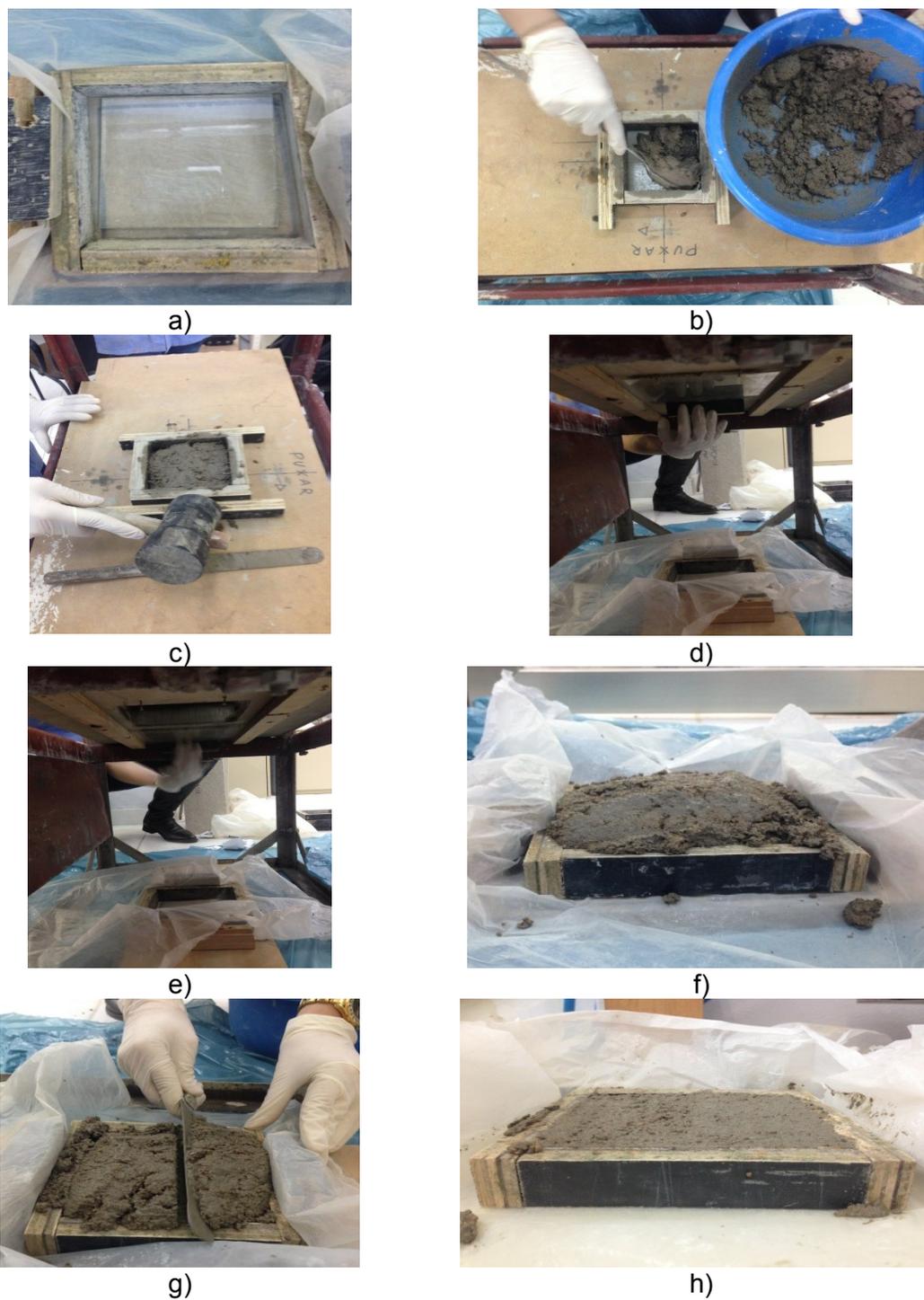


Figura 41: passo-a-passo da aplicação da argamassa sobre os substratos com a utilização da caixa de queda: a) colocação do substrato não poroso<sup>13</sup> no gabarito de madeira e posicionamento do gabarito inferior, b) preenchimento do gabarito superior com argamassa, c) adensamento da argamassa, d e e) abertura da guilhotina para queda da argamassa, f) argamassa logo após a queda sobre o gabarito, g) retirada do excesso de argamassa, h) aspecto final da argamassa

<sup>13</sup> No caso do polietileno, com reduzida espessura, era imprescindível que se garantisse que não houvessem ondulações geradas pelo inadequado estiramento do material. O polietileno que está apresentado nestas imagens, não representa o polietileno utilizado como substrato, mas sim uma proteção que era posicionada abaixo do substrato para facilitar a retirada e a movimentação do gabarito após a moldagem.

## 5.3 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios realizados para a caracterização dos materiais, bem como aqueles para se obter as variáveis de resposta estão apresentados nos itens que seguem.

### 5.3.1 Caracterização e controle das argamassas

Os ensaios de caracterização das argamassas realizados no estado fresco e as suas respectivas normas estão apresentados na figura 42.



a)



b)



c)

Figura 42: ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco: a) Densidade de massa e teor de ar incorporado (NBR 13278/05), b) Teor de ar incorporado (NBR NM 47/02), c) Retenção de água (NBR 13277/05)

A figura 43 apresenta os ensaios de caracterização das argamassas realizados no estado endurecido e as normas utilizadas para realizá-los.



a)



b)



c)



d)

Figura 43: ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido: a) Resistência à tração na flexão e Resistência à compressão - 28 dias (NBR 13279/05); b) Absorção de água por capilaridade - 28 dias (NBR15259/05); c) Densidade de massa aparente no estado endurecido - 28 dias (NBR 13280/05); d) Módulo de elasticidade dinâmico - 28 dias (NBR 15630/08)

### 5.3.2 Ensaios de avaliação reológica

Neste item estão detalhados os ensaios de avaliação realizados nas argamassas estudadas.

Os tempos de realização do ensaio levaram em consideração o momento da adição da água na produção das argamassas, ou seja, o tempo zero é o momento em que a água começa a ser adicionada à mistura.

#### 5.3.2.1 Squeeze-flow

Os ensaios de *squeeze-flow* foram realizados conforme preconiza a NBR 15839 (ABNT, 2010), em corpos de prova no estado fresco de 10 cm de diâmetro interno por 1 cm de altura, retirando-se o molde para a aplicação da força.

As argamassas estudadas foram submetidas ao ensaio moldadas sobre uma base metálica, lisa e não porosa (padrão).

As velocidades de deslocamento utilizadas foram de 0,1 mm/s e 3mm/s, com máximo deslocamento de 9mm e força máxima de 1kN. Os tempos de execução dos ensaios foram de 10 e 60 minutos para a velocidade de 3 mm/s e 15 e 65 min para a velocidade de 0,1 mm/s. Parâmetros estabelecidos pela norma vigente.

### 5.3.2.2 Reometria Rotacional

A caracterização reológica através de reômetro rotacional foi realizada em reômetro Brookfield R/S plus (figura 44).



Figura 44: vista geral do reômetro

Para a realização destes ensaios foi utilizada palheta do tipo vane, V 30x15, com 30mm de altura e 15mm de diâmetro, em recipiente padrão para todas as argamassas. Este tipo de palheta foi utilizado por ser o mais indicado para ensaios reológicos em argamassas de revestimento e suspensões com alta viscosidade. O tamanho da palheta foi determinado em testes preliminares, onde se verificou qual dimensão era a mais adequada para a aplicação do torque na argamassa mais viscosa e menos viscosa que foram produzidas nesta pesquisa. Nestes testes, a palheta que obteve melhor desempenho nos dois casos foi a V 30x15.

Posteriormente às medições no reômetro rotacional, os dados foram tratados com o software Rheo3000.

A rotina escolhida para a análise das argamassas consistiu em quatro patamares de leituras, sendo uma a cada 20 segundos, atingindo-se uma taxa de cisalhamento máxima de 100 1/s (figura 45). O uso de patamares para análise reológica de argamassas é indicado por outros pesquisadores, como Seabra *et al.* (2006).

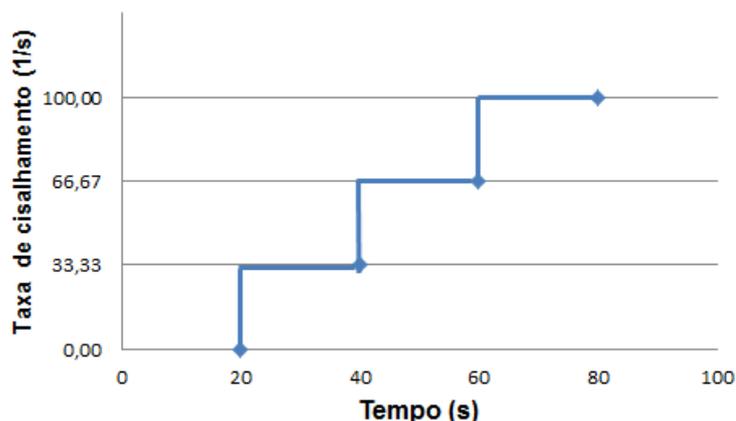


Figura 45: rotina utilizada no reômetro

### 5.3.3 Digitalização tridimensional a laser

O método mais utilizado atualmente para mensuração da área real de contato entre a argamassa e o substrato é através da visualização por microscópio estereoscópio da interface entre a argamassa e o substrato (RUDUIT, 2009; STOLZ, 2011; PAGNUSSAT, 2013; CARASEK *et al.*, 2014). Neste método, são realizadas medidas amostrais, sendo inviável a medição da área total da interface, de forma que a área de contato real é apenas estimada.

Nesta pesquisa, visando mensurar a área de contato real, foi proposta uma metodologia utilizando um scanner tridimensional a laser da marca Tecnodrill, modelo Digimill (3D), disponível no Laboratório de Design e Seleção de materiais (LdSM) da UFRGS (figura 46).



Figura 46: scanner tridimensional a laser

Este é um equipamento controlado por um computador que possui dois cabeçotes, sendo um para usinagem e outro para digitalização, ou seja, trata-se de um equipamento híbrido fresadora CNC

(controlada numericamente por computador) e scanner tridimensional a laser. O scanner 3D movimenta-se sobre a peça analisada no plano dos eixos X e Y, através do CNC, enquanto o cabeçote Laser mede a altura do eixo Z, obtendo-se como resultados arquivos de texto com os pontos da superfície do objeto, gerando uma nuvem de pontos em coordenadas (x, y, z) (SILVA, 2006).

O equipamento permite um controle da resolução através do espaçamento entre pontos, a qual é função da precisão de posicionamento nos eixos CNC, neste caso 0,0015 mm. O cabeçote laser adquire até 1000 pontos por segundo, com precisão variável conforme a lente utilizada. A lente utilizada também define diferentes faixas de aquisição de dados do equipamento, sendo estas faixas menores conforme é aumentada a resolução da lente (SILVA, 2006). Neste trabalho, a lente utilizada foi a de 50 mm, com resolução de 0,1 mm entre pontos.

Após lançadas sobre os substratos, as argamassas ficaram cobertas em laboratório por dois dias e posteriormente desformadas (figura 47a). Neste momento, também foi realizada a separação das argamassas dos substratos (figura 47c).

Após a desforma as argamassas estavam prontas para ter sua interface digitalizada (figura 47d).

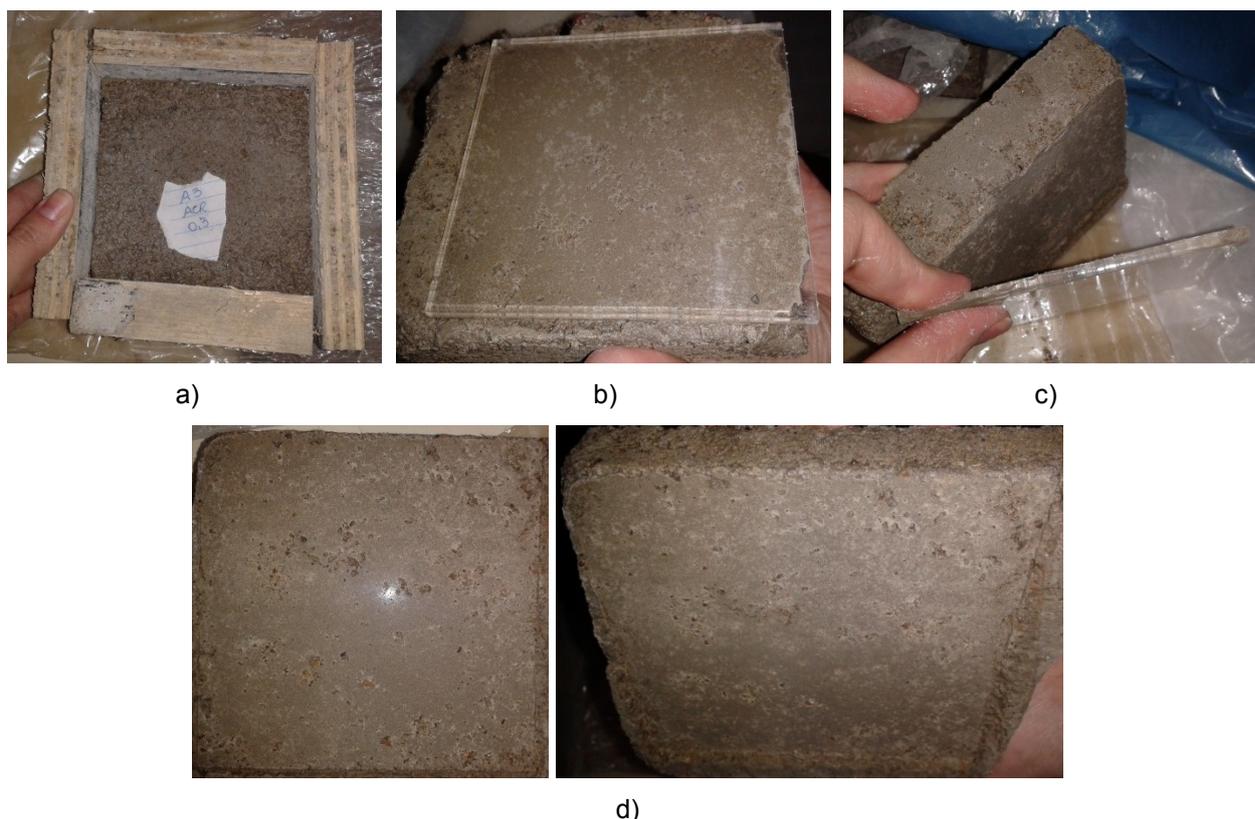


Figura 47: etapas de desforma da argamassa: a) desforma b) argamassa aderida à base c) remoção da base d) aspecto final da interface

A separação das argamassas aplicadas sobre os substratos de acrílico e de polietileno foi realizada com muita facilidade, sendo que não havia perda de argamassa por aderência na interface argamassa/substrato.

As argamassas aplicadas sobre o substrato de vidro apresentaram resistência de aderência no momento da separação, sendo que ao forçá-las ocorria ruptura em alguns pontos da argamassa próxima à interface, ficando a mesma aderida ao vidro. Este fato gerou superfícies com defeitos de desforma, o que impossibilitaria a digitalização fiel da área de contato real entre a argamassa e o vidro.

Visando eliminar este fator de variabilidade, após muitas tentativas, adotou-se o método do choque térmico para realizar a separação das argamassas aplicadas sobre o vidro. O conjunto vidro+argamassa foi colocado em ambiente de 0°C durante pelo menos 4 horas e, após isso, foi imerso em água fervente (figura 48). Assim, foi possível realizar a separação do conjunto sem a ocorrência de ruptura da argamassa em zonas fraturadas durante a remoção do vidro, tal qual ocorria manualmente.

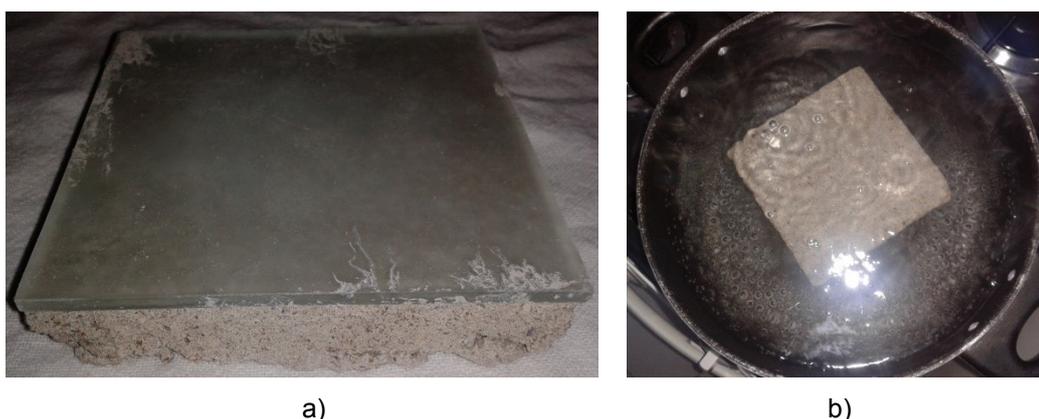
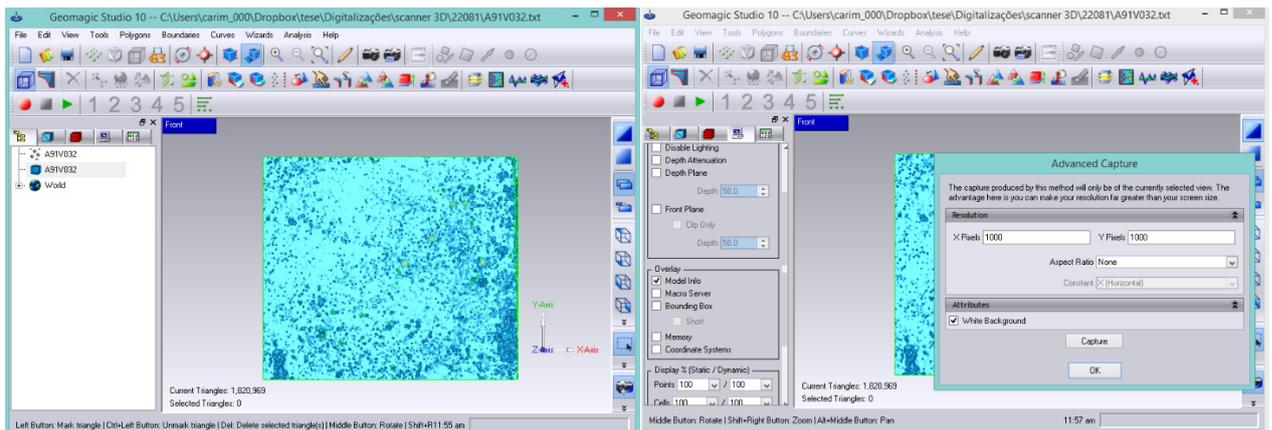


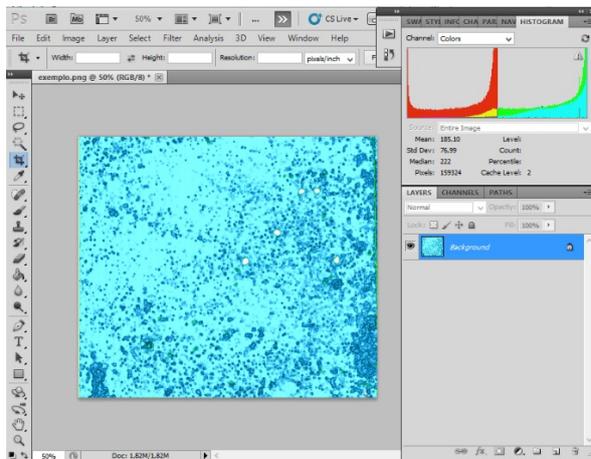
Figura 48: choque térmico para descolar a argamassa do vidro a) conjunto congelado b) conjunto em água fervente. Separadas dos substratos, as argamassas foram digitalizadas e então tratadas através de softwares específicos. A figura 49 apresenta um passo a passo do tratamento das imagens após a digitalização tridimensional a laser.

No software Geomagic Studio 10 é realizada transformação da nuvem de pontos resultante do scanner em uma malha de triângulos, gerando uma imagem tridimensional (figura 49a). Esta imagem gerada é salva em formato PNG - *Portable Network Graphics* (figura 49b).

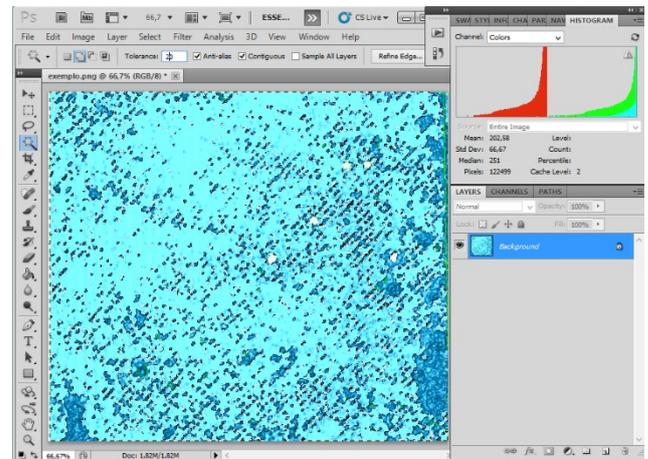


a)

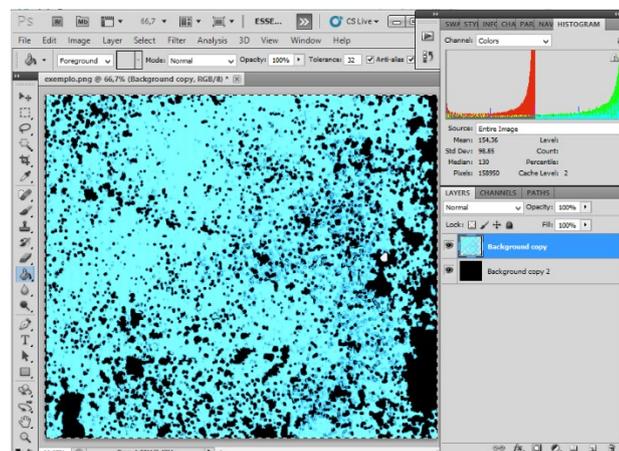
b)



c)



d)



e)

Figura 49: passo-a-passo do tratamento das imagens digitalizadas: a) a nuvem de pontos é transformada em uma malha de triângulos no Geomagic Studio; b) a imagem do Geomagic é salva como arquivo PNG; c) a imagem é aberta no Photoshop, selecionada, anotando-se a quantidade de pixels; d) com a “varinha mágica” a área de contato (azul mais clara é selecionada; e) inverte-se a seleção para selecionar as falhas de contato (azul mais escuro) e anota-se a quantidade de pixels das falhas, deletando-as posteriormente, deixando transparecer o fundo preto de outro layer

A imagem em formato PNG é então aberta no software Photoshop CS5, no qual é possível medir sua quantidade de pixels total ( $P_{total}$ ) (figura 49c). Posteriormente, com o comando “*Magic Wand*”, seleciona-se a área de contato, que é basicamente da mesma cor (figura 49d). As áreas sem

---

Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.

contato, ou seja, as falhas possuem cor mais escura. Seleccionada a área de contato, com o comando inverter seleção, seleciona-se então a área de falhas, bastando “deletar” e medir novamente a quantidade de pixels da imagem ( $P_{falhas}$ ).

A porcentagem de falhas ( $\%_{falhas}$ ) é obtida através da equação 27.

$$\%_{falhas} = \frac{P_{falhas}}{P_{total}} \cdot 100 \quad \text{Equação 27}$$

A figura 50 apresenta exemplos de imagens obtidas da digitalização tridimensional a laser tratadas no software Geomagic Studio 10 e no software Photoshop CS5, respectivamente. Na imagem “a” observa-se a nuvem de pontos em formato 3D, no Software Geomagic Studio 10, na “b” observa-se as falhas de contato em azul mais escuro, enquanto na imagem “c”, após o tratamento, as falhas de contato estão na cor preta, conforme indicado pelas setas.

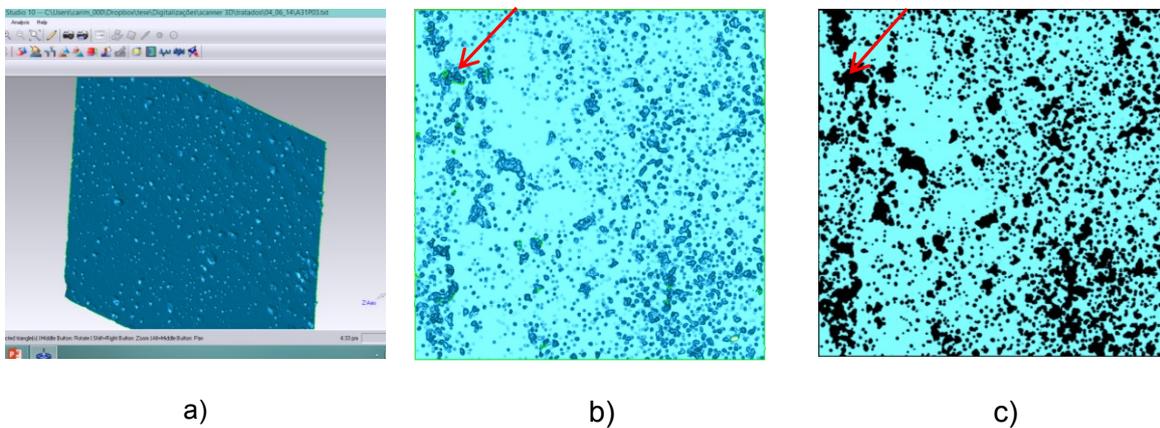


Figura 50: tratamento de imagens digitalizadas nos softwares: a) 3D no Geomagic Studio 10 b) 2D no Geomagic Studio 10 c) Photoshop CS5

## 6 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, estão apresentados os resultados dos ensaios propostos e descritos no programa experimental, juntamente com uma análise da influência das variáveis estudadas.

Para o tratamento de alguns dados utilizou-se o método de análise de variância (ANOVA), através do software STATISTICA 7.0. A análise de variância é um procedimento utilizado muito frequentemente para isolar as fontes de variabilidade em um conjunto de medições (GIRDEN, 1992). Sua frequente aplicação é justificada por Rutherford (2001) devido a sua adequação a diferentes tipos de projetos de pesquisa, tanto experimentais como não experimentais.

O objetivo desta análise estatística é observar quais fatores controláveis exercem influência sobre as variáveis de resposta, podendo-se assim, chegar a conclusões sobre a significância ou não dos mesmos, com um nível de confiabilidade estatística de 95%.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Nesta seção, serão apresentados os resultados da caracterização no estado fresco e endurecido das argamassas avaliadas no presente trabalho.

Visando facilitar o entendimento, segue o significado de cada uma das identificações utilizadas. As argamassas, A3, A6 e A9 foram produzidas com proporcionamentos de 1:0:3, 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia, materiais secos, em volume), respectivamente. A31, A61 e A91 foram produzidas com agregado miúdo composto por 25% de cada uma das frações retidas nas peneiras de malha 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm; A32, A62 e A92 com 10%, 40%, 40% e 10% de cada uma das frações citadas, respectivamente, e A33, A63 e A93 com 40%, 10%, 10% e 40% de cada fração, respectivamente.

#### 6.1.1 Caracterização no estado fresco

As tabelas 17, 18 e 19, apresentadas a seguir, mostram os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9. Na tabela 17 estão apresentados os valores médios de densidade de massa, na tabela 18 os valores médios de retenção de água e na tabela 19 os valores médios do teor de ar incorporado. Todos os valores medidos podem ser consultados no Apêndice A.

Tabela 17: densidade de massa média no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9

| Densidade de Massa - NBR 13278/05 |   |                         |        |                            |  |
|-----------------------------------|---|-------------------------|--------|----------------------------|--|
| Argamassa                         | Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> ) | DP (kg/m <sup>3</sup> ) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |  |
| A31                               | 2064                                    | 15,83                   | 0,8    | D6                         |  |
| A32                               | 2062                                    | 15,57                   | 0,8    | D6                         |  |
| A33                               | 2126                                    | 2,54                    | 0,1    | D6                         |  |
| A61                               | 2062                                    | 15,57                   | 0,8    | D6                         |  |
| A62                               | 2016                                    | 14,68                   | 0,7    | D6                         |  |
| A63                               | 2090                                    | 10,62                   | 0,5    | D6                         |  |
| A91                               | 2039                                    | 15,76                   | 0,8    | D6                         |  |
| A92                               | 1992                                    | 7,86                    | 0,4    | D5                         |  |
| A93                               | 2047                                    | 4,97                    | 0,2    | D6                         |  |

DP: desvio padrão; CV: Coeficiente de variação

Tabela 18: retenção de água média no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9

| Retenção de Água - NBR 13277/05 |                      |        |        |                            |  |
|---------------------------------|----------------------|--------|--------|----------------------------|--|
| Argamassa                       | Retenção de Água (%) | DP (%) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |  |
| A 31                            | 97                   | 2,35   | 2      | U6                         |  |
| A 32                            | 94                   | 1,99   | 2      | U5                         |  |
| A 33                            | 96                   | 1,99   | 2      | U6                         |  |
| A 61                            | 98                   | 0,62   | 1      | U6                         |  |
| A 62                            | 98                   | 1,45   | 1      | U6                         |  |
| A 63                            | 97                   | 1,14   | 1      | U6                         |  |
| A 91                            | 95                   | 2,85   | 3      | U6                         |  |
| A 92                            | 95                   | 2,12   | 2      | U6                         |  |
| A 93                            | 93                   | 1,17   | 1      | U5                         |  |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Tabela 19: teor de ar incorporado médio no estado fresco das argamassas A3, A6 e A9

| Teor de ar incorporado |              |        |        |              |        |        |                            |
|------------------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|----------------------------|
| Argamassa              | NBR NM 47/02 |        |        | NBR 13278/05 |        |        | Classificação NBR 13281/05 |
|                        | A médio (%)  | DP (%) | CV (%) | A médio (%)  | DP (%) | CV (%) |                            |
| A 31                   | 2,57         | 0,25   | 10     | 5,83         | 0,72   | 12     | NA                         |
| A 32                   | 2,20         | 0,10   | 5      | 4,39         | 0,72   | 16     | NA                         |
| A 33                   | 2,10         | 0,26   | 13     | 3,24         | 0,12   | 4      | NA                         |
| A 61                   | 2,20         | 0,10   | 5      | 4,64         | 0,72   | 16     | NA                         |
| A 62                   | 2,45         | 0,30   | 12     | 6,34         | 0,68   | 11     | NA                         |
| A 63                   | 2,07         | 0,21   | 10     | 3,77         | 0,49   | 13     | NA                         |
| A 91                   | 2,00         | 0,26   | 13     | 3,72         | 0,74   | 20     | NA                         |
| A 92                   | 2,33         | 0,06   | 2      | 5,24         | 0,37   | 7      | NA                         |
| A 93                   | 1,70         | 0,00   | 0      | 3,33         | 0,17   | 5      | NA                         |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; NA: não se aplica; A: Teor de ar incorporado

Quanto à densidade de massa, comparando-se as argamassas com as diferentes composições granulométricas CG1, CG2 e CG3, verificou-se que, para todos os proporcionamentos, os maiores valores de densidade de massa no estado fresco foram observados na CG3, seguida pela CG1 e CG2. Este comportamento foi influenciado pelo empacotamento dos grãos, sendo que a CG de maior massa unitária gerou uma argamassa com maior densidade de massa, enquanto a CG de

menor massa unitária resultou em uma argamassa de menor densidade de massa. Por sua vez, o empacotamento dos grãos está diretamente relacionado com o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) das areias, sendo que a CG3 com  $C_u = 6,28$ , considerada desuniforme, foi a argamassa com melhor empacotamento dos grãos, enquanto CG1 e CG2, com  $C_u = 3,95$  e  $2,48$ , respectivamente, consideradas muito uniformes, tiveram um menor empacotamento das partículas.

Apesar da influência das composições granulométricas, as argamassas obtiveram a mesma classificação, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), com exceção da A92, que por possuir maior quantidade de cal em seu proporcionamento e ser composta pela CG2 (menor valor de massa unitária) tende a ser uma argamassa mais leve.

Quanto à retenção de água, não houve grande variação de um proporcionamento para o outro, fato que não era esperado, devido a presença de cal em alguns proporcionamentos e em outros não. A cal, por possuir alta superfície específica dos grãos, costuma melhorar a retenção de água nas argamassas. Acredita-se que a pequena variação nos valores de retenção de água medidos deve estar relacionada, provavelmente, com a manutenção do proporcionamento entre ligantes:agregados. Por fim, a maioria das argamassas classificaram-se como U6 pela caracterização da NBR 13281 (ABNT, 2005).

De forma geral, o teor de ar incorporado foi diretamente influenciado pelo empacotamento das partículas e pelo coeficiente de uniformidade das composições granulométricas, de forma que quanto maior a massa unitária e maior o valor de coeficiente de uniformidade da areia, menor foi a porcentagem de vazios na argamassa, comportamento coerente com o observado nos ensaios de densidade de massa.

Já que foi possível observar que a maioria dos ensaios apresentou resultados influenciados pelo empacotamento dos agregados, ou seja, do volume de vazios ( $V_v$ ), a figura 51 apresenta gráficos que correlacionam o comportamento das argamassas no estado fresco e o  $V_v$  dos seus materiais constituintes. Através destes gráficos, foi possível confirmar que a densidade de massa das argamassas é inversamente proporcional ao  $V_v$  dos agregados e o teor de ar incorporado é diretamente proporcional a esta. Com relação à retenção de água, não foi possível estabelecer correlação entre estas variáveis.

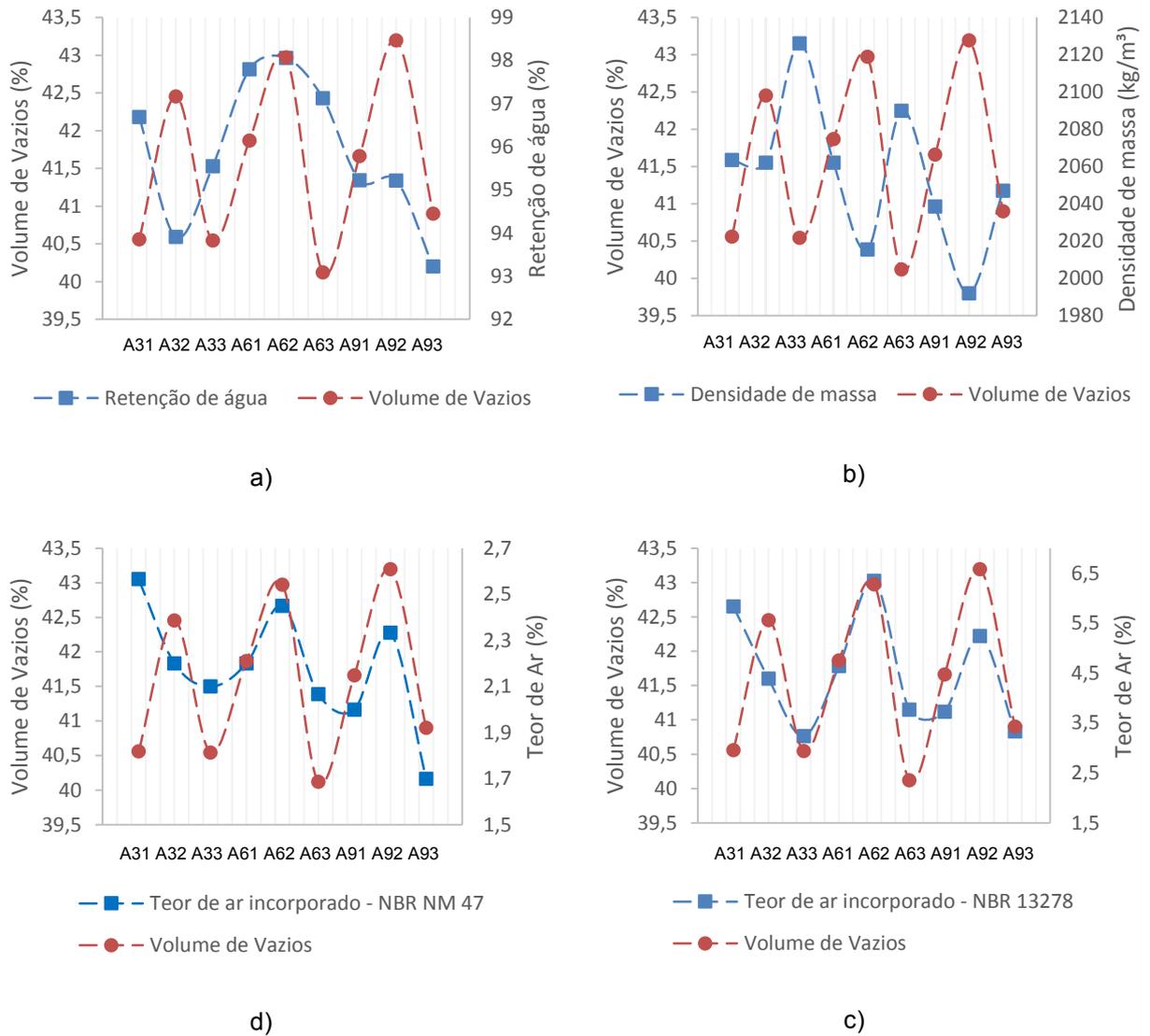


Figura 51: relação entre o volume de vazios (Vv) dos proporcionamentos dosados e as suas propriedades no estado fresco: a) relação entre a retenção de água e o Vv; b) relação entre a densidade de massa e o Vv; c) relação entre o teor ar mensurado pelo método da NBR 13278 e o Vv; d) relação entre o teor de ar mensurado pelo método da NBR NM 47 e o Vv

## 6.1.2 Caracterização no estado endurecido

A seguir, estão apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido. Todos os valores individuais obtidos nestes ensaios estão apresentados no Apêndice A.

A tabela 20 apresenta os resultados de coeficiente de capilaridade médio obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas A3, A6 E A9.

Tabela 20: coeficiente de capilaridade médio das argamassas A3, A6 e A9

| Absorção de Água por Capilaridade |   |   |        |                            |
|-----------------------------------|---|---|--------|----------------------------|
| Argamassa                         | Cmédio (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ) | DP (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |
| A 31                              | 8,89  | 0,37  | 4      | C5                         |
| A 32                              | 9,97  | 0,27  | 3      | C5                         |
| A 33                              | 9,37  | 0,56  | 6      | C5                         |
| A 61                              | 15,67   | 0,08  | 1      | C6                         |
| A 62                              | 18,64   | 0,30  | 2      | C6                         |
| A 63                              | 14,91   | 1,47  | 10     | C6                         |
| A 91                              | 24,43   | 1,54  | 6      | C6                         |
| A 92                              | 25,97   | 0,92  | 4      | C6                         |
| A 93                              | 20,15   | 1,90  | 9      | C6                         |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; C:coeficiente de capilaridade

Observa-se que, como esperado, as argamassas com cal apresentaram maior coeficiente de capilaridade em relação as argamassas sem cal (A3). A A9 que é uma argamassa com mais cal em sua composição, apresentou-se a mais absorvente. Apesar de estar classificada no mesmo grupo da A6, conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), verifica-se que seus valores de absorção foram expressivamente maiores do que os observados nesta argamassa.

A figura 52 apresenta a relação entre os valores de coeficientes de absorção capilar médios (Cmédio) obtidos e a relação água/cimento das argamassas. Observa-se que estas duas variáveis são diretamente proporcionais, ou seja, quanto mais pobre a argamassa, maior a absorção de água por capilaridade.

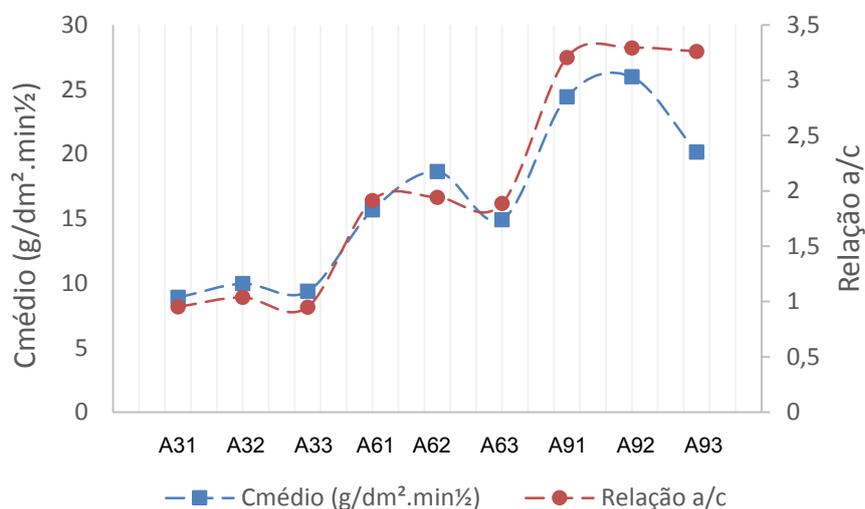


Figura 52: relação entre a absorção de água por capilaridade e a relação a/c das argamassas

Os valores obtidos no ensaio de densidade de massa no estado endurecido ( $\rho$  médio) estão apresentados na tabela 21. Observa-se que esta propriedade apresentou-se muito parecida nas três argamassas avaliadas, estando as mesmas classificadas em um mesmo grupo conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005).

Tabela 21: densidade de massa aparente no estado endurecido, aos 28 dias

| Densidade de Massa no Estado Endurecido |                                 |                         |        |                            |
|---|---------------------------------|-------------------------|--------|----------------------------|
| Argamassa                               | $\rho$ méd (kg/m <sup>3</sup> ) | DP (kg/m <sup>3</sup> ) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |
| A 31                                    | 1908                            | 19,59                   | 1      | M6                         |
| A 32                                    | 1865                            | 12,44                   | 1      | M6                         |
| A 33                                    | 1927                            | 309,17                  | 16     | M6                         |
| A 61                                    | 1880                            | 11,19                   | 1      | M6                         |
| A 62                                    | 1847                            | 2,26                    | 0      | M6                         |
| A 63                                    | 1892                            | 9,51                    | 1      | M6                         |
| A 91                                    | 1810                            | 39,50                   | 2      | M6                         |
| A 92                                    | 1782                            | 42,16                   | 2      | M5                         |
| A 93                                    | 1826                            | 9,91                    | 1      | M6                         |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação;  $\rho$ : densidade de massa

Quando comparados os valores de densidade de massa no estado endurecido com os teores de ar obtidos no estado fresco (figura 53), pelo método da NBR 13278 (ABNT, 2005), conclui-se que há uma tendência de relação inversa entre estas propriedades na maioria dos casos, ou seja, quanto maior o teor de ar incorporado nas argamassas no estado fresco, menor a densidade de massa aparente no estado endurecido.

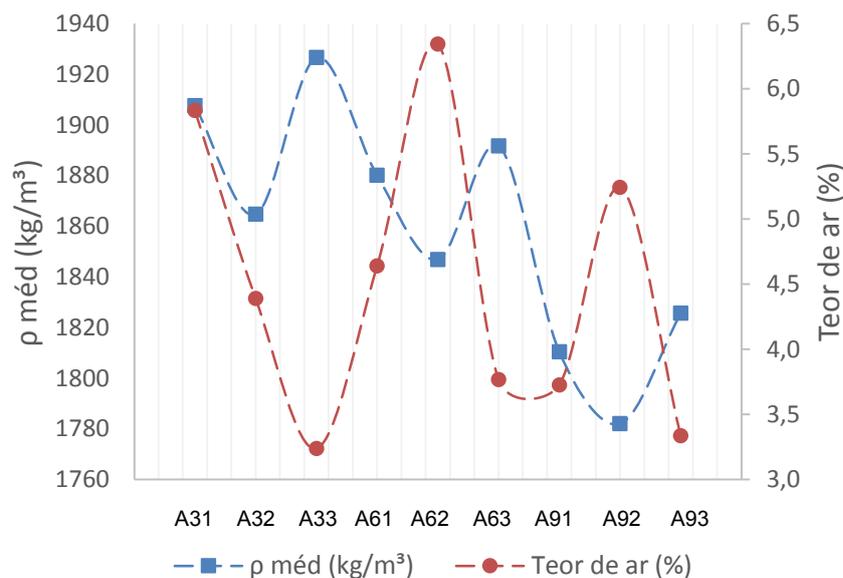


Figura 53: relação entre densidade de massa aparente no estado endurecido e teor de ar

A tabela 22 apresenta os valores de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas. Quanto maior o valor do módulo, menos deformável a argamassa.

Tabela 22: módulo de elasticidade dinâmico das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias

| <b>Módulo de Elasticidade Dinâmico</b> |                       |                 |               |                                   |
|--|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|
| <b>Argamassa</b>                       | <b>Ed Médio (GPa)</b> | <b>DP (GPa)</b> | <b>CV (%)</b> | <b>Classificação NBR 13281/05</b> |
| A 31                                   | 14,66                 | 2,48            | 17            | NA                                |
| A 32                                   | 12,93                 | 2,85            | 22            | NA                                |
| A 33                                   | 12,11                 | 2,26            | 0             | NA                                |
| A 61                                   | 7,31                  | 0,23            | 3             | NA                                |
| A 62                                   | 6,72                  | 0,20            | 3             | NA                                |
| A 63                                   | 8,44                  | 0,07            | 1             | NA                                |
| A 91                                   | 3,45                  | 0,64            | 0             | NA                                |
| A 92                                   | 3,37                  | 0,56            | 17            | NA                                |
| A 93                                   | 3,04                  | 0,37            | 0             | NA                                |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; NA: não se aplica; Ed: módulo de elasticidade dinâmico

Verificou-se que as argamassas com cal em sua composição apresentaram menores valores de módulo, comparativamente as A3, sem cal. Bandeira (2012) e Silva e Campiteli (2008) afirmaram em seus estudos que com o aumento da relação cal/cimento há uma redução do módulo de elasticidade das argamassas. Comportamento também verificado neste trabalho.

Além da questão da porosidade, a baixa densidade (massa específica da cal) pode influenciar no resultado do módulo dinâmico por ultrassom.

A relação água/cimento obtida para cada uma das argamassas também apresentou relação com os valores de módulo de elasticidade dinâmico mensurados. Observa-se, na figura 54, que o módulo de elasticidade dinâmico é inversamente proporcional aos valores da relação a/c, já que esta relação está diretamente relacionada com a porosidade dos materiais. Argamassas mais ricas em cimento, com relação a/c mais baixa, possuem menor porosidade e maior módulo de elasticidade, enquanto que argamassas com relação a/c mais alta, possuem maior porosidade e menor módulo de elasticidade dinâmico.

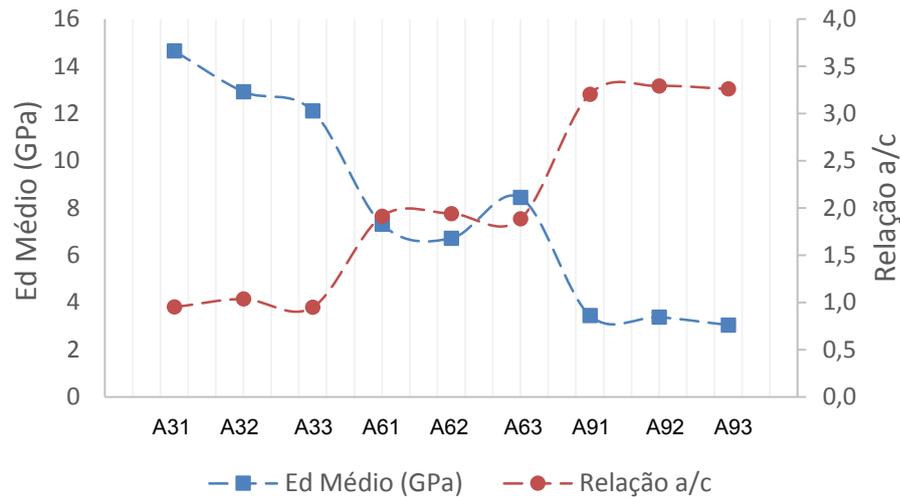


Figura 54: relação entre módulo de elasticidade dinâmico (Ed) e a relação água/cimento

Os valores de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, aos 28 dias de idade estão apresentados respectivamente na tabela 23 e na tabela 24. Como esperado, as argamassas A3, que são mais ricas em cimento e sem cal em seu proporcionamento, apresentaram valores de resistências mecânicas superiores às demais. Quanto mais pobre de cimento o proporcionamento, menores foram os valores de resistência mecânica.

Tabela 23: resistência à tração na flexão das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias

| Resistência à Tração na Flexão |                    |          |        |                            |
|--------------------------------|--------------------|----------|--------|----------------------------|
| Argamassa                      | Tensão Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |
| A 31                           | 2,34               | 0,28     | 12     | R4                         |
| A 32                           | 1,65               | 0,11     | 7      | R3                         |
| A 33                           | 1,76               | 0,18     | 10     | R3                         |
| A 61                           | 0,25               | 0,02     | 9      | R1                         |
| A 62                           | 0,27               | 0,01     | 4      | R1                         |
| A 63                           | 0,42               | 0,02     | 4      | R1                         |
| A 91                           | 0,35               | 0,02     | 7      | R1                         |
| A 92                           | 0,30               | 0,04     | 13     | R1                         |
| A 93                           | 0,30               | 0,04     | 14     | R1                         |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Tabela 24: resistência à compressão das argamassas A3, A6 e A9, aos 28 dias

| Resistência à Compressão |                    |          |        |                            |  |
|--------------------------|--------------------|----------|--------|----------------------------|--|
| Argamassa                | Tensão Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Classificação NBR 13281/05 |  |
| A 31                     | 7,63               | 0,71     | 9      | P5                         |  |
| A 32                     | 6,04               | 0,88     | 15     | P5                         |  |
| A 33                     | 7,13               | 0,57     | 8      | P5                         |  |
| A 61                     | 2,27               | 0,08     | 3      | P2                         |  |
| A 62                     | 1,85               | 0,20     | 11     | P2                         |  |
| A 63                     | 1,65               | 0,13     | 8      | P2                         |  |
| A 91                     | 0,73               | 0,10     | 14     | P1                         |  |
| A 92                     | 0,61               | 0,05     | 9      | P1                         |  |
| A 93                     | 0,77               | 0,10     | 13     | P1                         |  |

DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação

Argamassas com cal são já conhecidas no meio técnico por suas características de baixas resistências e por exigirem um tempo maior para adquirirem essa resistência (LANAS e ALVAREZ-GALINDO, 2003; SILVA, 2006a; SILVA e CAMPITELI, 2008). Ensaios de porosidade aberta confirmam que a cal é um material que conduz a argamassas mais porosas, sendo que pode haver uma redução da porosidade com o aumento dos teores de alguns tipos de agregados (LANAS e ALVAREZ-GALINDO, 2003). Esta relação entre o teor de cal nos proporcionamentos e a sua resistência mecânica pode ser observada na figura 55, onde fica clara a relação do aumento do teor de cal com a redução das resistências mecânicas das argamassas.

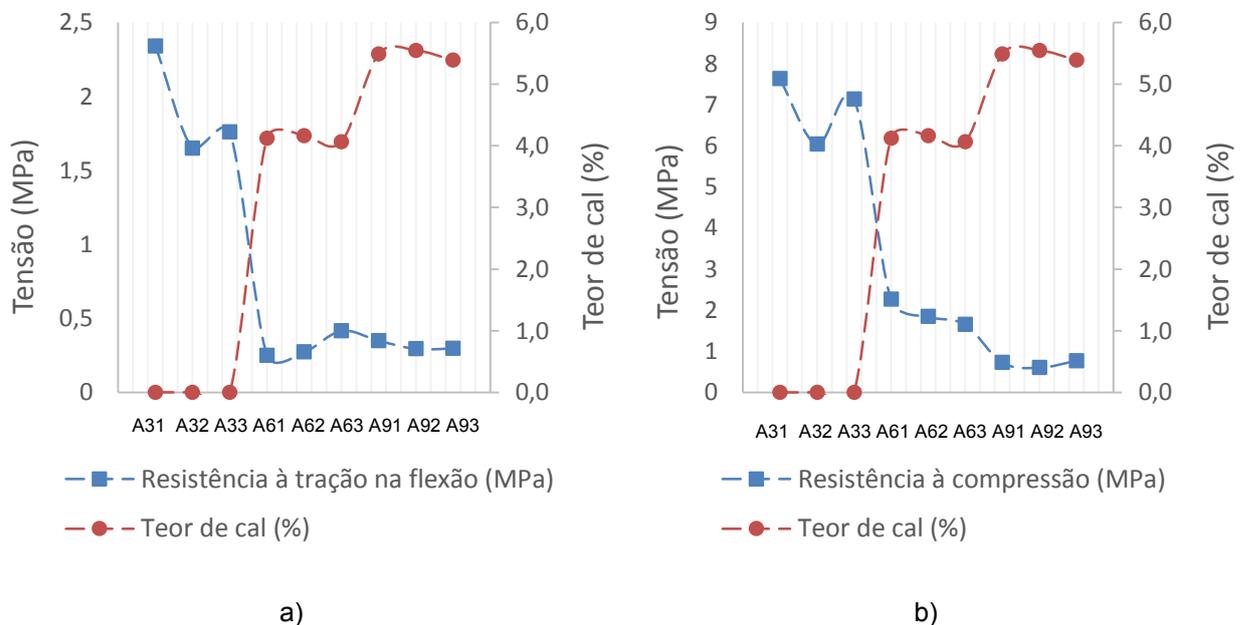


Figura 55: relação entre o teor de cal dos proporcionamentos e a resistência mecânica das argamassas aos 28 dias: a) resistência à tração na flexão; b) resistência à compressão

## 6.2 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO REOLÓGICA

Neste item, estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de avaliação reológica: *squeeze-flow* e reometria rotacional, para as argamassas A3, A6 e A9, produzidas com as três composições granulométricas propostas nesta pesquisa, bem como a análise estatística referente a estes resultados e uma discussão dos comportamentos observados.

### 6.2.1 *Squeeze-flow*

As figuras 51 a 55, apresentadas a seguir, mostram os resultados obtidos na caracterização reológica das argamassas através do ensaio de *Squeeze-flow* nos tempos de 10 e 60 minutos, com velocidade de 3 mm/s e nos tempos de 15 e 65 minutos com velocidade de 0,1 mm/s, conforme determina a norma brasileira NBR 15839 (ABNT, 2010).

Primeiramente, as argamassas de mesmo proporcionamento, mas com diferentes composições granulométricas, são analisadas e posteriormente são cruzados os resultados obtidos para argamassas de diferentes proporcionamento com a mesma composição granulométrica.

A figura 56 apresenta as curvas de Força em função do Deslocamento para as argamassas de proporcionamento 1:0:3 (A3) dosadas com a CG1, a CG2 e a CG3. Verifica-se que as argamassas A3 mostraram-se bastante resistentes ao escoamento, apresentando um estágio elástico praticamente inexistente e um estágio plástico bastante curto, de forma que seu deslocamento máximo foi em torno de 1,9 mm, atingindo a força máxima de ensaio de 1000N, enquanto que o ensaio permitiria um escoamento de até 9mm.

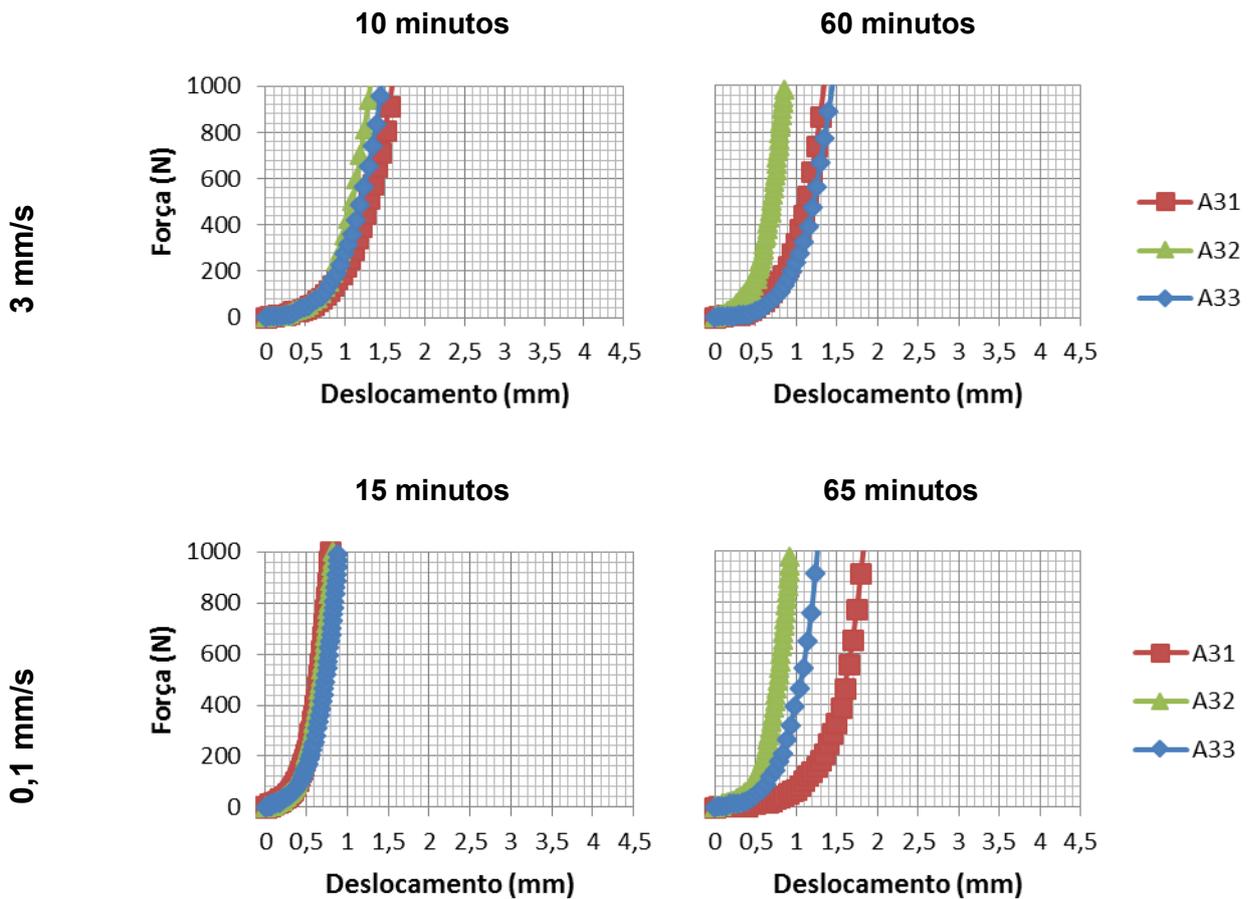


Figura 56: comportamento das argamassas A31, A32 e A33 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos

Com velocidade de 3 mm/s, o tempo de ensaio pareceu não exercer grande influência no escoamento da A3, apenas a A32 pareceu ter sofrido mais influência do tempo, fato esperado se considerarmos que esta argamassa foi a que apresentou uma menor retenção de água em relação às demais, ou seja, ela perde água com maior facilidade, o que dificultou mais seu deslocamento aos 60 minutos.

Quando sujeitas à uma aplicação de força com menor velocidade (0,1 mm/s), as argamassas ensaiadas a 15 minutos apresentaram comportamentos muito semelhantes entre si, além de apresentarem maior resistência ao deslocamento do que com velocidade maior. Este fato pode estar relacionado ao maior tempo para a reorganização dos grãos internamente à suspensão, devido a menor velocidade, de forma que a argamassa escoar com maior dificuldade pelo maior atrito entre as partículas rearranjadas. Este comportamento foi ilustrado por Olhero e Ferreira (2004), conforme apresentado na figura 57. Os autores explicam que as suspensões pseudoplásticas, quando sujeitas a baixas taxas de cisalhamento, liberam o líquido que fica aprisionado entre os vazios dos grãos, de forma que uma estrutura de grãos mais ordenada, na direção do fluxo é formada. Esta estrutura mais ordenada tende a oferecer uma resistência ao fluxo da suspensão. Complementarmente, Cardoso (2009) explica que quando submetidas a

maiores velocidades de deslocamento, há uma menor suscetibilidade das argamassas à segregação da pasta, de forma que fluem mais facilmente

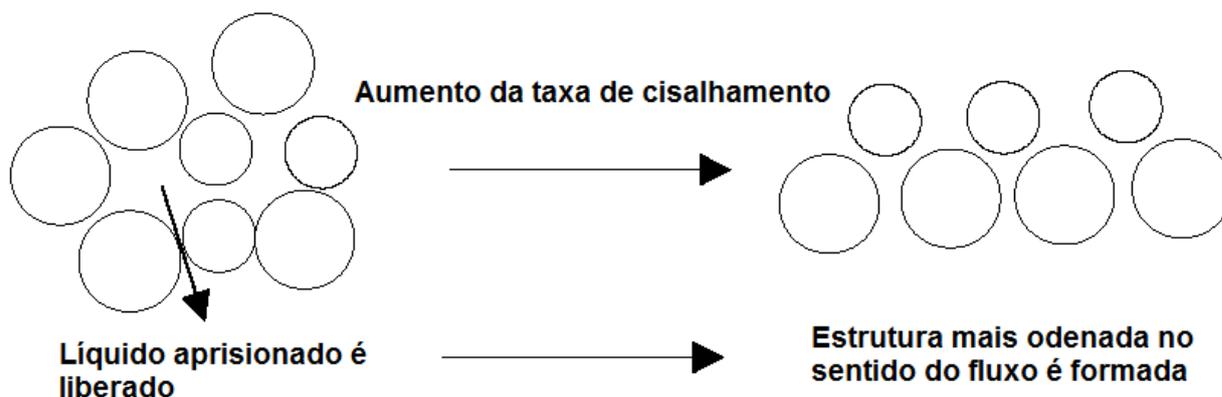


Figura 57: comportamento de suspensões pseudoplásticas sujeitas a baixas taxas de cisalhamento (adaptado de OLHERO, FERREIRA, 2004)

Aos 65 minutos, as argamassas A32 e a A33 apresentaram comportamento muito semelhante, enquanto a A31 apresentou um estágio plástico maior. A A31 foi a argamassa que apresentou maior retenção de água entre as A3, de forma que o tempo não ter prejudicado tanto seu escoamento não aparece como algo inesperado.

Para as duas velocidades de ensaio, quando o ensaio foi realizado para maiores tempos após execução das argamassas, aquelas produzidas com CG2 apresentaram maior resistência ao escoamento. A CG2 é a que possui menor coeficiente de uniformidade (2,48), sendo considerada uma areia muito uniforme, que resulta em maior quantidade de vazios entre os grãos.

Considerando-se que a distância de separação entre partículas é inversamente proporcional à quantidade de vazios, e que a maior distância entre partículas melhora a fluidez (reduz a viscosidade), pode-se dizer que “sobra” menos água na mistura para separar as partículas no caso de composições granulométricas muito uniformes (CARDOSO, 2009).

Ao avaliar a reologia de argamassas através do squeeze-flow, Cardoso (2009) verificou que, no caso de argamassas compostas por agregados desuniformes, há uma tendência de melhora no empacotamento dos agregados, o que reduz a quantidade de vazios entre partículas, de forma que menos pasta é consumida para preencher estes vazios, sobrando pasta para lubrificar os agregados, o que melhora a fluidez.

A figura 58 permite que sejam analisadas as diferenças de comportamento quanto ao escoamento das argamassas A61, A62 e A63. Novamente, o estágio plástico das argamassas foi bastante curto, com o estágio de enrijecimento por deformação ocorrendo com menos de 1mm de deslocamento. O ensaio foi encerrado quando se atingiu o limite máximo de força de 1000N, de forma que as argamassas A6 apresentaram estágio plástico semelhante ao observado na argamassa sem cal (A3) para os tempos iniciais de 10 e 15 minutos.

Quando analisados os deslocamentos das argamassas ao longo do tempo, pode-se observar que as argamassas A6 obtiveram um comportamento similar quanto aos seus deslocamentos, em relação à argamassa A3, apresentando comportamentos ligeiramente diferentes apenas na medição dos 65 minutos com velocidade de 0,1 mm/s, fato que não era esperado.

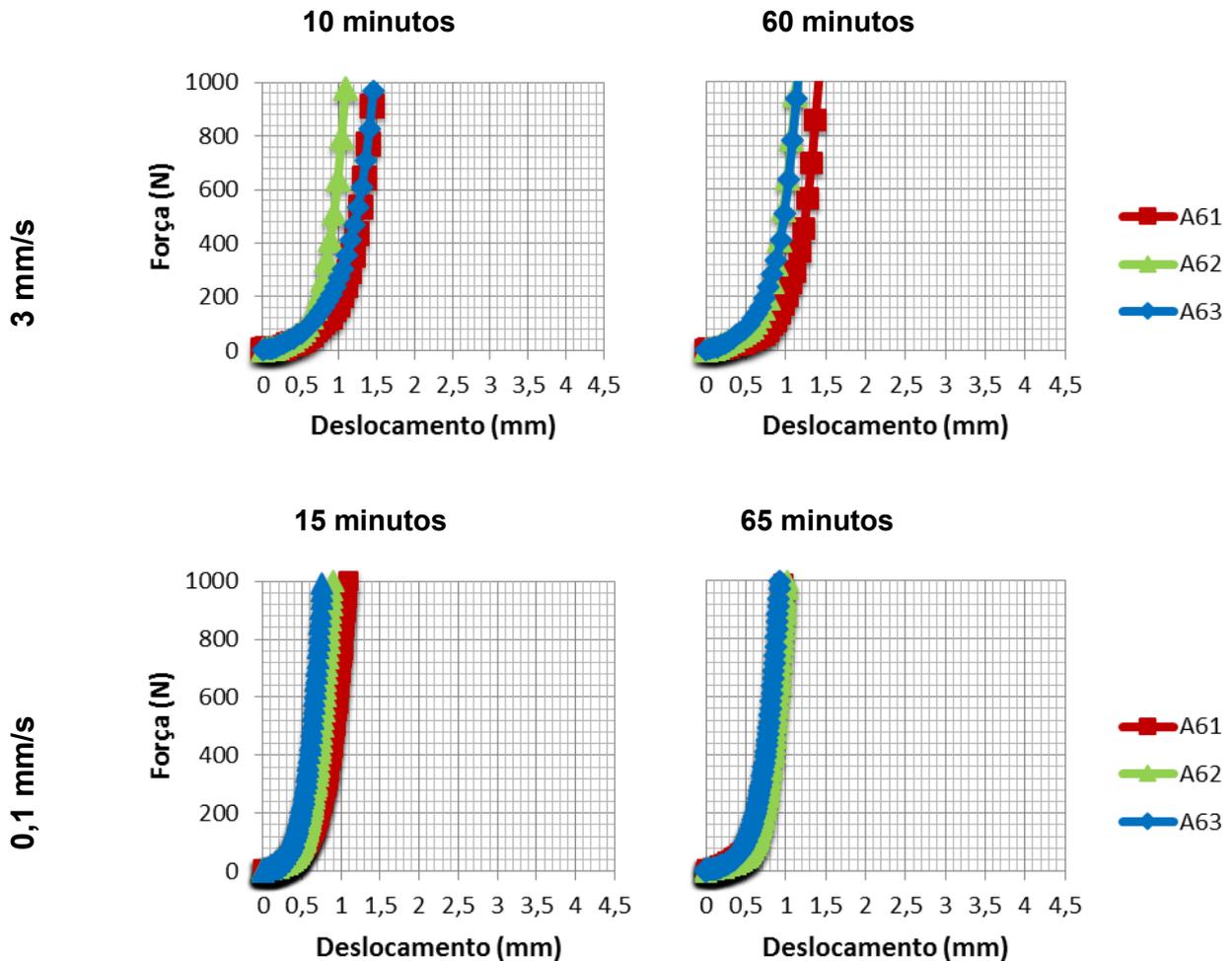


Figura 58: comportamento das argamassas A61, A62 e A63 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos

O comportamento das argamassas A91, A92 e A93 pode ser observado na figura 59. Estas argamassas, de proporcionamento 1:2:9 (cimento:cal:areia, em volume), foram as que apresentaram um maior estágio de deformação plástica, chegando a até, aproximadamente, 4 mm de deslocamento com a força máxima de ensaio de 1000 N. Muito provavelmente, para este proporcionamento, a maior presença de cal contribuiu para o aumento da trabalhabilidade, facilitando o escoamento.

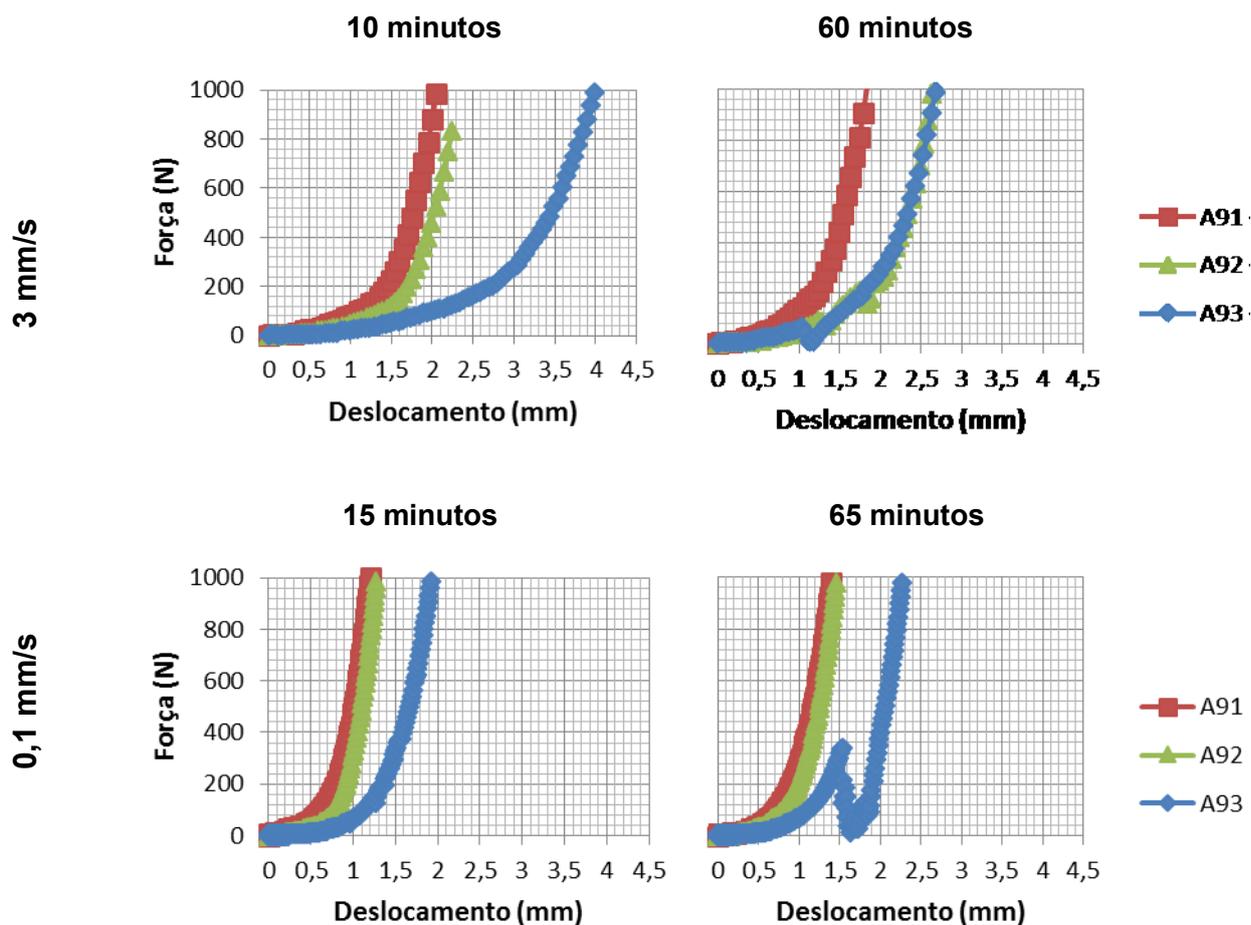


Figura 59: comportamento das argamassas A91, A92 e A93 no ensaio de squeeze flow, realizado com velocidade de 3mm/s aos 10 e aos 60 minutos e com velocidade de 0,1mm/s aos 15 e aos 65 minutos

Estas argamassas (A9), apresentaram diferenças de comportamento mais evidentes entre as diferentes composições granulométricas avaliadas do que a A3 e a A6. Verifica-se que as argamassas com a CG3, com maior coeficiente de uniformidade, apresentaram maior facilidade de escoamento. As argamassas A91 e A92, com menor coeficiente de uniformidade, apresentaram comportamento muito semelhante em relação ao escoamento na maioria dos casos.

Outro fato observado foi que a menor velocidade de aplicação da força nas argamassas A93 reduziu sua capacidade de escoamento. Este fato pode estar relacionado ao reposicionamento das partículas dentro da mistura, o que trava o deslocamento e faz com que o estágio de enrijecimento por deformação das argamassas apareça mais precocemente devido ao aumento do atrito entre as partículas, bem como mostrado anteriormente na figura 57.

A seguir, estão apresentadas as curvas referentes às argamassas A3, A6 e A9 ensaiadas aos 10 e 60 minutos, com velocidade de 3 mm/s (figura 60) e nos tempos de 15 e 65 minutos com velocidade de 0,1 mm/s (figura 61), comparando-se as argamassas de mesma composição granulométrica e diferentes proporcionamentos.

As argamassas A3 e A6 apresentaram comportamento semelhante em todos os casos, com maior resistência ao escoamento e estágio de enrijecimento por deformação iniciando com menor deslocamento. Possivelmente, o proporcionamento da argamassa A6 (1:1:6) não possui uma quantidade de cal significativa, em relação à argamassa A3 (1:0:3) para alterar as condições de ensaio do *squeeze-flow*, comparativamente à argamassa A9 (1:2:9). As causas para a presença de cal nas argamassas A6 não ter auxiliado na melhora da trabalhabilidade e escoamento das mesmas são objeto de outras análises, que serão realizadas ao longo da apresentação dos ensaios reológicos.

Com relação à influência da composição granulométrica no escoamento no ensaio de *Squeeze-flow*, observou-se que a CG3, com 40%, 10%, 10% e 40% das frações granulométricas passantes nas peneiras 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm, respectivamente, foi a que permitiu um maior escoamento da argamassa A9 com menor força aplicada, enquanto que nos demais proporcionamentos este comportamento não fica evidenciado.

As argamassas produzidas com a CG1 e CG2, com 10% e 25% de agregado miúdo retido na peneira 0,15mm, respectivamente, apresentaram comportamento ao escoamento muito semelhante. Ambas possuem massa unitária semelhante, de 1,51 g/cm<sup>3</sup> e 1,48 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, além de coeficiente de uniformidade baixo (3,95 e 2,48, respectivamente), sendo classificadas como muito uniformes. O tempo de realização do ensaio não pareceu exercer grande influência sobre as argamassas, fato que deve estar relacionado com sua alta retenção de água.

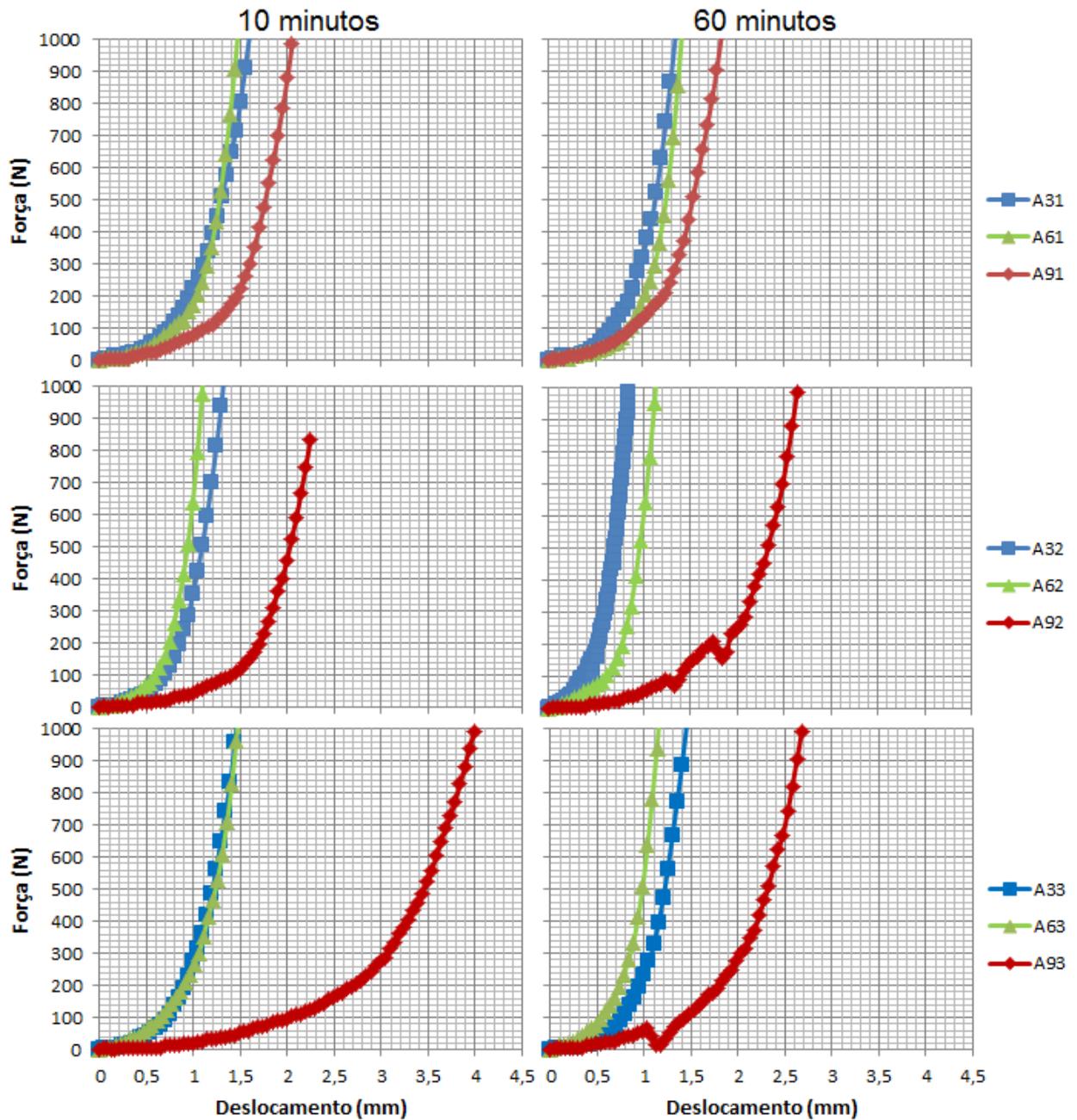


Figura 60: ensaio de squeeze flow das argamassas A3, A6 e A9 ensaiadas aos 10 e 60 minutos, com velocidade de 3 mm/s

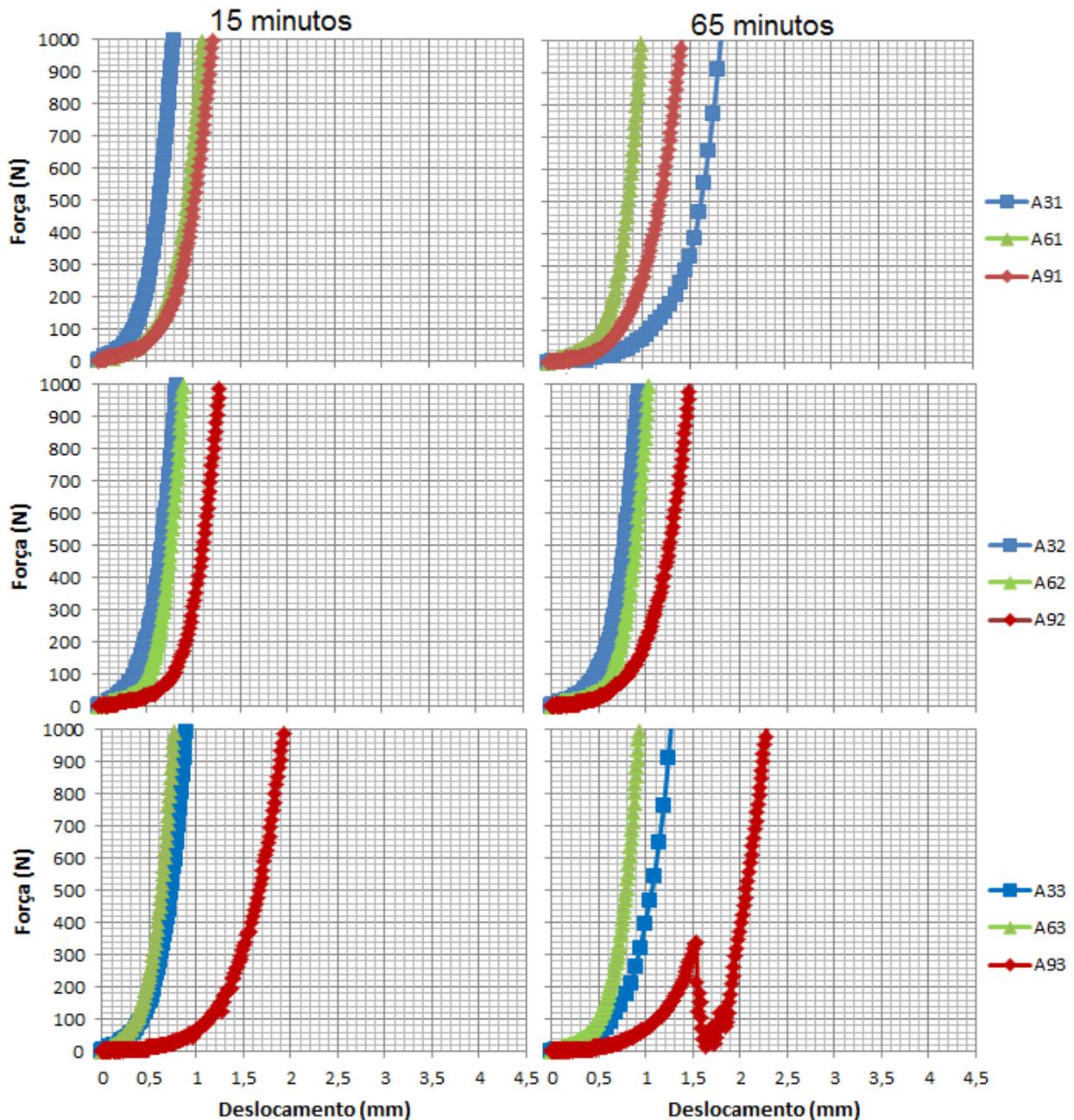


Figura 61: ensaio de squeeze flow das argamassas A3, A6 e A9 ensaiadas aos 15 e 65 minutos, com velocidade de 0,1 mm/s

Outro aspecto evidenciado na comparação entre as velocidades de aplicação da força é que quando a força é aplicada com velocidade menor, caso dos tempos de 15 e 65 minutos, os deslocamentos das argamassas são reduzidos. Novamente, isso deve estar relacionado ao maior tempo que os grãos dos ligantes e agregados têm para se reorganizar dentro da argamassa no decorrer do deslocamento mais lento, fato que permite que eles se compactem mais, dificultando o deslocamento.

Seguindo a metodologia utilizada por Antunes (2005) para analisar os resultados obtidos no ensaio de *squeeze-flow*, isolando um valor pontual para cada um dos ensaios, decidiu-se por

isolar o deslocamento máximo atingido por cada uma das argamassas, nos quatro tempos de execução. Visando avaliar a influência da presença de cal no escoamento das argamassas, foi gerada uma relação entre os deslocamentos máximos e a sua relação água/ligantes (figura 62). A figura mostra que há uma tendência de o aumento da relação água/ligantes aumentar o deslocamento, de forma que os finos podem estar travando o fluxo destas argamassas.

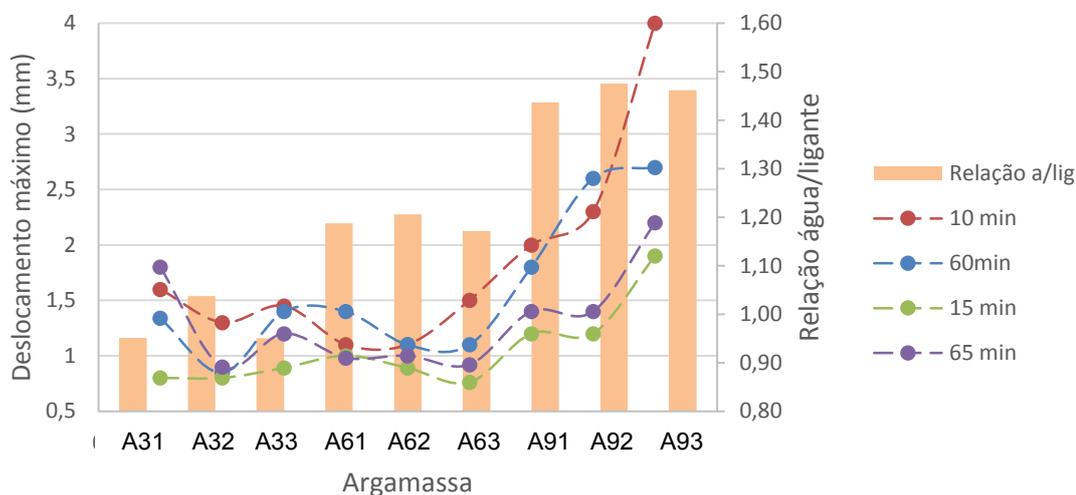


Figura 62: relação entre o deslocamento máximo no ensaio de squeeze-flow e a relação a/lig

Em geral, o ensaio de *squeeze-flow* demonstrou ser muito mais sensível do que a simples caracterização através da mesa de consistência para avaliar a influência dos proporcionamentos e das composições granulométricas das argamassas. As vantagens deste ensaio em relação à mesa de consistência já haviam sido observadas por diversos autores (SILVA *et al.*, 2005; CARDOSO *et al.*, 2005; entre outros). Apesar do ensaio não resultar em um valor pontual, passível de comparação entre as argamassas, ele torna possível graficamente a comparação quanto à resistência ao escoamento de cada uma delas. Aliado com outros ensaios de caracterização no estado fresco, como a reometria rotacional (que será apresentada no capítulo 6.2.2) pode ser uma importante ferramenta para a caracterização reológica de argamassas de revestimento.

## 6.2.2 Reometria rotacional

Os resultados obtidos na reometria rotacional estão apresentados através de gráficos de Viscosidade vs. Taxa de cisalhamento e Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento. A figura 63 apresenta os resultados da reometria rotacional para todas as argamassas avaliadas nesta pesquisa.

Para auxiliar na análise dos dados obtidos através da reometria rotacional, a tabela 25 reúne alguns ensaios de caracterização realizados no estado fresco, além de caracterizações das composições granulométricas e dos valores máximos obtidos nos gráficos de viscosidade e tensão de cisalhamento.

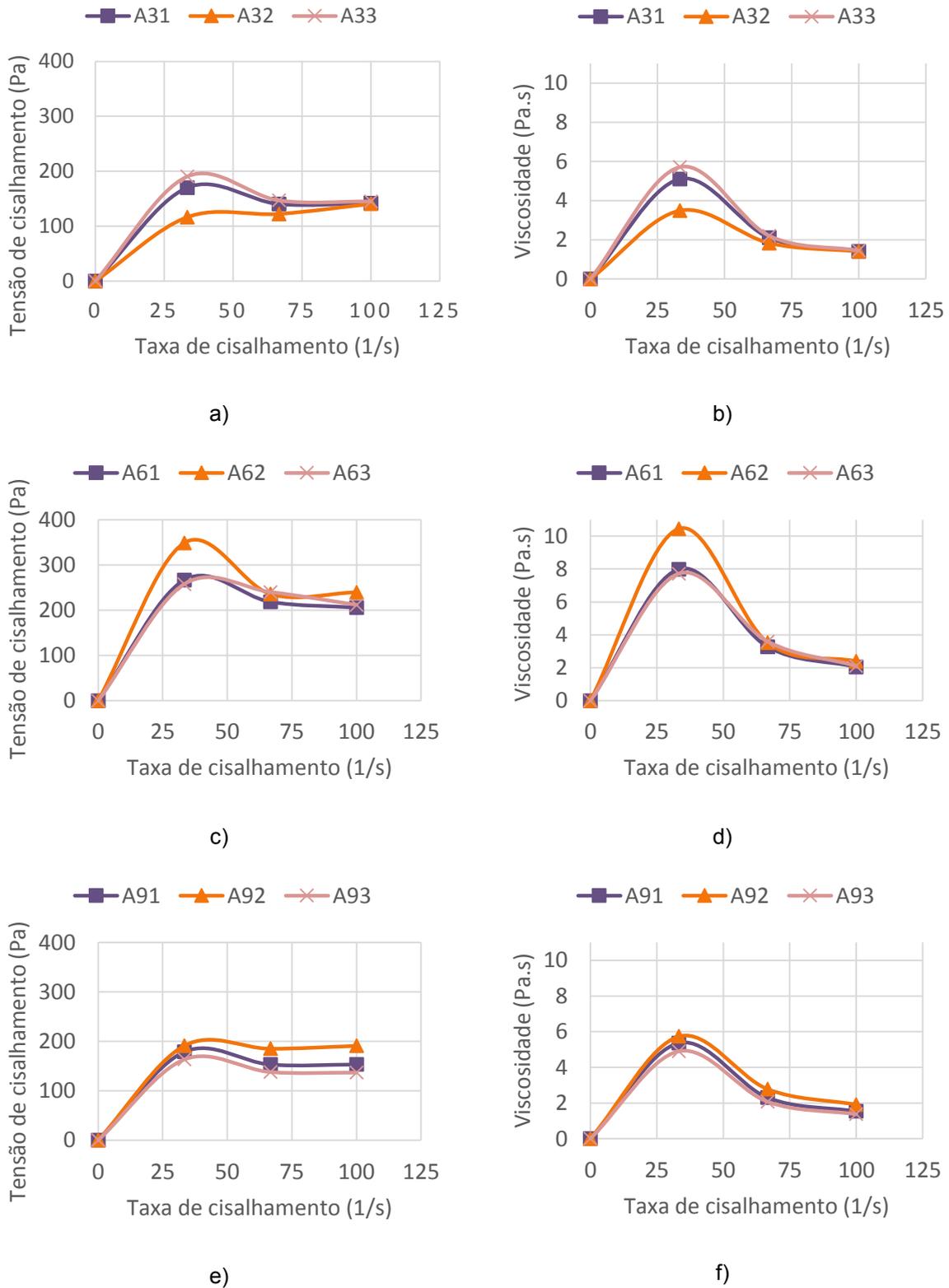


Figura 63: análise reológica por reometria rotacional: a) tensão x taxa de cisalhamento A3; b) viscosidade x taxa de cisalhamento A3; c) tensão x taxa de cisalhamento A6; d) viscosidade x taxa de cisalhamento A6; e) tensão x taxa de cisalhamento A9; f) viscosidade x taxa de cisalhamento A9

Tabela 25: resumo das características das argamassas no estado fresco e caracterização das composições granulométricas

| Argamassa | Viscosidade Máxima (Pa.s) | Tensão de Cisalhamento Máxima (Pa) | Massa unitária da argamassa (g/cm <sup>3</sup> ) |          | Massa específica da argamassa seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Volume de vazios (método gravidade - %) | Volume de vazios (método vibração - %) | Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> ) |          |
|-----------|---------------------------|------------------------------------|--|----------|---|---|--|---|----------|
|           |                           |                                    | Gravidade  | Vibração |   |   |  | Norma                                   | Vibração |
| A31       | 5,10                      | 170,11                             | 1,57   | 1,96     | 2,61  | 40                                      | 25                                     | 2,06                                    | 2,12     |
| A32       | 3,49                      | 140,53                             | 1,52   | 1,86     | 2,61  | 42                                      | 29                                     | 2,06                                    | 2,12     |
| A33       | 5,71                      | 190,43                             | 1,57   | 1,93     | 2,61  | 40                                      | 26                                     | 2,13                                    | 2,17     |
| A61       | 8,00                      | 266,54                             | 1,52   | 1,86     | 2,64  | 42                                      | 29                                     | 2,06                                    | 2,12     |
| A62       | 10,46                     | 348,63                             | 1,49   | 1,86     | 2,64  | 43                                      | 29                                     | 2,02                                    | 2,08     |
| A63       | 7,73                      | 257,62                             | 1,56   | 1,94     | 2,64  | 41                                      | 26                                     | 2,09                                    | 2,11     |
| A91       | 5,36                      | 178,71                             | 1,52   | 1,88     | 2,61  | 42                                      | 28                                     | 2,04                                    | 2,09     |
| A92       | 5,73                      | 191,06                             | 1,48   | 1,82     | 2,61  | 43                                      | 30                                     | 1,99                                    | 2,08     |
| A93       | 4,90                      | 163,43                             | 1,54   | 1,93     | 2,61  | 41                                      | 26                                     | 2,05                                    | 2,10     |

A figura 63, onde observa-se os gráficos de Tensão de cisalhamento vs. Taxa de cisalhamento e Viscosidade vs. Taxa de Cisalhamento, permite visualizar que a argamassa que apresentou maiores valores de viscosidade e tensão de cisalhamento foi a A6, em todos os casos. Nos ensaios de *Squeeze-flow*, apresentados no capítulo anterior, observou-se igualmente uma tendência das A6 apresentarem uma maior resistência ao escoamento, em alguns casos.

Verifica-se que houve uma inversão de comportamento das argamassas, quando se compara os valores obtidos naquelas com proporcionamento sem cal e nas com proporcionamento com cal. Nas A3, a composição granulométrica 2 apresentou menores valores de viscosidade, enquanto que nas A6 e A9, esta foi a CG que apresentou os maiores valores de viscosidade. Este fato ressalta que não apenas o proporcionamento influencia no comportamento reológico das argamassas, mas o pacote granulométrico, resultante da distribuição de grãos de diferentes tamanhos, tem grande influência neste comportamento. Sendo a CG2 a mais uniforme das composições granulométricas, pode-se inferir que nas argamassas sem cal (A3), faltaram finos para preencher os vazios entre os agregados, de forma que estes vazios foram preenchidos com água que foi liberada no momento da aplicação do torque para a medição da viscosidade, decorrente da segregação dos grãos, acumulando-se ao redor da palheta do reômetro e mascarando a viscosidade desta argamassa.

No caso da A32, quanto mais a palheta girava, maior era o acúmulo de água na região do entorno da palheta, fato que pode ter contribuído para esta redução na leitura do valor da viscosidade. Nas demais composições, o maior consumo de cal pode ter feito esta influência não existir, devido à alta superfície específica dos grãos de cal absorverem maior quantidade de água, não deixando tanta água livre na mistura.

Com relação à viscosidade e à tensão de cisalhamento, a argamassa A9 parece não ter sofrido muita influência da composição granulométrica, comparativamente às demais. Talvez, a maior quantidade de cal presente neste proporcionamento compensou os eventuais problemas oriundos de vazios gerados pelas composições granulométricas mal graduadas.

### 6.2.2.1 Análise estatística dos fatores que influenciam na viscosidade das argamassas

Visando analisar a influência do proporcionamento e da composição granulométrica (CG) do agregado na reologia das argamassas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), com nível de confiabilidade de 95%, destes fatores controláveis sobre os valores de viscosidade máxima obtidos através da reometria rotacional (tabela 26), através do programa Statística 7.

Tabela 26: ANOVA da argamassa e da CG sobre a viscosidade das argamassas ensaiadas por reometria rotacional

|   | SQ    | GDL | MQ    | F      | Fator p  | Significativo |
|---|-------|-----|-------|--------|----------|---------------|
| <b>Proporcionamento da Argamassa</b>                            | 55,01 | 2   | 27,50 | 124,12 | 0,000000 | Sim           |
| <b>Composição Granulométrica</b>                                | 0,73  | 2   | 0,36  | 1,64   | 0,245659 | Não           |
| <b>Proporcionamento da Argamassa *Composição Granulométrica</b> | 14,28 | 4   | 3,57  | 16,11  | 0,000390 | Sim           |
| <b>Erro</b>   | 1,99  | 9   | 0,22  |        |          |               |

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

A tabela 26 mostra, através da análise estatística, que os proporcionamentos das argamassas foram significativamente influentes nos valores de viscosidade medidos, enquanto as CG, isoladamente, não foram estatisticamente significativas. No entanto, a interação entre o proporcionamento e a CG apresentaram influência significativa sobre a reologia das argamassas. Isso significa que as diferentes composições granulométricas isoladamente não exercem influência sobre a viscosidade das argamassas, no entanto, sua interação com os demais finos presentes nos proporcionamentos exerce influência nos valores de viscosidade obtidos, o que indica que o pacote granulométrico total (ligantes + agregados) deve ser estudado no momento do proporcionamento/dosagem, já que seu empacotamento é significativo nas propriedades reológicas das argamassas.

Neste contexto, Benabed *et al.* (2012) encontraram em seus resultados grande influência do teor de adição de fíler calcário e da forma do agregado miúdo na viscosidade de argamassas. Os autores verificaram que teores de adição de finos até 15% melhoraram a fluidez das argamassas, enquanto que teores acima de 15% geraram perda de fluidez. Quanto ao agregado miúdo, os autores verificaram que a areia de duna, mais fina, reduz drasticamente a fluidez, necessitando de composição com areia de britagem ou de rio para apresentarem melhora das propriedades reológicas.

A influência dos proporcionamentos sobre os valores de viscosidade podem ser melhor entendidos analisando-se a figura 64. Os maiores valores de viscosidade foram observados no

proporcionamento 1:1:6, enquanto que os menores valores foram observados para o proporcionamento 1:0:3, valores estes muito próximos aos obtidos para o proporcionamento 1:2:9.

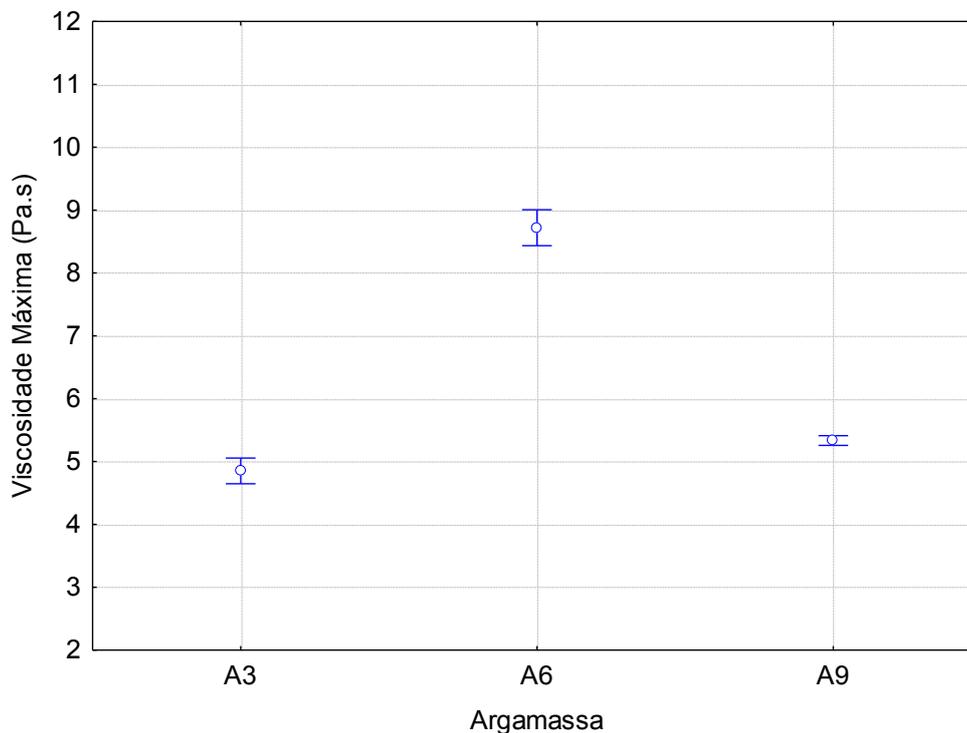


Figura 64: ANOVA do efeito do proporcionamento da argamassa sobre a viscosidade

Este comportamento não era esperado inicialmente, sendo que o uso de cal em proporcioneamentos de argamassas é associado a uma melhora de sua trabalhabilidade, com redução da viscosidade, facilitando o seu manuseio (BAÍÁ e SABBATINI, 2000; COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2002; BAUER, 2005; RECENA, 2008, entre outros).

No entanto, Raggo e Cincotto (1999), ao avaliar o efeito de diferentes cales sobre a viscosidade de argamassas, concluíram que quando se trabalha com curvas granulométricas semelhantes, “devem existir forças diferenciadas entre as partículas dos diferentes compostos químicos, que cooperam na modificação da viscosidade da pasta”. Seus resultados também possibilitaram concluir que a dimensão ou faixa granulométrica são as características das partículas que mais afetam a viscosidade das pastas. O presente trabalho reitera esta afirmação, de forma que a interação da composição granulométrica e os ligantes da mistura parece reger diretamente o comportamento reológico.

A interação entre os proporcioneamentos das argamassas com as diferentes composições granulométricas (CG) está apresentada na figura 65, onde é possível observar a prevalência da influência da argamassa A6 sobre o aumento da viscosidade, independentemente da composição granulométrica utilizada, porém com maior intensidade quando da utilização da granulometria mais uniforme CG2. O efeito interativo da composição granulométrica com o proporcioneamento

também fica evidenciado na mudança de comportamento da argamassa A3 com a CG2, que resultou nos menores valores de viscosidade, e uma diferença mais pronunciada da mesma CG2 em relação a argamassa A9, comparativamente ao comportamento destas (A3 e A9), quando produzidas com a CG 1 e a CG3.

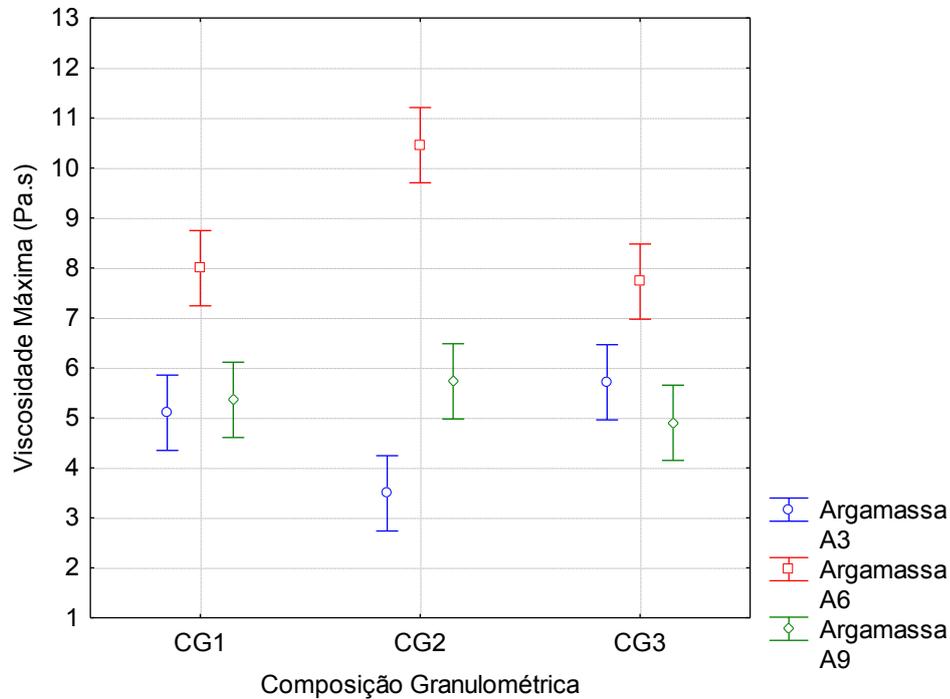


Figura 65: ANOVA do efeito da interação entre o proporcionamento da argamassa e a composição granulométrica sobre a viscosidade

É preciso analisar criticamente o comportamento da argamassa A32 que colaborou com o efeito significativo da interação entre o proporcionamento e a composição granulométrica. Por tratar-se a A32 da argamassa com condições teoricamente menos favoráveis a uma boa trabalhabilidade - não possui cal na composição, e possui a granulometria mais uniforme, verificou-se segregação nesta argamassa, durante o ensaio de reometria rotacional, com acúmulo de água ao redor da palheta do reômetro o que pode ter mascarado o resultado obtido, bem como já foi discutido anteriormente. Por outro lado, nas argamassas com cal, este ligante deve ter preenchido os vazios entre os agregados, mantendo a homogeneidade da mistura durante o ensaio.

Além disso, o tipo de cal, suas características físico-mecânicas, sua composição química e área superficial são fatores que estão diretamente ligados com o comportamento da viscosidade de pastas cimentícias (SÉBAIBI *et al.*, 2004). Sébaibi *et al.* (2004) salientam que estas propriedades influenciarão na quantidade de água a ser acrescentada na mistura, sendo que estudos preliminares demonstraram que a morfologia dos grãos da cal influencia mais na viscosidade do que a sua composição química.

Para visualizar melhor o efeito da composição granulométrica na viscosidade das argamassas, a figura 66 apresenta as viscosidades máximas obtidas para as argamassas relacionadas com o coeficiente de uniformidade (Cu) das areias. Relembrando, a CG1 (25, 25, 25, 25%) tem coeficiente de uniformidade 3,95, considerado muito uniforme, a CG2 (10, 40, 40, 10%) tem coeficiente de uniformidade 2,48, classificada como muito uniforme e a CG3 (40, 10, 10, 40%) tem coeficiente de uniformidade 6,28, considerado desuniforme.

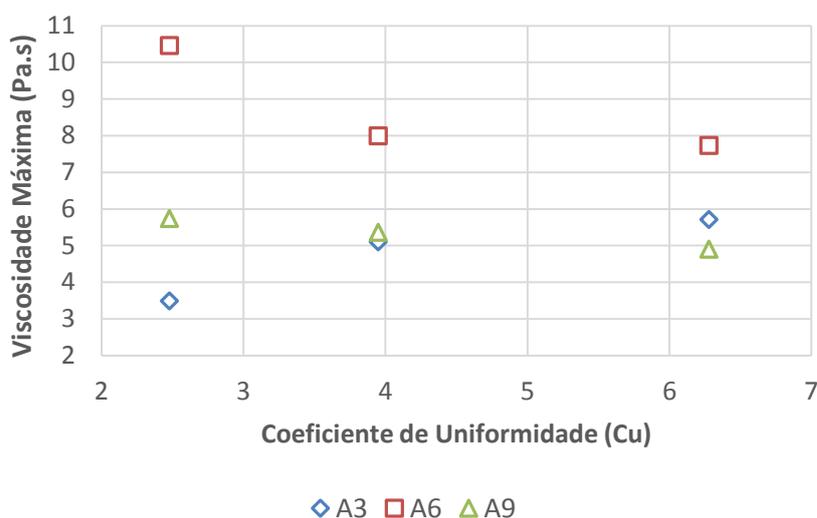


Figura 66: relação entre a viscosidade das argamassas e o coeficiente de uniformidade das areias

A figura 66 mostra que as argamassas com cal em sua composição (A6 e A9) apresentaram um comportamento decrescente de viscosidade com o aumento do coeficiente de uniformidade, ou seja, conforme a areia vai tornando-se desuniforme há uma redução da viscosidade. A argamassa sem cal em sua composição (A3) apresentou uma inversão no comportamento em relação às com cal. Acredita-se que para os Cu menores, onde a areia é muito uniforme, pode ter ocorrido segregação da água livre da mistura, proveniente dos vazios dos agregados, devido ao movimento rotacional da palheta do reômetro no momento da medição da viscosidade, gerando um falso valor de viscosidade baixa, resultante deste acúmulo de água ao redor da palheta.

Visando analisar todas as interações que ocorreram entre as argamassas estudadas, realizou-se uma comparação múltipla de médias através do método de Fisher no programa Statística 7 (tabela 27). Nesta análise, é possível observar todas as combinações de proporcionamentos das argamassas e composições granulométricas, além da influência destes parâmetros na viscosidade. Fica claro que, no caso da A9 (1:2:9), as CG não exerceram influência sobre os valores de viscosidade. Talvez a maior quantidade de cal presente neste proporcionamento possa ter compensado as características desfavoráveis de algumas composições granulométricas, mascarando o efeito das mesmas.

A A3 (1:0:3), sem cal, apresentou valores de viscosidade estatisticamente iguais aos valores da A9, para a CG1 e a CG3, que por sua vez também foram estatisticamente iguais, ou seja, A31=A33=A91=A93. No entanto, a argamassa A32 difere da A92, como já foi discutido anteriormente.

Tabela 27: comparação múltipla de médias pelo método de Fisher da influência do proporcionamento das argamassas e da CG sobre a viscosidade

| Argamassa | Composição Granulométrica | 1   | 2            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            |              |
|-----------|---------------------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1         | A3                        | CG1 |              | 0,0075<br>65 | 0,2276<br>28 | 0,0001<br>70 | 0,0000<br>01 | 0,0003<br>45 | 0,5966<br>03 | 0,2145<br>37 | 0,6806<br>18 |
| 2         | A3                        | CG2 | 0,0075<br>65 |              | 0,0010<br>89 | 0,0000<br>05 | 0,0000<br>00 | 0,0000<br>09 | 0,0032<br>35 | 0,0010<br>29 | 0,0149<br>57 |
| 3         | A3                        | CG3 | 0,2276<br>28 | 0,0010<br>89 |              | 0,0009<br>08 | 0,0000<br>03 | 0,0020<br>49 | 0,4746<br>21 | 0,9684<br>87 | 0,1195<br>35 |
| 4         | A6                        | CG1 | 0,0001<br>70 | 0,0000<br>05 | 0,0009<br>08 |              | 0,0005<br>43 | 0,5828<br>20 | 0,0003<br>36 | 0,0009<br>61 | 0,0001<br>03 |
| 5         | A6                        | CG2 | 0,0000<br>01 | 0,0000<br>00 | 0,0000<br>03 | 0,0005<br>43 |              | 0,0002<br>60 | 0,0000<br>02 | 0,0000<br>03 | 0,0000<br>01 |
| 6         | A6                        | CG3 | 0,0003<br>45 | 0,0000<br>09 | 0,0020<br>49 | 0,5828<br>20 | 0,0002<br>60 |              | 0,0007<br>13 | 0,0021<br>75 | 0,0002<br>02 |
| 7         | A9                        | CG1 | 0,5966<br>03 | 0,0032<br>35 | 0,4746<br>21 | 0,0003<br>36 | 0,0000<br>02 | 0,0007<br>13 |              | 0,4516<br>43 | 0,3555<br>46 |
| 8         | A9                        | CG2 | 0,2145<br>37 | 0,0010<br>29 | 0,9684<br>87 | 0,0009<br>61 | 0,0000<br>03 | 0,0021<br>75 | 0,4516<br>43 |              | 0,1121<br>43 |
| 9         | A9                        | CG3 | 0,6806<br>18 | 0,0149<br>57 | 0,1195<br>35 | 0,0001<br>03 | 0,0000<br>01 | 0,0002<br>02 | 0,3555<br>46 | 0,1121<br>43 |              |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$ .

A única argamassa que apresentou-se estatisticamente diferente de todas as outras foi a A62, que obteve o maior valor de viscosidade entre todas as argamassas estudadas. As demais argamassas A6 (A61 e A63) apresentaram comportamentos estatisticamente iguais.

A A6, quando produzida com a CG2, apresentou um acréscimo de viscosidade e tensão de escoamento bastante considerável. Acredita-se que um conjunto de fenômenos possa ter gerado este comportamento, sendo o mais evidente a interação entre o proporcionamento que gerou maior viscosidade associado à granulometria mais uniforme e, portanto com o pior empacotamento (evidenciado através de sua massa unitária, anteriormente discutida).

Para tentar visualizar o efeito das diferentes composições granulométricas e proporcionamentos na viscosidade das argamassas e no seu escoamento, realizaram-se cortes transversais em amostras no estado endurecido, as quais foram analisadas em Microscópio Estereoscópio Olympus, modelo SZX16 com objetiva de 1x e ocular de 10 vezes, disponível no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da UFRGS. As imagens obtidas para cada proporcionamento dosado com cada composição granulométrica estão apresentadas na figura 67.

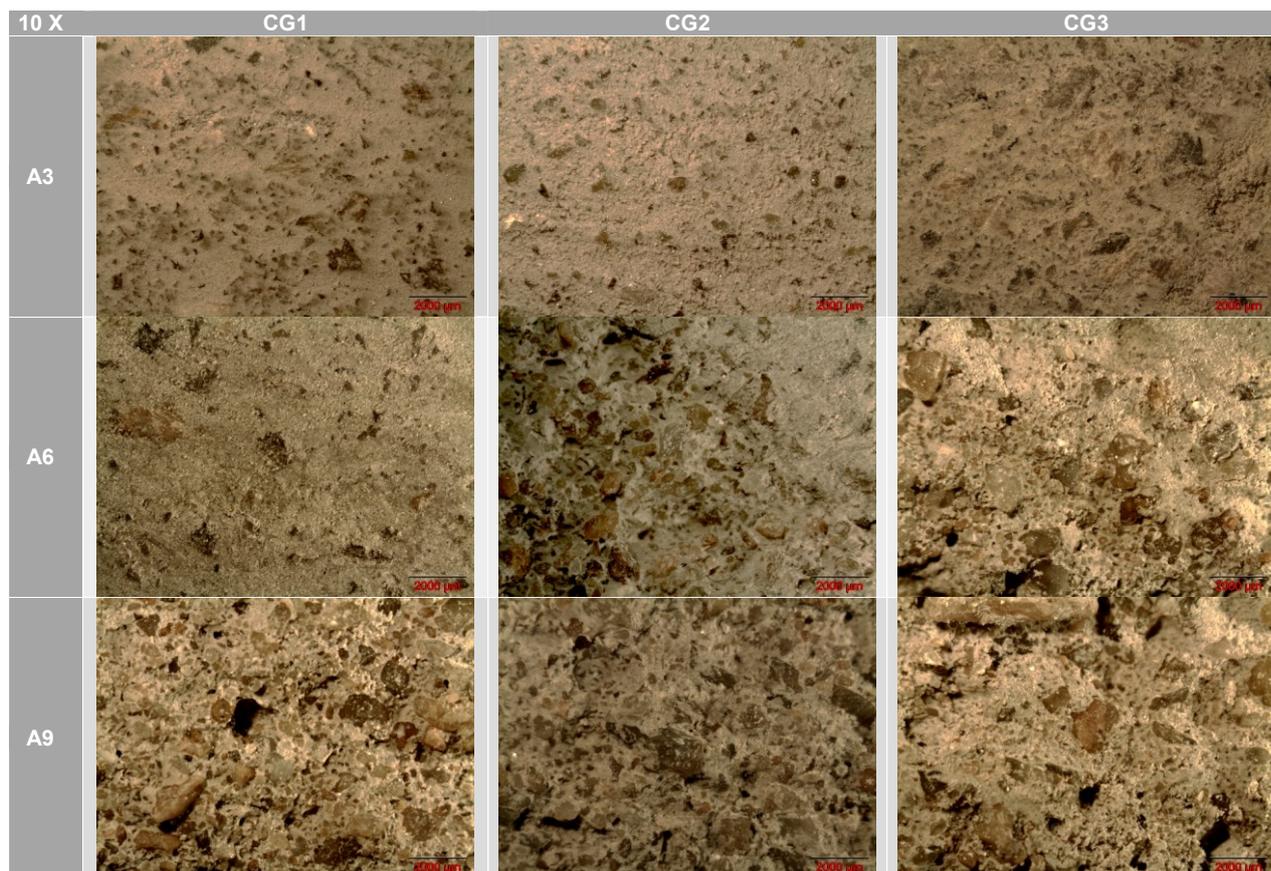


Figura 67: imagens de corte transversal realizado nas argamassas no estado endurecido, obtidas em Microscópio Estereoscópio com objetiva de 1x e ocular de 10 vezes

Estas imagens permitem observar que as argamassas A62 parecem ter sofrido segregação de seus agregados, com acúmulo destes em determinados pontos, enquanto que as argamassas A3 e A9 apresentam distribuição mais homogênea dos agregados na pasta. Este fato contribui, junto com as demais discussões feitas até então, para explicar as maiores viscosidades obtidas na A6, de forma que, ao segregar, os agregados passam a se atritar, dificultando o escoamento das argamassas.

Apesar de a A32 ter sofrido influência da água livre, liberada através da aplicação do torque do reômetro, a mesma não apresentou indícios de segregação na figura 67. Este fato indica que, caso não seja solicitada em altas taxas de cisalhamento, a A32 não mostra indícios de segregação.

O entendimento da forma como ocorre o fluxo em suspensões heterogêneas, como as argamassas de revestimento, é bastante complexo, de forma que, aparentemente, deve-se considerar não apenas o empacotamento e a distribuição granulométrica dos agregados, mas sua interação com a pasta de toda a dispersão e a forma como as partículas reagem ao serem submetidas a tensões, escoando de forma homogênea ou heterogênea (com segregação de partículas).

Um dos comportamentos que pode estar afetando a viscosidade é o fenômeno físico do “Efeito de Parede” (citado anteriormente, no item 6.1.1), aonde grãos de diâmetros muito semelhantes acabam afastando os outros grãos para entrar na mistura, e isto pode ter ocorrido na argamassa A62, travando o escoamento do conjunto.

O atrito entre os grãos de suspensões heterogêneas e sua influência na reologia das argamassas foi tema do estudo de Mendes (2008). O autor afirma que a distribuição granulométrica dos agregados possui influência no comportamento reológico da suspensão, porém, para as variáveis avaliadas pelo autor, não foi possível estabelecer correlação direta entre o coeficiente de atrito dos agregados e a viscosidade das suspensões. Olhero e Ferreira (2004) corroboram com esta afirmação, ressaltando o fato de que o comportamento reológico não pode ser baseado apenas no tamanho das partículas presentes em uma suspensão, mas sim na distribuição dos tamanhos das partículas, que desempenha papel mais relevante neste comportamento.

Outro fenômeno que pode estar ocorrendo na A6, que possui cal em sua composição, no entanto apresentou alta viscosidade e resistência ao escoamento, pode estar relacionado com o teor de finos ter chegado a um “valor crítico”. Esta teoria foi citada por alguns autores (ZHANG e HAN, 2000; YAHIA *et al.*, 2005; BENABED *et al.*, 2012) que observaram que, para um mesmo teor de cimento (com relação a/c constante), a adição de finos reduz a viscosidade da pasta antes de causar um aumento desta propriedade. Isso ocorre, segundo os autores, quando o teor de finos excede um determinado valor crítico, que é dependente da relação água/cimento.

Lee *et al.* (2003) e Kashani *et al.* (2014) complementam afirmando que quando uma adição mineral com uma grande dispersão de partículas é acrescentada à pasta de cimento, as pequenas partículas preenchem os poros, melhorando o empacotamento enquanto aumenta a água livre relativa a fluidez das pastas de cimento. No caso de distribuições granulométricas com menor dispersão, os poros entre partículas são maiores, fato que diminui a fluidez.

Dessa forma, buscando indícios do comportamento supracitado, foi proposta a dosagem de uma argamassa de proporcionamento 1:3:12 (cimento:cal:areia, materiais secos, em volume) com a CG2, denominada de A122. Esta argamassa foi dosada para o mesmo índice de consistência fixado para as demais ( $240 \pm 10$ mm), conforme mostra a tabela 28.

Tabela 28: dosagem da argamassa A122

| Água (g) | Consistência média (mm) | Relação a/c | Relação a/lig |
|----------|-------------------------|-------------|---------------|
| 250      | 250                     | 1,88        | 1,5           |

A escolha desta argamassa com o uso da CG2 se deve ao fato desta composição granulométrica ser a que apresentou, conforme discutido anteriormente, a maior influência sobre os resultados. Esta argamassa produzida foi submetida ao ensaio de reometria rotacional, com a mesma rotina de ensaio aplicada às demais, visando comparar os valores de viscosidade e tensão de

cisalhamento obtidos neste proporcionamento (A122), comparativamente aos proporcionamentos A62 e A92. Em outras palavras, buscou-se comparar os resultados da reometria rotacional entre três argamassas com proporcionamentos de diferentes teores de cal, ainda que com a mesma proporção ligante/agregado. Estes valores estão apresentados na tabela 29, bem como os gráficos resultantes da reometria rotacional estão apresentados na figura 68.

Tabela 29: influência do teor de cal na viscosidade e na tensão de cisalhamento das argamassas

| Argamassa | Viscosidade Máxima (Pa.s) | Tensão de Cisalhamento Máxima (Pa) |
|-----------|---------------------------|------------------------------------|
| A62       | 10,46                     | 348,63                             |
| A92       | 5,73                      | 191,06                             |
| A122      | 11,86                     | 395,66                             |

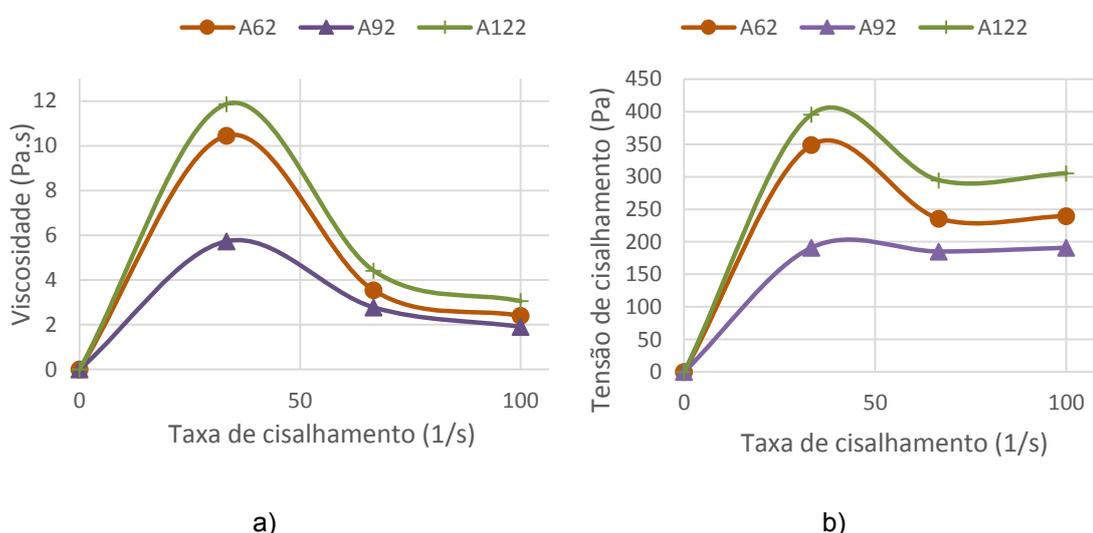


Figura 68: reometria rotacional de argamassas com diferentes teores de cal. a) viscosidade vs. taxa de cisalhamento, b) tensão de cisalhamento vs. taxa de cisalhamento

Percebe-se que há uma tendência de comportamento reológico das argamassas, sendo que a viscosidade da argamassa A62, de 10,46 Pa.s, é reduzida em mais de 45% (5,73 Pa.s) para a argamassa A92. Já para a argamassa A122, a viscosidade volta a crescer, atingindo um valor de 11,86 Pa.s. Dentro da teoria de “valor crítico” anteriormente citada e defendida por Zhang e Han (2000), Yahia *et al.* (2005) e Benabed *et al.* (2012), pode-se afirmar que há indícios de que este mesmo comportamento possa estar sendo reproduzido por estas argamassas em algum ponto.

Além disso, deve-se considerar que tanto a tensão de cisalhamento quanto a viscosidade são fortemente influenciadas pelas características das partículas das adições minerais utilizadas, sendo que a distribuição granulométrica, a densidade e a área superficial das partículas são parâmetros críticos que influenciam o comportamento reológico (BENTZ *et al.*, 2012). Estas

afirmações mostram o quão complexo é o entendimento de suspensões heterogêneas, que dependem de interações físicas e químicas, que afetam diretamente suas propriedades reológicas.

Outro aspecto importante a se considerar quando se trabalha com argamassas com cal são as cargas que estão envolvidas na interação interpartículas. Neste sentido, Raggo e Cincotto (1999) discutiram este assunto dizendo que “não se tem conhecimento de quais as cargas das partículas de cal, e como estas cargas estariam se comportando dentro da pasta, variando suas propriedades reológicas. Para isso tem-se a necessidade de estudos para a determinação do potencial zeta das partículas de cal”. A influência que a cal exerce na cinética de hidratação do cimento em materiais cimentícios, como a argamassa, possui uma carência de estudos específicos, considerando o fato de que a cal não é totalmente solúvel, permanecendo elevada parcela do teor adicionado em suspensão (RAGGO e CINCOTTO, 1999).

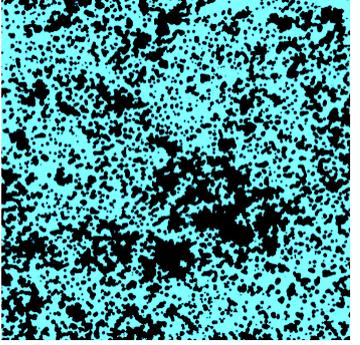
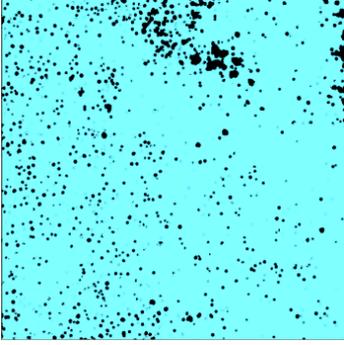
O potencial zeta é um indicador de carga superficial que pode ser usado para prever e controlar a estabilidade de suspensões. Quanto maior for o potencial zeta, maior é a probabilidade de que a suspensão seja estável, já que partículas carregadas se repelem e estas forças superam as forças de Van der Waals que promovem a agregação. Por outro lado, valores baixos de potencial zeta podem indicar a possibilidade de agregação de partículas (CORRERA, 2013). Estudos futuros mais aprofundados neste sentido podem ser de grande contribuição para a interpretação do comportamento de suspensões heterogêneas, como a argamassa.

### 6.3 ANÁLISE DOS FATORES CONTROLÁVEIS SOBRE A VARIÁVEL DE RESPOSTA ÁREA DE CONTATO

No Apêndice B estão apresentados todos os valores das medições realizadas na interface da argamassa com o substrato e no Apêndice C estão apresentadas as imagens resultantes destas digitalizações tridimensionais a laser tratadas no Geomagic Studio 10 e no Photoshop C5S com as respectivas porcentagens de área de contato. Alguns exemplos destas imagens resultantes da digitalização tridimensional a laser estão apresentados na tabela 30.

Para cada combinação de variáveis (argamassa, altura de queda e substrato) foram realizadas no mínimo três digitalizações, em áreas de 10x10 cm<sup>2</sup>. Nos casos onde o coeficiente de variação das áreas de contato ficou acima de 15%, foram feitas mais repetições de amostras, visando reduzir este coeficiente e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos, motivo pelo qual algumas argamassas possuem mais do que três repetições.

Tabela 30: exemplos de imagens resultantes da digitalização tridimensional a laser tratadas nos softwares Geomagic Studio 10 e no Photoshop C5S e a área de contato real medida

| Argamassa – Substrato –<br>Altura de lançamento                        | A62 – ACRÍLICO – 30cm  | A91 – VIDRO – 100cm   |
|--|--|---|
| Imagem resultante do<br>tratamento através de<br>softwares específicos |  |  |
| Área de contato real medida  | 56,81%   | 93,96%  |

A médias dos valores obtidos nas digitalizações para cada caso, desvio padrão e coeficiente de variação estão apresentados nas tabelas 31 e 32, a seguir. A tabela 31 apresenta os resultados médios das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9 (1:2:9), lançadas a 30cm de altura, com a caixa de queda, sobre os substratos de polietileno, acrílico e vidro.

A tabela 32 apresenta os resultados médios das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9 (1:2:9) lançadas a 100cm de altura, com a caixa de queda, sobre os substratos de polietileno, acrílico e vidro.

Tabela 31: percentual médio de área de contato das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9 (1:2:9) lançadas a 30cm de altura sobre diferentes substratos

| <b>Argamassa</b> | <b>Substrato</b> | <b>Altura de queda (cm)</b> | <b>Área de contato média (%)</b> | <b>Desvio padrão (%)</b> | <b>Coefficiente de variação (%)</b> |
|------------------|------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| A31              | Polietileno      | 30                          | 83,34                            | 6,67                     | 8                                   |
| A31              | Acrílico         | 30                          | 78,33                            | 5,23                     | 7                                   |
| A31              | Vidro            | 30                          | 78,89                            | 7,89                     | 10                                  |
| A32              | Polietileno      | 30                          | 84,02                            | 5,54                     | 7                                   |
| A32              | Acrílico         | 30                          | 82,70                            | 4,69                     | 6                                   |
| A32              | Vidro            | 30                          | 85,96                            | 2,40                     | 3                                   |
| A33              | Polietileno      | 30                          | 85,52                            | 1,53                     | 2                                   |
| A33              | Acrílico         | 30                          | 83,98                            | 9,40                     | 11                                  |
| A33              | Vidro            | 30                          | 92,19                            | 3,54                     | 4                                   |
| A61              | Polietileno      | 30                          | 75,35                            | 6,41                     | 9                                   |
| A61              | Acrílico         | 30                          | 73,29                            | 2,44                     | 3                                   |
| A61              | Vidro            | 30                          | 71,93                            | 5,70                     | 8                                   |
| A62              | Polietileno      | 30                          | 66,93                            | 1,94                     | 3                                   |
| A62              | Acrílico         | 30                          | 63,86                            | 7,06                     | 11                                  |
| A62              | Vidro            | 30                          | 72,88                            | 8,11                     | 11                                  |
| A63              | Polietileno      | 30                          | 75,34                            | 2,94                     | 4                                   |
| A63              | Acrílico         | 30                          | 76,31                            | 6,19                     | 8                                   |
| A63              | Vidro            | 30                          | 74,84                            | 7,41                     | 10                                  |
| A91              | Polietileno      | 30                          | 87,77                            | 4,63                     | 5                                   |
| A91              | Acrílico         | 30                          | 82,12                            | 6,22                     | 8                                   |
| A91              | Vidro            | 30                          | 79,57                            | 7,13                     | 9                                   |
| A92              | Polietileno      | 30                          | 81,81                            | 0,77                     | 1                                   |
| A92              | Acrílico         | 30                          | 80,36                            | 10,05                    | 13                                  |
| A92              | Vidro            | 30                          | 75,66                            | 10,11                    | 13                                  |
| A93              | Polietileno      | 30                          | 91,74                            | 3,54                     | 4                                   |
| A93              | Acrílico         | 30                          | 96,28                            | 1,87                     | 2                                   |
| A93              | Vidro            | 30                          | 81,10                            | 3,95                     | 5                                   |

Tabela 32: percentual médio de área de contato das argamassas A3 (1:0:3), A6 (1:1:6) e A9 (1:2:9) lançadas a 100cm de altura sobre diferentes substratos

| Argamassa | Substrato   | Altura de queda (cm) | Área de contato média (%) | Desvio padrão (%) | Coefficiente de variação (%) |
|-----------|-------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------------------------------|
| A31       | Polietileno | 100                  | 79,32                     | 2,89              | 4                            |
| A31       | Acrílico    | 100                  | 90,53                     | 3,07              | 3                            |
| A31       | Vidro       | 100                  | 89,53                     | 3,72              | 4                            |
| A32       | Polietileno | 100                  | 85,44                     | 1,57              | 2                            |
| A32       | Acrílico    | 100                  | 94,53                     | 0,90              | 1                            |
| A32       | Vidro       | 100                  | 91,08                     | 3,62              | 4                            |
| A33       | Polietileno | 100                  | 81,04                     | 5,54              | 7                            |
| A33       | Acrílico    | 100                  | 91,99                     | 4,96              | 5                            |
| A33       | Vidro       | 100                  | 93,01                     | 4,37              | 5                            |
| A61       | Polietileno | 100                  | 79,01                     | 6,69              | 8                            |
| A61       | Acrílico    | 100                  | 81,15                     | 9,83              | 12                           |
| A61       | Vidro       | 100                  | 78,31                     | 9,92              | 13                           |
| A62       | Polietileno | 100                  | 62,52                     | 4,87              | 8                            |
| A62       | Acrílico    | 100                  | 73,70                     | 11,31             | 15                           |
| A62       | Vidro       | 100                  | 75,96                     | 3,04              | 4                            |
| A63       | Polietileno | 100                  | 72,46                     | 3,53              | 5                            |
| A63       | Acrílico    | 100                  | 82,85                     | 5,68              | 7                            |
| A63       | Vidro       | 100                  | 89,29                     | 4,18              | 5                            |
| A91       | Polietileno | 100                  | 84,66                     | 4,66              | 6                            |
| A91       | Acrílico    | 100                  | 81,71                     | 3,36              | 4                            |
| A91       | Vidro       | 100                  | 92,19                     | 1,42              | 2                            |
| A92       | Polietileno | 100                  | 78,74                     | 3,75              | 5                            |
| A92       | Acrílico    | 100                  | 85,44                     | 2,77              | 3                            |
| A92       | Vidro       | 100                  | 86,87                     | 2,28              | 3                            |
| A93       | Polietileno | 100                  | 89,83                     | 3,07              | 3                            |
| A93       | Acrílico    | 100                  | 98,01                     | 0,17              | 0                            |
| A93       | Vidro       | 100                  | 94,52                     | 1,16              | 1                            |

Os valores de desvio padrão e coeficiente de variação, baixos quando comparados com outros ensaios que visam avaliar o fenômeno da aderência, validam a metodologia desenvolvida nesta pesquisa. Neste sentido, é importante salientar que a área real de contato é uma propriedade de difícil medição, já que são diversos os fatores que afetam a mecânica do contato de superfícies rugosas, como por exemplo, a área de contato real depende de propriedades mecânicas (pressão de contato, fricção, adesão, desgaste), de efeitos físicos (reações químicas, aquecimento por fricção), do tempo (viscosidade e cura dos materiais) e do ambiente (oxidação das superfícies, temperatura, umidade). Enquanto experimentalmente é difícil estudar todos estes fatores separadamente e deduzir os mais relevantes, em simulações numéricas é difícil incluir tantas variáveis para estudar seus efeitos combinados, de forma que os modelos tornam-se extremamente complexos e pouco confiáveis. Com experimentos, as áreas de contato são igualmente difíceis de ser observadas in situ para a caracterização direta das zonas em contato (YASTREBOV *et al.*, 2015).

Visando analisar a interação e a influência de cada uma das variáveis estudadas, considerando-se todos os dados obtidos com as digitalizações 3D a laser, realizou-se uma análise de variância (ANOVA), com 95% de confiabilidade, através do programa Statística 7. Na tabela 33 pode-se observar o efeito das variáveis controláveis propostas neste trabalho sobre a variável de resposta, no caso a área de contato substrato/argamassa.

Tabela 33: ANOVA dos fatores controláveis propostos sobre a variável de resposta: área de contato

|   | <b>SQ</b> | <b>GDL</b> | <b>MQ</b> | <b>Fcalc</b> | <b>Fator p</b> | <b>Significativo</b> |
|---|-----------|------------|-----------|--------------|----------------|----------------------|
| {1} Argamassa   | 6047      | 2          | 3024      | 86,72        | 0,000000       | Sim                  |
| {2} Composição Granulométrica                                 | 1664      | 2          | 832       | 23,86        | 0,000000       | Sim                  |
| {3} Substrato   | 441       | 2          | 221       | 6,33         | 0,002233       | Sim                  |
| {4} Altura de lançamento (cm)                                 | 1088      | 1          | 1088      | 31,20        | 0,000000       | Sim                  |
| Argamassa*Composição Granulométrica                           | 1056      | 4          | 264       | 7,57         | 0,000012       | Sim                  |
| Argamassa*Substrato   | 304       | 4          | 76        | 2,18         | 0,073040       | Não                  |
| Composição Granulométrica*Substrato                           | 284       | 4          | 71        | 2,04         | 0,091554       | Não                  |
| Argamassa*Altura de lançamento (cm)                           | 9         | 2          | 4         | 0,13         | 0,879598       | Não                  |
| Composição Granulométrica*Altura de lançamento (cm)           | 12        | 2          | 6         | 0,17         | 0,844095       | Não                  |
| Substrato*Altura de lançamento (cm)                           | 1144      | 2          | 572       | 16,41        | 0,000000       | Sim                  |
| Argamassa*Composição Granulométrica*Substrato                 | 613       | 8          | 77        | 2,20         | 0,029916       | Sim                  |
| Argamassa*Composição Granulométrica*Altura de lançamento (cm) | 130       | 4          | 33        | 0,93         | 0,445128       | Não                  |
| Argamassa*Substrato*Altura de lançamento (cm)                 | 383       | 4          | 96        | 2,74         | 0,030201       | Sim                  |
| Composição Granulométrica*Substrato*Altura de lançamento (cm) | 80        | 4          | 20        | 0,57         | 0,681139       | Não                  |
| 1*2*3*4   | 212       | 8          | 27        | 0,76         | 0,637531       | Não                  |
| Erro  | 5997      | 172        | 35        |              |                |                      |

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

A análise da tabela 33 permite identificar que o tipo de argamassa, a composição granulométrica, o tipo de substrato e a altura de lançamento exerceram influência estatisticamente significativa

sobre a área de contato. Da mesma forma, o efeito combinado entre o tipo de argamassa e a composição granulométrica e do substrato e a altura de lançamento, bem como o efeito combinado entre a argamassa, a composição granulométrica e o substrato e entre a argamassa, o substrato e a altura de lançamento também demonstraram ser estatisticamente significativos. Por outro lado, não foi possível identificar relação estatística relevante entre o tipo de argamassa e o substrato, a CG e o substrato, o tipo de argamassa e a altura de lançamento, a CG e a altura de lançamento, entre a CG, o substrato e a altura de lançamento, bem como o efeito combinado entre os quatro fatores controláveis propostos.

A ANOVA demonstrou que os diferentes proporcionamentos das argamassas influenciaram significativamente no desenvolvimento da área de contato na interface argamassa/substrato, conforme pode-se observar na figura 69. As argamassas A3 e A9 parecem ter tido comportamento muito semelhante, enquanto que a argamassa A6 apresentou valores de área de contato bem inferiores às demais. Uma análise múltipla de médias, com 95% de confiança, realizada através do Método de Fisher, confirma esta observação, mostrando que as argamassas A3 e A9 são estatisticamente iguais e a A6 é estatisticamente diferente de ambas, com relação à área de contato (tabela 34).

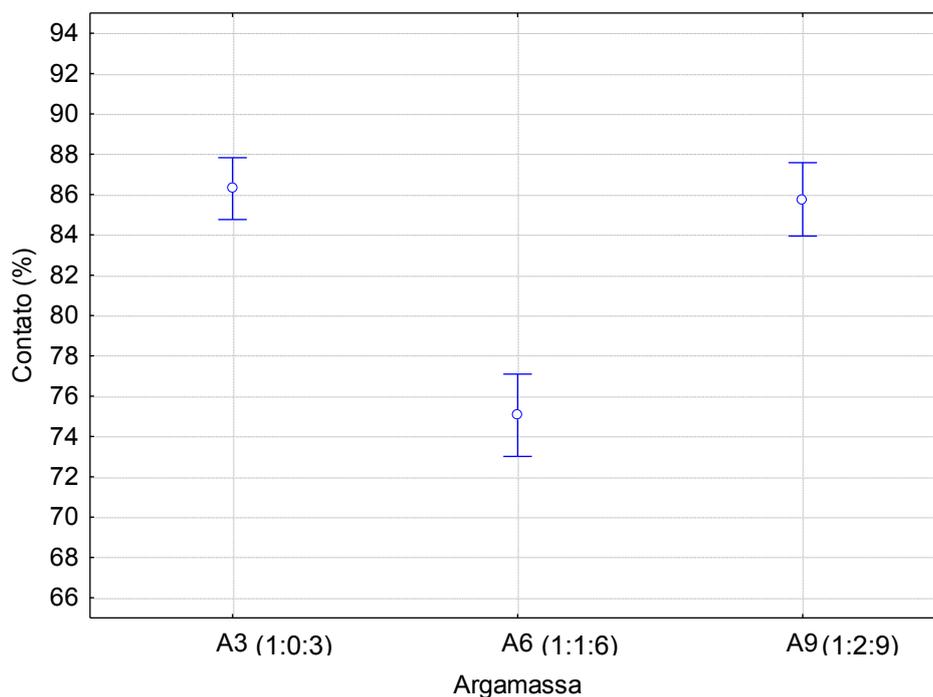


Figura 69: ANOVA do efeito do proporcionamento da argamassa sobre a área de contato

Tabela 34: análise múltipla de médias pelo Método de Fisher do efeito isolado dos proporcionamentos das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedades avaliadas são estatisticamente iguais)

| Argamassa         | A3       | A6       | A9       |
|-------------------|----------|----------|----------|
| <b>A3 (1:0:3)</b> |          | 0,000000 | 0,672367 |
| <b>A6 (1:1:6)</b> | 0,000000 |          | 0,000000 |
| <b>A9 (1:2:9)</b> | 0,672367 | 0,000000 |          |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$

A figura 69 pode ser relacionado com a figura 64, anteriormente apresentada (ANOVA do efeito do proporcionamento da argamassa sobre a viscosidade), sendo que o comportamento apresentado em uma é inversamente proporcional ao apresentado na outra, fato que indica que a área de contato é inversamente proporcional à viscosidade das argamassas, para a faixa de viscosidades e argamassas estudada nesta pesquisa. Este comportamento era esperado, já que no meio técnico afirma-se, que se a argamassa possuir trabalhabilidade (viscosidade adequada), poderá apresentar maior contato com a base através do seu espalhamento (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2002).

Se for realizada uma análise de forma separada das argamassas com cal e sem cal, pode-se dizer que houve um aumento da área de contato com o aumento do teor de cal das argamassas (da A6 para a A9), decorrente da redução da viscosidade, já discutida nos resultados de reometria rotacional (item 6.2.2). O comportamento da argamassa A3, neste caso, sendo considerada como o proporcionamento com 0% de cal, pode não ser passível de comparação com aquelas que possuem cal na sua composição, de forma que suas curvas de viscosidade podem ter comportamentos distintos.

Uma correlação entre o percentual de contato de cada proporcionamento e suas respectivas massas específicas teóricas da argamassa seca, resultam em um  $R^2 = 0,99$ , o que demonstra que existe uma relação linear entre estas duas propriedades, conforme pode-se observar na figura 70.

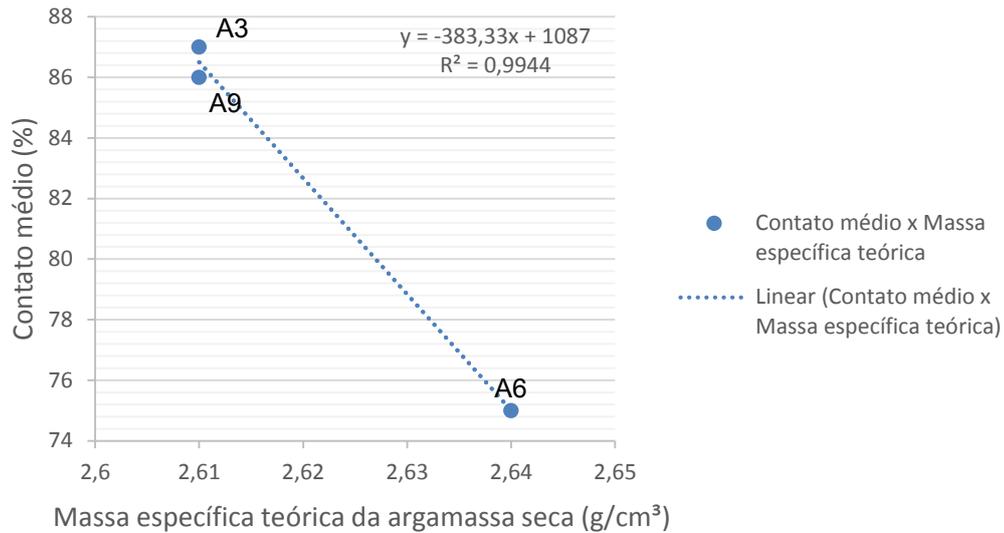


Figura 70: relação entre o percentual de contato médio das argamassas e a massa específica da argamassa seca

A figura 71 apresenta o comportamento das composições granulométricas (CG), que também foi estatisticamente significativa, no desenvolvimento da área de contato. O comportamento das CG quanto ao desenvolvimento da área de contato foi inversamente proporcional aos seus coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) e diretamente proporcional ao volume de vazios ( $V_v$ ) dos agregados. Quanto maior o  $C_u$  e menor o  $V_v$ , menos uniforme a curva granulométrica e maior a área de contato na interface argamassa/substrato, indicando que argamassas com CG muito uniformes tem uma área de contato na interface reduzida. Este comportamento está relacionado com a viscosidade das argamassas, conforme já discutido anteriormente na figura 66.

A análise múltipla de médias através do Método de Fisher, apresentada na tabela 35, mostrou que a CG3 (de uniformidade média:  $C_u$ : 6,28 e  $V_v$ : 41%) mostrou-se estatisticamente diferente das demais, enquanto que a CG1 e a CG2 (uniformes com  $C_u$ : 3,95 e 2,48 e  $V_v$ : 42 e 43,5%, respectivamente), quando analisadas isoladamente, apresentaram influência estatisticamente igual no desenvolvimento da área de contato.

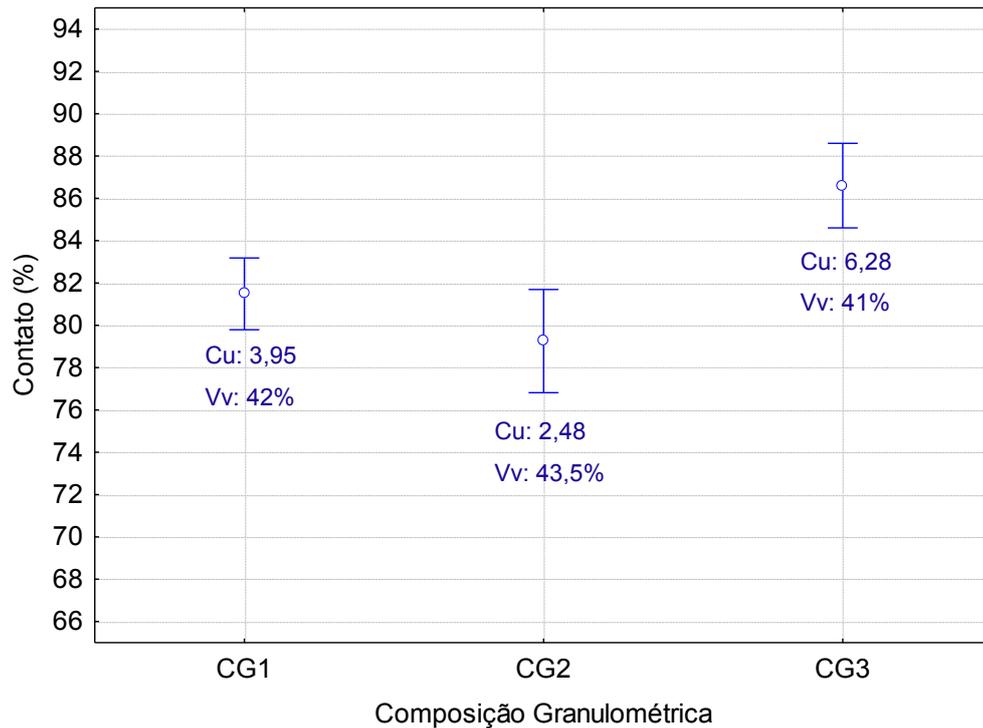


Figura 71: ANOVA da composição granulométrica (CG) da argamassa sobre a área de contato

Tabela 35: análise múltipla de médias do efeito isolado das composições granulométricas sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedades avaliadas são estatisticamente iguais)

| Composição Granulométrica    | CG1      | CG2      | CG3      |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| <b>CG1 (25, 25, 25, 25%)</b> |          | 0,124008 | 0,000391 |
| <b>CG2 (10, 40, 40, 10%)</b> | 0,124008 |          | 0,000001 |
| <b>CG3 (40, 10, 10, 40%)</b> | 0,000391 | 0,000001 |          |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$

A correlação entre o percentual de contato e o coeficiente de uniformidade (Cu) e o volume de vazios (Vv) das CG está apresentada na figura 72. É possível concluir, com elevado grau de correlação, que o percentual de contato aumenta com o aumento do coeficiente de uniformidade da areia, ou seja, quanto menos uniforme a composição granulométrica, maior o percentual de contato. Consequentemente, quanto menor o volume de vazios da areia, menor o percentual de contato.

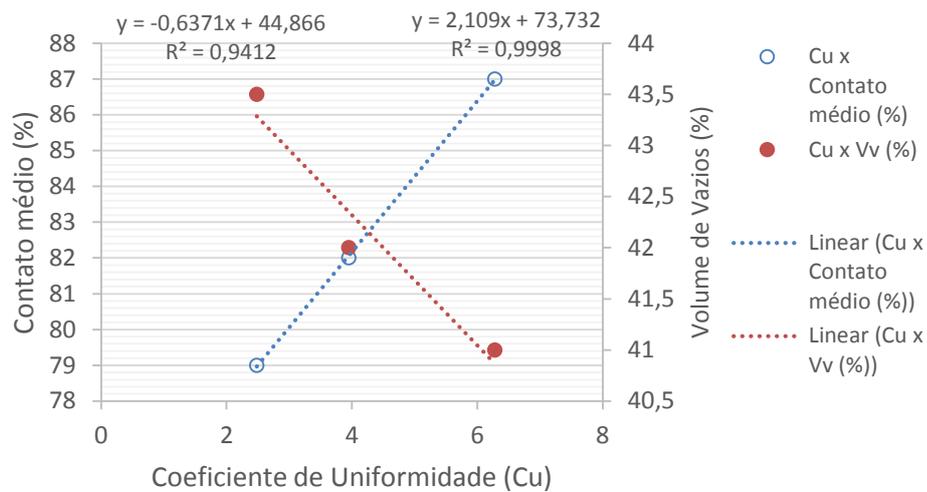


Figura 72: relação entre o coeficiente de uniformidade (Cu) e o volume de vazios (Vv) das areias com o percentual de contato médio

O efeito estatisticamente significativo dos substratos sobre a área de contato foi verificado na análise de variância fatorial, conforme apresentado na tabela 33. A figura 73 ilustra esse efeito dos substratos. Observa-se uma leve tendência do polietileno, substrato que oferece maior resistência o molhamento, gerar menores valores de área de contato entre todos os substratos avaliados. Por outro lado, o vidro, que molha com maior facilidade, por possuir um menor ângulo de contato gota de água/substrato, obteve maiores valores de área de contato, muito semelhantes aos obtidos pelo acrílico (substrato intermediário).

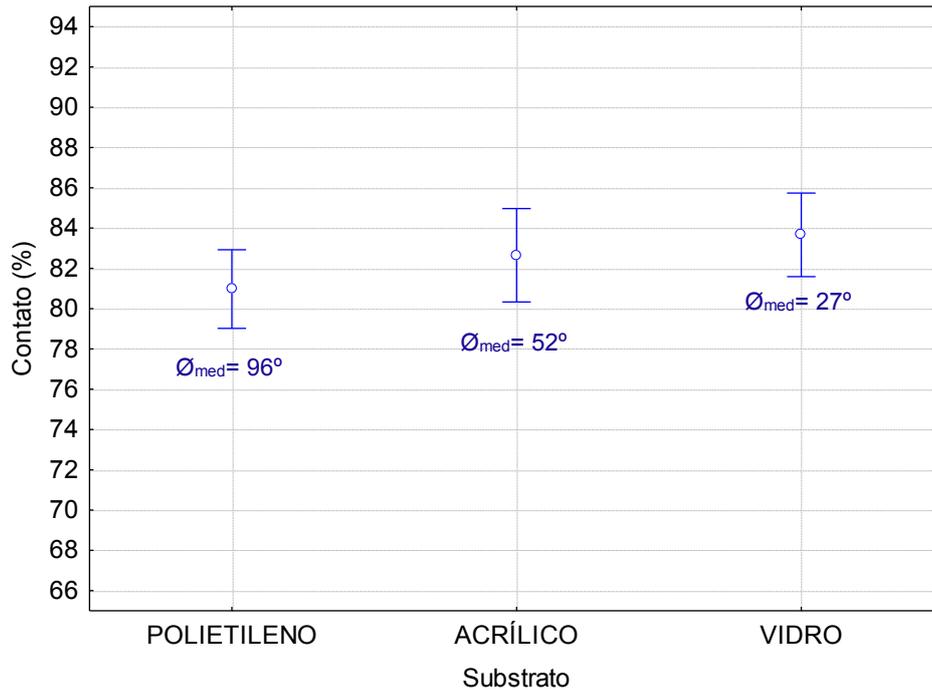


Figura 73: ANOVA dos substratos sobre a área de contato

A correlação entre o percentual de contato na interface e o ângulo de contato entre uma gota de água e os substratos pode ser observada na figura 74. Verifica-se eu há um alto fator de correlação entre estas duas variáveis,  $R^2=0,998$ , indicando influência do ângulo de contato de uma gota com o substrato, com a área de contato formada na interface argamassa/substrato.

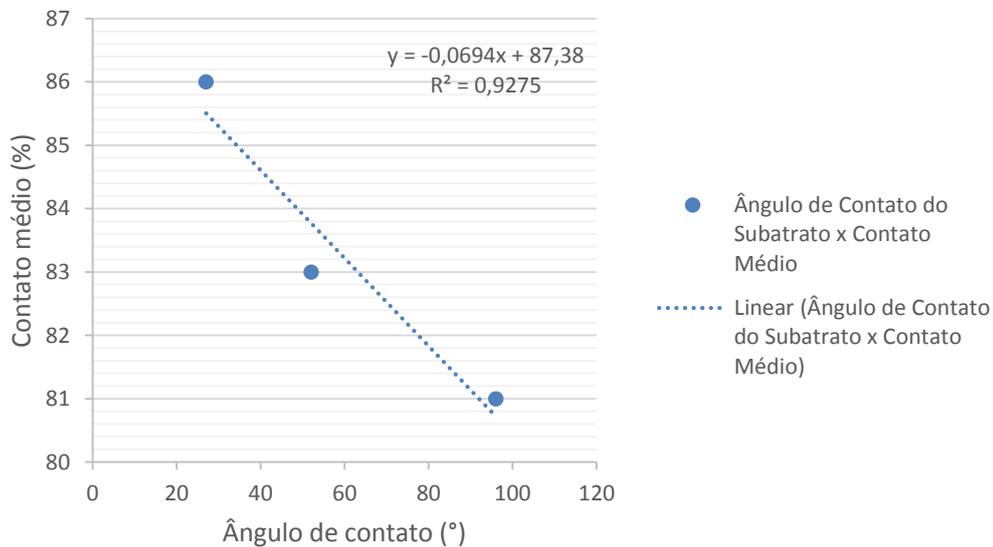


Figura 74: correlação entre o percentual de contato médio e o ângulo de contato que uma gota de água forma com o substrato

A altura de lançamento, ou seja, a energia de aplicação das argamassas sobre os substratos também exerceu influência estatisticamente significativa sobre a área de contato interfacial,

conforme mostra a figura 75. Quanto maior a altura de lançamento da argamassa, maior foi a porcentagem de contato das argamassas com os substratos.

Os resultados aqui obtidos podem ser correlacionados com os obtidos por Yastrebov *et al.* (2015), que estudaram o desenvolvimento da área de contato através de modelos computacionais. Quando avaliada a influência da aplicação de maiores pressões, visando a área de contato interfacial total, os autores verificaram que há um aumento da área de contato quando aplicadas pressões mais elevadas, resultantes da expansão das áreas de contato previamente existentes. Complementarmente, os autores afirmam que o crescimento da área de contato não é linear, mas uma função convexa decrescente.

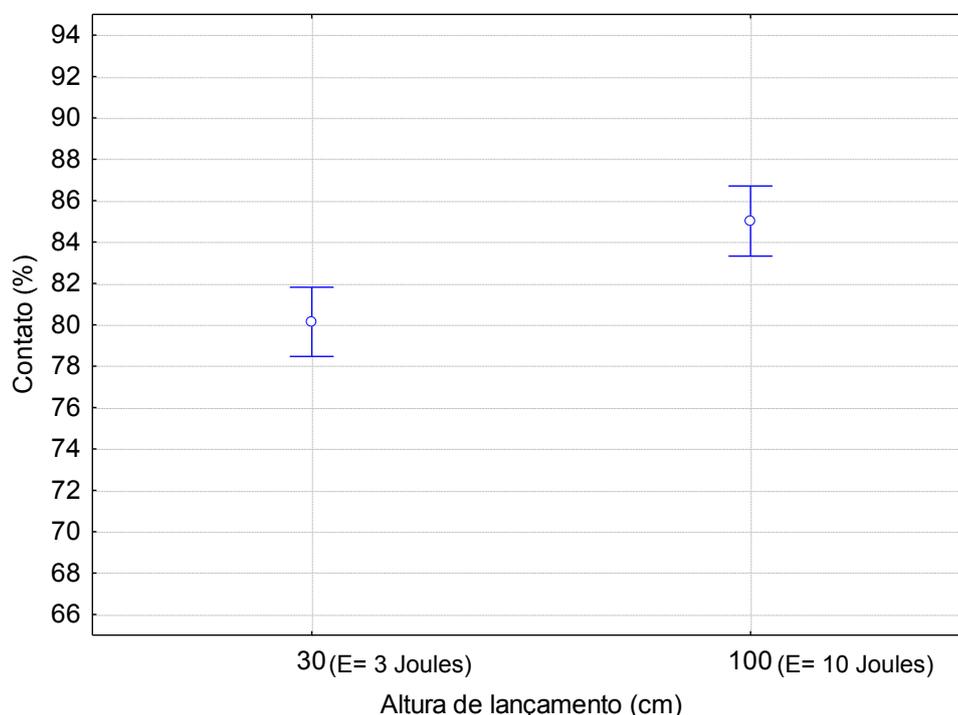


Figura 75: ANOVA da altura de lançamento sobre a área de contato

A figura 76 apresenta a ANOVA das composições granulométricas (CG) e das argamassas sobre a área de contato. A partir da análise, percebe-se que a argamassa de cimento e areia (sem cal) apresenta um comportamento linearmente crescente quanto a área de contato. Por sua vez, os proporcionamentos de argamassas com cal apresentaram comportamento distinto.

Notadamente, há uma diferença mais pronunciada de resultados de área de contato conforme se altera o pacote granulométrico dessas argamassas, principalmente na A62, ou seja, o traço 1:1:6 com a CG do agregado mais uniforme. Este comportamento é coerente com os resultados de viscosidade, anteriormente apresentados, na figura 63, já que a A62 foi a argamassa que apresentou maiores valores de viscosidade, em relação às demais argamassas avaliadas.

Uma das teorias para este comportamento consiste justamente em uma possível pior relação do pacote granulométrico desta argamassa a partir da inserção de uma granulometria uniforme com a composição de ligantes apresentada no traço, conforme discutido de maneira mais aprofundada no capítulo de resultados reológicos (6.2.2.1).

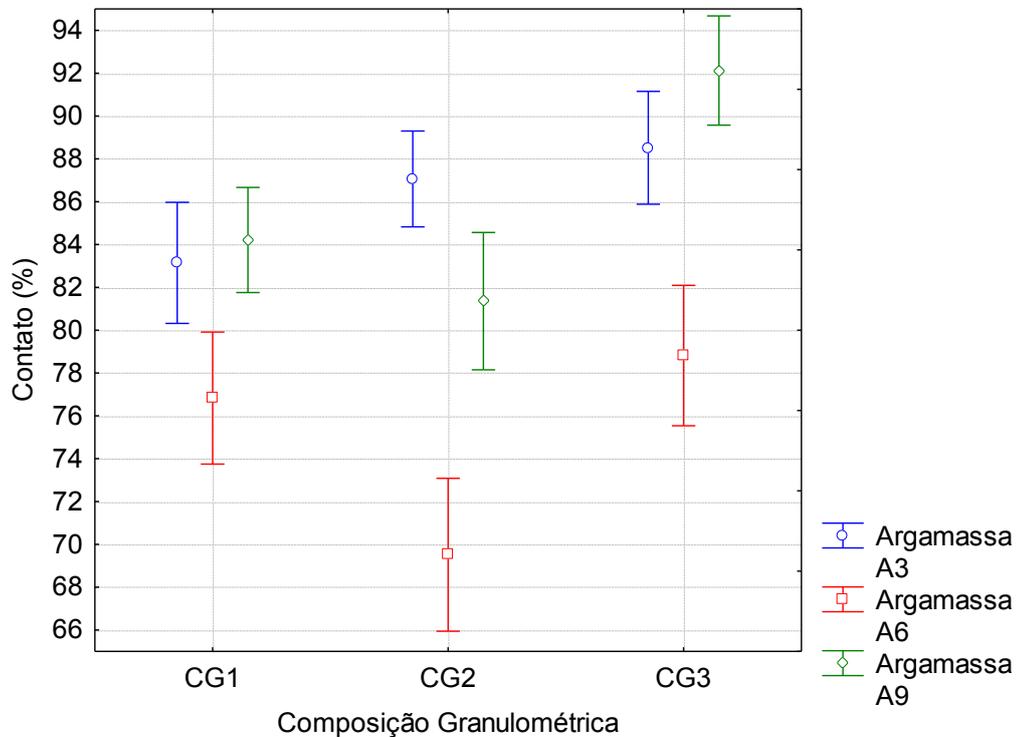


Figura 76: ANOVA da interação entre a CG e o proporcionamento da argamassa sobre a área de contato

A tabela 36 apresenta a análise múltipla de médias, pelo Método de Fisher, da interação entre o proporcionamento das argamassas e das composições granulométricas na área de contato. Nesta tabela, é possível observar que a grande maioria das argamassas apresentaram comportamentos estatisticamente diferentes entre si e, bem como já se previa através da análise da figura 76, a A62 foi a única estatisticamente diferente de todas as demais argamassas. As argamassas A3 e A9 foram estatisticamente diferentes entre si apenas quando produzidas com a CG2, nos demais casos apresentaram comportamentos estatisticamente iguais.

Tabela 36: análise múltipla de médias do proporcionamento das argamassas e da composição granulométrica sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedades avaliadas são estatisticamente iguais)

| Argamassa | Composição Granulométrica           | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-----------|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | A3 (1:0:3)<br>CG1<br>(25,25,25,25%) |       | 0,047 | 0,004 | 0,001 | 0,000 | 0,031 | 0,572 | 0,377 | 0,000 |
| 2         | A3 (1:0:3)<br>CG2<br>(10,40,40,10%) | 0,047 |       | 0,449 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,145 | 0,006 | 0,015 |
| 3         | A3 (1:0:3)<br>CG3<br>(40,10,10,40%) | 0,004 | 0,449 |       | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,068 |
| 4         | A6 (1:1:6)<br>CG1<br>(25,25,25,25%) | 0,001 | 0,000 | 0,000 |       | 0,000 | 0,323 | 0,000 | 0,027 | 0,000 |
| 5         | A6 (1:1:6)<br>CG2<br>(10,40,40,10%) | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |       | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 6         | A6 (1:1:6)<br>CG3<br>(40,10,10,40%) | 0,031 | 0,000 | 0,000 | 0,323 | 0,000 |       | 0,007 | 0,225 | 0,000 |
| 7         | A9 (1:2:9)<br>CG1<br>(25,25,25,25%) | 0,572 | 0,145 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |       | 0,154 | 0,000 |
| 8         | A9 (1:2:9)<br>CG2<br>(10,40,40,10%) | 0,377 | 0,006 | 0,000 | 0,027 | 0,000 | 0,225 | 0,154 |       | 0,000 |
| 9         | A9 (1:2:9)<br>CG3<br>(40,10,10,40%) | 0,000 | 0,015 | 0,068 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |       |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$

A ANOVA da interação entre a energia de aplicação da argamassa (altura de lançamento) e a tensão superficial dos substratos está apresentada na figura 77 e a análise múltipla de médias destas variáveis, através do Método de Fisher, está apresentada na tabela 37. Observa-se que com o aumento da energia de aplicação há igualmente um aumento na área de contato na interface argamassa/substrato, desde que exista uma tensão superficial do substrato favorável ao espalhamento, ou seja, uma tensão superficial mais baixa, como mostra o gráfico para os substratos de vidro e acrílico. Por outro lado, no momento que tem-se substrato hidrofóbico (polietileno), aplicar uma maior energia no lançamento da argamassa não necessariamente resultará em maiores áreas de contato.

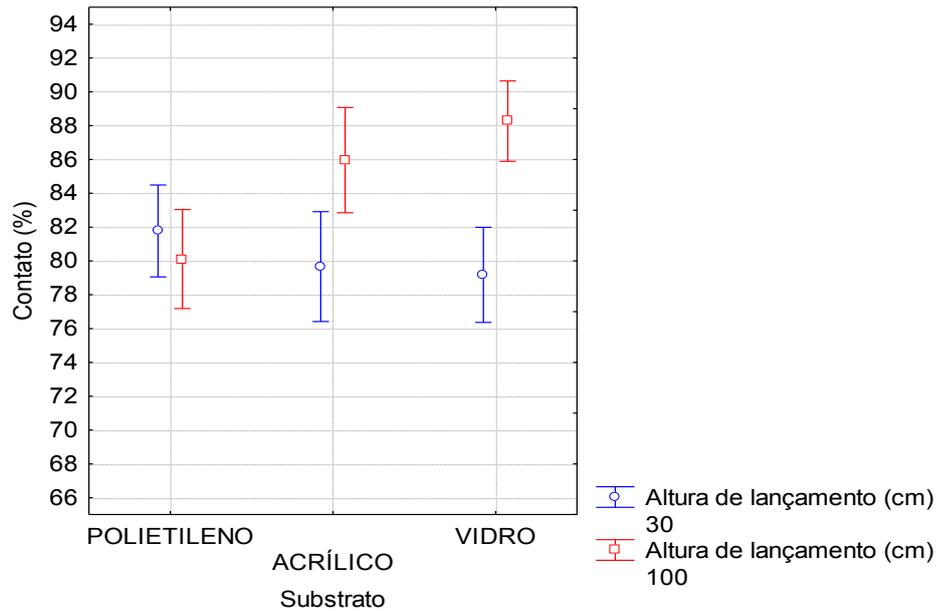


Figura 77: ANOVA da interação entre a altura de lançamento e a tensão superficial do substrato sobre a área de contato

Tabela 37: análise múltipla de médias do substrato e da altura de lançamento das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedades avaliadas são estatisticamente iguais)

|   | Substrato         | Altura de lançamento (cm) | Altura de lançamento (cm) |       |       |       |       |       |
|---|-------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   |                   |                           | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 1 | POLIETILENO (96°) | 30                        |                           | 0,432 | 0,293 | 0,042 | 0,198 | 0,001 |
| 2 | POLIETILENO (96°) | 100                       | 0,432                     |       | 0,827 | 0,005 | 0,649 | 0,000 |
| 3 | ACRÍLICO (52°)    | 30                        | 0,293                     | 0,827 |       | 0,001 | 0,801 | 0,000 |
| 4 | ACRÍLICO (52°)    | 100                       | 0,042                     | 0,005 | 0,001 |       | 0,000 | 0,251 |
| 5 | VIDRO (27°)       | 30                        | 0,198                     | 0,649 | 0,801 | 0,000 |       | 0,000 |
| 6 | VIDRO (27°)       | 100                       | 0,001                     | 0,000 | 0,000 | 0,251 | 0,000 |       |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$

A análise múltipla de médias pelo Método de Fisher permite afirmar que para a menor energia de aplicação, não houve influência da tensão superficial do substrato. Além disso, para o substrato que apresenta maior resistência ao molhamento (polietileno), aplicar a argamassa com maior energia não resulta em maiores valores de área de contato, no entanto, para substratos mais hidrofílicos, a energia maior aumenta a área de contato na interface.

A interação entre a argamassa, a composição granulométrica e o substrato, está apresentada na figura 78 e a análise múltipla de média destes parâmetros, realizada através do Método de Fisher, está apresentada na tabela 38.

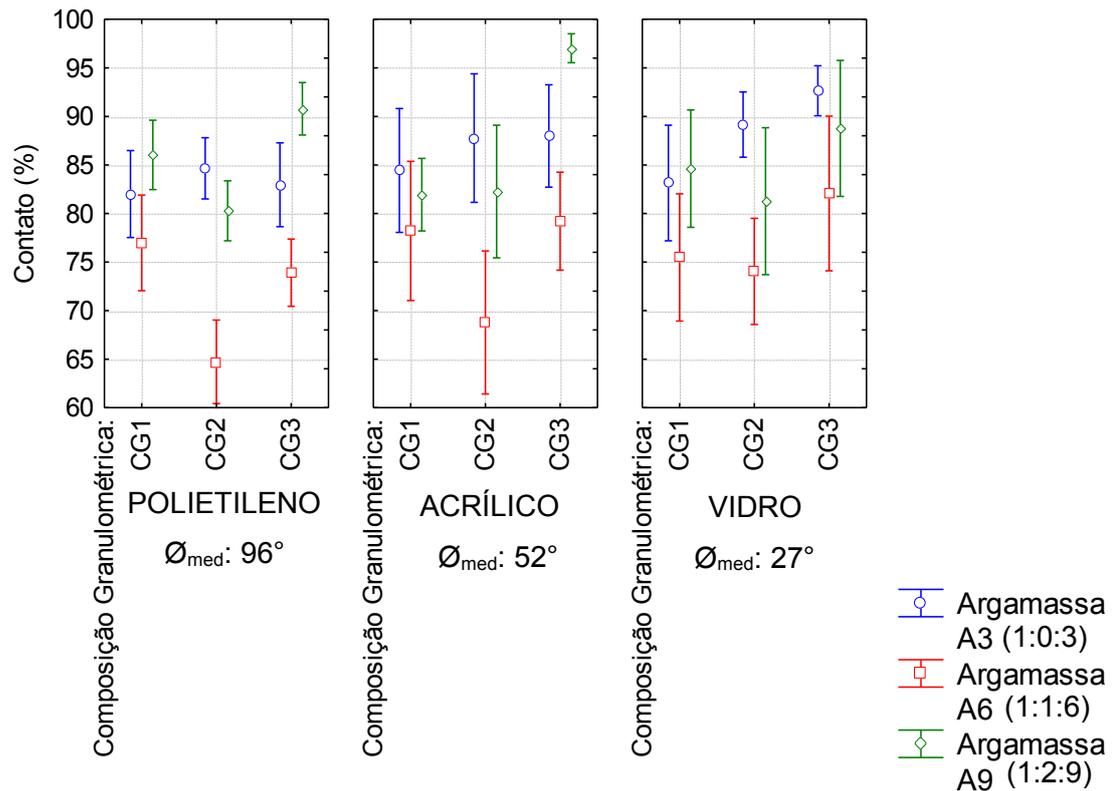


Figura 78: ANOVA da interação entre a argamassa, a composição granulométrica (CG) e o substrato sobre a área de contato

Através dos dados da figura 78, novamente, percebe-se que a argamassa A6, independentemente do substrato ou da CG tende a apresentar uma menor área de contato em relação às demais argamassas analisadas. Da mesma forma, percebe-se que a CG2, para esta argamassa, é a que apresenta os menores valores de área de contato, principalmente para o substrato mais hidrofóbico (polietileno). Entretanto, esta diferença de comportamento mais pronunciada da A62 é minimizada quando esta argamassa é colocada em contato com o substrato mais favorável ao seu espalhamento, ou seja, o substrato de vidro. Em outras palavras, pode-se afirmar que há uma tendência do substrato com melhor potencial de espalhamento da argamassa ser capaz de alterar o comportamento de argamassas pouco favoráveis (de maior viscosidade), inicialmente, quanto ao contato argamassa/substrato. Mesmo para as argamassas A3 e A9, a dispersão no comportamento quanto à área de contato é menor no substrato de vidro do que em relação aos substratos de polietileno e acrílico.

Tabela 38: análise múltipla de médias dos substratos e das composições granulométricas e das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0.05, indicam que as propriedade avaliadas são estatisticamente iguais)

| Argamassa | Composição Granulométrica | Substrato | 1           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    |
|-----------|---------------------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | A3                        | CG1       | POLIETILENO | 0,464 | 0,715 | 0,410 | 0,094 | 0,032 | 0,781 | 0,047 | 0,001 | 0,119 | 0,252 | 0,043 | 0,000 | 0,000 | 0,017 | 0,025 | 0,386 | 0,986 | 0,209 | 0,984 | 0,404 | 0,631 | 0,936 | 0,824 | 0,009 | 0,000 | 0,050 |
| 2         | A3                        | CG1       | ACRÍLICO    | 0,464 | 0,691 | 0,947 | 0,344 | 0,166 | 0,676 | 0,253 | 0,010 | 0,025 | 0,069 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,005 | 0,116 | 0,487 | 0,626 | 0,452 | 0,954 | 0,260 | 0,526 | 0,354 | 0,063 | 0,000 | 0,220 |
| 3         | A3                        | CG1       | VIDRO       | 0,715 | 0,691 | 0,631 | 0,169 | 0,064 | 0,955 | 0,098 | 0,002 | 0,050 | 0,128 | 0,015 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,009 | 0,210 | 0,738 | 0,355 | 0,700 | 0,629 | 0,415 | 0,786 | 0,561 | 0,019 | 0,000 | 0,095 |
| 4         | A3                        | CG2       | POLIETILENO | 0,410 | 0,947 | 0,631 | 0,364 | 0,174 | 0,622 | 0,267 | 0,010 | 0,018 | 0,053 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,003 | 0,092 | 0,435 | 0,664 | 0,399 | 0,991 | 0,224 | 0,472 | 0,308 | 0,065 | 0,000 | 0,231 |
| 5         | A3                        | CG2       | ACRÍLICO    | 0,094 | 0,344 | 0,169 | 0,364 | 0,693 | 0,187 | 0,947 | 0,141 | 0,002 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,013 | 0,106 | 0,615 | 0,090 | 0,348 | 0,049 | 0,120 | 0,066 | 0,393 | 0,012 | 0,785 |
| 6         | A3                        | CG2       | VIDRO       | 0,032 | 0,166 | 0,064 | 0,174 | 0,693 | 0,080 | 0,705 | 0,273 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,038 | 0,347 | 0,030 | 0,160 | 0,017 | 0,044 | 0,021 | 0,634 | 0,027 | 0,910 |
| 7         | A3                        | CG3       | POLIETILENO | 0,781 | 0,676 | 0,955 | 0,622 | 0,187 | 0,080 | 0,122 | 0,004 | 0,083 | 0,179 | 0,030 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,018 | 0,276 | 0,800 | 0,369 | 0,767 | 0,621 | 0,480 | 0,845 | 0,632 | 0,027 | 0,000 | 0,112 |
| 8         | A3                        | CG3       | ACRÍLICO    | 0,047 | 0,253 | 0,098 | 0,267 | 0,947 | 0,705 | 0,122 | 0,103 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,058 | 0,518 | 0,045 | 0,249 | 0,025 | 0,067 | 0,032 | 0,368 | 0,006 | 0,810 |
| 9         | A3                        | CG3       | VIDRO       | 0,001 | 0,010 | 0,002 | 0,010 | 0,141 | 0,273 | 0,004 | 0,103 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,032 | 0,001 | 0,008 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,558 | 0,184 | 0,240 |
| 10        | A6                        | CG1       | POLIETILENO | 0,119 | 0,025 | 0,050 | 0,018 | 0,002 | 0,000 | 0,083 | 0,000 | 0,000 | 0,710 | 0,640 | 0,001 | 0,009 | 0,375 | 0,393 | 0,486 | 0,125 | 0,005 | 0,123 | 0,015 | 0,358 | 0,111 | 0,196 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 11        | A6                        | CG1       | ACRÍLICO    | 0,252 | 0,069 | 0,128 | 0,063 | 0,007 | 0,001 | 0,179 | 0,002 | 0,000 | 0,710 | 0,409 | 0,000 | 0,004 | 0,221 | 0,243 | 0,761 | 0,258 | 0,019 | 0,260 | 0,048 | 0,574 | 0,234 | 0,369 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| 12        | A6                        | CG1       | VIDRO       | 0,043 | 0,007 | 0,015 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,030 | 0,000 | 0,000 | 0,640 | 0,409 | 0,003 | 0,033 | 0,664 | 0,662 | 0,245 | 0,048 | 0,001 | 0,045 | 0,004 | 0,182 | 0,041 | 0,081 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 13        | A6                        | CG2       | POLIETILENO | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,250 | 0,012 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 14        | A6                        | CG2       | ACRÍLICO    | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,033 | 0,250 | 0,105 | 0,146 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 15        | A6                        | CG2       | VIDRO       | 0,017 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,000 | 0,000 | 0,375 | 0,221 | 0,664 | 0,012 | 0,105 | 0,972 | 0,119 | 0,019 | 0,000 | 0,018 | 0,001 | 0,091 | 0,016 | 0,035 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 16        | A6                        | CG3       | POLIETILENO | 0,025 | 0,005 | 0,009 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 0,000 | 0,000 | 0,393 | 0,243 | 0,662 | 0,020 | 0,146 | 0,972 | 0,140 | 0,028 | 0,001 | 0,026 | 0,003 | 0,106 | 0,024 | 0,046 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 17        | A6                        | CG3       | ACRÍLICO    | 0,386 | 0,116 | 0,210 | 0,092 | 0,013 | 0,003 | 0,276 | 0,004 | 0,000 | 0,486 | 0,761 | 0,245 | 0,000 | 0,001 | 0,119 | 0,140 | 0,390 | 0,034 | 0,396 | 0,085 | 0,767 | 0,357 | 0,535 | 0,001 | 0,000 | 0,006 |
| 18        | A6                        | CG3       | VIDRO       | 0,986 | 0,487 | 0,738 | 0,435 | 0,106 | 0,038 | 0,800 | 0,058 | 0,001 | 0,125 | 0,258 | 0,048 | 0,000 | 0,000 | 0,019 | 0,028 | 0,390 | 0,230 | 0,970 | 0,430 | 0,628 | 0,952 | 0,815 | 0,011 | 0,000 | 0,058 |
| 19        | A9                        | CG1       | POLIETILENO | 0,209 | 0,626 | 0,355 | 0,664 | 0,615 | 0,347 | 0,369 | 0,518 | 0,032 | 0,005 | 0,019 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,034 | 0,230 | 0,202 | 0,649 | 0,109 | 0,255 | 0,150 | 0,153 | 0,002 | 0,428 |
| 20        | A9                        | CG1       | ACRÍLICO    | 0,984 | 0,452 | 0,700 | 0,399 | 0,090 | 0,030 | 0,767 | 0,045 | 0,001 | 0,123 | 0,280 | 0,045 | 0,000 | 0,000 | 0,018 | 0,026 | 0,396 | 0,970 | 0,202 | 0,393 | 0,643 | 0,921 | 0,839 | 0,008 | 0,000 | 0,048 |
| 21        | A9                        | CG1       | VIDRO       | 0,404 | 0,954 | 0,629 | 0,991 | 0,348 | 0,160 | 0,621 | 0,249 | 0,008 | 0,015 | 0,048 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,085 | 0,430 | 0,649 | 0,393 | 0,218 | 0,468 | 0,301 | 0,067 | 0,000 | 0,217 |
| 22        | A9                        | CG2       | POLIETILENO | 0,631 | 0,260 | 0,415 | 0,224 | 0,049 | 0,017 | 0,480 | 0,025 | 0,000 | 0,358 | 0,574 | 0,182 | 0,000 | 0,001 | 0,091 | 0,106 | 0,767 | 0,628 | 0,109 | 0,643 | 0,218 | 0,589 | 0,788 | 0,005 | 0,000 | 0,026 |
| 23        | A9                        | CG2       | ACRÍLICO    | 0,936 | 0,526 | 0,786 | 0,472 | 0,120 | 0,044 | 0,845 | 0,067 | 0,001 | 0,111 | 0,234 | 0,041 | 0,000 | 0,000 | 0,016 | 0,024 | 0,357 | 0,952 | 0,255 | 0,921 | 0,468 | 0,589 | 0,769 | 0,013 | 0,000 | 0,066 |
| 24        | A9                        | CG2       | VIDRO       | 0,824 | 0,354 | 0,561 | 0,308 | 0,066 | 0,021 | 0,632 | 0,032 | 0,000 | 0,196 | 0,369 | 0,081 | 0,000 | 0,000 | 0,035 | 0,046 | 0,535 | 0,815 | 0,150 | 0,839 | 0,301 | 0,788 | 0,769 | 0,006 | 0,000 | 0,034 |
| 25        | A9                        | CG3       | POLIETILENO | 0,009 | 0,063 | 0,019 | 0,065 | 0,393 | 0,634 | 0,027 | 0,368 | 0,558 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,011 | 0,153 | 0,008 | 0,057 | 0,005 | 0,013 | 0,006 | 0,078 | 0,567 |       |
| 26        | A9                        | CG3       | ACRÍLICO    | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,027 | 0,000 | 0,006 | 0,184 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,024 |
| 27        | A9                        | CG3       | VIDRO       | 0,050 | 0,220 | 0,095 | 0,231 | 0,785 | 0,910 | 0,112 | 0,810 | 0,240 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,058 | 0,428 | 0,048 | 0,217 | 0,026 | 0,066 | 0,034 | 0,567 | 0,024 |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator p> 0,05

Os resultados obtidos nesta análise vão ao encontro das afirmações realizadas pelos pesquisadores Randive e Dalal (2014) que, ao estudar a molhabilidade de superfícies e a viscosidade de soluções, corroboram que a alta viscosidade e a hidrofobicidade resultam em menor área de contato.

A interação entre a argamassa, a altura de lançamento e o substrato está apresentada na figura 79 e a análise múltipla de média destes parâmetros, realizada através do Método de Fisher está apresentada na tabela 39. Para o polietileno, substrato hidrofóbico, o efeito da altura de lançamento não apresentou-se significativo, sugerindo que para substratos que dificultam o molhamento, o efeito da tensão superficial do substrato é mais significativo do que a energia de lançamento para o desenvolvimento da área de contato na interface argamassa/substrato. Para o substrato de acrílico e de vidro, há claramente uma influência maior por parte da energia de lançamento, exceção feita a argamassa A9, onde o substrato de acrílico teve um comportamento similar ao de polietileno.

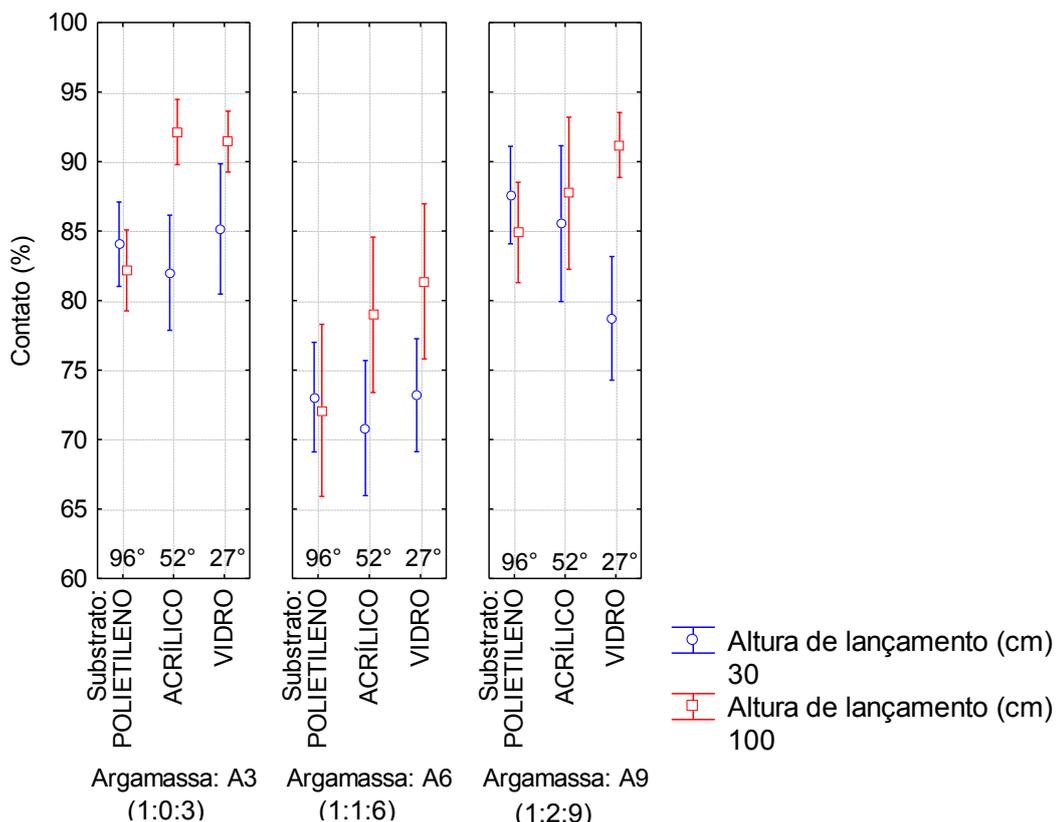


Figura 79: ANOVA da interação entre a argamassa, a altura de lançamento e o substrato sobre a área de contato

Tabela 39: análise múltipla de médias do substrato, da altura de lançamento e do proporcionamento das argamassas sobre a área de contato (valores acima de 0,05, indicam que as propriedades avaliadas são estatisticamente iguais)

| Argamassa | Substrato | Altura de lançamento (cm) |     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-----------|---------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           |           |                           | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |       |       |
| 1         | A3        | POLIETILENO               | 30  |       | 0,503 | 0,436 | 0,003 | 0,675 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,055 | 0,000 | 0,330 | 0,208 | 0,756 | 0,572 | 0,204 | 0,048 | 0,010 |       |
| 2         | A3        | POLIETILENO               | 100 | 0,503 |       | 0,952 | 0,001 | 0,288 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,256 | 0,002 | 0,787 | 0,069 | 0,347 | 0,230 | 0,069 | 0,227 | 0,002 |       |
| 3         | A3        | ACRÍLICO                  | 30  | 0,436 | 0,952 |       | 0,000 | 0,231 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,251 | 0,001 | 0,822 | 0,047 | 0,290 | 0,180 | 0,048 | 0,222 | 0,001 |       |
| 4         | A3        | ACRÍLICO                  | 100 | 0,003 | 0,001 | 0,000 |       | 0,010 | 0,794 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,113 | 0,010 | 0,015 | 0,133 | 0,000 | 0,738 |       |
| 5         | A3        | VIDRO                     | 30  | 0,675 | 0,288 | 0,231 | 0,010 |       | 0,016 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,169 | 0,385 | 0,927 | 0,884 | 0,373 | 0,017 | 0,028 |       |
| 6         | A3        | VIDRO                     | 100 | 0,005 | 0,001 | 0,000 | 0,794 | 0,016 |       | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,165 | 0,016 | 0,023 | 0,192 | 0,000 | 0,927 |       |
| 7         | A6        | POLIETILENO               | 30  | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |       | 0,754 | 0,435 | 0,036 | 0,961 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,048 | 0,000 |
| 8         | A6        | POLIETILENO               | 100 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,754 |       | 0,663 | 0,018 | 0,710 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,025 | 0,000 |
| 9         | A6        | ACRÍLICO                  | 30  | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,435 | 0,663 |       | 0,003 | 0,387 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 |
| 10        | A6        | ACRÍLICO                  | 100 | 0,055 | 0,256 | 0,251 | 0,000 | 0,020 | 0,000 | 0,036 | 0,018 | 0,003 |       | 0,032 | 0,380 | 0,002 | 0,031 | 0,013 | 0,003 | 0,923 | 0,000 |       |
| 11        | A6        | VIDRO                     | 30  | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,961 | 0,710 | 0,387 | 0,032 |       | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,044 | 0,000 |       |
| 12        | A6        | VIDRO                     | 100 | 0,330 | 0,787 | 0,822 | 0,000 | 0,169 | 0,000 | 0,005 | 0,002 | 0,000 | 0,380 | 0,004 |       | 0,034 | 0,216 | 0,130 | 0,034 | 0,339 | 0,001 |       |
| 13        | A9        | POLIETILENO               | 30  | 0,208 | 0,069 | 0,047 | 0,113 | 0,385 | 0,165 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,034 |       | 0,355 | 0,464 | 0,966 | 0,002 | 0,216 |       |
| 14        | A9        | POLIETILENO               | 100 | 0,756 | 0,347 | 0,290 | 0,010 | 0,927 | 0,016 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,031 | 0,000 | 0,216 | 0,355 |       | 0,817 | 0,345 | 0,027 | 0,028 |       |
| 15        | A9        | ACRÍLICO                  | 30  | 0,572 | 0,230 | 0,180 | 0,015 | 0,884 | 0,023 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,013 | 0,000 | 0,130 | 0,464 | 0,817 |       | 0,449 | 0,012 | 0,040 |       |
| 16        | A9        | ACRÍLICO                  | 100 | 0,204 | 0,069 | 0,048 | 0,133 | 0,373 | 0,192 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,000 | 0,034 | 0,966 | 0,345 | 0,449 |       | 0,002 | 0,245 |       |
| 17        | A9        | VIDRO                     | 30  | 0,048 | 0,227 | 0,222 | 0,000 | 0,017 | 0,000 | 0,048 | 0,025 | 0,004 | 0,923 | 0,044 | 0,339 | 0,002 | 0,027 | 0,012 | 0,002 |       | 0,000 |       |
| 18        | A9        | VIDRO                     | 100 | 0,010 | 0,002 | 0,001 | 0,738 | 0,028 | 0,927 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,216 | 0,028 | 0,040 | 0,245 | 0,000 |       |       |

\*Os itens sombreados correspondem aos valores não significativos, ou seja, fator  $p > 0,05$ .

Já que se observou, nas análises de variância e nas análises múltiplas de média, haver uma relação inversa de comportamento entre viscosidade e área de contato, confeccionou-se um gráfico com essas duas variáveis para cada substrato e altura de lançamento (figura 80). Neste gráfico ficou ainda mais evidente que a área de contato tende a ser inversamente proporcional aos valores de viscosidade, ou seja, quanto maior a viscosidade, menor a área de contato argamassa/substrato, para a faixa de viscosidades estudadas nesta pesquisa. Entretanto, cabe salientar que não pode-se generalizar este comportamento para qualquer tipo de argamassa, pois deve-se considerar que argamassas extremamente fluidas e pouco viscosas não são adequadas para o uso e lançamento como revestimento nos diversos substratos e poderão inverter esta curva de tendência, seja por questões de segregação, seja por escorrimento junto às superfícies. Esta informação requer um estudo mais amplo no âmbito de compreender até que ponto a curva viscosidade x área de contato se estabiliza e até qual viscosidade mínima a área de contato para de aumentar e passa a diminuir, para cada tensão superficial e energia de aplicação.

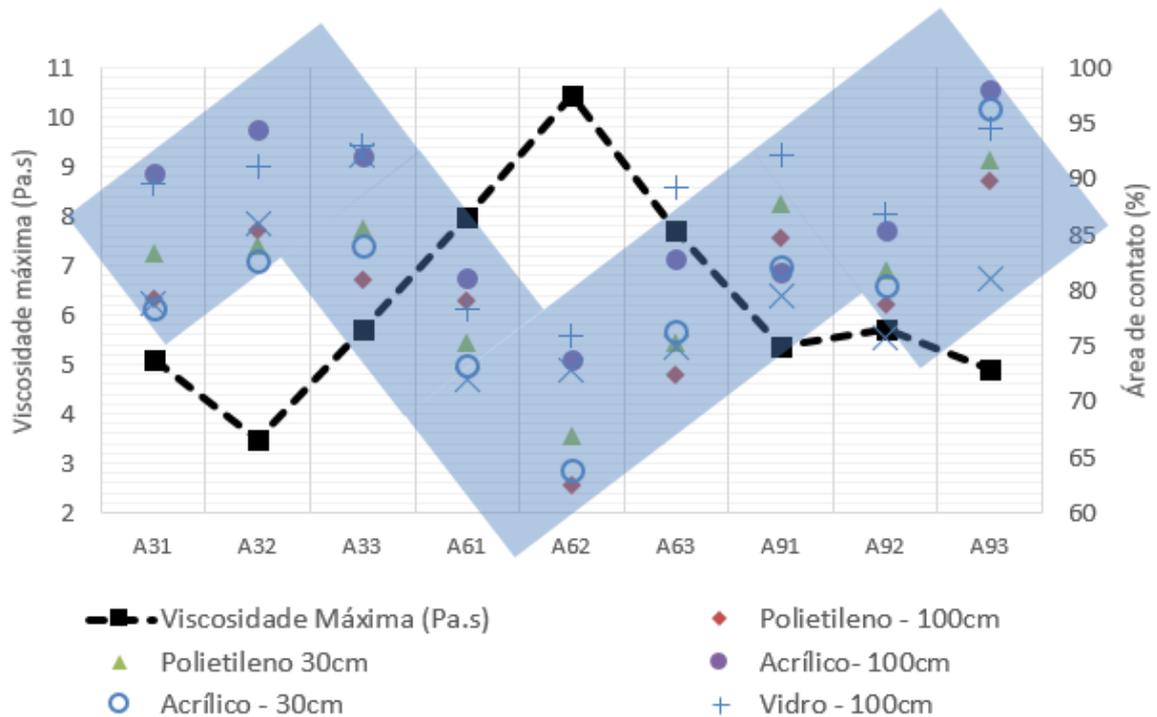
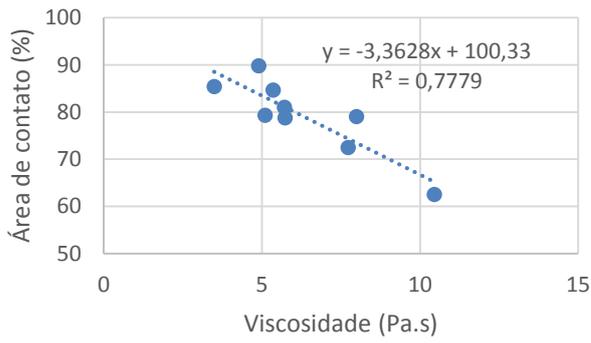


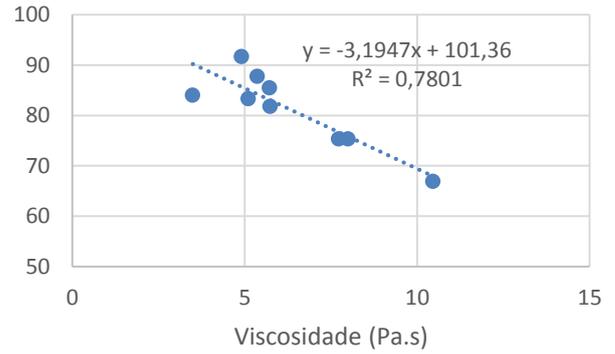
Figura 80: relação entre a viscosidade máxima e a área de contato das argamassas com os diversos substratos aplicados com as energias de aplicação propostas, quais sejam: polietileno – 100cm; polietileno – 30cm; acrílico - 100cm; acrílico – 30cm; vidro – 100cm; vidro – 30cm

Verificada a correlação entre a viscosidade e a área de contato, confeccionaram-se gráficos de dispersão com os valores obtidos para cada uma das interações argamassa/substrato/altura de lançamento, visando verificar o valor do coeficiente de correlação para cada caso (figura 81). Cada um dos pontos dos gráficos refere-se a uma argamassa estudada (A31, A32, A33, A61, A62, A63, A91, A92 e A93).

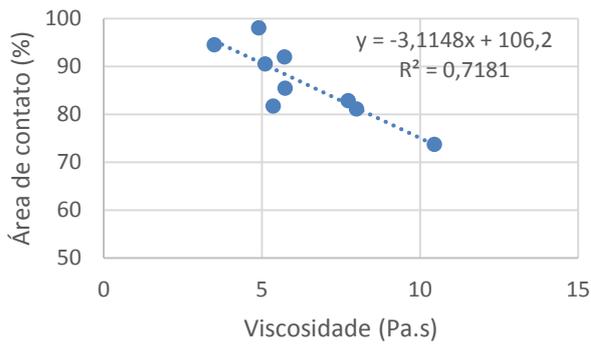
Os coeficientes de correlação obtidos para o substrato de polietileno (hidrofóbico) foram muito bons para uma linha de tendência linear, de forma que a correlação pode ser considerada válida. Quanto maior o grau de hidrofilicidade dos substratos, menor foi o coeficiente de correlação alcançado.



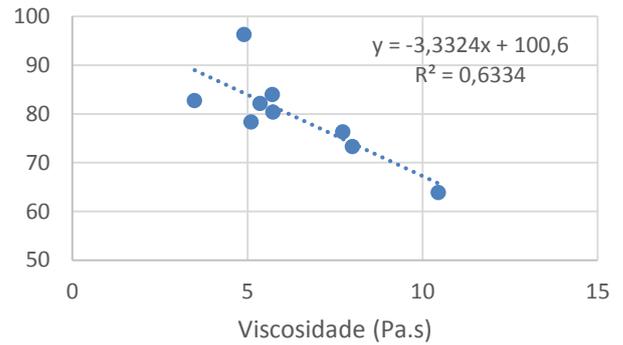
a) polietileno (96°) – 100cm



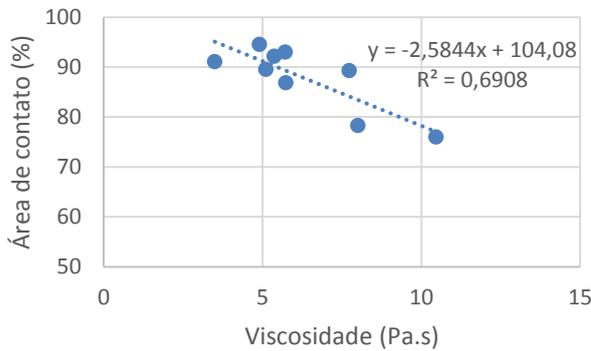
b) polietileno (96°) – 30cm



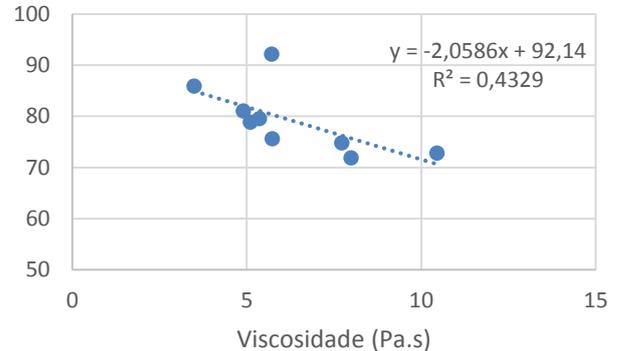
c) acrílico (52°) – 100cm



d) acrílico (52°) - 30cm



e) vidro (27°) – 100cm



f) vidro (27°) – 30cm

Figura 81: dispersão de valores, correlacionando área de contato com viscosidade: a) para o substrato de polietileno, lançada a 100cm de altura; b) para o substrato de polietileno, lançada a 30cm de altura; c) para o substrato de acrílico, lançada a 100cm de altura; d) para o substrato de acrílico, lançada a 30cm de altura; e) para o substrato de vidro, lançada a 100cm de altura; f) para o substrato de vidro, lançada a 30cm de altura

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a influência da reologia da argamassa, da tensão superficial dos substratos e da energia de aplicação na formação da área de contato na interface argamassa/substrato. Para tal, foram produzidas argamassas de proporcionamentos 1:0:3 (A3), 1:1:6 (A6) e 1:2:9 (A9), confeccionadas com três diferentes composições granulométricas cada (CG1, CG2 e CG3). As argamassas foram lançadas sobre três substratos não porosos e não rugosos com três diferentes tensões superficiais: um hidrofílico, um intermediário e um hidrofóbico, com o auxílio de uma caixa de queda com alturas de 30cm e 100cm. Posteriormente, as interfaces entre estas argamassas e os substratos foram medidas com o auxílio de scanner tridimensional a laser, através de metodologia desenvolvida neste trabalho.

A tabela 40 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos nesta pesquisa. Nela, pode-se observar que as argamassas produzidas com o proporcionamento 1:1:6 (A6) foram as que apresentaram maiores valores de viscosidade máxima, medida através da reometria rotacional e, conseqüentemente, apresentaram menores porcentagens de área de contato para as duas alturas de lançamento estudadas.

Com relação às alturas de lançamento, pode-se observar que no substrato que oferece maior resistência ao molhamento (polietileno), aumentar a energia de aplicação da argamassa não aumentou a área de contato na interface. No entanto, para os substratos mais hidrofílicos (acrílico e vidro), percebe-se um aumento da área de contato na interface com o aumento da energia de lançamento das argamassas.

Por fim, é possível observar que houve uma interação entre o proporcionamento das argamassas e as composições granulométricas, de forma que a quantidade de finos, o coeficiente de uniformidade e a quantidade de grãos de diferentes tamanhos influenciou no empacotamento das misturas e exerceu influência sobre a facilidade ou não das argamassas espalharem-se sobre os substratos.

A seguir, apresentam-se as conclusões obtidas ao final desta pesquisa, ressaltando-se que estas se referem aos materiais e condições laboratoriais utilizados neste trabalho, bem como a suas quantidades e forma de execução, não podendo ser tomados de forma absoluta.

Tabela 40: resumo dos principais resultados obtidos na pesquisa

|                           | A3 (1:0:3)      |                     |                     | A6 (1:1:6)      |                     |                     | A9 (1:2:9)          |                     |                     |
|---------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Argamassa                 | A3 (1:0:3)      |                     |                     | A6 (1:1:6)      |                     |                     | A9 (1:2:9)          |                     |                     |
| CG                        | 1 (25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) | 1 (25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) | 1 (25, 25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) |
| Viscosidade máxima (Pa.s) | 5,1             | 3,49                | 5,71                | 8               | 10,46               | 7,73                | 5,36                | 5,73                | 4,9                 |
| Substrato                 | POL ACR VID     | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID     | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         |
| Altura de queda (cm)      | 30              |                     |                     |                 |                     |                     |                     |                     |                     |
| Área de contato média (%) | 83              | 78                  | 79                  | 84              | 83                  | 86                  | 86                  | 84                  | 92                  |
|                           | 75              | 73                  | 72                  | 67              | 64                  | 73                  | 75                  | 76                  | 75                  |
|                           | 88              | 82                  | 80                  | 82              | 80                  | 82                  | 80                  | 76                  | 92                  |
|                           | 81              | 96                  | 96                  | 81              | 81                  | 96                  | 96                  | 81                  | 81                  |
| Argamassa                 | A3 (1:0:3)      |                     |                     | A6 (1:1:6)      |                     |                     | A9 (1:2:9)          |                     |                     |
| CG                        | 1 (25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) | 1 (25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) | 1 (25, 25, 25, 25%) | 2 (10, 40, 40, 10%) | 3 (40, 10, 10, 40%) |
| Viscosidade máxima (Pa.s) | 5,1             | 3,49                | 5,71                | 8               | 10,46               | 7,73                | 5,36                | 5,73                | 4,9                 |
| Substrato                 | POL ACR VID     | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID     | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         | POL ACR VID         |
| Altura de queda (cm)      | 100             |                     |                     |                 |                     |                     |                     |                     |                     |
| Área de contato média (%) | 79              | 91                  | 90                  | 85              | 95                  | 91                  | 81                  | 92                  | 93                  |
|                           | 79              | 81                  | 78                  | 63              | 74                  | 76                  | 72                  | 83                  | 89                  |
|                           | 85              | 82                  | 92                  | 79              | 85                  | 87                  | 90                  | 98                  | 95                  |

Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento.

## 7.1 CONCLUSÕES

Através dos resultados é possível tecer algumas considerações com relação ao tema de tese de doutorado proposto:

- a) A metodologia desenvolvida para medição da área de contato através do uso de scanner tridimensional a laser foi satisfatória, gerando valores coerentes e com coeficientes de variação bastante baixos;
- b) todas as variáveis propostas nesta pesquisa, quando analisadas isoladamente, exerceram influência estatisticamente significativa no desenvolvimento da área de contato na interface argamassa/substrato. Através da análise estatística pode-se concluir que, para os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa, o proporcionamento das argamassas foi a variável que mais influenciou na área de contato, seguida pela altura de lançamento, a composição granulométrica do agregado e, por fim, a tensão superficial do substrato;
- c) maiores energias de aplicação resultam em maiores áreas de contato desde que a tensão superficial do substrato seja favorável ao espalhamento (substratos hidrofílicos). A tensão superficial dos substratos hidrofóbicos exerce maior influência sobre os valores de área de contato do que a energia de aplicação, de forma que se o substrato não for favorável ao espalhamento, de nada adianta o aumento da energia de aplicação;
- d) granulometrias mais uniformes tendem a não ser tão favoráveis ao escoamento das argamassas de revestimento, o que prejudica o desenvolvimento da área de contato, necessitando um estudo mais aprofundado de seu pacote granulométrico;
- e) os ligantes exercem influência no pacote granulométrico das argamassas, sendo que de nada adianta se estudar e compor o empacotamento apenas dos agregados. Os finos adicionados às misturas exerceram grande influência na viscosidade e escoamento das argamassas avaliadas;
- f) há uma tendência de relação inversa entre a viscosidade e a porcentagem de área de contato, sendo que viscosidades muito altas reduzem a porcentagem de contato na interface. Viscosidades mais baixas tendem a aumentar a área de contato, até certo limite, tema que merece estudo específico.

Cabe salientar que este trabalho não visa criar, até o momento, correlações entre a resistência de aderência e a área de contato entre os elementos, uma vez que esta propriedade não está sendo avaliada. Entretanto, criam-se condições necessárias para a discussão a respeito do melhor entendimento dos fatores que influenciam no desenvolvimento da resistência de aderência dos sistemas de revestimento, entre eles o desenvolvimento da área de contato, criando a perspectiva

de continuidade através de trabalhos que avaliem a relação entre a resistência de aderência de revestimentos e os parâmetros aqui estudados, em condições de contorno semelhantes.

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho visou avaliar os principais parâmetros que influenciam na formação da área de contato na interface argamassas/substrato. Os resultados obtidos ficaram limitados às variáveis controláveis propostas, sendo que durante a realização da pesquisa, alguns novos questionamentos surgiram, podendo estes serem aplicados em temas de pesquisas futuras:

- a) estudar a influência dos ligantes e adições no empacotamento de materiais cimentícios;
- b) avaliar a influência do empacotamento dos grãos na viscosidade das argamassas através de reometria rotacional;
- c) avaliação de uma gama maior de argamassas, abrangendo um intervalo maior de viscosidades, visando construir a curva viscosidade vs. área de contato, e entender os limites em que incrementar a energia não aumenta necessariamente a área de contato;
- d) avaliar a influência de uma gama maior de energias de aplicação na área de contato na interface argamassa/substrato;
- e) avaliar a influência de uma gama maior de substratos com um maior intervalo de tensões superficiais na área de contato na interface argamassa/substrato;
- f) relacionar a área de contato da interface argamassa/substrato com a resistência de aderência à tração de argamassas;
- g) avaliar a influência do teor de cal na reologia de argamassas;
- h) estudar a influência do potencial zeta na aglomeração de partículas de diferentes proporcionamentos de argamassa de cimento e cal.

## REFERÊNCIAS

ADAMSON, A. W.; GAST, A.P. Physical Chemistry of Surfaces. 6e. New York: John Wiley e Sons Inc., 1997. 808p.

AGUILAR, M. T. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2º Ed. G.C. Isaia, cap. 7 – São Paulo: IBRACON, 2010.

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do CAA: Produção de pré-fabricados**. EPUSP, 2008.

ALHANATI, L. S. Disponível em: [http://alfaconnection.net/pag\\_avsf/fqm0101.htm](http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0101.htm). Acesso em 11/03/13.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento - b**. 2002. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, Brasília.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. 187p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G.; BRÜMMER, M.; VILES, H. A chemical, morphological and mineralogical study on the interaction between hemp hurds and aerial and natural hydraulic lime particles: Implications for mortar manufacturing. In: **Construction and Building Materials**, 75,02015,0375-384.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278**: Argamassa parra assentamento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279**: Argamassa parra assentamento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13749**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 15839**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 47: 02**: Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. [s. l.], 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. [s. l.], 2001.

BANDEIRA, A. F. D. Caracterização de argamassas de cal aérea e de cal hidráulica natural com metacaulino – Evolução com a Idade. 2012, 172 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

BANFILL, P. F. G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. In: International Cement Chemistry Congress, 11., 2003, Duban. **Anais...** Duban, 2003.

BARNES, H. A.; NGUYEN, Q. D. Rotating vane rheometry – a review. In.: **Jornal of non-Newtonian fluid mechanics**. 98, 2001, 1-14.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades**. Brasília: LEM-UnB; Sinduscon, 2005. 92 p.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A.; SILVA, F. G. S. Study of the laboratory Vane test on mortars. In: **Building and Environment**, 42, 2007, 86-92.

BENABED, B.; KADRI, E.; AZZOUZ, L.; KENAI, S. Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. In: **Cement e Concrete Composites**, 34, 2012, p. 1167-1173.

BENTZ, D. P.; FERRARIS, C. F.; GALLER, M. A.; HANSEN, A. S.; GUYNN, J. M. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement–fly ash pastes. In: **Cement and Concrete Research**, 42 (2), 2012, p. 404–409.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 211p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BETIOLI, A. M., JOHN, V. M., GLEIZE, P. J. P., PILEGGI, R. G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. In: **Ambiente Construído**, v. 9, n 4, 2009, 37-38.

BONIN, L. C., FEUERHARMEL, C., CARNEIRO, A. M. P. Estudo da influência da distribuição granulométrica da areia na trabalhabilidade da argamassa. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 3. 1999. Vitória. **Anais...** Vitória: SBTA, 1999.

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

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: SBTA, 2001.

CARASEK, H. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2º Ed. G.C. Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2010.

CARASEK, H.; JAPIASSÚ, P.; CASCUDO, O.; VELOSA, A. Bond between 19h century lime mortars and glazed ceramic tiles. In: **Construction and Building Materials**, 59, 2014, 85–98.

CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. 158 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de *squeeze-flow*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6. International Symposium on Mortars Technology, 1. 2005. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBTA, 2005, p. 121-143.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A. Dosagem de argamassas através de curvas granulométricas, **Boletim Técnico BT/PCC/237**, São Paulo, 1999.

CASTRO, A. L. De. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 f. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

CERVO, A. L.; BERVIAN, A. **Metodologia Científica**. 5 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 242p.

CINCOTTO, M.; RAGO, F. A reologia da pasta de cimento e a influência da cal. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, 1., 1995. Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBTA, 1995.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. 2002, 104 p. Disponível em: <http://www.comunidadeconstrucao.com.br/ativos/279/manual-de-revestimentos-de-argamassa.html>. Acesso em: 22/12/2014.

CORRERA, T.C. Estabilidade Coloidal. Disponível em: [www.usp.br/massa/2013/qfl2452/pdf/EstabilidadeColoidal.pdf](http://www.usp.br/massa/2013/qfl2452/pdf/EstabilidadeColoidal.pdf). Acesso em: 25/02/15.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. 2006. 131 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia e Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

COSTA, E. B. C, JOHN, V. M. Efeito da absorção do substrato na aderência. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, 10, 2013. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBTA, 2013.

COURARD, L. Contribution to the analysis of the parameters affecting creation of an interface between the concrete and repair system. Palatability and adhesion: a cause and effect link. **PhD thesis**, 1998, University of Liege, Department Argenco, Liège (In French).

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. 2004. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília.

DUTRA, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. 2007. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

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

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concretos de altíssimo desempenho**. 2005. 285 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.

FOX, R. **Introduction to fluid mechanics**. 6<sup>a</sup>.ed. John Wiley e Sons, 2004.

FRANÇA, M. S; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Avaliação do comportamento de mistura de argamassas através de reometria rotacional. In: **Ambiente construído**, v. 12, n. 2, 2012, 165-174.

GIRDEN, E. R. ANOVA, **Repeated Measures**. Newbury Park, 1992. 153p

GONÇALVES, S.R.C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos de argamassa – estudo de caso**. 2004. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

GROOOT, C., LARBI, J. The influence of water flow (reversal) on bond strength development in young masonry. In: **HERON**, v. 44, n. 2, 1999.

HACKLEY, V. A., FERRARIS, C. F. **The use of nomenclature in dispersion Science and technology**. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2001. Special publications, 945-046.

HALL, C. Water movement in porous building materials- I. Unsaturated flow theory and its applications. In.: **Building and Environment**, 12, 1977, 117-125.

HALL, C., YAU, M. H. R. Water movement in porous building materials – IX. The water absorption and sorptivity of concretes. In.: **Building and Environment**, 22, 1987, 77-82.

HANSEN, F. K. The measurement of surface energy of polymer by means of contact angles of liquids on solid surfaces: A short overview of frequently used methods. Disponível em: [http://www.ramehart.com/surface\\_energy\\_finn.pdf](http://www.ramehart.com/surface_energy_finn.pdf). Acesso em: 03/07/13.

HIBBELER, R. C. Dinâmica – Mecânica para Engenheiros. 12 ed. Editora Person, 608 p, 2011.

HOPPE FILHO, J.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de concretos. In.: **Revista Concreto e Construções**. Ed. IBRACON, n. 47. São Paulo, p. 108 – 124, 2007.

JOHN, V. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, 5, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBTA, 2003.

KASHANI, A.; NICOLAS, R. S.; QIAO, G. G.; VAAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L. Modelling the yield stress of ternary cement–slag–fly ash pastes based on particle size distribution. In: **Powder Technology**, 266; 2014, p. 203–209.

KAZMIERCZAK, C. S., BREZEZINSKI, D. E., COLLATTO, D. Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa. **Estudos tecnológicos**. vol. 3, n° 1, 2007, p 47-58.

KINDLEIN JR., W., FLORES, A. B. H., STOLZ, C. M., ALVES, A. K. Biônica e design de superfície: Influência da textura na molhabilidade de superfícies naturais e artificiais. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 10, 2012, São Luís. **Anais...** São Luiz, P&D Design, 2012.

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

KIRYU, H. S. Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-Newtonianos. 2006, 213 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

KOEHLER, E. P.; FOWLER, D. W. Summary of concrete workability test methods. **Technical Report**, ICAR 105-1, 2003, University of Texas, Austin, 93 p. European Mortar Industry Organization. **Technical dictionary**. 3ed. 22p. 2001.

KIRYU, H. S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**. 2006. 213 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

LANAS, J.; ALVAREZ-GALINDO, J.I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. In: **Cement and Concrete Research**, v 33, issue 11, 2003, 1867-1876.

LANAS, J.; BERNAL, J. L. P.; BELLO, M. A.; ALVAREZ, J. I. Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. In: **Cement and Concrete Research**, v 36, 2006, 951-960.

LEE, S. H.; KIM, H. J.; SAKAI, E.; DAIMON, M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. In: **Cement and Concrete Research**, 33 (5), 2003, p. 763–768.

MACHADO, J. C. **Reologia e Escoamento de Fluidos – Ênfase na Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro, Ed. Interciências, 2002, 257p.

MAHABOONPACHAI, T.; KUROMIYA, Y.; MATSUMOTO, T. Experimental investigation of adhesion of the interface between concrete and polymer-cement mortar in external wall tile structure under a thermal load. In: **Construction and Building Materials**, 22, 2008, 2001-2006.

MALKIN, A. Y., ISAYEV, A. I. **Rheology: Concepts, Methods, e Applications**. 1ª ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2001, 473 p.

MARANHÃO, F. L.; COSTA E SILVA, A. J.; MEDEIROS, J. S.; BARROS, M. M. S. B. Influência do tipo de argamassa colante e do revestimento na microestrutura e na resistência de aderência. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, 5., 2003, São Paulo. **Anais...**São Paulo: SBTA, 2003.

MASSOD, I., AGARWAL, S. K. Effect of various superplasticizers on rheological properties of cement paste and mortars. In: **Cement and Concrete Research**, 24, 1994, p. 291-302.

MENDES, T. M. Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas. 2008, 122p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NASCIMENTO, C. R. Ensaio em reômetros rotacional tipo cilindros coaxiais. **Comunicação técnica**, CT2007-081-00, 2007, Rio de Janeiro, 26 p.

OLHARNANO, Disponível em:

<http://www.olharnano.com/artigos/4001/63001/O%20efeito%20L%C3%B3tus>. Acesso em: 07/jul/2013.

OLHERO, S. M.; FERREIRA, J. M. F. Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions. In: **Powder Technology**, 139, 2004, p. 69– 75.

OLIVEIRA, N. M. de; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Estudo de desempenadeiras alternativas para aplicação de chapisco colante. In: Simpósio Brasileiro de tecnologia das argamassas, 8., 2009, Curitiba. **Anais...**Curitiba: SBTA, 2009.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação.** 2004, 265. Tese (doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília.

PAGNUSSAT, D. T. Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa. 2013, 216 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PAGNUSSAT, D. T.; MASUERO, A. B. Avaliação da aderência de revestimentos de argamassa aplicados em substratos cerâmicos com diferentes condições superficiais. In.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4, 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBTA, 2011.

PAIVA, H., SEABRA, M. P., LABRINCHA, J. A., FERREIRA, V. M. Efeito da natureza do ligante no comportamento em fresco de uma argamassa de reabilitação. At.: Congresso Nacional de Argamassas de Construção (APFAC), 2., 2007, Lisboa. **Anais...** Lisboa, 2007.

PALMA, Ernani Sales. **Metrologia.** Apostila. Mecatrônica e Engenharia Mecânica. PUC Minas. 2006. pg. 110-121.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. Lime-cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. In: **Construction and Building Materials**, 75, 2015, 306-314.

PARAVISI, S. Avaliação de sistemas de produção de revestimentos de fachada com aplicação mecânica e manual de argamassa, 2008, 179 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. In.: **Cerâmica**, 56, 2010, 237-243.

PRETTO, M.E.J. **Influência da rugosidade gerada pelo tratamento superficial do substrato de concreto na aderência do revestimento em argamassa.** 2007. 180 p. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRUDÊNCIO, J. L. R.; ISERNHAGEN, W. O.; STEIL, R. O.; MACARINI, M. R. Resistência de aderência de diferentes tipos de revestimentos de argamassa aplicados em alvenaria de blocos de concreto. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 3., 1999, Vitória. **Anais...** Vitória, 1999.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland: estudo em pasta. **Tese** (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ed. Ver. São Paulo, 2008. 172 p.

QUÉRÉ, D. Surface chemistry: Fakir droplets. **Nature materials**. v. 1, 2002. p. 14-15.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas. São Paulo, EPUSP, 1999, 24p. **Boletim técnico** da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/257.

RAMÉ-HART. **Glossary of surface Science terms.** Disponível em: <http://www.ramehart.com/glossary.htm>. Acesso em: 11/03/13.

RANDIVE, P.; DALAD, A. Influence of viscosity ratio and wettability on droplet displacement behavior: A mesoscale analysis. In: **Computer e Fluids**, v 102, 2014, p 15-31.

RATO, V. N. P. M. Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. 2006, 294 p. **Tese de doutorado** (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo Argamassa.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 192 p.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos.** Porto Alegre. PPGEP/UFRGS, 2000. 130p.

RIVERA, M. H.; MELO, M. E. R. La rugosidad de las superficies: Topometría. Revista Ingenierías, v.1, n. 11, 2001. Disponível em: < <http://ingenierias.uanl.mx/11/index.html>>. Acesso em abril de 2010.

ROMANO, R. C. O., SCHREURS, H., SILVA, F. B., CARDOSO, F. A., BARROS, M. M. S. B., JOHN, V. M., PILEGGI, R. G. Efeito do procedimento de mistura nas características de argamassas de revestimento industrializadas. At.: Congresso Nacional de Argamassas de Construção (APFAC), 3., 2010, Lisboa. **Anais...** Lisboa, 2010.

ROMERO, J. V. **Adherencia al hormigón de morteros de diferentes bases químicas.** 2010. 367p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Politécnica de Madrid, Madrid.

ROSA, L. C. **Acabamento de Superfícies – Rugosidade superficial.** Oficina mecânica para automação. Notas de aula. 2007. Disponível em: <[http://www.sorocaba.unesp.br/professor/luizrosa/index\\_arquivos/oma.htm](http://www.sorocaba.unesp.br/professor/luizrosa/index_arquivos/oma.htm)>. Acesso em: março de 2010.

ROSEN, M. J. Surfactants and interfacial phenomena. New York: John Wiley, 1978, 304 p.

RUDUIT, F. R. **Influência da cura de chapiscos na aderência em substratos de concreto.** 2009. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RUTHERFORD, A. **Introducing ANOVA and ANCOVA – a GLM approach.** Londres: Sage Publications Ltd., 2001. 77 p.

SANTANA, R. Material de apoio à disciplina de análise instrumental aplicada a polímeros. Disponível em: [http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise\\_instrumental/index.html](http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise_instrumental/index.html). Acesso em: 26/02/13.

SALGADO, M. S. Arquitetura, Materiais e Tecnologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Apostila de aulas, 2011.

SCANNELL, S.; LAWRENCE, M.; WALKER, P. Impact of aggregate type on air lime mortar properties. In: **Energy Procedia**, 62, 2014, 81-90.

SCHRAMM, G. **Reologia e Reometria – Fundamentos teóricos e práticos**. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2006. 232 p.

SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M. Rheological behavior of hydraulic lime-based mortars. In: **Journal of the European Ceramic Society**, 27, 2007, 1735-1741.

SÉBAIBI, Y.; DHEILLY, R. M.; QUÉNEUDEC, M. A Study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physic-chemical characteristics of lime. In: **Construction and Building Materials**, 18, 2004, 0653-660.

SEFF, L., BARBETTA, P. A., REPETTE, W. L., HOTZA, D., PAIVA, H., FERREIRA, V. M., LABRINCHA, J. A. Mortar composition defined according to the rheometer and flow table tests using factorial designed experiments. In.: **Construction and Building Materials**, 23, 2009, 3107-3111.

SILVA, J. R. M. da. **Relações de usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do Eucalyptus grandis HILL EX. MAIDEN**. 2002. 204p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, R. P.; BARROS, M. M. S. B.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, *dropping ball* e *squeeze-flow*. At.: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas (SBTA), 6, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005.

SILVA, F. P da. **Uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos**. 2006. 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, N. G. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. 2006a. 164 p, **Tese** (Doutorado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V.C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e Areia. In: **Ambiente Construído**, v 8, n 4, p 21-35, 2008.

SOMORAJ, G. A., LI, Y. Introduction to Surface Chemistry and Catalysis. 2 ed. 771 p. Editora Wiley, USA, 2010.F

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. Estudo da reologia de argamassas de revestimento no estado fresco. At.: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), 1, 2002, Natal. **Anais...** Natal, 2002.

SPECIALCHEM. Determining Critical Surface Tension of Solid Substrates. 2007. Disponível em: <http://www.specialchem4adhesives.com/home/editorial.aspx?id=1785>, Acesso em: 30/11/13.

STOLZ, C. M. **Interação entre parâmetros reológicos de argamassas e a rugosidade de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. 2011. 162 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SUGO, H. O., PAGE, A. W., LAWRENCE, S.J. The development of mortar/unit bond. In: Canadian Masonry Symposium, 9th, Fredericton. **Proceedings...** Department of Civil Engineering – University of New Brunswick, 2001.

TANNER, R. J., WALTERS, K. **Rheology: An Historical Perspective**. 1ª ed. 1998. Elsevier Science. 268 p.

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

VIEIRA, C. M. F.; TEIXEIRA, S. S.; MONTEIRO, S. N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamo-te. In.: **Cerâmica**, 55, 2009, 332-336.

WEBER, E., FERNANDEZ, M., WAPNER, P., HOFFMAN, W. Comparison of X-ray microtomography measurements of densities and porosity principally to values measured by mercury porosimetry for carbon-carbon composites. In: **Carbon**, 48, 2010, p. 2151 a 2158.

WESTERHOLM, M., LAGERBLAD, B., SILFWERBRAND, J., FORSSBERG, E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. In.: **Cement and Concrete Composites**, 30, 2008, 274-282.

XU, S.; WANG, J.; MA, Q.; ZHAO, X.; ZHANG, T. Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate. In: **Construction and Building Materials**, 73, 2014, 33-40.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio. The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. In: **Cement and Concrete Research**, 35 (3), 2005, p. 532-539.

YANG, C.; PERSSON, B. N. J. Contact Mechanics: contact area and interfacial separation from small contact to full contact. In: **Journal of Physics: Condensed Matter**, 20, 2008, 13p.

YASTREBOV, V. A.; ANCIAUX, G.; MOLINARI, J. From infinitesimal to full contact between rough surfaces: Evolution of the contact area. In: **International Journal of Solids and Structures**, 52, 2015, p. 83-102.

YATES, M.; MARTIN-LUENGO, M. A.; CORNEJO, J.; GONZÁEZ, V. The importance of the porosity of mortars, tiles and bricks in relation to their bonding strengths. In.: **Studies in surface science and catalysis**, 87, 1994, 781-190.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. BOTTURA de. Caracterização de argamassas no estado fresco – Peculiaridades da análise de argamassas industrializadas. In: Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas, 1, 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBTA, 1995.

ZANELATTO, K. C.; BARROS, M. M. S. B; MONTE, R.; SABBATINI, F. H. Avaliação da influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa aplicado com projeção mecânica contínua. In: **Ambiente Construído**, 13, 2013, 87-109.

ZHANG, X.; HAN, J., The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste. **Cement and Concrete Research**, 30 (5), 2000, p. 827–830.

# ANEXO A



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 1180 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 2500.00 mu / 100 Classes

|                    |                     |                       |             |
|--------------------|---------------------|-----------------------|-------------|
| Ref da amostra     | : Cimento CPIV      | Ultrasom              | : 60 s      |
| Type produit       | : Pó                | Concentração          | : 126       |
| Client             | : NORIE             | Diâmetro a 10%        | : 2.10 mu   |
| Comentários        | :                   | Diâmetro a 50%        | : 13.42 mu  |
| Líquido            | : Isopropyl alcohol | Diâmetro a 90%        | : 36.67 mu  |
| Agente dispersante | :                   | Diâmetro médio        | : 16.95 mu  |
| Operador           | : Malu              | Fraunhofer            |             |
| Empresa            | :                   | Densidade/Fator       | -----       |
| Localização        | :                   | Superfície específica | -----       |
| Data : 10/07/2013  | Hora : 10:51:02     | Diluição automática   | : Sim / Não |
| Índice med.        | : 767               | Medida./Limp.         | : 60/60/8   |
|                    |                     | SOP                   | : UFRGS L   |

Valores cumulados característicos

in volume / passante

|    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| x  | 0.04   | 0.07   | 0.10   | 0.20   | 0.30   | 0.40   | 0.50   | 0.60   | 0.70   | 0.80   |
| Q3 | 0.06   | 0.21   | 0.33   | 0.70   | 1.13   | 1.51   | 1.89   | 2.32   | 2.80   | 3.35   |
| q3 | 0.02   | 0.03   | 0.03   | 0.05   | 0.10   | 0.12   | 0.16   | 0.22   | 0.29   | 0.39   |
| x  | 0.90   | 1.00   | 1.10   | 1.20   | 1.30   | 1.40   | 1.60   | 1.80   | 2.00   | 2.20   |
| Q3 | 3.92   | 4.48   | 5.02   | 5.55   | 6.07   | 6.58   | 7.58   | 8.57   | 9.53   | 10.47  |
| q3 | 0.46   | 0.50   | 0.54   | 0.58   | 0.61   | 0.65   | 0.71   | 0.79   | 0.86   | 0.93   |
| x  | 2.40   | 2.60   | 3.00   | 4.00   | 5.00   | 6.00   | 6.50   | 7.00   | 7.50   | 8.00   |
| Q3 | 11.41  | 12.34  | 14.19  | 18.79  | 23.21  | 27.29  | 29.20  | 31.02  | 32.77  | 34.46  |
| q3 | 1.02   | 1.10   | 1.22   | 1.51   | 1.87   | 2.12   | 2.26   | 2.32   | 2.40   | 2.48   |
| x  | 8.50   | 9.00   | 10.00  | 11.00  | 12.00  | 13.00  | 14.00  | 15.00  | 16.00  | 17.00  |
| Q3 | 36.10  | 37.69  | 40.75  | 43.64  | 46.37  | 48.95  | 51.39  | 53.70  | 55.87  | 57.95  |
| q3 | 2.56   | 2.63   | 2.75   | 2.87   | 2.97   | 3.05   | 3.11   | 3.17   | 3.18   | 3.24   |
| x  | 18.00  | 19.00  | 20.00  | 22.00  | 25.00  | 28.00  | 32.00  | 36.00  | 38.00  | 40.00  |
| Q3 | 59.94  | 61.86  | 63.72  | 67.35  | 72.67  | 77.79  | 84.07  | 89.29  | 91.37  | 93.13  |
| q3 | 3.29   | 3.36   | 3.43   | 3.60   | 3.94   | 4.27   | 4.45   | 4.19   | 3.64   | 3.25   |
| x  | 45.00  | 50.00  | 53.00  | 56.00  | 63.00  | 71.00  | 75.00  | 80.00  | 85.00  | 90.00  |
| Q3 | 96.33  | 98.20  | 98.90  | 99.38  | 99.87  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 2.57   | 1.68   | 1.14   | 0.82   | 0.39   | 0.10   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| x  | 95.00  | 100.0  | 106.0  | 112.0  | 125.0  | 130.0  | 140.0  | 145.0  | 150.0  | 160.0  |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| x  | 170.0  | 180.0  | 190.0  | 200.0  | 212.0  | 242.0  | 250.0  | 300.0  | 400.0  | 500.0  |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| x  | 600.0  | 700.0  | 800.0  | 900.0  | 1000.0 | 1100.0 | 1200.0 | 1300.0 | 1400.0 | 1500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| x  | 1600.0 | 1700.0 | 1800.0 | 1900.0 | 2000.0 | 2100.0 | 2200.0 | 2300.0 | 2400.0 | 2500.0 |
| Q3 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| q3 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

## ANEXO B



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA CILAS 1180 Líquido

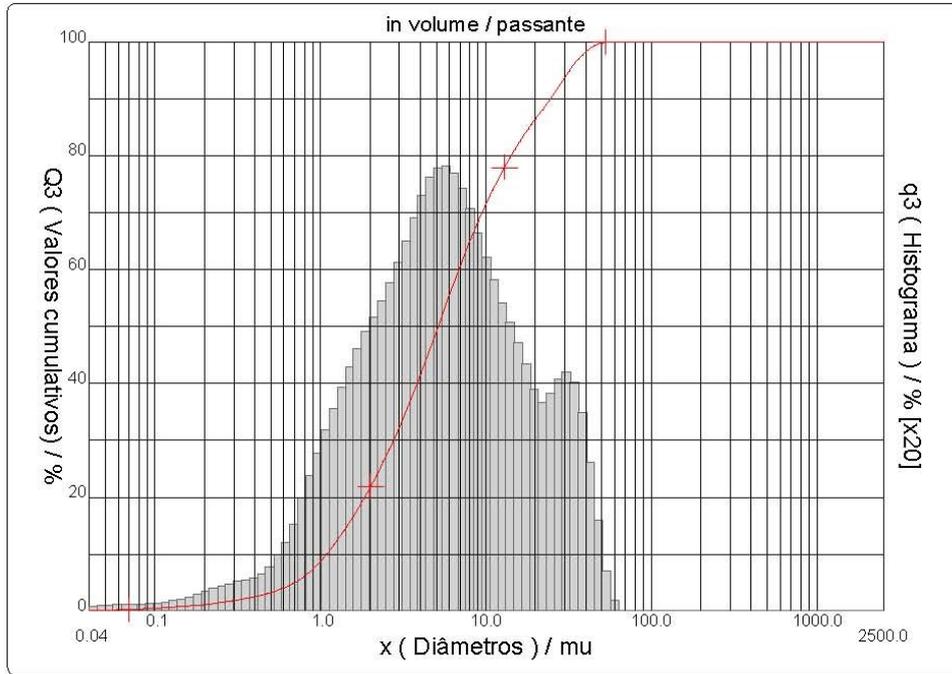
Faixa : 0.04  $\mu$ m - 2500.00  $\mu$ m / 100 Classes

|  |  |
|--|--|
| Ref da amostra : CAL CHI<br>Type produit : Pó<br>Client : NORIE<br>Comentários :<br>Líquido : Isopropyl alcohol<br>Agente dispersante :<br>Operador : Malu<br>Empresa :<br>Localização :<br>Data : 10/07/2013 Hora : 10:33:00<br>Índice med. : 765 | Ultrassom : 60 s<br>Concentração : 117<br>Diâmetro a 10% : 1.08 $\mu$ m<br>Diâmetro a 50% : 5.15 $\mu$ m<br>Diâmetro a 90% : 24.66 $\mu$ m<br>Diâmetro médio : 9.03 $\mu$ m<br>Fraunhofer<br>Densidade/Fator : -----<br>Superfície específica : -----<br>Diluição automática : Sim / Não<br>Medida./Limp. : 60/60/8<br>SOP : UFRGS L |
|--|--|

|                                  |      |      |       |        |                      |
|----------------------------------|------|------|-------|--------|----------------------|
| Valores cumulativos particulares |      |      |       |        | in volume / passante |
| x                                | 0.10 | 1.00 | 10.00 | 100.0  | 1000.0               |
| Q3                               | 0.45 | 8.84 | 71.37 | 100.00 | 100.00               |

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

|                        |       |
|------------------------|-------|
| Porcentagem do usuário |       |
| %                      | 100.0 |
| Q3                     | 56.00 |



Núm. de série : 570      Ref : 1.r113.m0.45A1818/5.00/765/m26.12.40.20.1Fh.20.40.20.BhvQ-.0.0.0.0/300.0.15.g60.0.9.10.1.10.P7200.27.80.P29.0V 3.10/633

# APÊNDICE A

**Ensaio de caracterização das argamassas no estado fresco**

| Argamassa  | Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )<br>NBR 13278/05 | Média (kg/m <sup>3</sup> ) | Desvio Padrão (kg/m <sup>3</sup> ) | Coefficiente de Variação (%) | Retenção de água (%) NBR 13277/05 | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) | Teor de ar incorporado (%) NBR NM47/02 | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|------------|---|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------|------------------------------|--|-----------|-------------------|------------------------------|
| <b>A31</b> | 1626  | 1859                       | 248                                | 13                           | 94                                | 97        | 2                 | 2                            | 2,80                                   | 2,57      | 0,25              | 10                           |
|            | 1832  |                            |                                    |                              | 99                                |           |                   |                              | 2,60                                   |           |                   |                              |
|            | 2120  |                            |                                    |                              | 97                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |
| <b>A32</b> | 1660  | 1850                       | 205                                | 11                           | 94                                | 94        | 2                 | 2                            | 2,10                                   | 2,20      | 0,10              | 5                            |
|            | 1822  |                            |                                    |                              | 92                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |
|            | 2067  |                            |                                    |                              | 96                                |           |                   |                              | 2,20                                   |           |                   |                              |
|            | 1714  |                            |                                    |                              | 94                                |           |                   |                              | 1,90                                   |           |                   |                              |
| <b>A33</b> | 1851  | 1895                       | 207                                | 11                           | 98                                | 96        | 2                 | 2                            | 2,40                                   | 2,10      | 0,26              | 13                           |
|            | 2121  |                            |                                    |                              | 95                                |           |                   |                              | 2,00                                   |           |                   |                              |
|            | 2063  |                            |                                    |                              | 97                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |
| <b>A61</b> | 2030  | 2051                       | 18                                 | 1                            | 98                                | 98        | 1                 | 1                            | 2,20                                   | 2,20      | 0,10              | 5                            |
|            | 2061  |                            |                                    |                              | 98                                |           |                   |                              | 2,10                                   |           |                   |                              |
|            | 1991  |                            |                                    |                              | 96                                |           |                   |                              | 2,25                                   |           |                   |                              |
| <b>A62</b> | 2021  | 2008                       | 15                                 | 1                            | 99                                | 98        | 1                 | 1                            | 2,80                                   | 2,45      | 0,30              | 12                           |
|            | 2011  |                            |                                    |                              | 99                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |
|            | 2109  |                            |                                    |                              | 96                                |           |                   |                              | 1,90                                   |           |                   |                              |
|            | 2061  |                            |                                    |                              | 98                                |           |                   |                              | 2,00                                   |           |                   |                              |
| <b>A63</b> | 2079  | 2083                       | 25                                 | 1                            | 97                                | 97        | 1                 | 1                            | 2,30                                   | 2,07      | 0,21              | 10                           |
|            | 1633  |                            |                                    |                              | 92                                |           |                   |                              | 2,10                                   |           |                   |                              |
|            | 1796  |                            |                                    |                              | 98                                |           |                   |                              | 2,20                                   |           |                   |                              |
| <b>A91</b> | 2062  | 1830                       | 217                                | 12                           | 95                                | 95        | 3                 | 3                            | 1,70                                   | 2,00      | 0,26              | 13                           |
|            | 1591  |                            |                                    |                              | 93                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |
|            | 1760  |                            |                                    |                              | 97                                |           |                   |                              | 2,40                                   |           |                   |                              |
| <b>A92</b> | 2027  | 1793                       | 220                                | 12                           | 95                                | 95        | 2                 | 2                            | 2,30                                   | 2,33      | 0,06              | 2                            |
|            | 1653  |                            |                                    |                              | 92                                |           |                   |                              | 1,70                                   |           |                   |                              |
| <b>A93</b> | 1829  | 1741                       | 125                                | 7                            | 93                                | 93        | 1                 | 1                            | 1,70                                   | 1,70      | 0,00              | 0                            |
|            |   |                            |                                    |                              | 94                                |           |                   |                              | 2,30                                   |           |                   |                              |

## Ensaio de caracterização das argamassas no estado endurecido

| Absorção de água por capilaridade |           |        |        |   |   |   |  |                  |        |
|-----------------------------------|-----------|--------|--------|---|---|---|--|------------------|--------|
| Argamassa                         | Massa (g) |        |        | A <sub>10</sub><br>(g/cm <sup>2</sup> ) | A <sub>90</sub><br>(g/cm <sup>2</sup> ) | C<br>(g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ) | Cmédio<br>(g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> ) | Desvio<br>Padrão | CV (%) |
|                                   | inicial   | 10min  | 90min  |   |   |   |  |                  |        |
| A 31                              | 479,8     | 484,43 | 493,35 | 0,29                                    | 0,85                                    | 8,92  |  |                  |        |
| A 31                              | 469,4     | 474,63 | 483,88 | 0,33                                    | 0,91                                    | 9,25  | 8,89   | 0,37             | 4,17   |
| A 31                              | 496,8     | 501,85 | 510,36 | 0,32                                    | 0,85                                    | 8,51  |  |                  |        |
| A 32                              | 495,1     | 500,08 | 510,36 | 0,31                                    | 0,95                                    | 10,28   |  |                  |        |
| A 32                              | 491,3     | 495,99 | 505,84 | 0,29                                    | 0,91                                    | 9,85  | 9,97   | 0,27             | 2,75   |
| A 32                              | 486,1     | 490,81 | 500,58 | 0,29                                    | 0,90                                    | 9,77  |  |                  |        |
| A 33                              | 509,4     | 514,67 | 523,87 | 0,33                                    | 0,90                                    | 9,20  |  |                  |        |
| A 33                              | 487,7     | 492,91 | 501,82 | 0,33                                    | 0,88                                    | 8,91  | 9,37   | 0,56             | 6,02   |
| A 33                              | 493,9     | 498,78 | 508,78 | 0,31                                    | 0,93                                    | 10,00   |  |                  |        |
| A 61                              | 477,45    | 486,71 | 502,45 | 0,58                                    | 1,56                                    | 15,74   |  |                  |        |
| A 61                              | 463,12    | 472,35 | 487,93 | 0,58                                    | 1,55                                    | 15,58   | 15,67  | 0,08             | 0,52   |
| A 61                              | 467,31    | 476,4  | 492,09 | 0,57                                    | 1,55                                    | 15,69   |  |                  |        |
| A 62                              | 473,45    | 484,24 | 502,77 | 0,67                                    | 1,83                                    | 18,53   |  |                  |        |
| A 62                              | 473,34    | 485,14 | 504,12 | 0,74                                    | 1,92                                    | 18,98   | 18,64  | 0,30             | 1,63   |
| A 62                              | 472,34    | 483,73 | 502,13 | 0,71                                    | 1,86                                    | 18,40   |  |                  |        |
| A 63                              | 473,55    | 482,92 | 497,73 | 0,59                                    | 1,51                                    | 14,81   |  |                  |        |
| A 63                              | 446,5     | 455,34 | 468,83 | 0,55                                    | 1,40                                    | 13,49   | 14,91  | 1,47             | 9,88   |
| A 63                              | 480,75    | 491,56 | 507,99 | 0,68                                    | 1,70                                    | 16,43   |  |                  |        |
| A 91                              | 479,6     | 490,17 | 512,91 | 0,66                                    | 2,08                                    | 22,74   |  |                  |        |
| A 91                              | 474,2     | 484,95 | 510,7  | 0,67                                    | 2,28                                    | 25,75   | 24,43  | 1,54             | 6,30   |
| A 91                              | 472       | 482,29 | 507,09 | 0,64                                    | 2,19                                    | 24,80   |  |                  |        |
| A 92                              | 461,2     | 472,61 | 497,52 | 0,71                                    | 2,27                                    | 24,91   |  |                  |        |
| A 92                              | 458,1     | 470,57 | 497,03 | 0,78                                    | 2,43                                    | 26,46   | 25,97  | 0,92             | 3,55   |
| A 92                              | 463,6     | 476,25 | 502,8  | 0,79                                    | 2,45                                    | 26,55   |  |                  |        |
| A 93                              | 464,9     | 476,01 | 498,05 | 0,69                                    | 2,07                                    | 22,04   |  |                  |        |
| A 93                              | 470       | 479,21 | 497,46 | 0,58                                    | 1,72                                    | 18,25   | 20,15  | 1,90             | 9,40   |
| A 93                              | 452,9     | 462,68 | 482,85 | 0,61                                    | 1,87                                    | 20,17   |  |                  |        |

| Argamassa | Densidade de massa no estado endurecido |       |        |              |       |        |                  |        |        |           |                           |                            |                            |      |      | Desvio Padrão | CV (%) |
|-----------|---|-------|--------|--------------|-------|--------|------------------|--------|--------|-----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|------|------|---------------|--------|
|           | Altura (mm)                             |       |        | Largura (mm) |       |        | Comprimento (mm) |        |        | Massa (g) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | ρ máx (kg/m <sup>3</sup> ) | ρ méd (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |               |        |
|           | 1                                       | 2     | 3      | Média        | 1     | 2      | 3                | Média  | 1      |           |                           |                            |                            | 2    | 3    |               |        |
| A 31      | 39,75                                   | 40,35 | 40,05  | 40,07        | 40,18 | 40,125 | 40,13            | 167,02 | 167,56 | 167,29    | 167,29                    | 509,8                      | 268,84                     | 1896 |      |               |        |
| A 31      | 40,24                                   | 40,6  | 40,42  | 40,49        | 39,84 | 40,165 | 40,17            | 166,46 | 166,49 | 166,475   | 166,48                    | 505,5                      | 270,27                     | 1870 |      |               |        |
| A 31      | 40,43                                   | 40,32 | 40,375 | 40,26        | 40,21 | 40,235 | 40,24            | 166,85 | 166,97 | 166,91    | 166,91                    | 520,6                      | 271,14                     | 1920 | 1908 | 19,59         | 1,03   |
| A 31      | 39,97                                   | 40,43 | 40,20  | 37,47        | 39,37 | 38,42  | 38,42            | 162,32 | 161,96 | 162,14    | 162,14                    | 479,80                     | 250,42                     | 1916 |      |               |        |
| A 31      | 38,83                                   | 36,21 | 37,52  | 40,54        | 40,88 | 40,71  | 40,71            | 161,76 | 161,85 | 161,81    | 161,81                    | 469,40                     | 247,15                     | 1899 |      |               |        |
| A 31      | 39,89                                   | 40,53 | 40,21  | 39,86        | 39,71 | 39,79  | 39,79            | 161,74 | 161,49 | 161,62    | 161,62                    | 496,80                     | 258,54                     | 1922 |      |               |        |
| A 32      | 40,21                                   | 40,89 | 40,55  | 40,34        | 40,24 | 40,29  | 40,29            | 166,82 | 167,07 | 166,945   | 166,95                    | 509,2                      | 272,75                     | 1867 |      |               |        |
| A 32      | 39,79                                   | 40,11 | 39,95  | 41,48        | 40,51 | 40,995 | 41,00            | 166,18 | 166,1  | 166,14    | 166,14                    | 504,9                      | 272,10                     | 1856 |      |               |        |
| A 32      | 32,66                                   | 34,44 | 33,55  | 40,93        | 40,34 | 40,635 | 40,64            | 167,1  | 167,37 | 167,235   | 167,24                    | 423,3                      | 227,99                     | 1857 | 1865 | 12,44         | 0,67   |
| A 32      | 40,48                                   | 40,30 | 40,39  | 40,26        | 40,32 | 40,29  | 40,29            | 160,90 | 161,12 | 161,01    | 161,01                    | 495,10                     | 262,01                     | 1890 |      |               |        |
| A 32      | 40,26                                   | 40,31 | 40,29  | 40,83        | 40,08 | 40,46  | 40,46            | 161,47 | 162,25 | 161,86    | 161,86                    | 491,30                     | 263,79                     | 1862 |      |               |        |
| A 32      | 39,25                                   | 40,30 | 39,78  | 40,51        | 40,69 | 40,60  | 40,60            | 160,95 | 161,10 | 161,03    | 161,03                    | 486,10                     | 260,03                     | 1869 |      |               |        |
| A 33      | 49,41                                   | 50,37 | 49,89  | 49,89        | 50,71 | 50,66  | 50,66            | 166,66 | 166,69 | 166,675   | 166,68                    | 519,3                      | 421,28                     | 1233 |      |               |        |
| A 33      | 36,4                                    | 37,82 | 37,11  | 40,29        | 40,31 | 40,3   | 40,30            | 166,39 | 166,51 | 166,45    | 166,48                    | 480,4                      | 248,98                     | 1930 |      |               |        |
| A 33      | 40,70                                   | 41,21 | 40,96  | 39,67        | 39,43 | 39,55  | 39,55            | 163,47 | 162,99 | 163,23    | 163,23                    | 509,40                     | 264,40                     | 1927 | 1927 | 309,17        | 16,05  |
| A 33      | 41,22                                   | 40,30 | 40,76  | 38,62        | 38,74 | 38,68  | 38,68            | 162,30 | 162,28 | 162,29    | 162,29                    | 487,70                     | 255,87                     | 1906 |      |               |        |
| A 33      | 40,10                                   | 39,98 | 40,04  | 39,75        | 38,88 | 39,32  | 39,32            | 162,02 | 162,73 | 162,38    | 162,38                    | 493,90                     | 255,61                     | 1932 |      |               |        |
| A 61      | 40,29                                   | 40,24 | 40,27  | 40,38        | 40,43 | 40,41  | 40,41            | 161,21 | 161,09 | 161,15    | 161,15                    | 492,60                     | 262,18                     | 1879 |      |               |        |
| A 61      | 41,35                                   | 40,34 | 40,85  | 40,15        | 40,35 | 40,25  | 40,25            | 160,68 | 160,71 | 160,70    | 160,70                    | 496,70                     | 264,18                     | 1880 | 1880 | 11,19         | 0,60   |
| A 61      | 39,59                                   | 40,05 | 39,82  | 40,42        | 40,11 | 40,27  | 40,27            | 160,59 | 160,51 | 160,55    | 160,55                    | 488,80                     | 257,42                     | 1899 |      |               |        |
| A 62      | 40,15                                   | 40,06 | 40,11  | 40,41        | 40,49 | 40,45  | 40,45            | 161,46 | 161,44 | 161,45    | 161,45                    | 483,70                     | 261,91                     | 1847 |      |               |        |
| A 62      | 40,43                                   | 40,27 | 40,35  | 40,44        | 40,35 | 40,40  | 40,40            | 161,00 | 161,24 | 161,12    | 161,12                    | 485,90                     | 262,62                     | 1850 | 1847 | 2,26          | 0,12   |
| A 62      | 40,23                                   | 40,25 | 40,24  | 40,46        | 40,45 | 40,46  | 40,46            | 161,16 | 160,83 | 161,00    | 161,00                    | 483,80                     | 262,09                     | 1846 |      |               |        |
| A 63      | 40,16                                   | 38,69 | 39,43  | 41,64        | 39,79 | 40,72  | 40,72            | 162,79 | 162,91 | 162,85    | 162,85                    | 494,51                     | 261,41                     | 1892 |      |               |        |
| A 63      | 40,88                                   | 45,35 | 43,12  | 39,28        | 38,66 | 38,97  | 38,97            | 163,74 | 162,66 | 163,20    | 163,20                    | 515,14                     | 274,21                     | 1879 | 1892 | 9,51          | 0,50   |
| A 63      | 40,52                                   | 39,63 | 40,08  | 40,05        | 39,45 | 39,75  | 39,75            | 162,07 | 162,30 | 162,19    | 162,19                    | 490,14                     | 258,36                     | 1897 |      |               |        |
| A 91      | 40,15                                   | 40,21 | 40,18  | 40,81        | 39,69 | 40,25  | 40,25            | 162,06 | 162,16 | 162,11    | 162,11                    | 479,60                     | 262,17                     | 1829 |      |               |        |
| A 91      | 40,08                                   | 40,13 | 40,105 | 40,1         | 40,3  | 40,415 | 40,42            | 165,93 | 165,89 | 165,91    | 165,91                    | 474,3                      | 268,91                     | 1764 |      |               |        |
| A 91      | 40,37                                   | 40,28 | 40,325 | 40,33        | 40,05 | 40,05  | 40,05            | 166,65 | 166,53 | 166,59    | 166,59                    | 468,8                      | 269,05                     | 1742 | 1810 | 39,50         | 2,18   |
| A 91      | 40,05                                   | 40,11 | 40,08  | 40,14        | 40,35 | 40,25  | 40,25            | 160,77 | 160,88 | 160,83    | 160,83                    | 474,20                     | 259,41                     | 1828 |      |               |        |
| A 91      | 40,34                                   | 40,25 | 40,30  | 40,30        | 40,31 | 40,06  | 40,19            | 160,80 | 161,22 | 161,01    | 161,01                    | 472,00                     | 260,72                     | 1810 |      |               |        |
| A 92      | 40,19                                   | 40,01 | 40,10  | 39,64        | 39,83 | 39,74  | 39,74            | 160,88 | 160,82 | 160,85    | 160,85                    | 461,20                     | 256,29                     | 1799 |      |               |        |
| A 92      | 40,70                                   | 40,21 | 40,46  | 39,99        | 39,72 | 39,86  | 39,86            | 160,87 | 161,17 | 161,02    | 161,02                    | 458,10                     | 259,62                     | 1765 |      |               |        |
| A 92      | 40,12                                   | 40,01 | 40,07  | 39,67        | 39,82 | 39,75  | 39,75            | 161,39 | 161,03 | 161,21    | 161,21                    | 463,60                     | 256,71                     | 1806 | 1782 | 42,16         | 2,37   |
| A 92      | 40,04                                   | 38,99 | 39,515 | 40,46        | 40,33 | 40,395 | 40,40            | 161,11 | 161,47 | 161,29    | 161,29                    | 476,00                     | 267,45                     | 1849 |      |               |        |
| A 92      | 40,51                                   | 39,38 | 39,945 | 39,95        | 39,96 | 40,54  | 40,25            | 165,96 | 166,22 | 166,09    | 166,09                    | 468,30                     | 257,04                     | 1754 |      |               |        |
| A 92      | 39,95                                   | 40,4  | 40,175 | 40,18        | 40,2  | 40,11  | 40,155           | 165,77 | 166,13 | 165,95    | 165,95                    | 463,80                     | 267,72                     | 1732 |      |               |        |
| A 93      | 39,69                                   | 40,44 | 40,065 | 40,07        | 40,2  | 40,06  | 40,13            | 165,84 | 165,93 | 165,885   | 165,89                    | 476,00                     | 266,71                     | 1785 |      |               |        |
| A 93      | 40,21                                   | 40,63 | 40,42  | 40,42        | 40,29 | 39,97  | 40,13            | 165,85 | 166,06 | 165,955   | 165,96                    | 478,00                     | 269,19                     | 1776 |      |               |        |
| A 93      | 39,81                                   | 39,27 | 39,54  | 39,54        | 40,03 | 40,16  | 40,10            | 160,54 | 160,72 | 160,63    | 160,63                    | 464,90                     | 254,66                     | 1826 | 1826 | 9,91          | 0,54   |
| A 93      | 39,82                                   | 39,85 | 39,84  | 39,84        | 40,85 | 40,03  | 40,44            | 161,47 | 160,82 | 161,15    | 161,15                    | 470,00                     | 259,59                     | 1811 |      |               |        |
| A 93      | 39,83                                   | 39,79 | 39,81  | 39,81        | 39,22 | 38,51  | 38,87            | 160,03 | 160,02 | 160,03    | 160,03                    | 452,90                     | 247,59                     | 1829 |      |               |        |

| Módulo de Elasticidade Dinâmico |                       |                       |                       |                           |                           |                             |             |                   |                        |             |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|
| Argamassa                       | tempo 1<br>( $\mu$ s) | tempo 2<br>( $\mu$ s) | tempo 3<br>( $\mu$ s) | Menor tempo<br>( $\mu$ s) | Comprimento<br>médio (mm) | Velocidade<br>(mm/ $\mu$ s) | Ed<br>(GPa) | Ed médio<br>(GPa) | Desvio Padrão<br>(GPa) | C.V.<br>(%) |
| A 31                            | 52,6                  | 52,3                  | 52,5                  | 52,30                     | 167,29                    | 3,20                        | 17,46       |                   |                        |             |
| A 31                            | 51,6                  | 53                    | 53,3                  | 51,60                     | 166,48                    | 3,23                        | 17,52       |                   |                        |             |
| A 31                            | 54,4                  | 54,7                  | 55                    | 54,40                     | 166,91                    | 3,07                        | 16,27       | 14,66             | 2,48                   | 16,90       |
| A 31                            | 61,2                  | 62                    | 62,1                  | 61,20                     | 162,14                    | 2,65                        | 12,10       |                   |                        |             |
| A 31                            | 61,6                  | 63,6                  | 62,8                  | 61,60                     | 161,81                    | 2,63                        | 11,79       |                   |                        |             |
| A 31                            | 59,4                  | 59,7                  | 59,9                  | 59,40                     | 161,62                    | 2,72                        | 12,80       |                   |                        |             |
| A 32                            | 56,1                  | 56,2                  | 56,9                  | 56,10                     | 166,95                    | 2,98                        | 14,88       |                   |                        |             |
| A 32                            | 53,7                  | 54,1                  | 56,8                  | 53,70                     | 166,14                    | 3,09                        | 15,99       |                   |                        |             |
| A 32                            | 54,1                  | 55,8                  | 57,1                  | 54,10                     | 167,24                    | 3,09                        | 15,97       | 12,93             | 2,85                   | 22,04       |
| A 32                            | 63                    | 63,2                  | 62,9                  | 62,90                     | 161,01                    | 2,56                        | 11,14       |                   |                        |             |
| A 32                            | 62,8                  | 63,1                  | 63,6                  | 62,80                     | 161,86                    | 2,58                        | 11,14       |                   |                        |             |
| A 32                            | 71,8                  | 71,8                  | 72,1                  | 71,80                     | 161,03                    | 2,24                        | 8,46        |                   |                        |             |
| A 33                            | 57,1                  | 57,6                  | 58,1                  | 57,1                      | 166,68                    | 2,92                        | 9,45        |                   |                        |             |
| A 33                            | 54,5                  | 54,6                  | 54,5                  | 54,5                      | 166,48                    | 3,05                        | 16,20       |                   |                        |             |
| A 33                            | 61,3                  | 63,3                  | 63,7                  | 61,3                      | 163,23                    | 2,66                        | 12,29       | 12,11             | 2,26                   | 0,186       |
| A 33                            | 64,4                  | 64,4                  | 64,4                  | 64,4                      | 162,29                    | 2,52                        | 10,89       |                   |                        |             |
| A 33                            | 62,6                  | 63,8                  | 64,1                  | 62,6                      | 162,38                    | 2,59                        | 11,70       |                   |                        |             |
| A 61                            | 78,00                 | 76,60                 | 76,20                 | 76,2                      | 160,545                   | 2,11                        | 7,51        |                   |                        |             |
| A 61                            | 77,40                 | 77,70                 | 76,80                 | 76,8                      | 160,91                    | 2,10                        | 7,43        | 7,31              | 0,23                   | 3,143       |
| A 61                            | 79,40                 | 79,40                 | 80,20                 | 79,4                      | 160,52                    | 2,02                        | 6,98        |                   |                        |             |
| A 62                            | 80,20                 | 80,40                 | 79,80                 | 79,8                      | 159,3                     | 2,00                        | 6,62        |                   |                        |             |
| A 62                            | 82,00                 | 82,60                 | 81,30                 | 81,3                      | 160,955                   | 1,98                        | 6,53        | 6,72              | 0,20                   | 3,034       |
| A 62                            | 78,40                 | 78,40                 | 78,70                 | 78,4                      | 160,92                    | 2,05                        | 7,00        |                   |                        |             |
| A 63                            | 73,8                  | 73,3                  | 72,7                  | 72,7                      | 162,85                    | 2,24                        | 8,54        |                   |                        |             |
| A 63                            | 73,8                  | 73,3                  | 73,2                  | 73,2                      | 163,2                     | 2,23                        | 8,40        | 8,44              | 0,07                   | 0,844       |
| A 63                            | 73,5                  | 74,3                  | 73,2                  | 73,2                      | 162,185                   | 2,22                        | 8,38        |                   |                        |             |
| A 91                            | 110,2                 | 112,8                 | 115,2                 | 110,2                     | 162,11                    | 1,47                        | 3,56        |                   |                        |             |
| A 91                            | 103,6                 | 102,2                 | 108,2                 | 102,2                     | 165,91                    | 1,62                        | 4,18        |                   |                        |             |
| A 91                            | 103,8                 | 104,2                 | 104                   | 103,8                     | 166,59                    | 1,60                        | 4,04        | 3,45              | 0,64                   | 0,186       |
| A 91                            | 123,7                 | 120,4                 | 120                   | 120                       | 160,825                   | 1,34                        | 2,95        |                   |                        |             |
| A 91                            | 130                   | 134,3                 | 134                   | 130                       | 161,01                    | 1,24                        | 2,50        |                   |                        |             |
| A 92                            | 101,7                 | 102,8                 | 102,9                 | 101,7                     | 160,85                    | 1,58                        | 4,05        |                   |                        |             |
| A 92                            | 102,2                 | 103,4                 | 102,8                 | 102,2                     | 161,02                    | 1,58                        | 3,94        |                   |                        |             |
| A 92                            | 117,3                 | 118,6                 | 124,5                 | 117,3                     | 161,21                    | 1,37                        | 3,07        | 3,37              | 0,56                   | 16,73       |
| A 92                            | 114,3                 | 117,4                 | 120,5                 | 114,3                     | 161,29                    | 1,41                        | 3,31        |                   |                        |             |
| A 92                            | 135,7                 | 140,2                 | 137,2                 | 135,7                     | 166,09                    | 1,22                        | 2,36        |                   |                        |             |
| A 92                            | 108,8                 | 111                   | 118,5                 | 111                       | 165,95                    | 1,50                        | 3,49        |                   |                        |             |
| A 93                            | 114,6                 | 118,5                 | 123,3                 | 114,6                     | 165,885                   | 1,45                        | 3,37        |                   |                        |             |
| A 93                            | 117,7                 | 124,8                 | 119,7                 | 117,7                     | 165,955                   | 1,41                        | 3,18        |                   |                        |             |
| A 93                            | 129,3                 | 129,8                 | 130,7                 | 129,3                     | 160,63                    | 1,24                        | 2,54        | 3,04              | 0,37                   | 0,12        |
| A 93                            | 125,5                 | 130                   | 133,9                 | 125,5                     | 161,145                   | 1,28                        | 2,69        |                   |                        |             |
| A 93                            | 110,6                 | 111,7                 | 112,7                 | 110,6                     | 160,025                   | 1,45                        | 3,45        |                   |                        |             |

| Resistência à Tração na Flexão |              |             |          |        |
|--------------------------------|--------------|-------------|----------|--------|
| Argamassa                      | Tensão (MPa) | Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
| A 31                           | 2,66         |             |          |        |
| A 31                           | 2,16         | 2,34        | 0,28     | 11,87  |
| A 31                           | 2,2          |             |          |        |
| A 32                           | 1,74         |             |          |        |
| A 32                           | 1,79         |             |          |        |
| A 32                           | 1,55         | 1,65        | 0,11     | 6,56   |
| A 32                           | 1,68         |             |          |        |
| A 32                           | 1,63         |             |          |        |
| A 32                           | 1,51         |             |          |        |
| A 33                           | 1,96         |             |          |        |
| A 33                           | 1,63         | 1,76        | 0,18     | 9,99   |
| A 33                           | 1,69         |             |          |        |
| A 61                           | 0,24         |             |          |        |
| A 61                           | 0,28         | 0,25        | 0,02     | 8,81   |
| A 61                           | 0,24         |             |          |        |
| A 62                           | 0,28         |             |          |        |
| A 62                           | 0,26         | 0,27        | 0,01     | 4,22   |
| A 62                           | 0,28         |             |          |        |
| A 63                           | 0,40         |             |          |        |
| A 63                           | 0,43         | 0,42        | 0,02     | 3,67   |
| A 63                           | 0,42         |             |          |        |
| A91                            | 0,37         |             |          |        |
| A91                            | 0,32         | 0,35        | 0,02     | 7,00   |
| A91                            | 0,34         |             |          |        |
| A91                            | 0,37         |             |          |        |
| A92                            | 0,28         |             |          |        |
| A92                            | 0,29         | 0,30        | 0,04     | 13,13  |
| A92                            | 0,26         |             |          |        |
| A92                            | 0,35         |             |          |        |
| A93                            | 0,34         |             |          |        |
| A93                            | 0,26         | 0,30        | 0,04     | 13,62  |
| A93                            | 0,29         |             |          |        |

| <b>Resistência à Compressão</b> |                     |                     |                    |                 |               |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| <b>Argamassa</b>                | <b>Tensão (Mpa)</b> | <b>Tensão (MPa)</b> | <b>Média (MPa)</b> | <b>DP (MPa)</b> | <b>CV (%)</b> |
| A 31                            | 7,17                | 8,37                |                    |                 |               |
| A 31                            | 7,59                | 7,96                |                    |                 |               |
| A 31                            | 6,92                | 7,26                | 7,63               | 0,71            | 9,29          |
| A 31                            | 8,17                | 8,55                |                    |                 |               |
| A 31                            | 6,06                | 7,41                |                    |                 |               |
| A 31                            | 8,08                | 8,03                |                    |                 |               |
| A 32                            | 7,14                | 6,54                |                    |                 |               |
| A 32                            | 7,07                | 6,11                |                    |                 |               |
| A 32                            | 6,63                | 5,41                | 6,04               | 0,88            | 14,65         |
| A 32                            | 4,59                | 6,1                 |                    |                 |               |
| A 32                            | 4,75                | 6,04                |                    |                 |               |
| A 33                            | 7,81                | 6,9                 |                    |                 |               |
| A 33                            | 6,74                | 6,96                |                    |                 |               |
| A 33                            | 7,28                | 6,93                | 7,13               | 0,57            | 7,96          |
| A 33                            | 6,55                | 8,42                |                    |                 |               |
| A 33                            | 6,82                | 6,92                |                    |                 |               |
| A 61                            | 2,26                | 2,30                |                    |                 |               |
| A 61                            | 2,40                | 2,25                | 2,27               | 0,08            | 3,46          |
| A 61                            | 2,22                | 2,17                |                    |                 |               |
| A 62                            | 1,71                | 1,73                |                    |                 |               |
| A 62                            | 1,72                | 2,14                | 1,85               | 0,20            | 10,99         |
| A 62                            | 2,07                | 1,70                |                    |                 |               |
| A 63                            | 1,45                | 1,74                |                    |                 |               |
| A 63                            | 1,65                | 1,83                | 1,65               | 0,13            | 8,10          |
| A 63                            | 1,68                | 1,56                |                    |                 |               |
| A91                             | 0,58                | 0,8                 |                    |                 |               |
| A91                             | 0,9                 | 0,83                |                    |                 |               |
| A91                             | 0,65                | 0,77                | 0,73               | 0,10            | 13,57         |
| A91                             | 0,65                | 0,66                |                    |                 |               |
| A91                             | 0,69                | 0,76                |                    |                 |               |
| A92                             | 0,52                | 0,7                 |                    |                 |               |
| A92                             | 0,64                | 0,57                |                    |                 |               |
| A92                             | 0,67                | 0,57                | 0,61               | 0,05            | 8,79          |
| A92                             | 0,64                | 0,57                |                    |                 |               |
| A92                             | 0,62                | 0,55                |                    |                 |               |
| A92                             | 0,58                | 0,63                |                    |                 |               |
| A93                             | 0,8                 | 0,8                 |                    |                 |               |
| A93                             | 0,83                | 0,9                 |                    |                 |               |
| A93                             | 0,7                 | 0,57                | 0,77               | 0,10            | 12,64         |
| A93                             | 0,78                | 0,83                |                    |                 |               |
| A93                             | 0,67                | 0,84                |                    |                 |               |

## APÊNDICE B

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionalamento 1:0:3 (A3) lançada a 100 cm de altura

| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A31       | POLIETILENO | 100                       | 82,64               | 79,32     | 2,89              | 3,65                         |
| A31       | POLIETILENO | 100                       | 77,37               |           |                   |                              |
| A31       | POLIETILENO | 100                       | 77,95               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 100                       | 90,79               | 90,53     | 3,07              | 3,39                         |
| A31       | ACRÍLICO    | 100                       | 88,27               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 100                       | 94,78               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 100                       | 88,27               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 100                       | 90,40               | 89,53     | 3,72              | 4,15                         |
| A31       | VIDRO       | 100                       | 84,15               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 100                       | 90,86               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 100                       | 92,69               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 100                       | 83,48               | 85,44     | 1,57              | 1,84                         |
| A32       | POLIETILENO | 100                       | 87,31               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 100                       | 85,31               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 100                       | 85,65               |           |                   |                              |
| A32       | ACRÍLICO    | 100                       | 95,19               | 94,53     | 0,90              | 0,95                         |
| A32       | ACRÍLICO    | 100                       | 93,50               |           |                   |                              |
| A32       | ACRÍLICO    | 100                       | 94,91               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 100                       | 94,69               | 91,08     | 3,62              | 3,97                         |
| A32       | VIDRO       | 100                       | 85,87               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 100                       | 88,96               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 100                       | 93,57               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 100                       | 92,32               |           |                   |                              |
| A33       | POLIETILENO | 100                       | 78,30               | 81,04     | 5,54              | 6,83                         |
| A33       | POLIETILENO | 100                       | 87,91               |           |                   |                              |
| A33       | POLIETILENO | 100                       | 82,75               |           |                   |                              |
| A33       | POLIETILENO | 100                       | 75,18               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 100                       | 95,83               | 91,99     | 4,96              | 5,39                         |
| A33       | ACRÍLICO    | 100                       | 84,13               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 100                       | 92,93               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 100                       | 87,77               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 100                       | 94,96               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 97,81               | 93,01     | 4,37              | 4,70                         |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 92,42               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 90,83               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 85,72               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 96,01               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 100                       | 95,30               |           |                   |                              |

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionalamento 1:0:3 (A3) lançada a 30 cm de altura

| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 76,40               | 83,34     | 6,67              | 8,00                         |
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 90,48               |           |                   |                              |
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 90,67               |           |                   |                              |
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 84,25               |           |                   |                              |
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 75,05               |           |                   |                              |
| A31       | POLIETILENO | 30                        | 83,20               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 30                        | 81,05               | 78,33     | 5,23              | 6,68                         |
| A31       | ACRÍLICO    | 30                        | 70,96               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 30                        | 82,84               |           |                   |                              |
| A31       | ACRÍLICO    | 30                        | 78,47               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 72,58               | 78,89     | 7,89              | 10,00                        |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 77,64               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 84,64               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 70,39               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 91,50               |           |                   |                              |
| A31       | VIDRO       | 30                        | 76,59               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 30                        | 86,59               | 84,02     | 5,54              | 6,59                         |
| A32       | POLIETILENO | 30                        | 78,11               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 30                        | 78,21               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 30                        | 90,23               |           |                   |                              |
| A32       | POLIETILENO | 30                        | 86,96               |           |                   |                              |
| A32       | ACRÍLICO    | 30                        | 77,94               | 82,70     | 4,69              | 5,67                         |
| A32       | ACRÍLICO    | 30                        | 88,38               |           |                   |                              |
| A32       | ACRÍLICO    | 30                        | 84,53               |           |                   |                              |
| A32       | ACRÍLICO    | 30                        | 79,95               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 30                        | 88,67               | 85,96     | 2,40              | 2,79                         |
| A32       | VIDRO       | 30                        | 84,10               |           |                   |                              |
| A32       | VIDRO       | 30                        | 85,11               |           |                   |                              |
| A33       | POLIETILENO | 30                        | 87,29               | 85,52     | 1,53              | 1,79                         |
| A33       | POLIETILENO | 30                        | 84,56               |           |                   |                              |
| A33       | POLIETILENO | 30                        | 84,71               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 94,82               | 83,98     | 9,40              | 11,19                        |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 72,37               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 95,46               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 82,53               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 76,85               |           |                   |                              |
| A33       | ACRÍLICO    | 30                        | 81,84               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 30                        | 94,79               | 92,19     | 3,54              | 3,84                         |
| A33       | VIDRO       | 30                        | 95,79               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 30                        | 92,64               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 30                        | 86,87               |           |                   |                              |
| A33       | VIDRO       | 30                        | 90,85               |           |                   |                              |

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionamento 1:1:6 (A6) lançada a 100 cm de altura

| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A61       | POLIETILENO | 100                       | 76,04               | 79,01     | 6,69              | 8,46                         |
| A61       | POLIETILENO | 100                       | 88,27               |           |                   |                              |
| A61       | POLIETILENO | 100                       | 79,00               |           |                   |                              |
| A61       | POLIETILENO | 100                       | 72,72               |           |                   |                              |
| A61       | ACRÍLICO    | 100                       | 88,21               | 81,15     | 9,83              | 12,12                        |
| A61       | ACRÍLICO    | 100                       | 64,76               |           |                   |                              |
| A61       | ACRÍLICO    | 100                       | 79,68               |           |                   |                              |
| A61       | ACRÍLICO    | 100                       | 84,61               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 100                       | 76,90               | 78,31     | 9,92              | 12,67                        |
| A61       | VIDRO       | 100                       | 83,70               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 100                       | 61,90               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 100                       | 81,70               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 100                       | 87,35               |           |                   |                              |
| A62       | POLIETILENO | 100                       | 67,94               | 62,52     | 4,87              | 7,79                         |
| A62       | POLIETILENO | 100                       | 61,09               |           |                   |                              |
| A62       | POLIETILENO | 100                       | 58,52               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 100                       | 65,91               | 73,70     | 11,31             | 15,34                        |
| A62       | ACRÍLICO    | 100                       | 89,18               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 100                       | 82,28               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 100                       | 63,94               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 100                       | 67,19               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 100                       | 79,44               | 75,96     | 3,04              | 4,00                         |
| A62       | VIDRO       | 100                       | 74,61               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 100                       | 73,84               |           |                   |                              |
| A63       | POLIETILENO | 100                       | 76,54               | 72,46     | 3,53              | 4,87                         |
| A63       | POLIETILENO | 100                       | 70,39               |           |                   |                              |
| A63       | POLIETILENO | 100                       | 70,46               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 100                       | 85,04               | 82,85     | 5,68              | 6,86                         |
| A63       | ACRÍLICO    | 100                       | 74,75               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 100                       | 83,66               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 100                       | 87,93               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 100                       | 92,26               | 89,29     | 4,18              | 4,68                         |
| A63       | VIDRO       | 100                       | 83,29               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 100                       | 92,01               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 100                       | 89,58               |           |                   |                              |

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionalamento 1:1:6 (A6) lançada a 30 cm de altura

| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A61       | POLIETILENO | 30                        | 71,96               | 75,35     | 6,41              | 8,51                         |
| A61       | POLIETILENO | 30                        | 86,36               |           |                   |                              |
| A61       | POLIETILENO | 30                        | 75,05               |           |                   |                              |
| A61       | POLIETILENO | 30                        | 73,23               |           |                   |                              |
| A61       | POLIETILENO | 30                        | 70,13               |           |                   |                              |
| A61       | ACRÍLICO    | 30                        | 71,51               | 73,29     | 2,44              | 3,32                         |
| A61       | ACRÍLICO    | 30                        | 76,07               |           |                   |                              |
| A61       | ACRÍLICO    | 30                        | 72,30               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 30                        | 78,37               | 71,93     | 5,70              | 7,92                         |
| A61       | VIDRO       | 30                        | 64,58               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 30                        | 71,52               |           |                   |                              |
| A61       | VIDRO       | 30                        | 73,23               |           |                   |                              |
| A62       | POLIETILENO | 30                        | 67,66               | 66,93     | 1,94              | 2,89                         |
| A62       | POLIETILENO | 30                        | 64,73               |           |                   |                              |
| A62       | POLIETILENO | 30                        | 68,39               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 30                        | 60,29               | 63,86     | 7,06              | 11,05                        |
| A62       | ACRÍLICO    | 30                        | 71,87               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 30                        | 71,04               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 30                        | 59,27               |           |                   |                              |
| A62       | ACRÍLICO    | 30                        | 56,81               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 30                        | 76,02               | 72,88     | 8,11              | 11,12                        |
| A62       | VIDRO       | 30                        | 82,29               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 30                        | 76,28               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 30                        | 61,33               |           |                   |                              |
| A62       | VIDRO       | 30                        | 68,46               |           |                   |                              |
| A63       | POLIETILENO | 30                        | 75,28               | 75,34     | 2,94              | 3,90                         |
| A63       | POLIETILENO | 30                        | 78,31               |           |                   |                              |
| A63       | POLIETILENO | 30                        | 72,44               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 30                        | 78,10               | 76,31     | 6,19              | 8,11                         |
| A63       | ACRÍLICO    | 30                        | 66,77               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 30                        | 83,44               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 30                        | 78,61               |           |                   |                              |
| A63       | ACRÍLICO    | 30                        | 74,61               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 30                        | 76,35               | 74,84     | 7,41              | 9,90                         |
| A63       | VIDRO       | 30                        | 64,20               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 30                        | 81,37               |           |                   |                              |
| A63       | VIDRO       | 30                        | 77,43               |           |                   |                              |

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionamento 1:2:9 (A9) lançada a 100 cm de altura

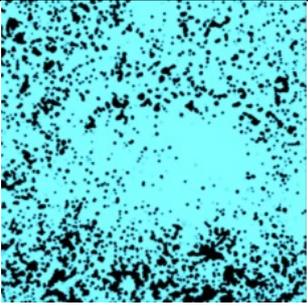
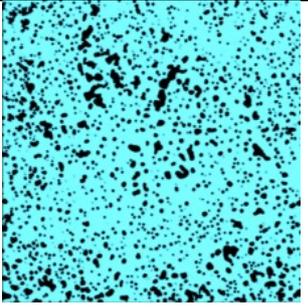
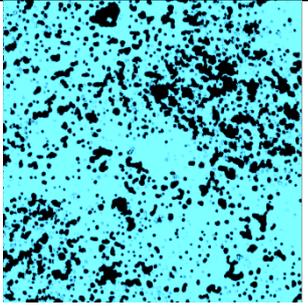
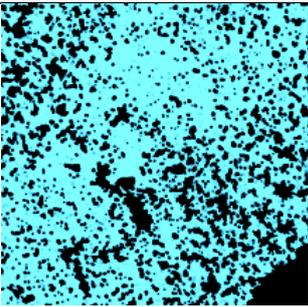
| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A91       | POLIETILENO | 100                       | 82,85               | 84,66     | 4,66              | 5,51                         |
| A91       | POLIETILENO | 100                       | 91,26               |           |                   |                              |
| A91       | POLIETILENO | 100                       | 78,49               |           |                   |                              |
| A91       | POLIETILENO | 100                       | 86,11               |           |                   |                              |
| A91       | POLIETILENO | 100                       | 84,58               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 100                       | 77,26               | 81,71     | 3,36              | 4,11                         |
| A91       | ACRÍLICO    | 100                       | 85,20               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 100                       | 83,04               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 100                       | 81,35               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 100                       | 93,96               | 92,19     | 1,42              | 1,55                         |
| A91       | VIDRO       | 100                       | 90,48               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 100                       | 92,00               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 100                       | 92,32               |           |                   |                              |
| A92       | POLIETILENO | 100                       | 82,23               | 78,74     | 3,75              | 4,76                         |
| A92       | POLIETILENO | 100                       | 74,77               |           |                   |                              |
| A92       | POLIETILENO | 100                       | 79,22               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 100                       | 83,94               | 85,44     | 2,77              | 3,24                         |
| A92       | ACRÍLICO    | 100                       | 88,63               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 100                       | 83,74               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 100                       | 85,73               | 86,87     | 2,28              | 2,62                         |
| A92       | VIDRO       | 100                       | 90,07               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 100                       | 84,88               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 100                       | 86,82               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 100                       | 87,45               | 89,83     | 3,07              | 3,42                         |
| A93       | POLIETILENO | 100                       | 93,65               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 100                       | 87,23               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 100                       | 90,99               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 100                       | 98,20               | 98,01     | 0,17              | 0,17                         |
| A93       | ACRÍLICO    | 100                       | 97,87               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 100                       | 97,98               |           |                   |                              |
| A93       | VIDRO       | 100                       | 95,04               | 94,52     | 1,16              | 1,22                         |
| A93       | VIDRO       | 100                       | 95,86               |           |                   |                              |
| A93       | VIDRO       | 100                       | 93,89               |           |                   |                              |
| A93       | VIDRO       | 100                       | 93,27               |           |                   |                              |

Percentual de área de contato da argamassa de proporcionamento 1:2:9 (A9) lançada a 30 cm de altura

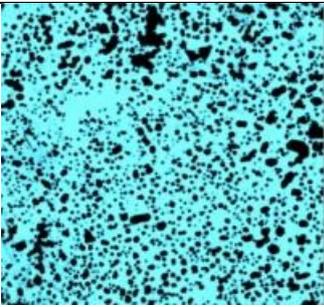
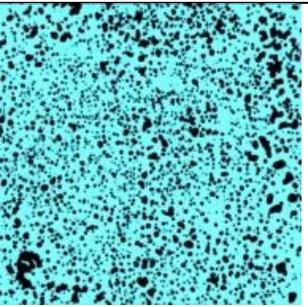
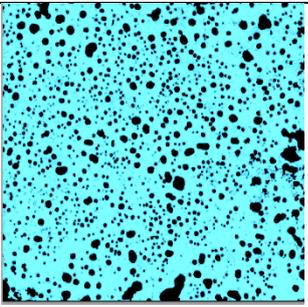
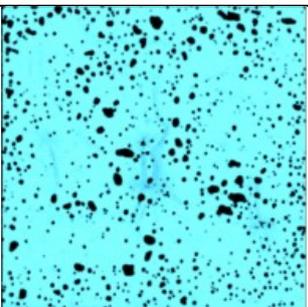
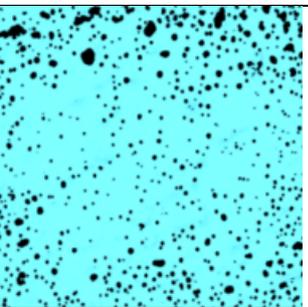
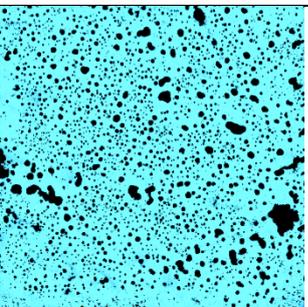
| Argamassa | Substrato   | Altura de lançamento (cm) | Área de contato (%) | Média (%) | Desvio Padrão (%) | Coefficiente de Variação (%) |
|-----------|-------------|---------------------------|---------------------|-----------|-------------------|------------------------------|
| A91       | POLIETILENO | 30                        | 88,50               | 87,77     | 4,63              | 5,27                         |
| A91       | POLIETILENO | 30                        | 94,04               |           |                   |                              |
| A91       | POLIETILENO | 30                        | 84,22               |           |                   |                              |
| A91       | POLIETILENO | 30                        | 84,34               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 30                        | 87,97               | 82,12     | 6,22              | 7,57                         |
| A91       | ACRÍLICO    | 30                        | 86,50               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 30                        | 73,21               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 30                        | 78,21               |           |                   |                              |
| A91       | ACRÍLICO    | 30                        | 84,70               | 79,57     | 7,13              | 8,96                         |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 74,16               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 80,85               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 83,45               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 70,95               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 90,86               |           |                   |                              |
| A91       | VIDRO       | 30                        | 77,12               | 81,81     | 0,77              | 0,94                         |
| A92       | POLIETILENO | 30                        | 80,99               |           |                   |                              |
| A92       | POLIETILENO | 30                        | 82,51               |           |                   |                              |
| A92       | POLIETILENO | 30                        | 81,93               | 80,36     | 10,05             | 12,51                        |
| A92       | ACRÍLICO    | 30                        | 85,32               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 30                        | 86,18               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 30                        | 65,88               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 30                        | 74,20               |           |                   |                              |
| A92       | ACRÍLICO    | 30                        | 90,25               | 75,66     | 10,11             | 13,36                        |
| A92       | VIDRO       | 30                        | 75,20               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 30                        | 61,74               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 30                        | 84,99               |           |                   |                              |
| A92       | VIDRO       | 30                        | 80,72               | 91,74     | 3,54              | 3,86                         |
| A93       | POLIETILENO | 30                        | 87,80               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 30                        | 90,18               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 30                        | 92,97               |           |                   |                              |
| A93       | POLIETILENO | 30                        | 96,01               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 30                        | 97,59               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 30                        | 96,70               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 30                        | 93,53               |           |                   |                              |
| A93       | ACRÍLICO    | 30                        | 97,28               | 96,28     | 1,87              | 1,94                         |
| A93       | VIDRO       | 30                        | 85,66               |           |                   |                              |
| A93       | VIDRO       | 30                        | 78,97               |           |                   |                              |
| A93       | VIDRO       | 30                        | 78,66               | 81,10     | 3,95              | 4,87                         |

## APÊNDICE C

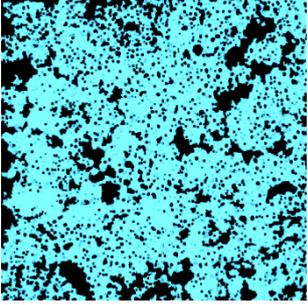
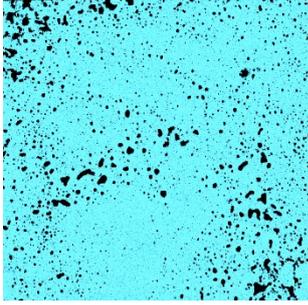
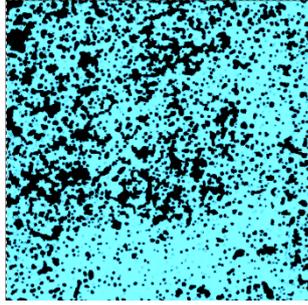
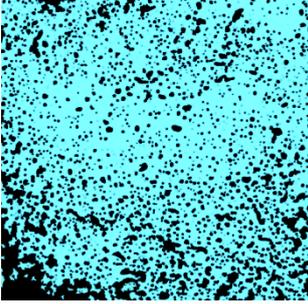
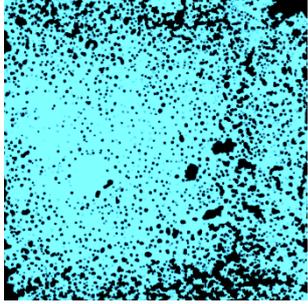
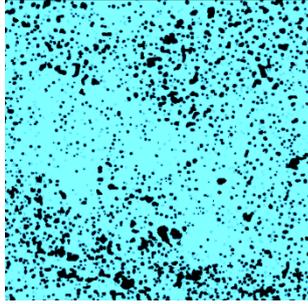
## A31 ACRÍLICO 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 81,05 %   | 82,84%  | 78,47%   |
|  |   |  |
| 70,96%  |   |  |

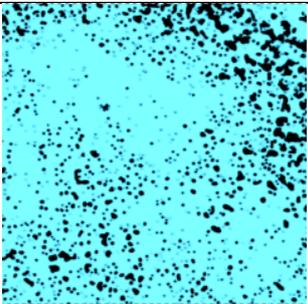
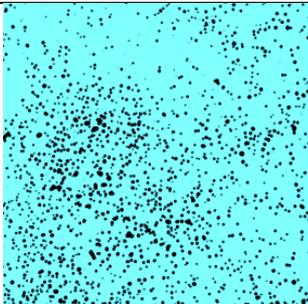
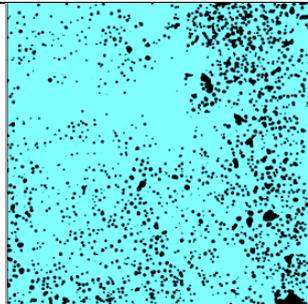
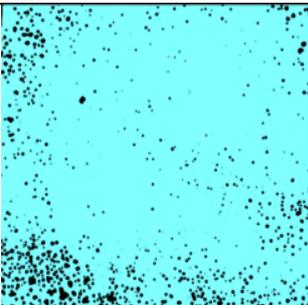
## A31 POLIETILENO 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 75,05%  | 76,40%  | 83,20%   |
|  |  |  |
| 90,48%  | 90,67%  | 84,25%   |

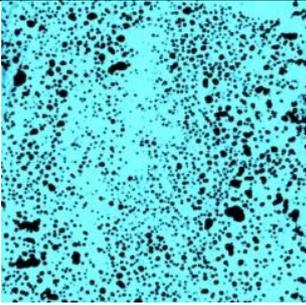
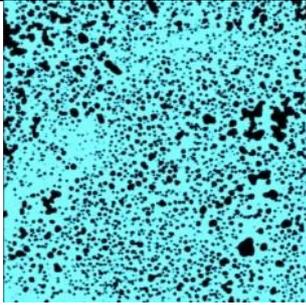
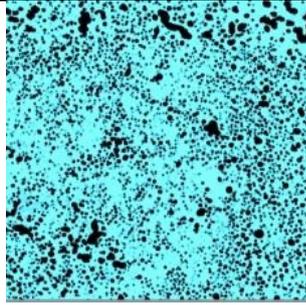
## A31 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 72,58%  | 91,50%  | 70,39%   |
|  |  |  |
| 76,59%  | 77,65%  | 84,64%   |

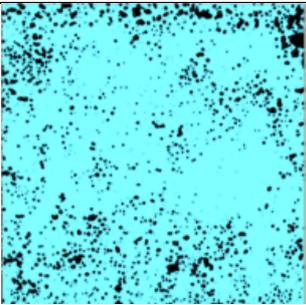
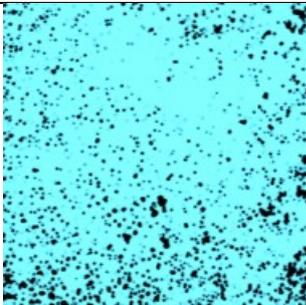
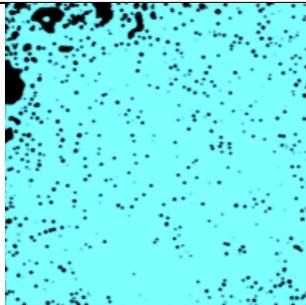
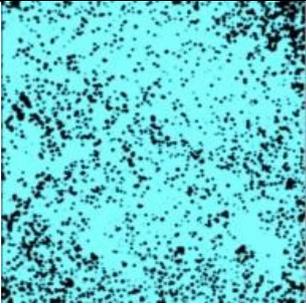
## A31 Acrílico 100cm

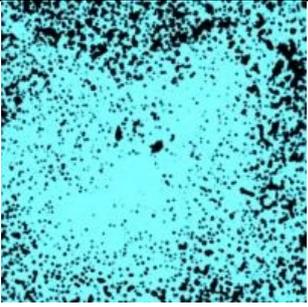
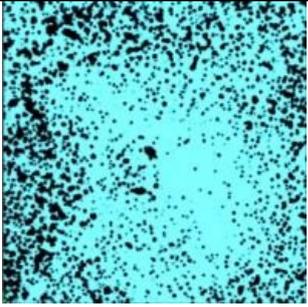
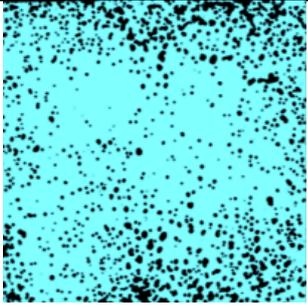
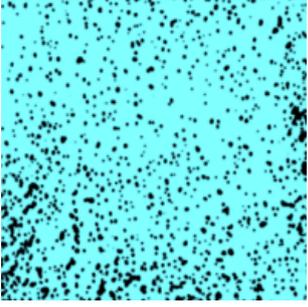
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 88,27%  | 90,79%  | 88,27%   |
|  |   |  |
| 94,78%  |   |  |

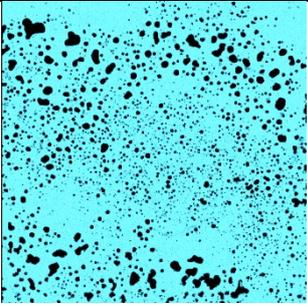
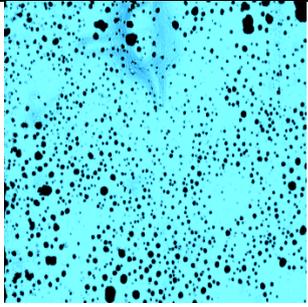
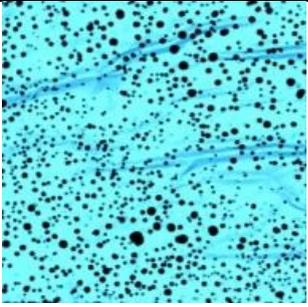
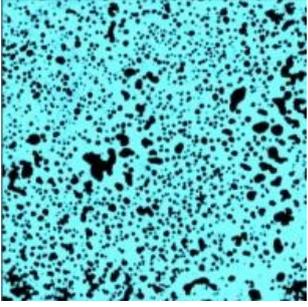
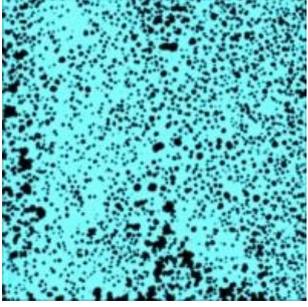
## A31 Polietileno 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 82,64%  | 77,37%  | 77,95%   |

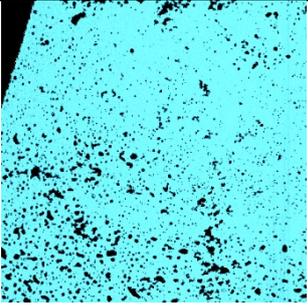
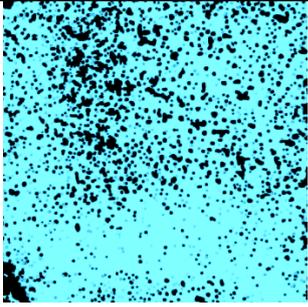
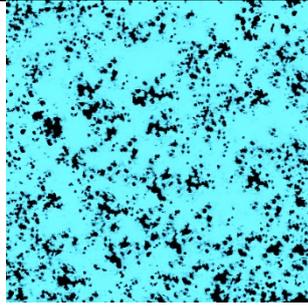
## A31 vidro 100cm

|   |  |   |
|---|--|---|
|   |  |  |
| 90,40%  | 90,86%   | 92,69%  |
|  |  |   |
| 84,15%  |  |   |

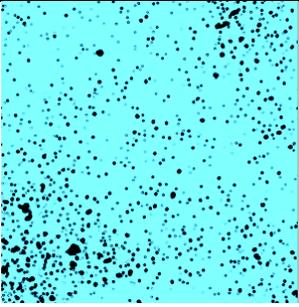
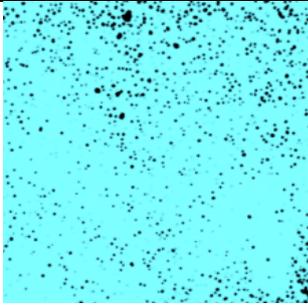
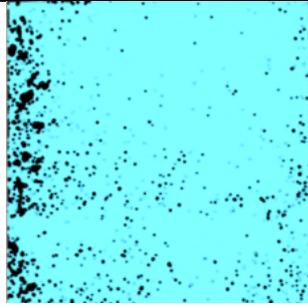
| A32 Acrílico 30cm   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 79,95%  | 77,94%  | 84,53%   |
|  |   |  |
| 88,38%  |   |  |

| A32 Polietileno 30cm  |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 86,59%  | 90,23%  | 86,96%   |
|  |  |  |
| 78,11%  | 78,21%  |  |

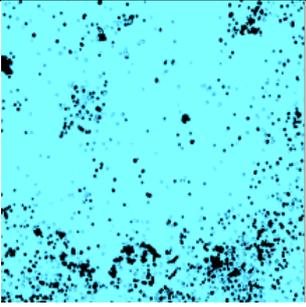
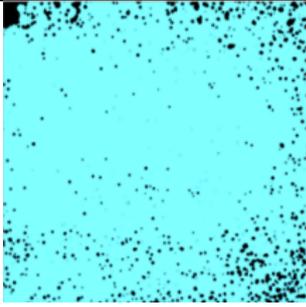
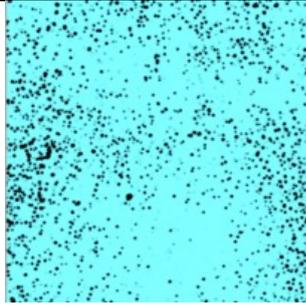
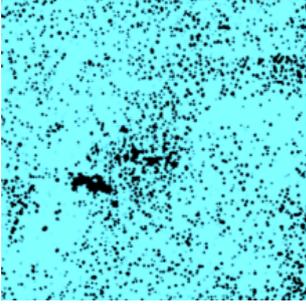
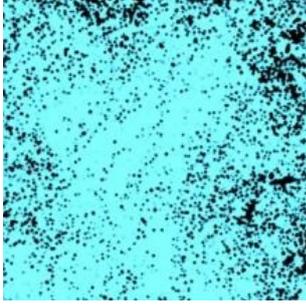
## A32 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 88,67%  | 84,10%  | 85,11%   |

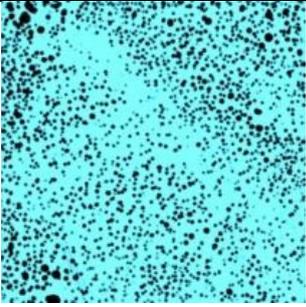
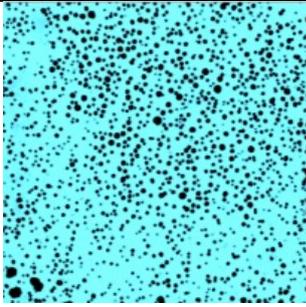
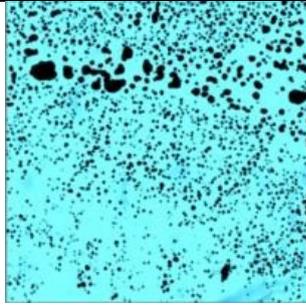
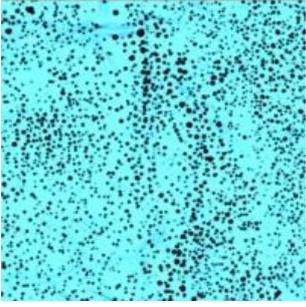
## A32 Acrílico 100cm

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  |  |
| 93,50%   | 95,19%   | 94,91%  |

## A32 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 93,57%  | 94,69%  | 92,32%   |
|  |  |  |
| 88,96%  | 85,87%  |  |

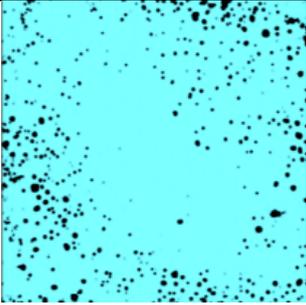
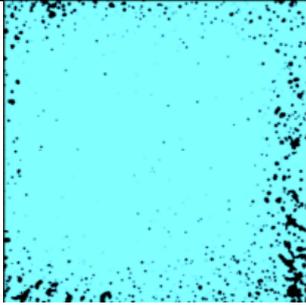
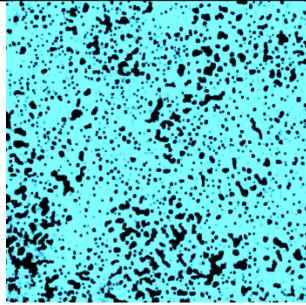
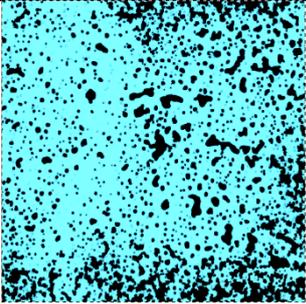
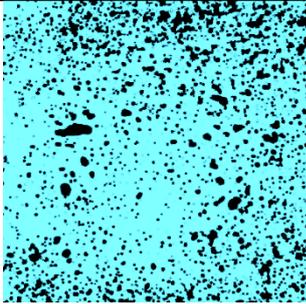
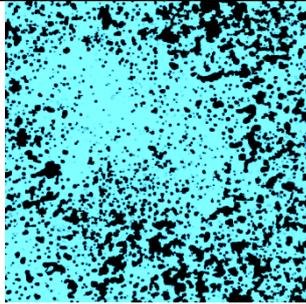
## A32 Polietileno 100 cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 83,48%  | 85,31%  | 85,65%   |
|  |   |  |
| 87,31%  |   |  |

---

A33 Acrílico 30cm

---

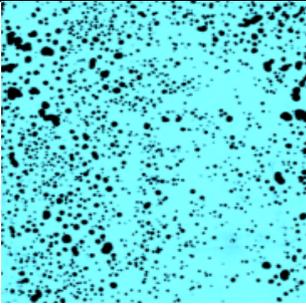
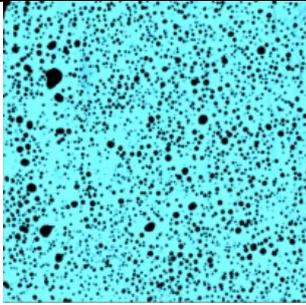
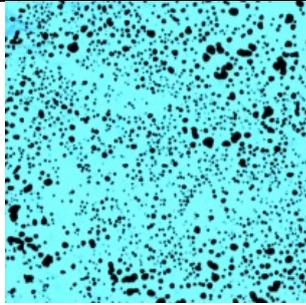
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 94,82%  | 95,46%  | 81,84%   |
|  |  |  |
| 76,85%  | 82,53%  | 72,37%   |

---

---

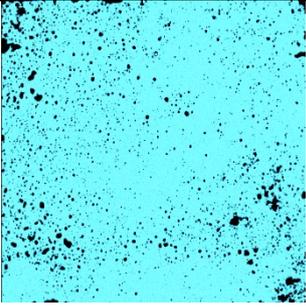
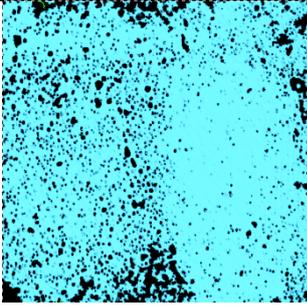
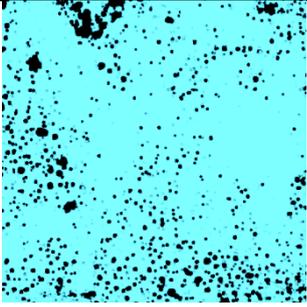
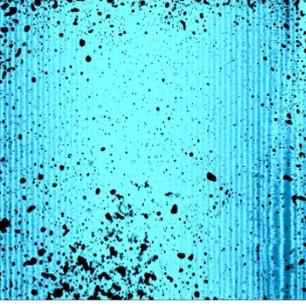
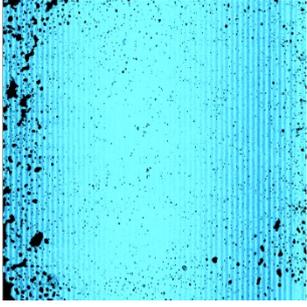
A33 Polietileno 30cm

---

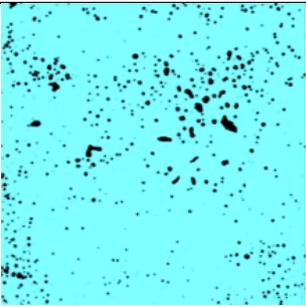
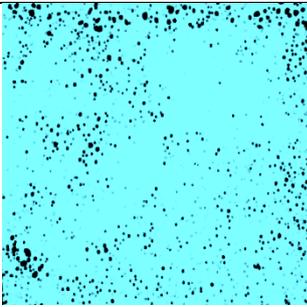
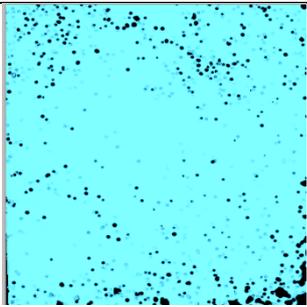
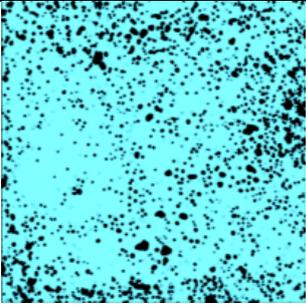
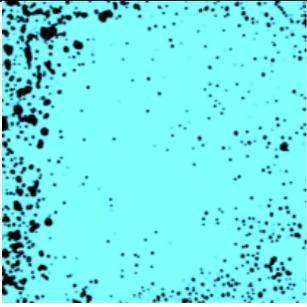
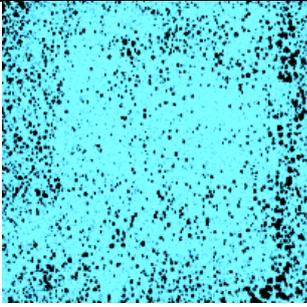
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 87,29%  | 84,56%  | 84,71%   |

---

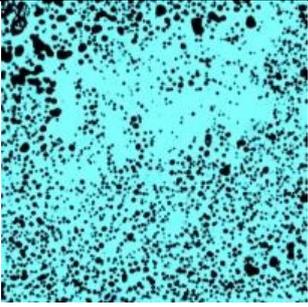
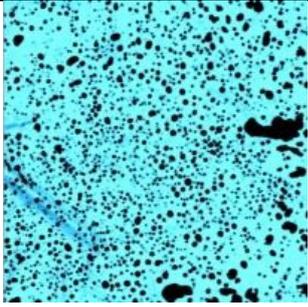
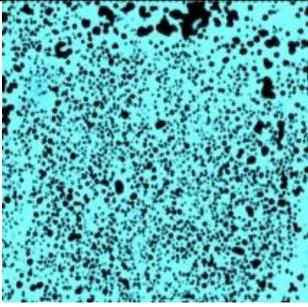
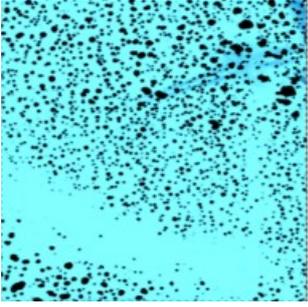
## A33 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 94,79 %   | 86,87%  | 90,85%   |
|  |  |  |
| 92,64%  | 95,79%  |  |

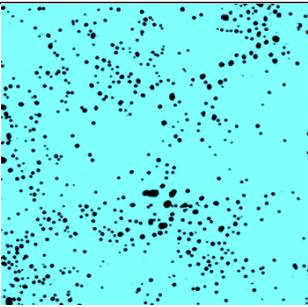
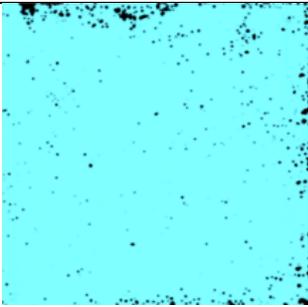
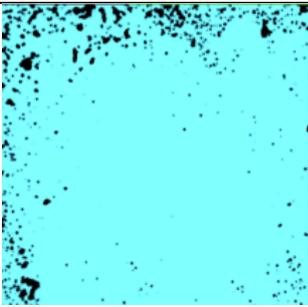
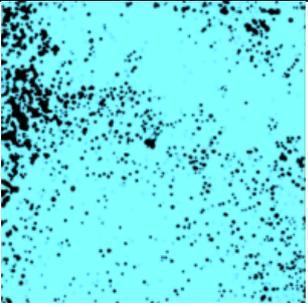
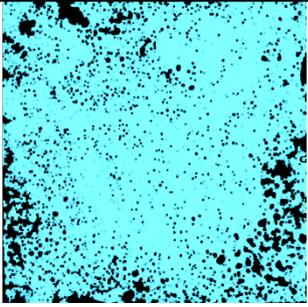
## A33 Acrílico 100cm

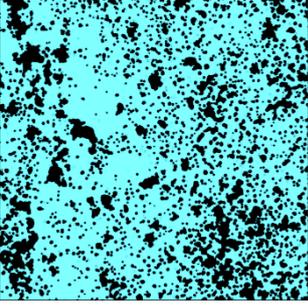
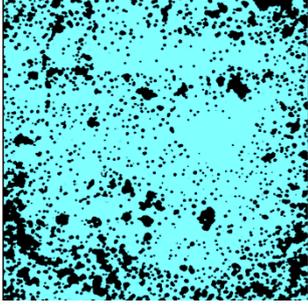
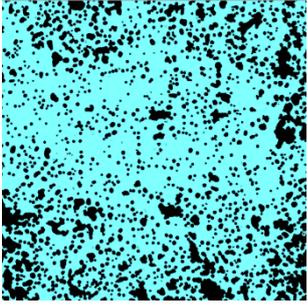
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 95,83%  | 94,96%  | 96,32%   |
|  |  |  |
| 84,13%  | 92,93%  | 87,77%   |

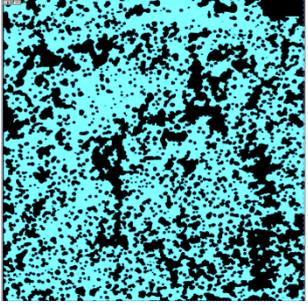
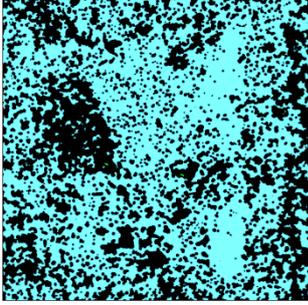
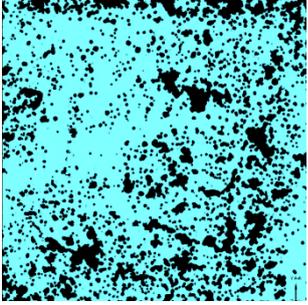
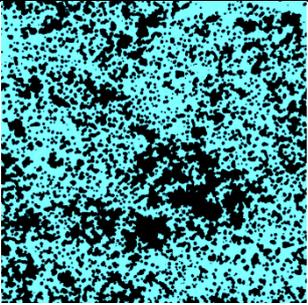
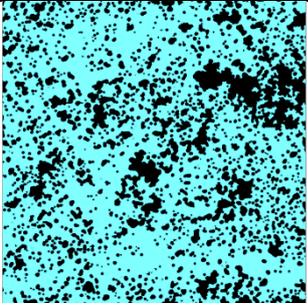
## A33 Polietileno 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 78,30%  | 82,75%  | 75,18%   |
|  |   |  |
| 87,91%  |   |  |

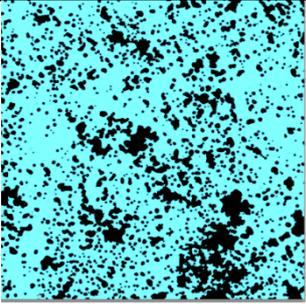
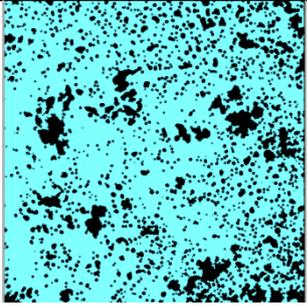
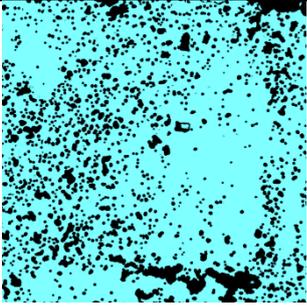
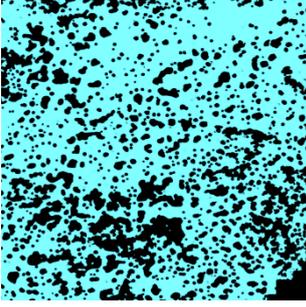
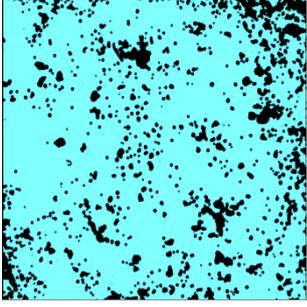
## A33 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 96,01%  | 97,81%  | 95,30%   |
|  |  |  |
| 90,83%  | 85,72%  |  |

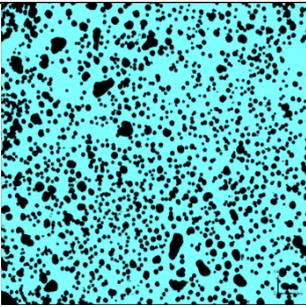
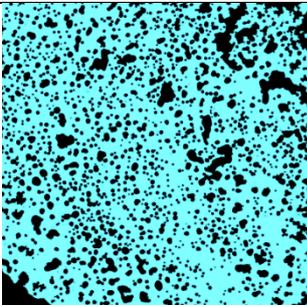
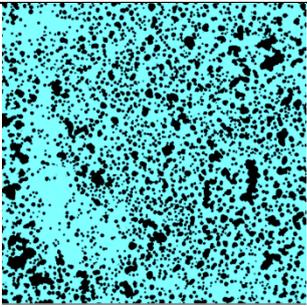
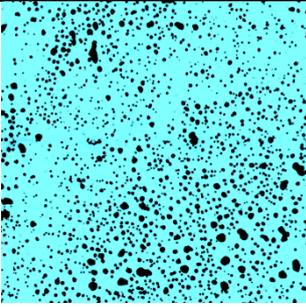
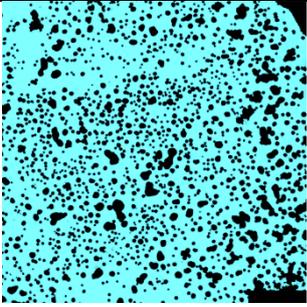
| A61 Acrílico 30cm   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 71,51%  | 76,07%  | 72,30%   |

| A62 Acrílico 30cm   |   |   |
|---|---|---|
|   |   |  |
| 60,29%  | 59,27%  | 71,87%  |
|  |  |   |
| 56,81%  | 71,04%  |   |

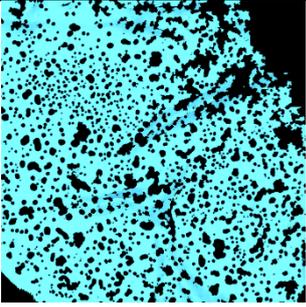
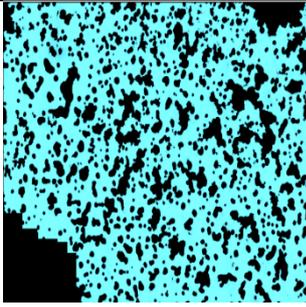
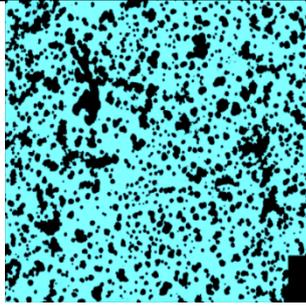
## A63 Acrílico 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 74,61%  | 78,10%  | 78,61%   |
|  |  |  |
| 66,77%  | 83,44%  |  |

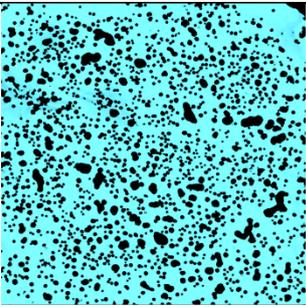
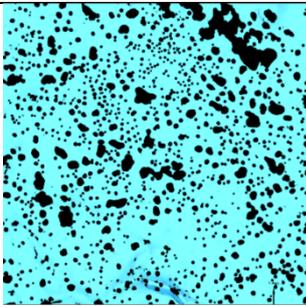
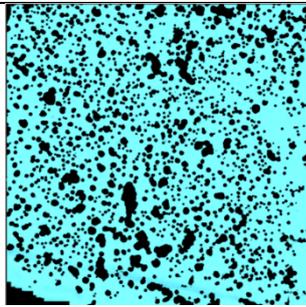
## A61 Polietileno 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 71,96%  | 73,23%  | 70,13%   |
|  |  |  |
| 86,36%  | 75,05%  |  |

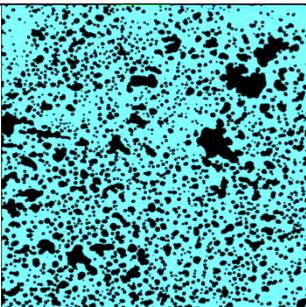
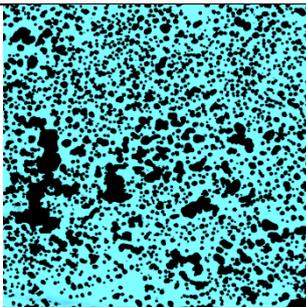
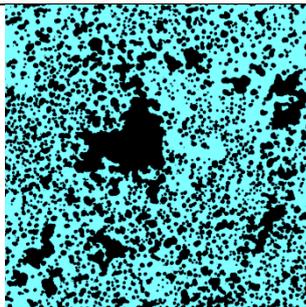
## A62 Polietileno 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 67,66%  | 64,73%  | 68,39%   |

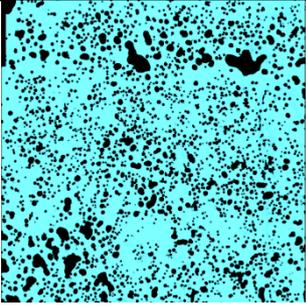
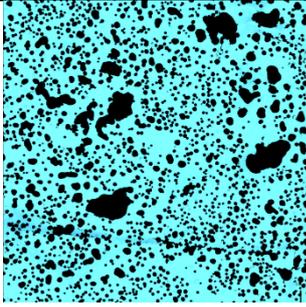
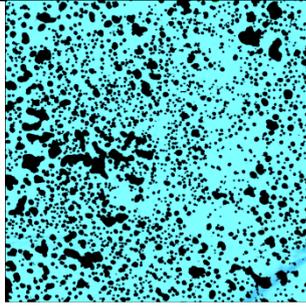
## A63 Polietileno 30cm

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  |  |
| 75,28%   | 78,31%   | 72,44%  |

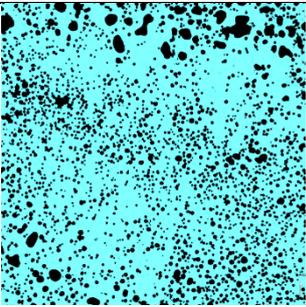
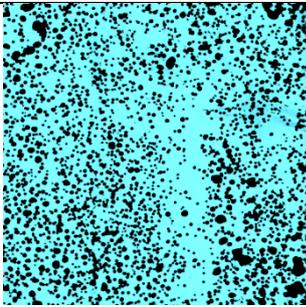
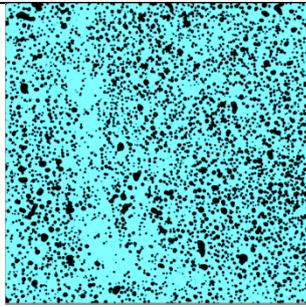
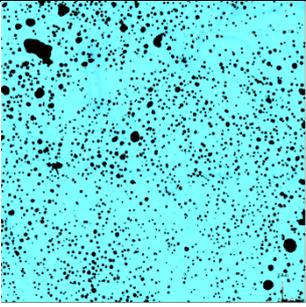
## A62 Polietileno 100cm

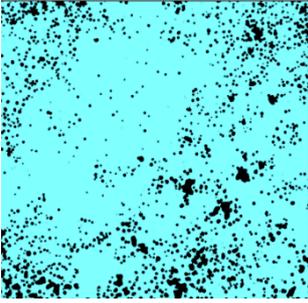
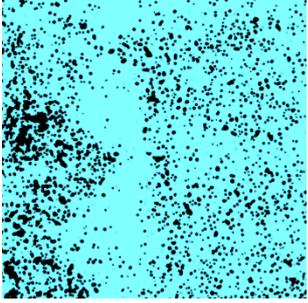
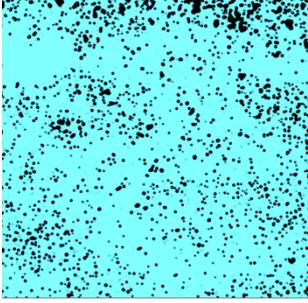
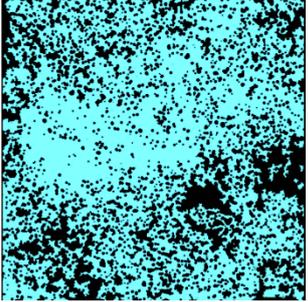
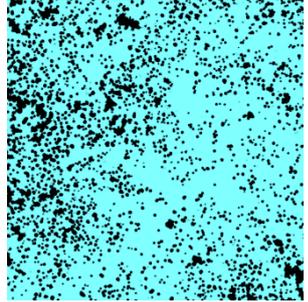
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 67,94%  | 61,09%  | 58,52%   |

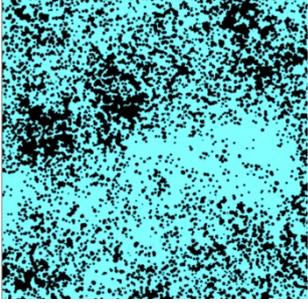
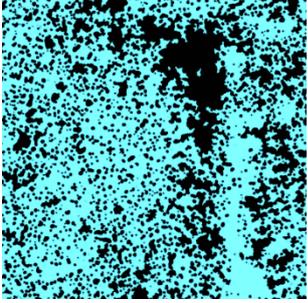
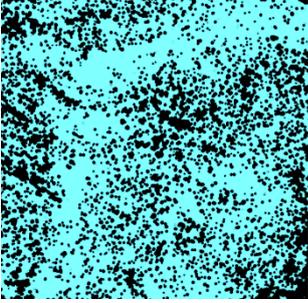
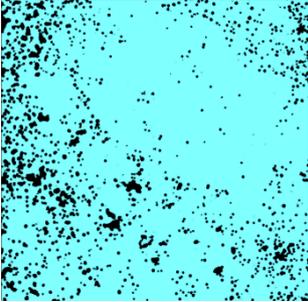
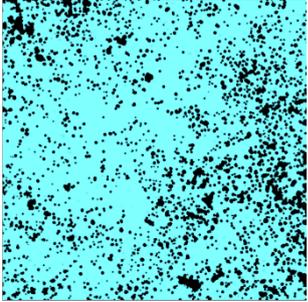
## A63 Polietileno 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 76,54%  | 70,39%  | 70,46%   |

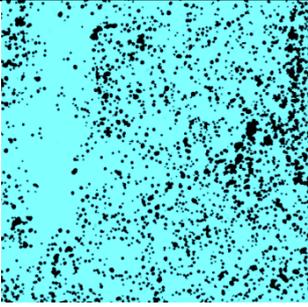
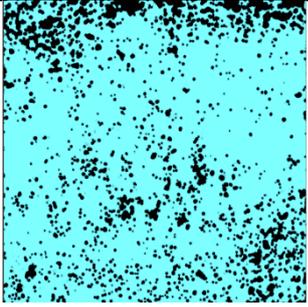
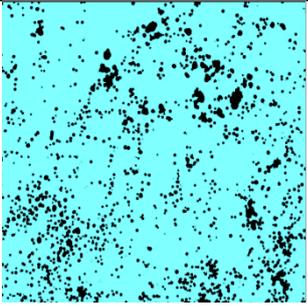
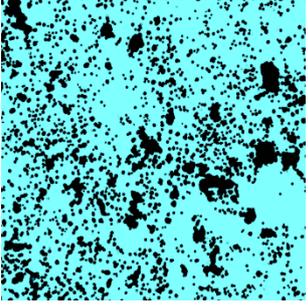
## A61 Polietileno 100cm

|   |  |   |
|---|--|---|
|   |  |  |
| 79,00%  | 72,72%   | 76,04%  |
|  |  |   |
| 88,27%  |  |   |

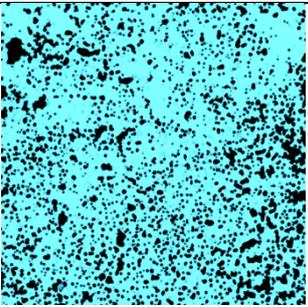
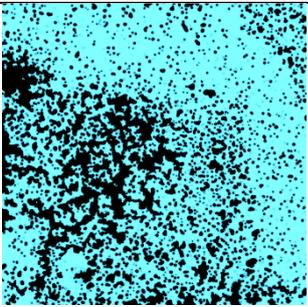
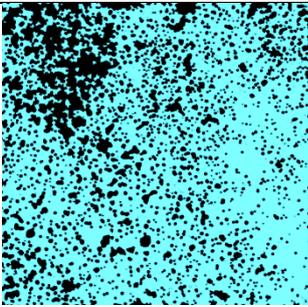
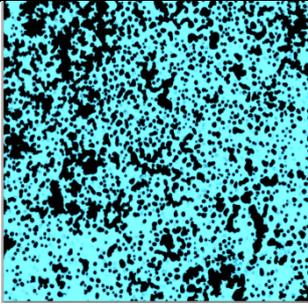
| A61 Acrílico 100cm  |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 88,21%  | 84,61%  | 88,51%   |
|  |  |  |
| 64,76%  | 79,68%  |  |

| A62 Acrílico 100cm  |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 65,91%  | 63,94%  | 67,19%   |
|  |  |  |
| 89,18%  | 82,28%  |  |

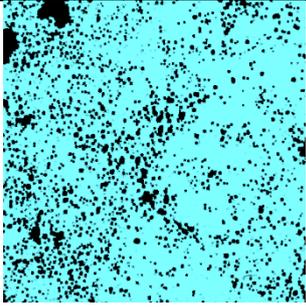
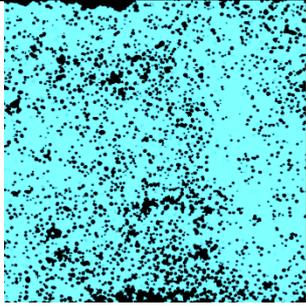
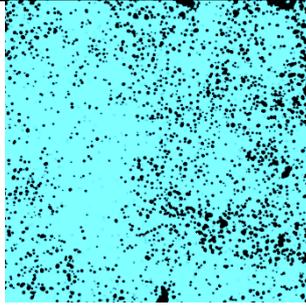
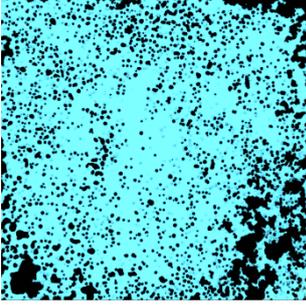
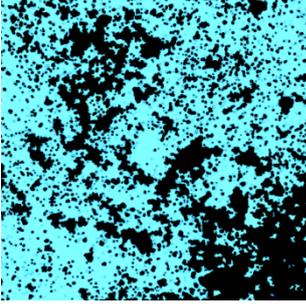
## A63 Acrílico 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 85,04%  | 83,66%  | 87,93%   |
|  |   |  |
| 74,75%  |   |  |

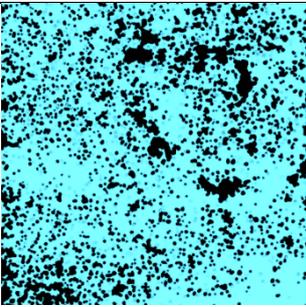
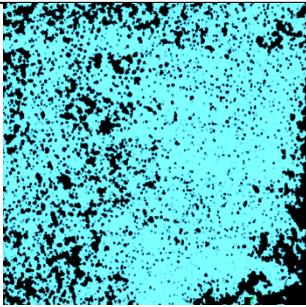
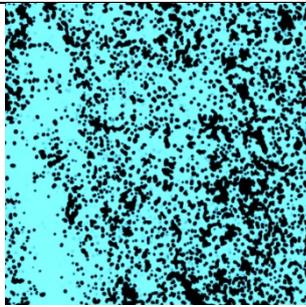
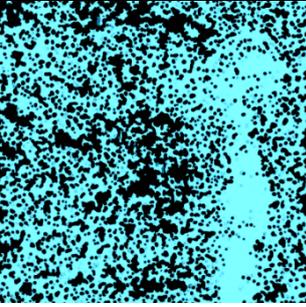
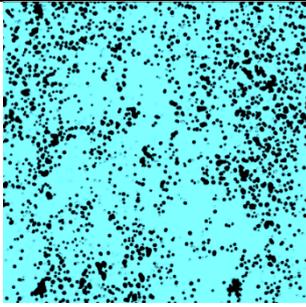
## A61 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 78,37%  | 71,52%  | 73,23%   |
|  |   |  |
| 64,58%  |   |  |

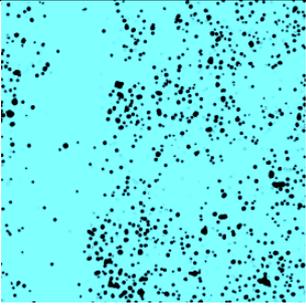
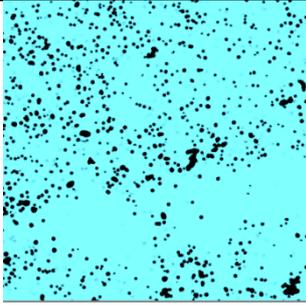
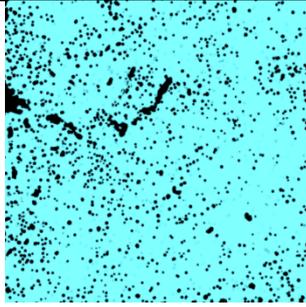
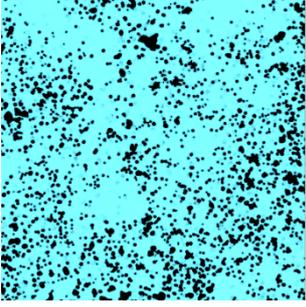
## A61 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 83,70%  | 81,70%  | 87,35%   |
|  |  |  |
| 76,90%  | 61,90%  |  |

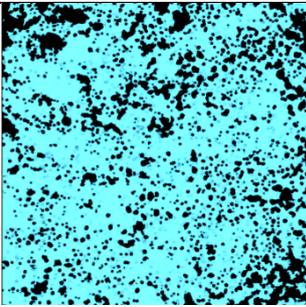
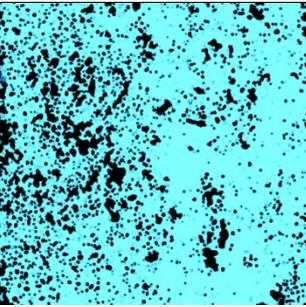
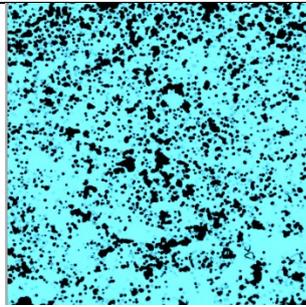
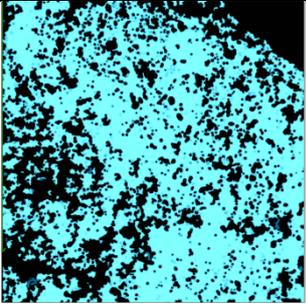
## A62 Vidro 30cm

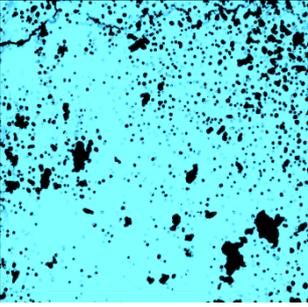
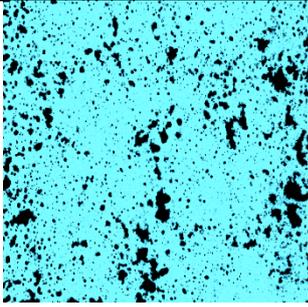
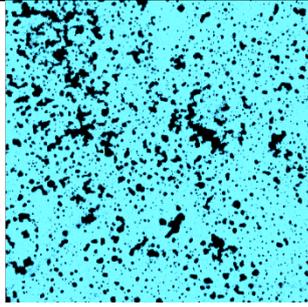
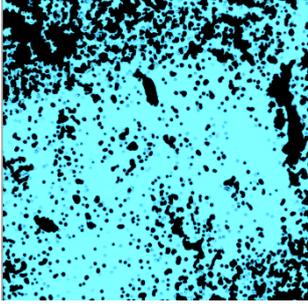
|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 76,02%  | 76,28%  | 68,46%   |
|  |  |  |
| 61,33%  | 82,29%  |  |

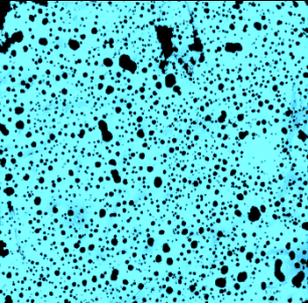
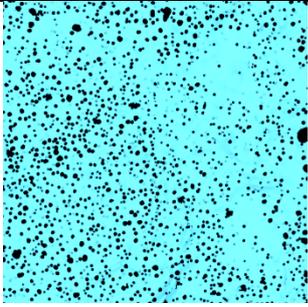
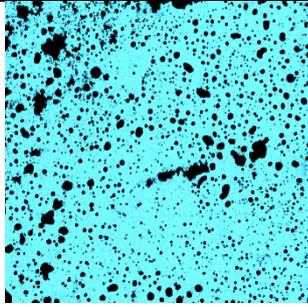
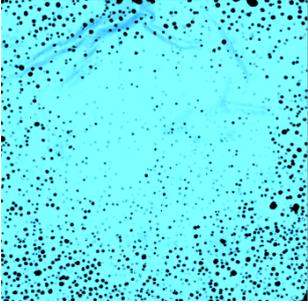
## A63 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 92,26%  | 92,01%  | 89,58%   |
|  |   |  |
| 83,29%  |   |  |

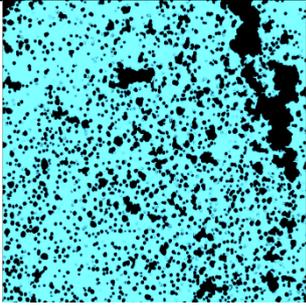
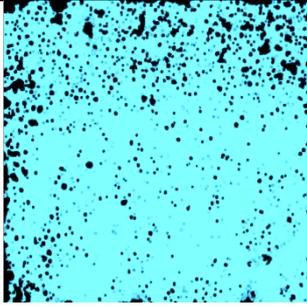
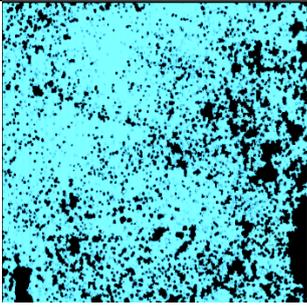
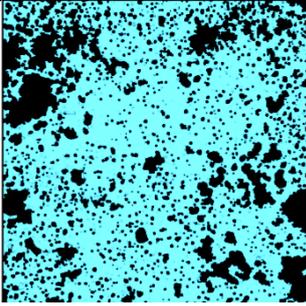
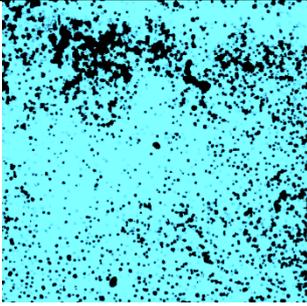
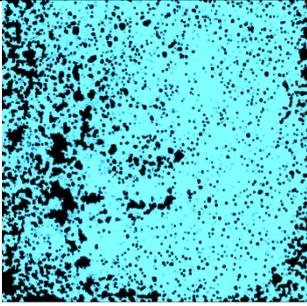
## A63 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 76,35%  | 81,37%  | 77,43%   |
|  |   |  |
| 64,20%  |   |  |

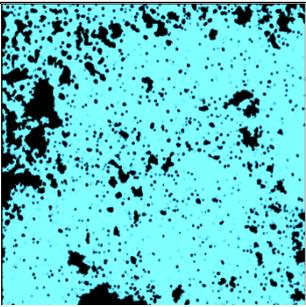
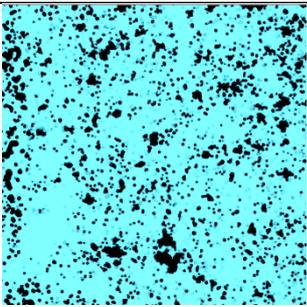
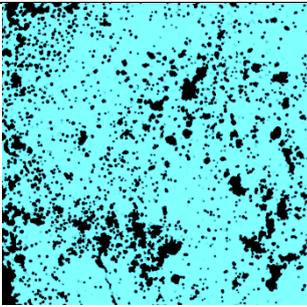
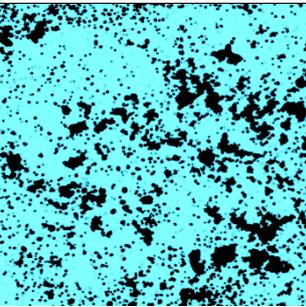
| A91 Acrílico 30cm   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 87,97%  | 84,70%  | 86,50%   |
|  |   |  |
| 73,21%  |   |  |

| A91 Polietileno 30cm  |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 84,34%  | 88,50%  | 84,22%   |
|  |   |  |
| 94,04%  |   |  |

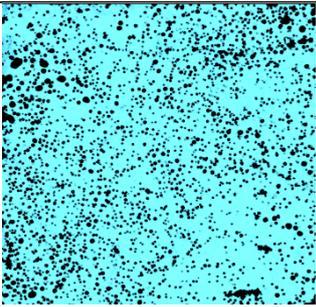
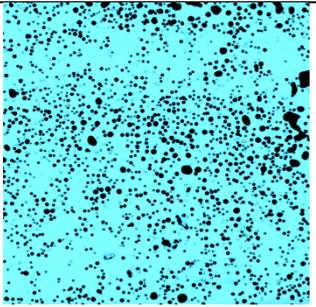
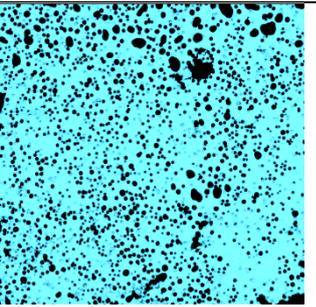
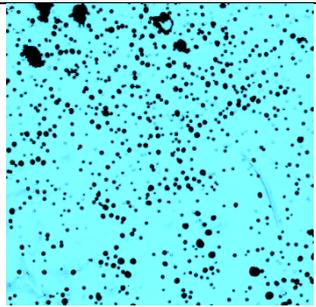
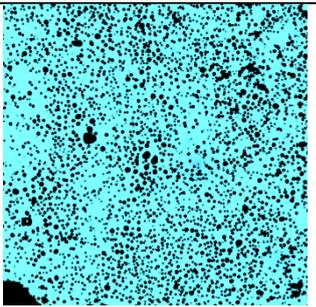
## A91 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 74,16%  | 90,86 %   | 77,12%   |
|  |  |  |
| 70,95%  | 83,45%  | 80,85%   |

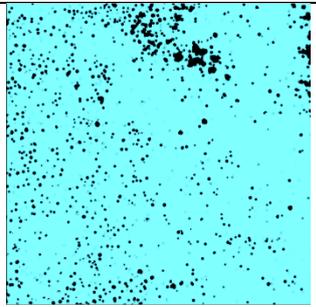
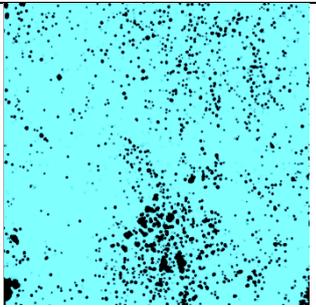
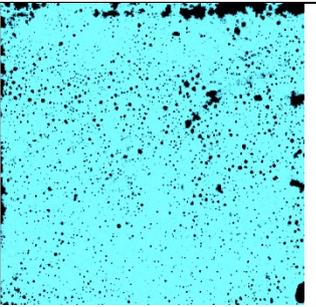
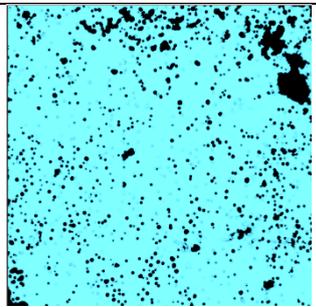
## A91 Acrílico 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 83,04%  | 85,20%  | 81,35%   |
|  |   |  |
| 77,26%  |   |  |

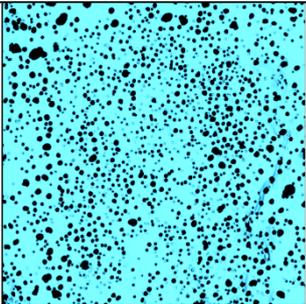
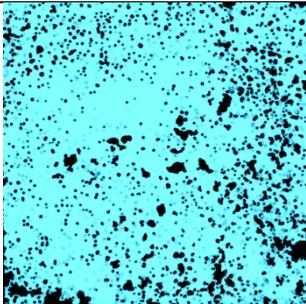
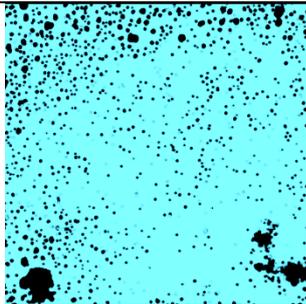
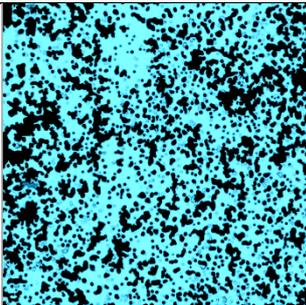
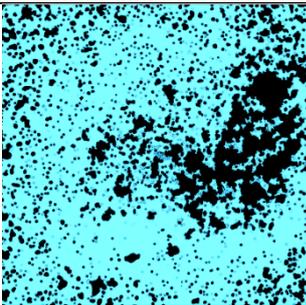
## A91 Polietileno 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 84,58%  | 86,11%  | 82,85%   |
|  |  |  |
| 91,26%  | 78,49%  |  |

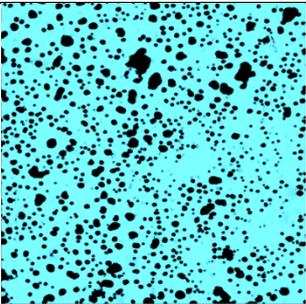
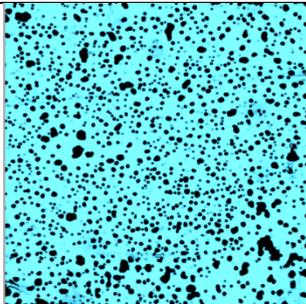
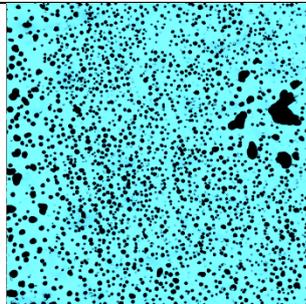
## A91 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 93,96%  | 92,00%  | 92,32%   |
|  |   |  |
| 90,48%  |   |  |

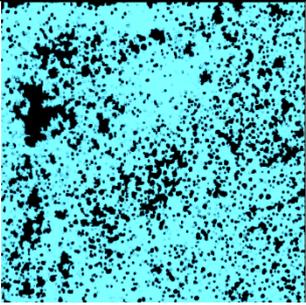
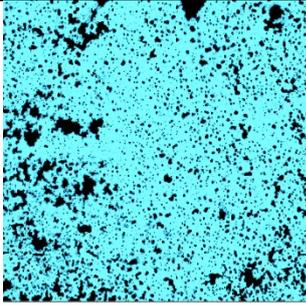
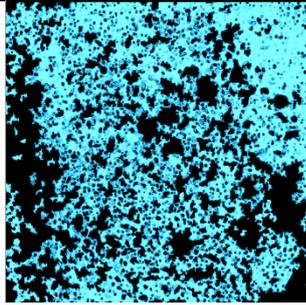
## A92 Acrílico 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 85,32%  | 86,18%  | 90,25%   |
|  |  |  |
| 65,88%  | 74,20%  |  |

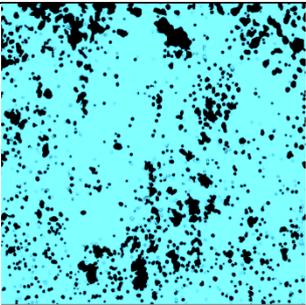
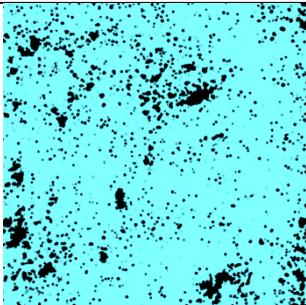
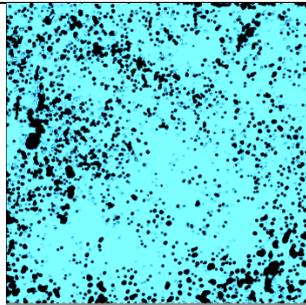
## A92 Polietileno 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 80,99 %   | 82,51 %   | 81,93%   |

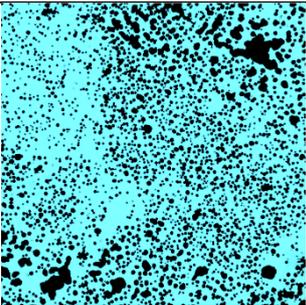
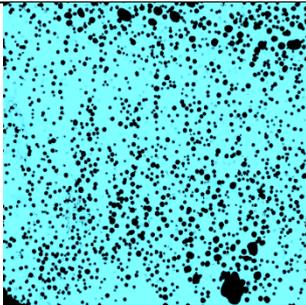
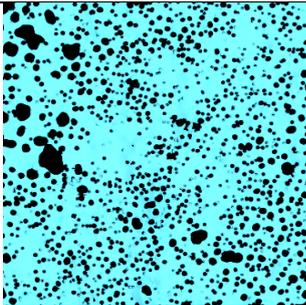
## A92 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 75,20%  | 84,99%  | 61,74%   |

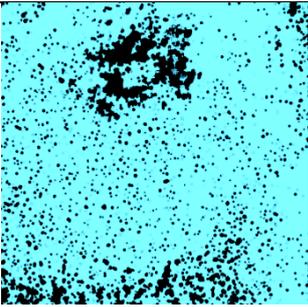
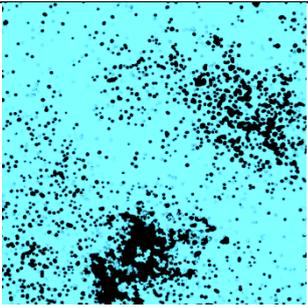
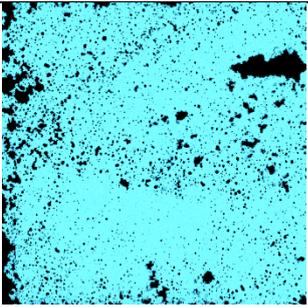
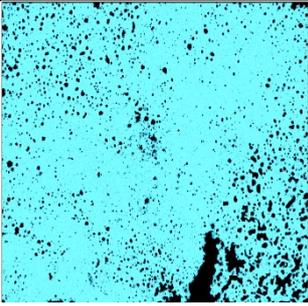
## A92 Acrílico 100cm

|  |  |   |
|--|--|---|
|  |  |  |
| 83,94%   | 88,63%   | 83,74%  |

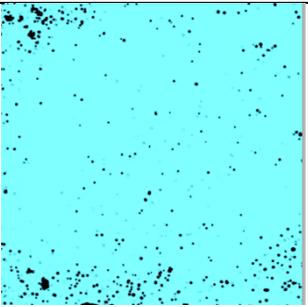
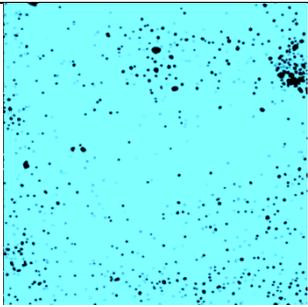
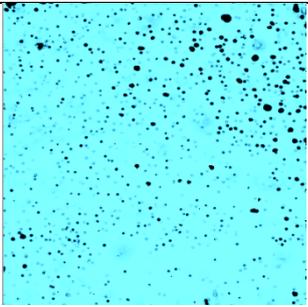
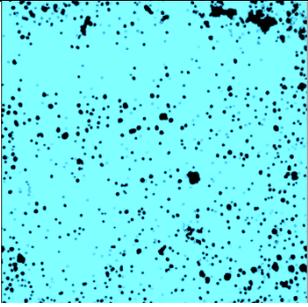
## A92 Polietileno 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 74,77%  | 82,23%  | 79,22%   |

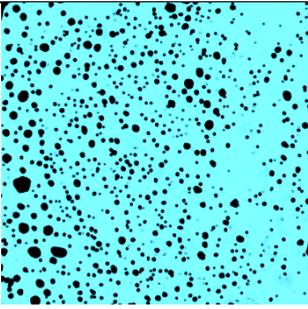
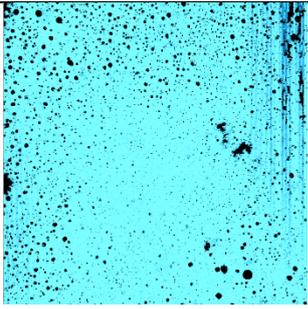
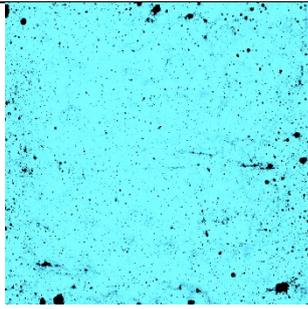
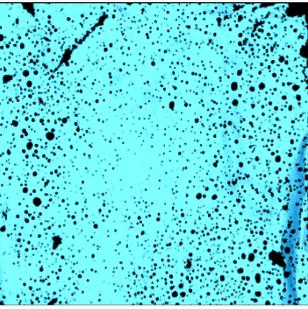
## A92 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 85,73%  | 84,88%  | 86,82%   |
|  |   |  |
| 90,07%  |   |  |

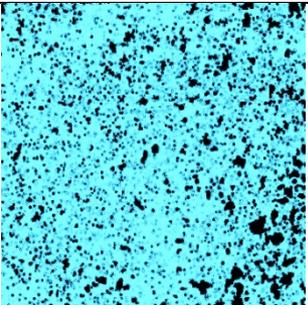
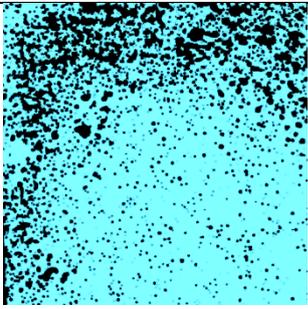
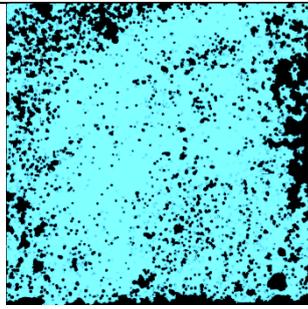
## A93 Acrílico 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 97,59%  | 96,70%  | 97,28%   |
|  |   |  |
| 93,53%  |   |  |

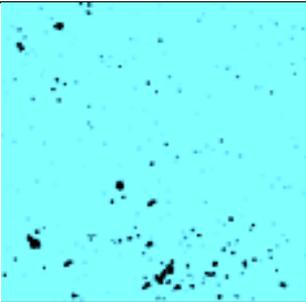
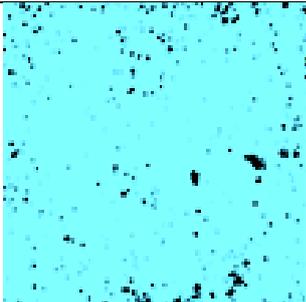
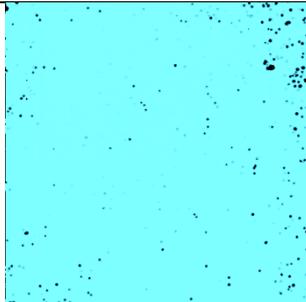
## A93 Polietileno 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 87,80 %   | 92,97%  | 96,01%   |
|  |   |  |
| 90,18%  |   |  |

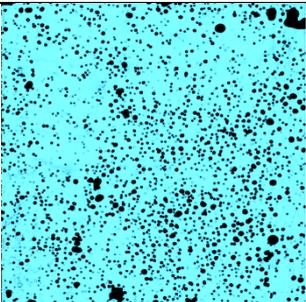
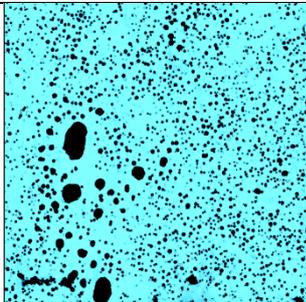
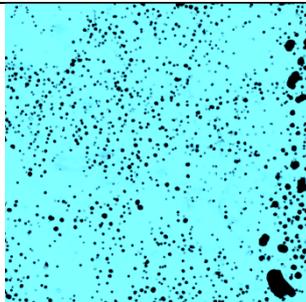
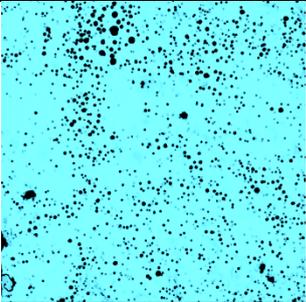
## A93 Vidro 30cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 85,66%  | 78,97%  | 78,66%   |

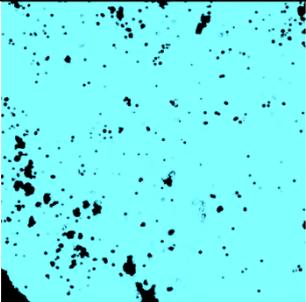
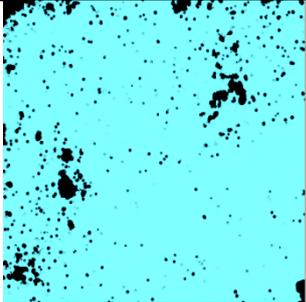
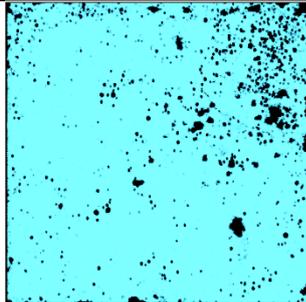
## A93 Acrílico 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 98,20%  | 97,87   | 97,98%   |

## A93 Polietileno 100cm

|   |  |   |
|---|--|---|
|   |  |  |
| 87,45%  | 87,23%   | 90,99%  |
|  |  |   |
| 93,65%  |  |   |

## A93 Vidro 100cm

|   |   |  |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 95,04%  | 93,89%  | 93,27%   |