

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

**Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre
a resistência de aderência à tração de revestimentos de
argamassa**

Daniel Tregnago Pagnussat

Porto Alegre
junho 2013

Daniel Tregnago Pagnussat

**EFEITO DA TEMPERATURA DE QUEIMA DE BLOCOS CERÂMICOS
SOBRE A RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DE
REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA**

Tese 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 Acadêmico

Porto Alegre

junho 2013

CIP - Catalogação na Publicação

Pagnussat, Daniel Tregnago
Efeito da temperatura de queima de blocos
cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de
revestimentos de argamassa / Daniel Tregnago
Pagnussat. -- 2013.
211 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,
2013.

1. Argamassa. 2. Porosidade. 3. Substrato
Cerâmico. 4. Aderência. 5. Temperatura de queima. I.
Masuero, Angela Borges, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DANIEL TREGNAGO PAGNUSSAT

Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção Civil, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 20 de junho de 2013

Profa. Angela Borges Masuero
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Prof. Armando Miguel Awruch
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Fernanda Macedo Pereira (ULBRA/CIENTEC)
Dra. pelo PPGE3M/UFRGS

Prof. Saulo Roca Bragança (UFRGS)
Dr. pelo PPGE3M/UFRGS

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Dra. pela POLI/USP

A Deus.

*Por provar sempre que está ao meu
lado, sem restrições.*

AGRADECIMENTOS

O arquivo que continha esta página de agradecimentos existia desde o primeiro ano do meu doutorado. Sim, pois aqui creio eu estão marcadas todas as justificativas que fazem valer a pena um momento como esse, de conclusão de uma tese. É um registro de um trabalho que permeou uma vida por alguns anos. Esse arquivo mudou várias vezes, ganhou novos textos, mudou outros, descobriu coisas novas, deixou para trás outras que não eram tão importantes. Não deixa de ser um pouco uma bela metáfora do que é um doutorado.

Por isso, gostaria de agradecer.

À Deus, que me mostrou toda sua força e todo seu poder sempre que Dele precisei. E à minha família: meus pais Ampélio e Vera e meu irmão Eduardo. Eu amo vocês de todo meu coração.

À Carina, meu amor, por todo carinho, compreensão e apoio. E por ter um lugar no meu coração que é só dela, e de mais ninguém. Você é uma mulher fantástica.

À minha orientadora Angela Masuero, pelo crescimento proporcionado por este trabalho, e por ter se tornado uma amiga para toda vida, pela qual sempre terei especial apreço. Eu não seria a mesma pessoa que sou hoje se você não tivesse cruzado meu caminho, e você sabe disso. Muito, muito, muito obrigado. Ainda à mesma prof. Angela e ao prof. Washington Moura, que em 1998 selecionaram um jovem estudante de engenharia para uma bolsa de iniciação científica, apresentando a ele este incrível e controverso mundo da pesquisa.

Ao Fábio Schramm, pela amizade estreitada no período de doutorado, por todas as conquistas compartilhadas e por ser meu companheiro de reivindicações e posicionamentos fortes junto à comunidade discente do PPGEC/UFRGS. Você foi e é um amigo essencial.

Aos professores do NORIE, que o tornaram durante muito tempo um espaço singular de pesquisa, sem nunca descuidar do lado humano, meu agradecimento pelos conhecimentos adquiridos. Obrigado Ana Luisa, Beatriz, Denise, Formoso, Isatto, Ruy, Sattler. Agradeço especialmente ao professor Luis Carlos Bonin, quem admiro bastante, por compartilhar idéias e dar suporte em momentos importantes desta tese.

A todos os amigos que a vida me presenteou. A saudade é grande dos que não estão mais próximos e a alegria maior ainda pelos que me dão o prazer de convivermos. Sou uma pessoa privilegiada, vocês todos realmente não caberiam aqui. Mas têm espaço de sobra no meu coração.

Cristóvão, Tiago: vocês fazem muita falta aqui em Porto Alegre.

Agradeço à minha amiga "chata" Luciana Cordeiro, um exemplo de como uma pessoa pode crescer. Obrigado por sempre acreditar em mim (quando às vezes nem eu acreditava), e por ser essa amiga querida.

À Aline Barroso e Juliana Senisse, queridas amigas e companheiras de viagens Caxias - Porto Alegre.

Aos integrantes da "família" construída no meu doutorado, principalmente nos anos de 2008 e 2009. Não vou citar todos aqui, muitos já estão em outras partes destes agradecimentos. Pelos passeios, jantares, corridas no gasômetro... Adoro vocês, todos foram importantíssimos.

Aos demais amigos do NORIE que conviveram comigo: Andreos (Jack), Angela Piovezan, Alexandre Vargas, Abrahão, Amanda, Ana Paula, Ana Carina, Antônio Eduardo, Azambuja (obrigado pela inspiração!), Bruno Mota, Bernardo Tutikian, Clarissa, Cris Pauletti, Cris Vitorino, Cristiano Richter, Eugênia, Eugênio, Edna, Franciele, Geilma, Gisele, Ju Brito, Josi, Laís, Giovanna, Luis Fernando, Lucília, Márlon, Márcia Pretto, Patrícia Lovato, Santiago, Sandra, Simone Venquiaruto, Thiago.

Aos bolsistas de iniciação científica que me ajudaram neste período de doutorado, especialmente João Paulo Walter, Rafael Mascolo, Mauro Mário e Anderson "HEDA" – Anderson, você é o cara!, hoje grandes engenheiros.

Aos colegas da UCS - Universidade de Caxias do Sul, em especial meu bom amigo prof. Givanildo Garlet.

Ao "Seu" Gilmar e especialmente ao Airton, não só um laboratorista, mas uma grande figura humana, um coração como muitos que fazem falta por aí.

Ao "NORIE Futebol Clube", pelos muitos anos de diversão.

À CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro e institucional, nos primeiros anos do doutorado.

À Pauluzzi Blocos Cerâmicos, pela doação dos materiais para pesquisa.

Todos deixamos marcas na vida das pessoas, e elas em nós. Alguns mais, outros menos. Somos resultado do conjunto da nossa personalidade, das nossas experiências e das relações que construímos ao longo da vida. Se escrevo todas essas palavras, é para que elas sirvam de sincero agradecimento, mas também de incentivo para quem as leem. O mesmo incentivo que tive em diversos momentos da minha vida.

É com nostalgia e saudade que vejo meus dias de "*noriano*" se aproximarem do fim. Dediquei alguns dos meus melhores anos a esta instituição. Nela experimentei todos os sentimentos que contribuem para o engrandecimento de um ser humano. Consciência crítica; conhecimento; estímulos e desestímulos; redenção e decepção; confiança e dúvida; amizade e amor. Acreditei no NORIE e fui arauto do espírito diferenciado desse grupo de pesquisa. Não medi esforços para exaltar suas qualidades e eventualmente questionar seus defeitos. Se após 14 anos não estarei mais presente fisicamente, com certeza mantereirei o espírito e a irrefutável confiança nos paradigmas originais desse grupo único de profissionais.

Simplesmente, muito obrigado.

Daniel Tregnago Pagnussat

“A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento.”

Platão

“Estou disposto a demolir paredes, construir pontes e acender fogueiras. Tenho uma grande experiência, um monte de energia, um pouco dessa coisa de 'visão' e não tenho medo de começar do zero”

Steve Jobs

RESUMO

PAGNUSSAT, D.T. **Efeito da temperatura de queima de blocos cerâmicos sobre a resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa.** 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Muitos pesquisadores têm procurado analisar a questão dos mecanismos de aderência entre argamassas de revestimento e substratos porosos, das mais variadas formas. Este trabalho insere-se nessa mesma linha de pesquisa. A partir dos referenciais teóricos pesquisados, definiu-se como objetivo principal desta tese contribuir para o entendimento de alguns dos fatores intervenientes no fenômeno de aderência entre substratos cerâmicos e argamassas de cimento Portland. O enfoque proposto visou identificar, prioritariamente, a influência de substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima (e conseqüentemente diferentes padrões de porosidade e absorção de água), e sua relação com a resistência de aderência adquirida pelo sistema de revestimento, sob condições específicas. Foi proposto um programa experimental onde uma argamassa com características específicas foi assentada em blocos cerâmicos lisos ou com estrias verticais. Esta argamassa revestiu blocos com diferentes capacidades de absorção de água, obtidas através da queima dos mesmos em diferentes temperaturas: 700, 800, 900 e 1000°C. Variaram-se também as condições na interface entre argamassa e substrato: sem nenhum tratamento da área de contato, ou então reduzindo o potencial contato superficial e conseqüentemente a penetração de água/pasta nos poros em 50% da área do bloco cerâmico. Foram mapeadas as principais propriedades dos blocos cerâmicos que se alteraram ou mantiveram com o processo de queima, de modo a verificar sua influência sobre os resultados de aderência à tração das argamassas neles assentados. Os resultados demonstram que a alteração da temperatura de queima dos blocos, bem como a introdução de restrições para a absorção de água e/ou pasta dos blocos, variaram consideravelmente os resultados de aderência à tração dos revestimentos. Há uma relação significativa entre a estrutura de poros do substrato, em função da temperatura de queima, e a resistência de aderência do sistema de revestimento.

Palavras-chave: sistemas de revestimento; argamassa; porosidade; substrato cerâmico; temperatura de queima.

ABSTRACT

PAGNUSSAT, D.T. **Effect of production burning temperature of ceramic blocks and its influence in the tensile bond strength of mortar renderings under ceramic block walls.** 2013. Thesis (Doctoral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Over the centuries, mortar renderings have been considered a traditional building technique. However, even recent technologic improves couldn't eliminate some pathologies problems such as detachments. In Brazil, particularly, many researchers have been studying the adhesion mechanisms between mortar renderings and porous substrates in different ways. This work is part of this interest point. After the theoretical research realized, the main objective of this doctoral thesis consisted to contribute to the understanding of bond strength phenomenon, specially of some factors involved between ceramic substrates and Portland cement mortars. The proposed approach aimed to identifying the influence of ceramic substrates with different firing temperatures (and therefore with different porous surface and water absorption), and its relationship to bond strength acquired by the mortar rendering system under specific conditions. A Lime-Portland Cement mortar with specific characteristics was applied on smooth or grooved surfaces of ceramic blocks. The firing temperature of production of these ceramic blocks was 700, 800, 900 and 1000 ° C. Furthermore, the interface conditions between mortar and ceramic substrate also was varied: without any contact surface treatment, or reducing potential contact surface (and thus water/paste penetration) in the 50% area of ceramic blocks. After, had been identified the main properties of ceramic blocks that have changed or remained after the firing process, so check their influence on the results of tensile bond strenght of mortars settled on them. The results show that with changing the firing temperature of the blocks as well as the introduction of pore sealing areas to the absorption of water and / or binder in blocks surfaces, the tensile bond strength of mortar renderings also varied considerably. There is a significant relationship between pore structure of the ceramic substrate, depending on the firing temperature, and the bond strength of the mortar rendering system

Keywords: renderings; mortar; porosity; ceramic brick; brick firing temperature.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS | 22 |
| 1.2 ORIGINALIDADE DA PESQUISA | 23 |
| 1.3 QUESTÃO DE PESQUISA | 24 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 24 |
| 1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA | 25 |
| 1.6 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA | 26 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 27 |
| 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS | 27 |
| 2.2 A QUESTÃO DA ADERÊNCIA | 29 |
| 2.2.1 Aspectos relacionados à interface de contato entre superfícies | 36 |
| 2.2.2 Aspectos Relacionados aos Substratos | 42 |
| 2.2.3 Aspectos Relacionados às Argamassas | 51 |
| 2.2.3.1 Argamassa de Revestimento | 51 |
| 2.2.3.2 Argamassas de Chapisco | 58 |
| 2.2.3.3 Aspectos Reológicos das Argamassas | 61 |
| 2.2.4 Influência das Condições de Cura dos Revestimentos | 68 |
| 2.3 TRANSPORTE DE ÁGUA EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA | 71 |

| | |
|--|------------|
| 2.3.1 Técnicas de Avaliação de Transporte de Umidade em Materiais Porosos | 79 |
| 3 METODOLOGIA DE PESQUISA | 87 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO E DAS VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL | 87 |
| 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS | 92 |
| 3.2.1 Agregados | 92 |
| 3.2.2 Aglomerantes | 93 |
| 3.2.3 Água | 94 |
| 3.2.4 Substratos Cerâmicos | 94 |
| 3.3 ETAPAS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 97 |
| 3.3.1 Determinação da energia de aplicação da argamassa utilizada no assentamento dos revestimentos | 97 |
| 3.3.2 Definição do proporcionamento de materiais da argamassa utilizada | 103 |
| 3.3.3 Ensaios de caracterização das argamassas | 105 |
| 3.3.4 Ensaios de avaliação dos substratos cerâmicos e do sistema argamassa/substrato cerâmico | 106 |
| 3.3.4.1 Avaliação da rugosidade superficial dos substratos cerâmicos | 107 |
| 3.3.4.2 Avaliação da porosidade e da absorção de água dos substratos cerâmicos | 109 |
| 3.3.4.3 Adaptação do ensaio do squeeze flow como ferramenta de avaliação da interação entre os substratos cerâmicos e a argamassa de revestimento .. | 112 |
| 3.3.4.4 Avaliação da perda de água/pasta da argamassa para os substratos cerâmicos | 114 |

| | |
|---|------------|
| 3.3.4.5 Avaliação da resistência de aderência à tração dos sistemas de revestimento estudados | 117 |
| 3.3.4.6 Estudo piloto para alteração das condições dos substratos | 118 |
| 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 123 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA | 123 |
| 4.2 POROSIDADE E ABSORÇÃO DOS BLOCOS CERÂMICOS | 124 |
| 4.3 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL | 130 |
| 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA/PASTA NOS SUBSTRATOS | 135 |
| 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SQUEEZE FLOW | 137 |
| 4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO | 144 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 160 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESPECÍFICAS DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL | 160 |
| 5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO E QUESTIONAMENTOS PARA DEBATE | 162 |
| 6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 165 |
| REFERÊNCIAS | 166 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: exemplos de equipamentos empregados em ensaios de aderência à tração: dinamômetros manuais (a) (GONÇALVES, 2004) e (b) (BÉLAIR, 2005); (c) eletrônicos (MOURA, 2007); (d) manual com braço de alavanca (acervo pessoal do autor)..... | 33 |
| Figura 2: análise da interface de ligação entre argamassa e substrato presentes nos trabalhos de: a) Pretto (2007); b) Silva, V. (2004); c) Broken et al. (1998) e d) Carasek (1996)..... | 35 |
| Figura 3: ângulo de contato entre um sólido e um líquido (adaptado de Adhesion Guide)..... | 38 |
| Figura 4: medição de ângulos de contato (adaptado de FLORES ET AL., 2012) | 40 |
| Figura 5: forma dos grãos de areias relacionados com diferentes esfericidades (TRISTÃO, 2005)..... | 56 |
| Figura 6: classes de arredondamento (NBR 7389/92)..... | 57 |
| Figura 7: tipos de chapisco mais comuns utilizados em obras de edificações - (a) convencional (b) desempenado (c) rolado (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2005 e WEBER, 2013)..... | 60 |
| Figura 8: representação da diferença entre as linhas de fluxo de um fluido sem (a) e com (b) a presença de uma partícula (PANDOLFELLI, 2000). .. | 63 |
| Figura 9: perfil típico de carga versus deslocamento do ensaio de Squeeze flow (CARDOSO et al., 2005) | 68 |
| Figura 10: os quatro tipos de fluxo possível num poro cilíndrico à medida que a umidade relativa aumenta (Adaptado de Quénard e Sallée, 1991).... | 74 |
| Figura 11: proposta de ensaio de avaliação da absorção de água da argamassa pelo substrato (HONORIO e CARASEK, 2009)..... | 81 |
| Figura 12: perfis de umidade (obtidos através de ressonância magnética nuclear) durante o transporte inicial de água entre a argamassa e tijolos: a) cerâmico; b) sílico-cálcario; c) e d) sílico-calcário com diferentes pré-umidificações. (BROCKEN et al., 1998)..... | 83 |
| Figura 13: imagens de seis seções delgadas de concretos com diferentes relações água/cimento impregnadas com marcadores fluorescentes. O tom do verde fluorescente é função da relação a/c; os agregados apresentam-se em um tom verde-escuro e os vazios, mais claros em relação à pasta (JAKOBSEN e BROWN, 2006)..... | 86 |
| Figura 14: fluxograma do estudo exploratório realizado..... | 91 |
| Figura 15: fluxograma do programa experimental realizado..... | 91 |
| Figura 16: substratos cerâmicos - (a) detalhe da face do bloco com ranhuras verticais ("estriado"); (b) detalhe da face do bloco liso..... | 95 |
| Figura 17: aspecto visual dos blocos cerâmicos submetidos à queima em laboratório com diferentes temperaturas. | 96 |
| Figura 18: caixa de queda desenvolvida para a realização do trabalho..... | 98 |
| Figura 19: detalhe do molde utilizado para colocação da argamassa sobre o alçapão da caixa de queda e detalhe da argamassa projetada para fora da superfície de contato com o bloco. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Figura 20: molde final utilizado para colocação da argamassa sobre o alçapão da caixa de queda. Note-se também o menor desperdício de argamassa e o preenchimento homogêneo da face do bloco. | 100 |
| Figura 21: detalhe do recipiente utilizado no ensaio de densidade de massa no estado fresco na caixa de queda | 102 |
| Figura 22: Scanner 3D do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM). | 107 |
| Figura 23 – Rugosidade Média - Ra (Adaptado de PRETTO, 2007) | 108 |
| Figura 24: mercúrio em contato com um sólido poroso, sendo D o diâmetro do poro e Φ o ângulo de contato com a superfície (GOUVEA, 20__)... | 110 |
| Figura 25: ensaio squeeze-flow (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005) | 112 |
| Figura 26: demonstração do ensaio squeeze-flow realizado sobre os blocos cerâmicos | 113 |
| Figura 27: vista geral da amostra no momento da pesagem em balança de precisão de 0,0001 g | 114 |
| Figura 28: etapas do ensaio de avaliação de transferência de água e pasta proposto..... | 116 |
| Figura 29: sequência de execução dos revestimentos sobre os substratos cerâmicos..... | 117 |
| Figura 30: sequência de preparo e execução dos ensaios de resistência de aderência à tração..... | 118 |
| Figura 31: blocos ensaiados durante o estudo-piloto..... | 119 |
| Figura 32: detalhe do revestimento deslocado após selamento dos poros com parafina. | 120 |
| Figura 33: ângulo de contato entre gota d'água e superfície do bloco cerâmico selado com parafina..... | 121 |
| Figura 34: Representação do procedimento de selamento de 50% da superfície do blocos. | 122 |
| Figura 35: a) aspecto visual do selamento com parafina derretida de 50% da área potencial de contato da superfície porosa do substrato cerâmico e b) imagem de lupa estereoscópica da superfície com parafina. | 122 |
| Figura 36: IRA e absorção capilar dos blocos ao longo do tempo, em função da temperatura de queima dos blocos cerâmicos. | 125 |
| Figura 37: Absorção total de água de blocos cerâmicos apresentados no trabalho de Vieira et al. (2009)..... | 126 |
| Figura 38: Perfil Intensidade de absorção (mm^3/mm^2) versus raiz do tempo ($\text{min}^{1/2}$) - blocos de a) 700°C e b) 800°C | 127 |
| Figura 39: Perfil Intensidade de absorção (mm^3/mm^2) versus raiz do tempo ($\text{min}^{1/2}$) - blocos de a) 900°C e b) 1000°C. | 128 |
| Figura 40: distribuição de poros nas amostras de blocos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima: a) volume acumulado x diâmetro de poros e b) volume de intrusão x diâmetro dos poros. | 129 |
| Figura 41: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 700°C | 130 |
| Figura 42: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 800°C | 131 |

| | |
|---|-----|
| Figura 43: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 900°C | 131 |
| Figura 44: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 1000°C | 132 |
| Figura 45: exemplos de ângulos de contato da superfície de encontrados em amostras de blocos cerâmicos queimados nas temperaturas de a) 700°C b) 800°C c) 900°C e d) 1000°C | 134 |
| Figura 46: resultados do ensaio de absorção de água/pasta da argamassa nos substratos cerâmicos, em função da temperatura de queima dos blocos..... | 135 |
| Figura 47: curvas do ensaio de absorção de a) água/pasta da argamassa nos substratos cerâmicos em comparação ao ensaio b) de absorção capilar..... | 136 |
| Figura 48: resultado do ensaio do squeeze flow segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada..... | 137 |
| Figura 49: imagens do ensaio do squeeze flow segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada, nos tempos de a) 5 minutos e b) 60 minutos..... | 138 |
| Figura 50: resultado do ensaio do squeeze flow segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada nos blocos lisos (L) e estriados (E) de 700°C e 800°C. | 139 |
| Figura 51: resultado do ensaio do squeeze flow segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada nos blocos lisos (L) e estriados (E) de 900°C e 1000°C. | 140 |
| Figura 52: imagens das argamassas moldadas sobre os blocos cerâmicos, em diferentes tempos, antes dos ensaios de squeeze flow. | 142 |
| Figura 53: detalhes das argamassas moldadas sobre os blocos cerâmicos, após ensaios de squeeze flow - (a) argamassa aderida sobre bloco liso de 900°C após 5 min de contato; (b) argamassa aderida sobre bloco estriado de 900°C após 5 min de contato; (c) detalhe da interface bloco/argamassa após ensaio em bloco de 900°C - 5 minutos; (d) detalhe da interface bloco/argamassa após ensaio em bloco de 700°C - 5 minutos..... | 143 |
| Figura 54: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa, nos substratos estudados..... | 146 |
| Figura 55: Percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados..... | 146 |
| Figura 56: Percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados..... | 147 |
| Figura 57: efeito do tipo de superfície do substrato cerâmico sobre a resistência de aderência à tração da argamassa de revestimento utilizada..... | 149 |
| Figura 58: efeito da temperatura de queima do bloco cerâmico sobre a resistência de aderência à tração da argamassa de revestimento utilizada..... | 150 |
| Figura 59: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada. | 152 |

| | |
|--|-----|
| Figura 60: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada. | 153 |
| Figura 61: percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada. | 154 |
| Figura 62: Percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,1 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada. | 154 |
| Figura 63: resumo dos resultados de ensaio de aderência à tração a) bloco liso, 100% da área potencial de contato com o substrato absorvente; b) Bloco liso, 50% da área potencial de contato com o substrato absorvente; c) bloco estriado, 100% da área potencial de contato com o substrato absorvente; d) Bloco estriado, 50% da área potencial de contato com o substrato absorvente. | 157 |
| Figura 64: a) imagem da superfície da amostra da pastilha de arrancamento em contato com a região do substrato com parafina; b) imagem da superfície da amostra da pastilha de arrancamento em contato com a região do substrato sem parafina (porosidade livre); c) imagem da superfície do substrato com parafina, após o ensaio de aderência à tração; d) imagem da superfície do substrato com sem parafina (porosidade livre), após o ensaio de aderência à tração; | 158 |
| Figura 65: detalhe da amostra de argamassa arrancada no ensaio de aderência – (A) área que estava em contato com os poros abertos do substrato cerâmico e (B) área que estava em contato com a superfície do substrato cerâmico selada por parafina | 159 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: trabalhos do Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA), que avaliam prioritariamente aspectos relacionados à aderência de argamassas..... | 20 |
| Tabela 2: classificação das superfícies conforme o ângulo de contato (adaptado de RAMÉ-HART, 2013)..... | 39 |
| Tabela 3: exemplos de porosidade de tijolos constituídos de diferentes matérias primas (WHITELEY et al., 1977, <i>apud</i> Carasek, 1996)..... | 43 |
| Tabela 4: exemplos de tratamentos superficiais de preparação e/ou aumento da rugosidade do substrato. | 48 |
| Tabela 5: distribuição granulométrica e caracterização física do agregado miúdo após peneiramento..... | 93 |
| Tabela 6: características químicas da cal utilizada no trabalho | 93 |
| Tabela 7: características químicas do cimento utilizado no trabalho..... | 94 |
| Tabela 8: características químicas da argila utilizada na produção dos blocos cerâmicos do trabalho | 94 |
| Tabela 9: densidade de massa no estado fresco de argamassa aplicada em parede durante estudo piloto..... | 102 |
| Tabela 10: valores médios de densidade de massa no estado fresco de argamassa aplicada com auxílio de caixa de queda, nas alturas de projeção indicadas | 103 |
| Tabela 11: resultados dos ensaios de caracterização da argamassa selecionada | 123 |
| Tabela 12: caracterização dos blocos cerâmicos produzidos..... | 124 |
| Tabela 13: rugosidade média Ra das áreas superficiais dos blocos cerâmicos lisos com diferentes temperaturas de queima..... | 132 |
| Tabela 14: rugosidade média Rq das áreas superficiais dos blocos cerâmicos lisos com diferentes temperaturas de queima..... | 133 |
| Tabela 15: ângulo médio de contato da superfície dos blocos cerâmicos .. | 134 |
| Tabela 16: análise estatística do efeito da temperatura de queima sobre o ângulo de contato superficial dos blocos cerâmicos..... | 135 |
| Tabela 17: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 700°C e 800°C. | 144 |
| Tabela 18: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 900°C e 1000°C..... | 144 |
| Tabela 19: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 700 °C e 800°C..... | 145 |
| Tabela 20: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 900 °C e 1000°C..... | 145 |
| Tabela 21: análise estatística do efeito da temperatura de queima e do tipo de superfície sobre a resistência de aderência à tração. | 149 |
| Tabela 22: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 700 °C e 800°C com 50% de parafina na face de contato. | 151 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 23: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 900 °C e 1000°C com 50% de parafina na face de contato. | 151 |
| Tabela 24: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 700 °C e 800°C com 50% de parafina na face de contato. | 151 |
| Tabela 25: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 900 °C e 1000°C com 50% de parafina na face de contato. | 152 |
| Tabela 26: análise estatística (ANOVA) do efeito da temperatura de queima e do tipo de superfície (lisa ou estriada) sobre a resistência de aderência à tração, quando se reduz em 50% o potencial de absorção do substrato. | 155 |
| Tabela 27: resumo das incidências de valores de resistência de aderência à tração (Ra) nos ensaios realizados do trabalho. | 156 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA: Análise de variância

ASTM: American Society for Testing and Materials

fck: resistência característica do concreto à compressão

LdSM: Laboratório de design e seleção de materiais

LACER: Laboratório de materiais cerâmicos

LEME: Laboratório de ensaios e modelos estruturais

MPa: mega pascal

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

NORIE: Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

SBTA: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas

Rad: resistência de aderência à tração

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

“O estudo do perfeito entendimento do mecanismo de aderência da argamassa ao substrato poroso e dos fatores intervenientes nesta ligação é de grande importância, pois grande parte das manifestações patológicas nos revestimentos é devida à falhas nessa aderência.”

O parágrafo acima é a introdução da tese de Carasek, redigida em 1996, considerado até hoje um dos trabalhos pioneiros, em nível nacional, sobre novos paradigmas de pesquisa envolvendo tecnologia de argamassas de revestimento. Após mais de dezesseis anos da publicação deste trabalho, persistem ainda muitos questionamentos acerca do perfeito entendimento de todos os fatores intervenientes nos mecanismos de aderência entre argamassas a base de cimento Portland e os substratos nos quais são assentadas. Muito menos animador é perceber que, ainda atualmente, muitas das edificações continuam a apresentar manifestações patológicas decorrentes de falhas de aderência.

Tal cenário tem motivado, ainda que de forma incipiente, ações conjuntas entre diversos agentes como universidades, centros de pesquisa, construtoras e fornecedores. A chamada Comunidade da Construção¹ é um exemplo dessa tentativa de interação em busca de soluções para os problemas existentes. Ações de diagnóstico e melhorias implantadas durante os ciclos de atividades dessa entidade identificaram que ainda persistem não só problemas de gestão, mas também de tecnologia dos materiais e sistemas empregados.

Autores como Scartezini (2002) e Carasek (1996) já colocavam, à época de seus trabalhos, que o empirismo ainda se constitui em situação constante em obras de edificação, o que explica em grande parte a ocorrência de manifestações patológicas de revestimentos, como os observados por Ioshimoto (1988) através de um levantamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. Para Moura (2007), o interesse das empresas construtoras e pesquisadores por um maior domínio das propriedades dos sistemas de revestimento em argamassa é reflexo direto do seu desejo em prevenir a existência dessas manifestações, principalmente

¹ A Comunidade da Construção é um movimento lançado pela ABCP em 2002. Possui 17 pólos implantados em diferentes cidades no país, integrando construtoras, instituições de ensino, entidades representativas de classe, além indústrias e entidades de formação profissional e empresarial.

descolamentos. Hoje em dia, mais do que isso, é reflexo da preocupação com a garantia de qualidade das obras, dado a insuficiência de mão-de-obra qualificada disponível.

Historicamente, revestimentos de argamassa são considerados parte de uma técnica tradicional que tem evoluído ao longo dos séculos. Em tempos muito antigos, argamassas à base de terra e galhos foram utilizadas como elementos de preenchimento e revestimento dos espaços entre paredes construídas de madeira ou pedra, de modo a minimizar o ingresso de vento e chuva. A desvantagem destas primeiras argamassas rudimentares era a sua incapacidade de impedir o ingresso de água, o que era parcialmente compensada através das proteções dos telhados e de uma drenagem adequada na base das paredes (Mortar Industry Association, 200_).

O desenvolvimento de argamassas de cimento Portland levou a uma maior disseminação da aplicação de revestimentos em áreas externas de fachadas. No Brasil, o uso de sistemas de revestimento à base de argamassas de cimento Portland é uma tecnologia assimilada há décadas. Atualmente, permanece a escolha tecnológica da maioria das fachadas em edificações das grandes cidades brasileiras.

Por sua vez, o Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA) tem se constituído no principal evento de caráter técnico-científico de discussão do estado da arte e das novas perspectivas de pesquisa na área de argamassas e dos sistemas nos quais elas são empregadas. Questões versando problemas de perda de aderência de revestimentos estão entre as principais causas de manifestações patológicas em edificações que utilizam argamassas, sendo este um assunto também explorado em artigos técnicos apresentados nesse congresso, ao longo dos anos. Para exemplificar, na tabela 1 constam, dentre os temas abordados nos simpósios realizados no período de 1995 a 2013, quantos destes trabalhos versavam especificamente sobre temas ligados ao estudo dos fenômenos relacionados à aderência de diferentes argamassas.

Tabela 1: trabalhos do Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA), que avaliam prioritariamente aspectos relacionados à aderência de argamassas.

| Ano do congresso | Total de trabalhos | Trabalhos sobre aderência ² | Percentual (%) sobre o total de trabalhos |
|------------------|--------------------|--|---|
| 2013 | 65 | 7 | 11 |
| 2011 | 38 | 7 | 18 |
| 2009 | 47 | 6 | 13 |
| 2007 | 39 | 7 | 18 |
| 2005 | 87 | 13 | 15 |
| 2003 | 51 | 7 | 14 |
| 2001 | 38 | 0 | - |
| 1999 | 61 | 5 | 8 |
| 1997 | 44 | 3 | 7 |
| 1995 | 43 | 3 | 7 |

Na 10ª edição do SBTA, em 2013, inclusive a própria questão do valor indicativo de resistência de aderência de 0,3 MPa para revestimentos externos e 0,2 MPa para revestimentos internos definida pela NBR 13749/96 foi questionado. Ainda persiste, portanto, uma demanda muito pronunciada por trabalhos que investiguem não somente propriedades isoladas de argamassas (como materiais constituintes, parâmetros reológicos ou desempenho mecânico em condições de contorno específicas), mas sim estudos visando o entendimento dos fenômenos físico-químicos e reológicos das argamassas enquanto parte integrante de um sistema de alto grau de complexidade e múltipla interação de fatores.

Um revestimento em argamassa deve proporcionar, basicamente, uma barreira física para evitar a penetração de umidade na alvenaria, e também melhorar a aparência estética de uma estrutura. Os princípios que regem a especificação de uma argamassa de revestimento exigem a consideração de alguns parâmetros, dentre os quais podem ser citados (Mortar Industry Association, 200_):

- a) a natureza e as condições do substrato;
- b) a natureza e as condições de exposição do revestimento;
- c) os requisitos funcionais;

² Como critério, foram considerados aqui apenas trabalhos que tinham a aderência de argamassas como tema principal de pesquisa ou como principal parâmetro de investigação.

- d) o tipo de acabamento final/ aparência (acabamentos texturizados / pintura / cerâmica).

Detriché e Maso (1986) sugerem que argamassas podem sofrer alterações de suas propriedades (inicialmente esperadas) quando em contato com substratos absorventes, pois as características destes quanto ao diâmetro, estrutura e volume de poros existentes influem no transporte de umidade de um meio para outro. Essa premissa é, justamente, o ponto de partida a que se propõe esta tese de doutorado.

Ainda tomando como referência o trabalho de Carasek (1996), a autora ressalta que, à época, faltaria um volume maior de estudos científicos que buscassem um entendimento claro dos fatores preponderantes. Todavia, no lastro do caminho aberto pela pesquisadora, muitos acadêmicos e profissionais têm buscado novas respostas. A segunda metade dos anos 90 e a primeira década dos anos 2000 foram, por este motivo, palco de trabalhos que procuraram entender e disseminar conhecimento a respeito das propriedades de aderência de sistemas de revestimento à base de argamassas de cimento Portland.

Em uma breve reflexão, podem-se levantar diversos questionamentos a respeito do tema aderência de revestimentos passíveis de investigação científica. Como exemplo, pode-se questionar:

- a) parâmetros reológicos são importantes na garantia das condições de trabalhabilidade e assentamento dos revestimentos. Entretanto, quais as vantagens ou limitações de argamassas caracterizadas como reologicamente "eficientes" assentadas em substratos sem uma rugosidade minimamente compatível?
- b) e se, por outro lado, a rugosidade exercesse menor influência na resistência de aderência do que a estrutura de poros do substrato? Devem-se dosar argamassas que possuam uma retenção de água compatível especificamente para assentamento em superfícies desta natureza?
- c) ou, ao contrário, o aumento da rugosidade da base é suficiente para garantir a aderência em um substrato pouco poroso? Mesmo que essas questões pudessem ser facilmente respondidas, como todos estes

parâmetros têm ou deixam de ter importância na medida em que o processo executivo é deficiente?

- d) guardadas condições mínimas de reologia, bastaria uma boa execução que eliminasse vazios na interface substrato/argamassa? Nesse caso, estariam certos pesquisadores que definissem a extensão de aderência como principal parâmetro a ser garantido?
- e) ou ainda, mesmo com uma boa extensão de aderência, a absorção de água pelo substrato ao longo do tempo implicaria em variações de qualidade na resistência de aderência, sob determinadas condições?

Como se pode notar, estudos voltados à tecnologia de revestimentos argamassados ainda estão repletas de questionamentos, dada a complexidade e a variedade dos fatores influentes no fenômeno. Em um cenário como esse, como estabelecer quais variáveis exercerão maior influência sobre a questão da aderência dos revestimentos?

Dessa forma este trabalho procura inserir-se dentro deste contexto de pesquisa, visando colaborar para o desenvolvimento da ciência e tecnologia de argamassas de revestimento.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese visa identificar, prioritariamente, a influência da temperatura de queima na produção de blocos cerâmicos (e conseqüentemente de diferentes padrões de porosidade e absorção de água destes substratos), sobre a resistência de aderência à tração de sistemas de revestimento em argamassa, sob condições específicas.

Como objetivos específicos, buscam-se:

- a) caracterizar substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima, visando sua utilização como variável de estudo nos sistemas de revestimento propostos.

- b) identificar a influência de parâmetros relacionados aos substratos, quando estes são previamente definidos e controlados, principalmente quanto à questão da sua porosidade e absorção de água.
- c) identificar a influência das condições da área de potencial contato para extensão de aderência na interface dos blocos, nas condições propostas neste trabalho;
- d) analisar o processo de migração de água da argamassa para os poros do substrato.
- e) debater, a partir das análises propostas, a questão das variáveis influentes no processo de garantia da aderência de revestimentos de argamassa.

1.2 ORIGINALIDADE DA PESQUISA

A originalidade da tese está baseada na premissa de que ainda há uma lacuna de conhecimento quanto ao entendimento inequívoco da natureza dos mecanismos de ligação e da interação entre as variáveis que garantem a plena aderência dos sistemas de revestimento à base de argamassas de cimento Portland.

Desde a publicação da tese de Carasek (1996), um grande impulso foi dado para que os pesquisadores brasileiros buscassem entender a questão da aderência de revestimentos de argamassas de cimento Portland. Conforme comentado anteriormente, a segunda metade dos anos 90 e toda a década de 2000 têm sido testemunhas de trabalhos nesse sentido. A questão da aderência como um fator fundamental de desempenho passou a ser objeto de estudos mais apurados, principalmente pelo advento de substratos de concreto de alta resistência e baixa porosidade, conjugado ao ritmo cada vez mais acelerado das etapas de execução das obras civis. O passo seguinte dentro da área acadêmica foi buscar entender cada vez mais a interface de ligação argamassa/substrato. Nesse sentido, e na opinião deste pesquisador, a tese de Paes (2004) representou um novo impulso de pesquisa ao buscar avaliar a questão do transporte de água nos momentos pós-aplicação e seus reflexos na aderência dos revestimentos argamassados. Em ambos os trabalhos citados, porém, não foram criadas condições específicas para variar a

estrutura de poros e de absorção dos substratos para elementos de mesma natureza (por exemplo, blocos cerâmicos). Assim, a originalidade deste trabalho consiste também em criar tais condições de contorno específicas.

1.3 QUESTÃO DE PESQUISA

A elaboração da questão de pesquisa se deu, em grande parte, a partir da discussão já citada anteriormente sobre a grande quantidade de variáveis envolvidas na questão de desempenho de argamassas de cimento Portland, e suas conseqüências na aderência de revestimentos. Assim, chegou-se à elaboração da seguinte questão: como contribuir pra o avanço do entendimento dos mecanismos que influenciam a microestrutura da interface argamassa/substrato poroso, quanto às questões de aderência em substratos cerâmicos?

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está organizado em seis capítulos. Após a contextualização inicial do trabalho contida no capítulo de introdução, o mesmo apresenta ainda os objetivos principal e específicos, bem como a identificação da originalidade da proposta de tese e as limitações da mesma. O capítulo dois apresenta a revisão de literatura que balizou o trabalho técnico subsequente, procurando abordar os aspectos relevantes ao tema revestimentos de argamassa, assim descritos nos itens que seguem. São discutidos conceitos básicos de aderência de argamassas em substratos porosos. Na seqüência, identificam-se aspectos relacionados aos substratos e às argamassas de revestimento, tais como porosidade da base, condições de cura, influência dos materiais constituintes, aspectos reológicos. O capítulo três apresenta, por sua vez, e a partir das perspectivas e oportunidades identificadas na revisão bibliográfica, a método de pesquisa adotado. Nele consta o programa experimental executado. Os resultados deste programa experimental são descritos e debatidos no capítulo quatro. O capítulo cinco fica a cargo das considerações finais desta proposta de tese, incluindo as reflexões do pesquisador a partir das observações feitas não somente através dos resultados obtidos, mas

também e fundamentalmente pelo conhecimento acumulado durante todo o processo de concepção, planejamento e desenvolvimento do trabalho. Tais considerações identificam a possibilidade de trabalhos futuros no tema, que estão descritos no capítulo seis. Finalmente, as referências citadas ao longo do corpo do texto constam no final deste documento.

1.5 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Durante o período de planejamento experimental, foram pesquisadas alternativas de ensaios junto a diversos laboratórios, tanto dentro do próprio programa de pós-graduação, como em centros de pesquisa vinculados à Engenharia Nuclear, Engenharia Química, Engenharia de Materiais e Instituto de Geociências. Isto posto, embora a revisão bibliográfica tenha demonstrado a existência de inúmeros métodos de ensaio para identificação dos fenômenos correlatos aos propostos para avaliação, este trabalho foi limitado pela existência (ou não) dos equipamentos disponíveis nos laboratórios de pesquisa utilizados.

Ainda durante a fase de planejamento, pensou-se em trabalhar com substratos das mais diferentes naturezas: blocos cerâmicos; blocos pré-moldados de concreto; prismas de concreto (simulando concreto estrutural de pilares e vigas). Tal alternativa foi rechaçada não só pelo tempo e pela matriz experimental que teria de ser montada para suprir tal projeto, mas principalmente pela natureza da proposta de tese, que visava não inferir a influência de muitas variáveis separadamente e entre si. Analogamente, as contribuições da banca de qualificação de doutorado levaram à montagem de um plano experimental similar ao que está apresentado neste documento final.

Ainda são consideradas limitações deste trabalho o fato de que não se avaliaram diferentes condições de cura das argamassas, sendo as mesmas consideradas um fator fixo dentro do programa experimental, bem como a granulometria dos agregados.

1.6 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como delimitação deste trabalho optou-se por estudar substratos cerâmicos, cujos blocos foram coletados, ainda crus, em uma fábrica da região da grande Porto Alegre. O processo de queima foi realizado em laboratório, sob condições controladas. O cimento utilizado foi um cimento Portland uruguaio CPN-40, marca Artigas, similar ao cimento Portland comum (CP-I-S), segundo classificação da NBR 5732 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991). A escolha do mesmo se deu em função da decisão de utilizar um cimento puro e livre de adições minerais que pudessem comprometer ou mascarar resultados de ensaios propostos na tese. Haja vista que o cimento tipo I praticamente inexistente para comercialização no mercado brasileiro, optou-se pelo cimento uruguaio anteriormente descrito. A caracterização de todos estes materiais está descrita no capítulo do programa experimental.

A escolha das temperaturas de queima dos blocos cerâmicos se deu em função de orientação prévia, em conversa com professor da área de engenharia de materiais da UFRGS, que sugeriu temperaturas entre 800 e 950°C. A partir disso, ampliaram-se as temperaturas propostas para uma faixa entre 700 e 1000 °C, visando englobar queimas que proporcionassem características bem distintas entre as massas cerâmicas, bem como a utilização de uma faixa de temperatura (700°C) abaixo do considerado necessário para a sinterização da peça cerâmica para fins de comercialização, e outra (1000°C) acima do usual para queima de blocos cerâmicos para alvenarias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sistemas de revestimento em argamassa sofrem influência de diversos fatores, seja pelo processo de produção em si, seja pela influência exercida pelos seus materiais constituintes ou de agentes externos, como fatores climáticos. Dentre os problemas mais comuns apresentados por revestimentos, destacam-se os descolamentos, vesículas, fissuras, eflorescências, manifestações relacionadas à umidade, contaminações atmosféricas e contaminação ambiental por substâncias agressivas (Costa, F., 2005; Bauer, R., 1997)

Para Bauer, R. (1997), a inexistência de projeto, o desconhecimento das propriedades dos materiais empregados, a utilização de materiais inadequados, erros executivos, o desconhecimento ou não observância de normas técnicas e falhas de manutenção estão entre as principais justificativas para a ocorrência de falhas em sistemas de revestimento. O mesmo autor reitera que via de regra, mais de um fator está associado à presença de manifestações patológicas, muito embora um fator específico possa ser preponderante sobre os demais.

Araújo Júnior (2004) ressalta algumas particularidades que, segundo ele, dificultam a obtenção de parâmetros de desempenho aplicados para as argamassas de revestimento, quais sejam:

- a) a variabilidade decorrente da forma de aplicação das argamassas, função da capacitação da mão-de-obra executora³;
- b) as propriedades desejadas no estado fresco, tais como plasticidade e consistência, que têm reflexo direto nas propriedades do revestimento final no estado endurecido;

³ Situação descrita em 2004 que se mantém e inclusive foi agravada nos últimos anos com a escassez de mão-de-obra na Construção Civil.

- c) desconhecimento de propriedades dos materiais e métodos para avaliar o desempenho dos sistemas de revestimento;
- d) um grande número de fatores que interferem no sistema global, tais como natureza do substrato, preparo da base de aplicação, dosagem e especificação de materiais constituintes.

Beningfield (1994), analisando os testes em argamassas para alvenarias disponíveis pela CEN (Comitê Europeu de Normalização) cita uma série de normas existentes e propostas, à época. Curiosamente, o texto referido dá menos ênfase a propostas como a prEN 1015-12 (Determinação da aderência de revestimentos no estado endurecido e argamassas no estado fresco), em relação a outras de diferentes propriedades da argamassa. Embora a questão da aderência não tenha ficado necessariamente em segundo plano, fica a impressão de que a questão da aderência seria dependente simplesmente de uma boa ancoragem à base, sem levar em conta o mérito da questão, ou os mecanismos que proporcionam tal ancoragem em sistemas de revestimento.

Pareek et al. (1995) estudaram a aderência de argamassas em superfícies de concreto. Segundo eles, o mecanismo de adesão entre materiais cimentícios é extremamente complexo, devido ao fenômeno envolver questões de heterogeneidade (presença de várias fases relativas aos materiais empregados), natureza dos substratos e das argamassas. Dessa forma, quando dois materiais são unidos e testados quanto a sua aderência, não somente esta resistência de aderência deve ser considerada, mas também o tipo de fratura a ela associada. Tais fraturas, segundo Pareek et al. (1995), podem estar associadas a questões de aderência entre argamassa e substrato ou à coesão insuficiente da própria argamassa, ou mesmo problemas do substrato. Por isso, a importância de identificar quais são as causas que levam a um eventual colapso da ligação entre a argamassa e o material sobre o qual está assentada.

Muitos autores (PRETTO, 2007; MOURA, 2007; PAES, 2004; SANTOS, C. 2003; PAES et al., 2003; SCARTEZINI, 2002; CARASEK et al., 2001, DUPIN et al., 1988) colocam a aderência entre o substrato e a argamassa como um fenômeno predominantemente mecânico, conseqüência não só da rugosidade das bases de

aplicação, mas também pela penetração da pasta aglomerante nos poros desta base. Scartezini (2002, p.5) explica ainda que:

“Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a base absorvente, parte da água de amassamento, que contém em dissolução ou estado coloidal componentes do aglomerante, penetra pelos poros e cavidades do substrato de modo que ocorre a precipitação de produtos de hidratação de cimento no seu interior, exercendo a ação de ancoragem da argamassa à base”.

A movimentação da água influencia a cinética das reações de hidratação da pasta de cimento das argamassas de revestimento (DETRICHÉ et al., 1983). Esta movimentação, por sua vez, será mais ou menos intensa conforme as condições de sucção da base (PAES et al., 2003), bem como da influência de fatores externos como temperatura e ventilação sobre a cura (MOURA, 2007).

Surge então uma questão que deve ser analisada. Até que ponto pode-se avaliar cada um dos elementos do revestimento como variáveis independentes e seus efeitos isolados, em termos de resposta estatística, sobre a aderência dos revestimentos, se estes dificilmente atuam de maneira isolada sobre tal propriedade? Candia (1998) chega a afirmar, em certo ponto, que o grande número de variáveis que influenciam torna quase impossível estabelecer diretrizes ou especificações que garantam valores altos ou satisfatórios de resistência de aderência entre argamassa e substrato, embora cada pesquisador defenda sua hipótese.

É preciso, portanto, constituir uma forte base teórica dos fenômenos e dos materiais envolvidos. A seguir, a questão da aderência em revestimentos de argamassa é analisada em detalhes.

2.2 A QUESTÃO DA ADERÊNCIA

O termo “aderência” e “adesão” possuem, dentro do contexto científico, significados distintos, muito embora tenham semelhante definição. As próprias normas técnicas colaboram para eventuais confusões, bem como a variação de traduções e significados que as palavras possuem quando transcritas do inglês, o principal idioma utilizado na literatura técnica internacional. Embora o termo

“adhesion” sirva genericamente tanto para adesão como para aderência, a ASTM e a ABNT citam “*bond strength*” como sendo a chamada resistência de aderência. As normas européias (EN) preferem utilizar o termo “*adhesion strength*” (GONÇALVES, 2004).

Na opinião de Romero (2010) não existe uma teoria unívoca para explicar o conjunto do fenômeno (de aderência), senão diferentes teorias aplicáveis a casos particulares de materiais, uma vez que nenhuma destas teorias por si só seria capaz de explicar plenamente o fenômeno de aderência em si. O problema primordial residiria fundamentalmente na difícil conciliação entre as contribuições ao fenômeno devidas ao nível microscópico (molecular) e ao nível macroscópico (forma e contato entre interfaces).

Nesse sentido, o fenômeno que determina a colagem de um material adesivo a uma superfície é definido pela soma de uma série de forças mecânicas e físico-químicas que se sobrepõem e se influenciam mutuamente. O Specialchem Guide (2011) afirma que não é possível separar essas forças umas das outras, mas pode-se distingui-las da seguinte forma:

- a) a parcela devida ao intertravamento mecânico, resultante da ancoragem mecânica do adesivo nos poros e nas irregularidades da superfície;
- b) a parcela devida a forças eletrostáticas, no que diz respeito à diferença de eletro negatividades dos materiais;
- c) e por fim os demais mecanismos de adesão que se relacionam com as forças intermoleculares e químicas de ligação que ocorrem nas interfaces de sistemas heterogêneos.

Messler (2004) contribui com esta discussão, ao afirmar que materiais ditos adesivos são capazes de unir materiais por suas superfícies através de forças oriundas de ligações químicas secundárias (do tipo forças de Van der Waal's ou pontes de hidrogênio) e, em muito menor escala, através de ligações químicas primárias (ligações iônicas ou covalentes). Rudit (2009) complementa que por vezes, estas ligações químicas secundárias, em sistemas de revestimento de argamassa, são reforçadas pela contribuição de ligações mecânicas de intertravamento do material adesivo dentro de irregularidades nas superfícies dos materiais aderidos.

Sousa (2005) define adesão, na área de tecnologia de revestimentos, como a propriedade da argamassa em ficar aderida ao substrato logo depois da aplicação e durante o período em que está à espera do sarrafeamento. Semelhante conceito é utilizado por Carasek (1996), que o diferencia da chamada aderência, que seria uma qualidade própria da argamassa endurecida.

A adesão inicial da argamassa à base está relacionada com a reologia da pasta aglomerante, sendo influenciada não só pela trabalhabilidade da argamassa, mas também pela textura ou porosidade do substrato. Nesse caso, influi também a presença ou não de tratamento prévio com o objetivo de melhorar a superfície de contato entre a argamassa e a base (CINCOTTO et al., 1995).

Gallegos (1995) e Gonçalves (2004) consideram que argamassas de assentamento, por exemplo, podem ser consideradas materiais adesivos, cuja função principal é a adesão durável à unidade de alvenaria, sendo as demais propriedades – incluída a resistência à compressão – menores em relação a esta primeira.

Jung (1988), por sua vez, caracteriza o conceito de “aderência” como a união da resistência de aderência à tração e da resistência de aderência ao cisalhamento, sendo esta última sempre superior à primeira. Para Candia (1998, p.33), “quando a resistência de aderência ao cisalhamento é baixa, o espaçamento entre fissuras aumenta, com riscos de descolamento do revestimento”. Para Recena (2008), a resistência de aderência deve ser entendida como o resultado do comportamento de um sistema, o qual depende tanto das características e propriedades da argamassa como das características e propriedades do substrato.

Internacionalmente, é mais comum o registro de trabalhos que avaliam a aderência de argamassas de assentamento de unidades de alvenaria, principalmente com viés estrutural. Trabalhos de aderência de revestimentos são mais comuns em alguns países europeus, como França, Alemanha e Portugal (ANTUNES, 2005).

As perdas de aderência que geram fissuras e descolamentos podem ocorrer com poucos dias de cura da argamassa, ou mesmo durante a vida útil das mesmas em uma edificação. O efeito dessas manifestações patológicas é inicialmente estético, mas pode levar a degradação da construção, ingresso de agentes agressivos e, por

consequente, perda de suas condições de serviço (CEMENT & CONCRETE ASSOCIATION OF AUSTRALIA, 2001).

A aderência da argamassa ao substrato pode sofrer influência de alguns fatores relacionados ao processo executivo do revestimento, tais como: o tempo de mistura da argamassa na betoneira (afetando o teor de ar incorporado), a altura de lançamento no substrato, o tempo de espera para o sarrafeamento, a existência de cura, dentre outros (GONÇALVES, 2004).

Quanto às propriedades intrínsecas do revestimento, Pereira et al. (1999), a partir dos resultados experimentais obtidos em seus trabalhos, fazem algumas proposições, dentre as quais se podem destacar:

- a) não são identificadas correlações entre resistência à compressão e resistência de aderência;
- b) é falso afirmar que a relação a/c e a resistência de aderência são inversamente proporcionais;
- c) a consistência da argamassa está intimamente ligada à resistência de aderência;
- d) a cura dos revestimentos é fundamental para a resistência de aderência.

Conforme ressaltado por Pereira et al. (1999) é errado afirmar que a relação água/cimento ou água/aglomerante e a resistência de aderência são inversamente proporcionais. Em alguns casos, argamassas com maior relação a/c podem apresentar desempenho mais satisfatório que outras com menor quantidade de água. Novamente, a questão é que o sistema de revestimento deve ser analisado globalmente, levando em consideração não somente a reologia da argamassa, mas também as condições de sucção do substrato, e a cura. Todos estes parâmetros exercerão influência sobre a capacidade aderente da interface argamassa/substrato.

Os equipamentos utilizados para o ensaio de aderência das argamassas são dinamômetros acoplados ou não a equipamentos eletrônicos (por exemplo, uma célula de carga), onde é determinada a carga de ruptura a tração. Na inexistência

de tais equipamentos, pode-se ainda fazer uso de equipamentos mais rudimentares, à base de braços de alavanca, onde pesos colocados na extremidade do braço (COSTA, E. et al., 2006; GONÇALVES, 2004). A figura 1 ilustra alguns exemplos de equipamentos utilizados em pesquisas ao longo dos anos.

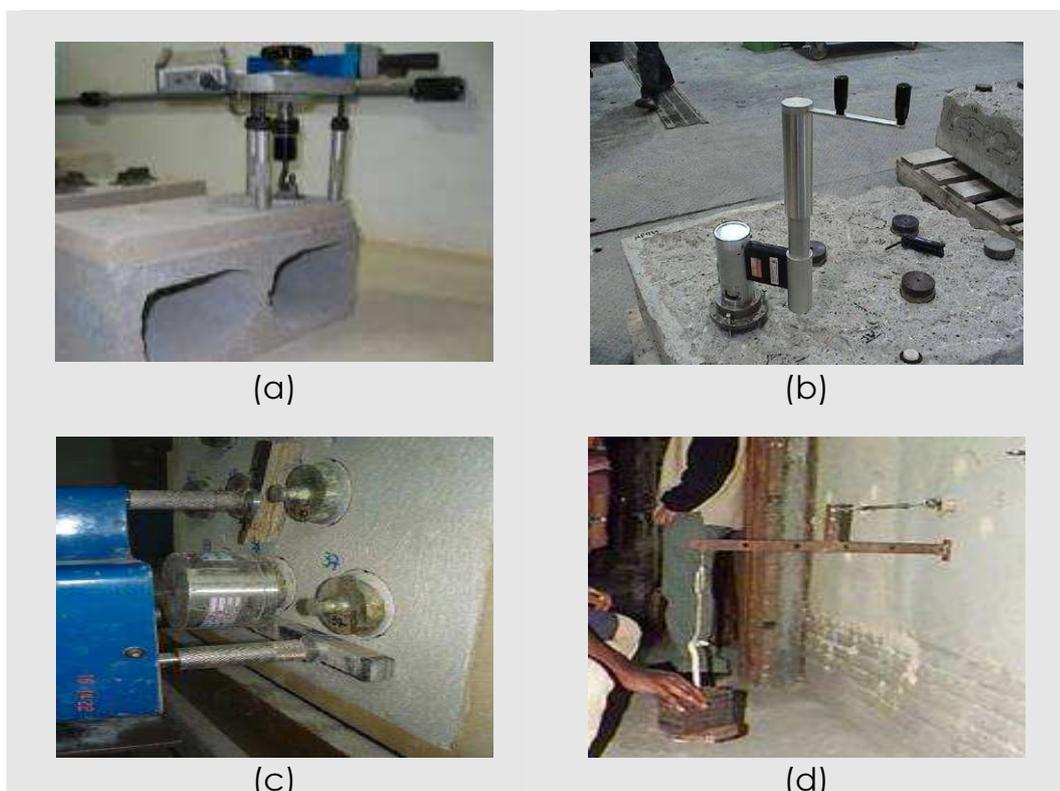


Figura 1: exemplos de equipamentos empregados em ensaios de aderência à tração: dinamômetros manuais (a) (GONÇALVES, 2004) e (b) (BÉLAIR, 2005); (c) eletrônicos (MOURA, 2007); (d) manual com braço de alavanca (acervo pessoal do autor).

Muitas das críticas dos trabalhos quanto aos resultados de aderência apresentados nos ensaios se devem a grande variabilidade dos valores encontrados. Para Cincotto et al. (1995), esta variabilidade pode fornecer coeficientes de variação superiores a 35%, sendo devida principalmente a fatores como o ângulo de corte das paredes para realização do ensaio, ou mesmo a variação da velocidade de aplicação da carga, dependendo do equipamento utilizado. Além disso, pode-se incluir também a variação própria dos materiais utilizados. A variabilidade da aderência pode, ainda, estar associada à questão do fator executivo, ou fator humano (COSTA, E. et al., 2006; GONÇALVES, 2004). Segundo Gonçalves (2004), o empirismo na execução das tarefas e a subjetividade de fatores dependentes da habilidade do profissional, como a determinação do ponto de sarrafeamento,

contribuem para falhas executivas e apresenta conseqüências no acabamento e qualidade do produto final. Moura (2007) e Pretto (2007) identificaram que a variação do profissional que executa o revestimento teve reflexo direto nas propriedades de aderência do revestimento por elas executado, independente do tipo de tratamento do substrato, ou da argamassa de chapisco e/ou revestimento utilizada.

A extensão de aderência é outro aspecto fundamental a ser considerado. Esta extensão de aderência pode ser interpretada como a área de contato sólida entre a interface argamassa/substrato. Uma vez que falhas de aderência ocorrem devido à ineficiência ou ausência de contato, Antunes (2005) interpreta que a extensão de aderência avalia, indiretamente, a quantidade de “defeitos” presentes na região de interface. O uso de equipamentos de microscopia ótica permite diferenciar áreas de contato e vazios presentes (LANGE et al., 1999). Microscópios eletrônicos de varredura (MEV) também podem ser utilizados, quando se deseja um maior nível de detalhamento.

A figura 2 ilustra a análise da interface entre argamassa de revestimento/substrato cerâmico ou de concreto de alguns trabalhos pesquisados nesta revisão bibliográfica.

A execução de revestimentos é realizada através do lançamento da argamassa contra sua base de aplicação, seja por lançamento manual ou projeção mecanizada. Durante este processo de aplicação, a argamassa recebe certa quantidade de energia cinética que é dissipada ao atingir a base. Segundo Antunes (2005), esta energia de impacto é dissipada no espalhamento da argamassa sobre a base (deformação plástica) e na eliminação do ar preso entre as camadas, garantindo o que Carasek (1996) chama de extensão de aderência.

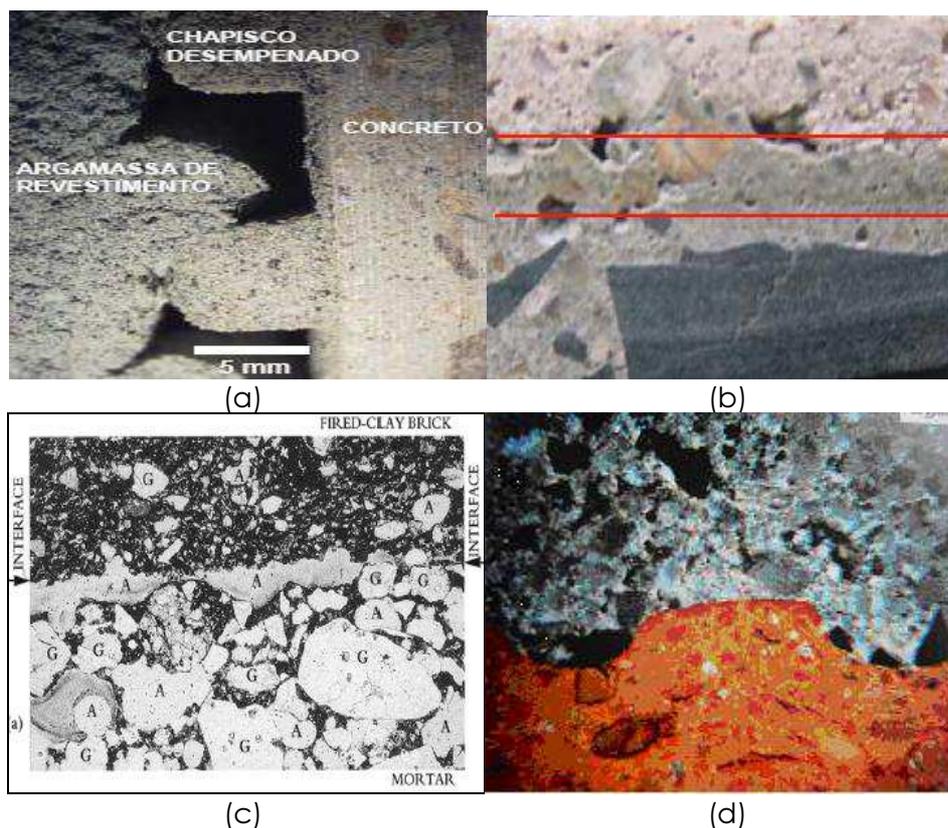


Figura 2: análise da interface de ligação entre argamassa e substrato presentes nos trabalhos de: a) Pretto (2007); b) Silva, V. (2004); c) Broken et al. (1998) e d) Carasek (1996).

Exemplos de pesquisadores que se preocuparam com a questão da energia de aplicação da argamassa são apontados por Antunes e John (2007), no boletim técnico BT/PCC/455. Neste propõe-se também uma técnica de controle e determinação da energia de impacto, com o auxílio, dentre outros, de filmadoras digitais e instrumentação de sensores nas colheres de pedreiro. Os resultados apontam uma energia de aplicação equivalente a uma altura de queda livre da argamassa de 1,8 metros, valor similar à outra pesquisa de campo citada no artigo, elaborada por Bonin⁴ (2002). Porém, é diferente da altura utilizada (com auxílio de uma caixa de queda) por autores como Carasek (1996) - 15 cm - e por Paes (2004) - 50 cm. Para Antunes (2005), existe uma relação entre o comportamento reológico das argamassas e a energia de lançamento das mesmas sobre um substrato, sendo que o aumento desta energia, no trabalho da autora, levou a um aumento da resistência de aderência dos revestimentos. Para Duailibe et al. (2005), a projeção mecânica de argamassa, por exemplo, possui melhor capacidade de gerar uma

⁴ O trabalho citado de Bonin (2002), realizado no NORIE/UFRGS, não está oficialmente documentado (BT/PCC/455).

maior extensão de aderência, já que a pressão de lançamento é superior à executada por um pedreiro profissional. Estudos realizados por Paravisi (2007) confirmam esta tendência. A autora avaliou a produção, em uma mesma obra, de revestimentos de fachada executados através de aplicação manual e projeção mecânica. Para uma mesma fachada, a resistência de aderência média foi de 0,25 MPa para aplicação manual e de 0,42 MPa para projeção mecânica. Entretanto, esta não é necessariamente uma consequência direta (maior energia de aplicação = maior resistência de aderência à tração). No trabalho de Fernandes (2007), pode-se observar que argamassas projetadas com ar comprimido não necessariamente resultavam em revestimentos com aderência superior a outros realizados com lançamento manual. Buscando tentar identificar quais as causas deste comportamento, Fernandes et al. (2009) estudaram a influência da forma de aplicação (lançamento manual e projeção a ar comprimido), mantendo-se constante a energia específica de lançamento, que é a energia cinética (J) por quantidade de massa (kg) com que a argamassa é lançada durante a execução do revestimento, em duas formas diferentes de aplicação.

Uma vez conceituada a questão da aderência de argamassas em sistemas de revestimento, o foco passa a ser a influência dos diversos fatores dos quais depende a qualidade desta propriedade. Na seqüência, portanto, tais fatores são detalhados.

2.2.1 Aspectos relacionados à interface de contato entre superfícies

Para Aguilar (2010), não são raros os casos onde os materiais são estudados sem que se considerem o que a autora chama de suas fronteiras, as chamadas interfaces ou superfícies. Uma interface pode ser conceituada como a superfície ao longo do qual duas substâncias diferentes, ou fases distintas de um mesmo material, se encontram. São nas interfaces onde ocorrem a maioria das interações entre sólidos, líquidos e gases de naturezas distintas. A mesma autora observa que na área de Engenharia, as superfícies são responsáveis pela capacidade de um sistema transferir tensões entre diferentes volumes. Nesse aspecto, o estudo de superfícies e interfaces permitiria auxiliar na compreensão de determinados mecanismos de fratura, tais como a aderência dentre substratos e argamassas.

Já foi citada no capítulo anterior a importância da chamada extensão de aderência. A garantia de uma boa extensão de aderência pode ter relação com o conceito de “molhabilidade” de um fluido sobre um sólido, ou seja, a capacidade que o mesmo teria de espalhar-se homoganeamente sobre a superfície de um substrato. Blake e Coninck (2002) consideram o molhamento de sólidos por líquidos uma parte essencial de muitos processos, tanto naturais como industriais. Ressaltam, contudo, que por mais que se conheçam os conceitos básicos da cinética molecular que levam ao espalhamento de um líquido, persistem incertezas, principalmente sobre o conhecimento preciso de mecanismos pelos quais um fluido se move através de uma superfície sólida, molhando-a, e como este mecanismo interage com o resto do fluxo existente.

As interações moleculares que ocorrem nas imediações de uma interface em processo de molhamento são fundamentais para a compreensão da dinâmica de molhabilidade, dentro da zona trifásica em movimento. Nesta zona, sólidos, líquidos e uma segunda fase fluida imiscível se encontram, e por isso é aqui que, para ocorrer o molhamento, as moléculas de uma fase fluida devem deslocar as da outra. A formulação da explicação entre esta atividade molecular e o fluxo macroscópico no interior do líquido é um grande desafio para a mecânica dos fluidos. Mesmo em equilíbrio, as moléculas que compõem a zona de três fases não serão estacionárias, mas, ao contrário, estarão sujeitas a atividade térmica constante, de modo que o perfil de espalhamento flutuará localmente sobre sua posição média. Se o sistema não está em equilíbrio, a região de molhamento tende a se mover, com a sua direção geral imposta à flutuações por alguma força externa ou gradiente de potencial (BLAKE E CONINCK, 2002).

Paes (2004) coloca que a “molhagem” de uma superfície só ocorrerá se a fase líquida possuir baixa viscosidade e se o processo resultar em um decréscimo da energia livre do sistema. Em outras palavras, a chamada tensão superficial existente entre superfícies de materiais é fator preponderante na molhabilidade. Aguilar (2010) ressalta, contudo, que a tensão superficial “não é uma interação física que atua no sistema. É apenas um tipo de equilíbrio entre forças que já existem no sistema, que define o tamanho e a forma da superfície”.

Pretto (2007) coloca que, neste aspecto, é particularmente interessante estudar questões relacionadas ao chamado ângulo de contato, relacionando-o com o comportamento das tensões superficiais e da energia de superfície dos materiais envolvidos. Para Romero (2010), o ângulo de contato é “o ângulo formado entre um líquido e um sólido na interface sólido/líquido/vapor”. O mesmo autor considera que, na maioria dos casos, uma mudança de propriedades da superfície do sólido será medida por uma mudança do ângulo de contato. A figura 3 ilustra o contato entre um líquido e um sólido, gerando um ângulo de contato superficial.

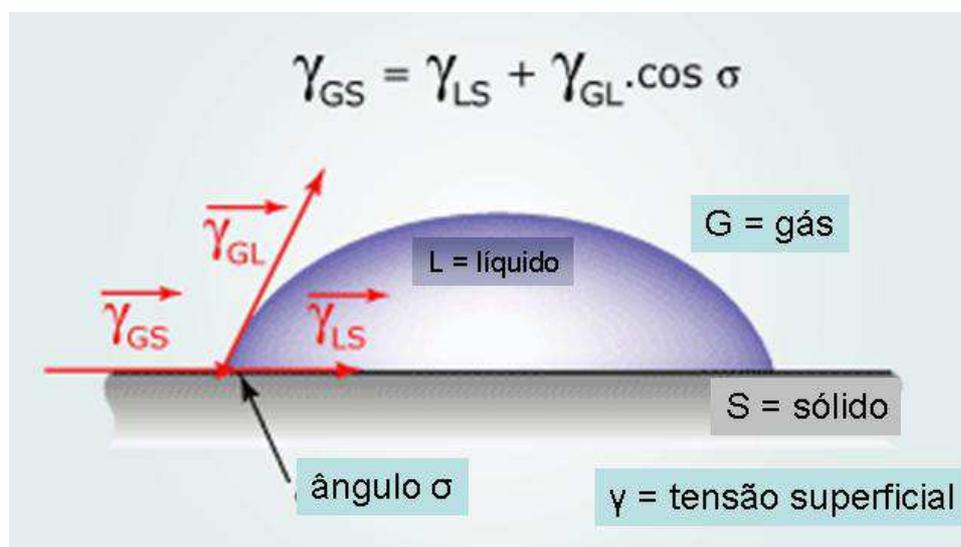


Figura 3: ângulo de contato entre um sólido e um líquido (adaptado de Adhesion Guide⁵).

Se um líquido mover-se livremente até seu equilíbrio de forças, o grau de molhamento parcial pode ser determinado considerando-se o equilíbrio de forças entre as três tensões superficiais, expressas através da equação presente na figura 3.

“A energia de superfície de sólidos também pode ser expressa como resultado do trabalho necessário para separar duas fases. As moléculas ou átomos dentro de uma fase ou mesmo na superfície apresentam fortes atrações entre moléculas e átomos. São chamadas forças coesivas. Quando as forças que atuam entre um líquido e um sólido, chamadas forças de adesão, forem mais fortes que as forças coesivas do próprio líquido, o líquido tende a molhar o sólido. O líquido se espalha pela superfície sólida (ângulo = zero) quando as forças de atração líquido-sólido igualam ou superam as forças coesivas do líquido. Por outro lado, quando ângulo = 180°, não ocorre adesão entre as duas fases (AGUILAR, 2010).”

⁵ Disponível em <http://www.specialchem4adhesives.com/resources/adhesionguide/index.aspx?id=theory2>

Pretto (2007) ressalta que a molhabilidade de substratos irá depender tanto da composição química destes quanto da sua rugosidade, a qual altera o ângulo de contato. As superfícies podem, assim, ser classificadas como hidrofóbicas ou hidrofílicas, conforme a tabela 2. Para a mesma autora, o ideal é que se obtenha um substrato com uma superfície mais hidrofílica possível.

Tabela 2: classificação das superfícies conforme o ângulo de contato (adaptado de RAMÉ-HART, 2013)

| Propriedade da Superfície | Molhagem da Superfície | Ângulo de Contato |
|---------------------------|------------------------|-------------------|
| superhidrofílico | Total | $\sim 0^\circ$ |
| hidrofílico | Grande | $< 60^\circ$ |
| hidrofílico | Moderada | $< 90^\circ$ |
| hidrófoba | Baixa | $> 120^\circ$ |
| superhidrofóbica | Muito Baixa | $> 150^\circ$ |
| superhidrofóbica | Nenhuma | 180° |

O índice de molhagem de um líquido sobre um dado sólido, segundo Ramé-Hart (2013), define o termo "Trabalho de Adesão". Para o autor, segundo as Teorias de Adsorção, forças de Van der Waals podem ser suficientes para garantir uma boa adesão sólido/líquido. Entretanto, o autor não explica claramente como essa interação ocorre em sólidos porosos.

A medição do ângulo de contato pode ser realizada através de equipamentos específicos. Estes equipamentos permitem que uma gota de água seja lançada sobre a superfície a ser analisada enquanto uma câmera digital de alta precisão fotografa a gota sobre a base. A partir da imagem obtida, pode-se medir o ângulo de contato com o auxílio de outros softwares, como o AutoCad por exemplo (STOLZ, 2013). A figura 4 ilustra um exemplo de ângulo de contato de tintas auto-limpantes e vernizes, medido e comparado com um vidro padrão, citados no trabalho de Flores et al. (2012).



Figura 4: medição de ângulos de contato (adaptado de FLORES ET AL., 2012)

A equação de Dupré estabelece o trabalho de adesão por unidade de área de contato:

$$W_{ad} = \gamma_{gs} + \gamma_{gl} - \gamma_{ls} \quad (\text{Equação 01})$$

A partir da equação de Dupré e da equação exposta na figura 3, pode-se determinar a chamada equação de Dupré-Young, onde, a partir do ângulo de contato, pode-se calcular o trabalho de adesão (CARASEK, 1996; PAES, 2004; AGUILAR, 2010)

$$W_{ad} = \gamma_{gl}(1 + \cos \sigma) \quad (\text{Equação 02})$$

O ângulo de contato é uma característica interfacial independente das características reológicas ou da quantidade de líquido colocado sobre uma superfície. Entretanto, procedimentos de medida de ângulo de contato baseadas em técnicas ópticas que utilizam gotas minúsculas podem gerar perfis errôneos, quando aplicadas em superfícies não homogêneas ou rugosas (ROMERO, 2010). Blake e Coninck (2002) complementam que é plenamente comprovável (tal qual intuitivamente já se poderia supor) que um líquido projetado em uma superfície molha mais rapidamente do que um simplesmente colocado sobre essa superfície, mas a maneira em que o fluxo do líquido auxilia a molhar é ainda objeto de controvérsias. Sobre esta perspectiva, a interpretação do ângulo de contato entre um líquido e um sólido deve sempre ser analisada criticamente, a partir das condições de contorno existentes.

Um outro aspecto é salientado pelo guia da Specialchem (2011). A superfície de contato formada durante o processo de molhamento depende da tensão superficial e a viscosidade dos materiais adesivos, mas também de aspectos relacionados à microestrutura (forma e tamanho dos poros) da superfície do substrato. O tamanho da superfície de contato efetiva é geralmente menor do que a superfície real do substrato, uma vez que os poros e irregularidades da superfície podem não ser completamente preenchidos pelo material adesivo.

No caso de sistemas de revestimento, existe claramente uma fase viscosa (argamassa fresca) assentada sobre um substrato sólido poroso (concreto ou cerâmica). Nesse caso, outro fenômeno de superfície ligado a efeitos tensoativos e eletrocinéticos ganha importância: a questão da capilaridade e permeabilidade. A capilaridade é um fenômeno relacionado à propriedade física de fluidos subirem ou descerem por tubos muito finos, ou tubos capilares. A altura atingida por um fluido dentro de um tubo capilar pode ser determinada através de um balanço de forças. Segundo Aguilar (2010), uma coluna de água em um tubo capilar está sob ação de duas forças. A primeira é resultante das forças atrativas existentes ao longo da área de contato entre o fluido e a parede do capilar. Em segundo, existe a força da gravidade. Dessa forma, a altura de equilíbrio poderia ser expressa pela equação a seguir, onde ρ , g , r são, respectivamente a densidade do líquido, a aceleração da gravidade e o raio do tubo capilar.

$$h = \frac{2\gamma_{gl} \cos \sigma}{(\rho \cdot g \cdot r)} \quad (\text{Equação 03})$$

Quando os tubos capilares são predominantemente horizontais, as forças gravitacionais passam a não ser tão importantes; nesse caso, se um líquido molha um sólido poroso, a pressão de vapor do líquido no poro capilar tende a ser menor do que fora dele. Paes (2004) destaca a complexidade destes fenômenos quando relacionados às argamassas sobre substratos porosos, uma vez que as argamassas tendem a se comportar inicialmente como um sistema de poros capilares saturados, e após um sistema de poros capilares não saturados, ao passo que nos substratos este comportamento é inverso.

Dessa forma, passa a ser importante verificar também os aspectos relacionados aos substratos porosos e às argamassas, em sistemas de revestimento, e sua influência na resistência de aderência.

2.2.2 Aspectos Relacionados aos Substratos

Substratos são, por definição neste trabalho, as superfícies nas quais estão assentadas as argamassas de revestimento. Nas obras de edificação, os principais substratos encontrados são componentes de concreto estrutural e as paredes (estruturais ou de vedação simples) de alvenaria (compostas de tijolos ou blocos cerâmicos, sílico-calcário, blocos de concreto convencional ou celular). Autores como Pereira (2000) destacam que os blocos utilizados apresentam, ainda, características superficiais diferentes, e conseqüentemente condições para aplicação de argamassas também diferenciadas.

A *Mortar Industry Association* (200_) identifica algumas propriedades do substrato que devem ser consideradas, quando da seleção de um sistema de revestimento em argamassa. Estas seriam:

- a) resistência mecânica. Substratos com resistência mecânica elevada geralmente exigem misturas de argamassas relativamente fortes também⁶;
- b) sucção d'água. O grau de sucção da base é um fator significativo na garantia de uma boa aderência. Pode ser necessário ajustar este através de um pré-tratamento do substrato ou o uso de aditivos;
- c) durabilidade do substrato;
- d) resistência à penetração de umidade: muitos substratos são resistentes à penetração de umidade, enquanto outros necessitam que o revestimento de argamassa garanta essa estanqueidade. Além disso, alguns substratos podem ser degradados pelos efeitos da saturação de água sobre eles.

Gallegos (1995) levanta uma questão muito pertinente associada ao tipo de substrato utilizado: a diferença da forma e maneira como os poros se apresentam, conforme o tipo de unidade da base. Unidades sinterizadas como tijolos e blocos cerâmicos tendem a apresentar uma rede de poros similar a condutos cilíndricos de textura suave; substratos de matrizes a base de cimento Portland, por sua vez, apresentariam poros comparáveis a várias esferas secantes de textura mais rugosa,

⁶ Nota do autor: embora o texto referenciado não faça nenhuma menção objetiva, entende-se que a maior resistência sugerida para a argamassa esteja relacionada à maior resistência de aderência da mesma, em relação a um substrato de elevada resistência mecânica – e conseqüentemente menos poroso. Afinal, conforme citado

possivelmente devido à presença de produtos de hidratação envolvendo os agregados do esqueleto granular do concreto.

No caso de unidades cerâmicas, os mecanismos de aderência entre argamassa e base são influenciados por aspectos microestruturais, muito embora grande parte das abordagens leve em conta apenas aspectos macroestruturais. IRA (taxa inicial de absorção), porosidade dos tijolos ou blocos, textura superficial e o caráter da interface de contato são controlados pelas características dos materiais empregados, em micro escala (LANGE et al., 1999). Para Khalaf e Wilson (1999), o nível de porosidade de uma unidade cerâmica depende da qualidade da argila utilizada, bem como a temperatura e o tempo de queima da mesma. Jackson e Dühr (1994)⁷, citados por Khalaf e Wilson (1999) afirmam que dimensões típicas de diâmetros de poros em tijolos cerâmicos variam de 1 a 10 µm. Em outra perspectiva, a tabela de Whiteley et al. (1997), citada por Carasek (1996), apresenta valores um pouco diferenciados, como se pode observar através da tabela 3.

Tabela 3: exemplos de porosidade de tijolos constituídos de diferentes matérias primas (WHITELEY et al⁸, 1977, apud Carasek, 1996).

| Material do tijolo | Porosidade total (%) | Distribuição dos tamanhos dos poros em % não cumulativa | | | | |
|--------------------|----------------------|---|---------|--------|----------|-------|
| | | Diâmetros equivalentes em µm | | | | |
| | | < 0,1 | 0,1 - 1 | 1 - 10 | 10 - 100 | > 100 |
| cerâmico | 30 | 0 | 3 | 26 | 65 | 6 |
| Sílico-calcário | 31 | 29 | 13 | 10 | 29 | 19 |
| Concreto celular | 37 | 14 | 49 | 14 | 24 | 0 |

Estudos desenvolvidos por Raimondo et al. (2007) indicam não haver necessária correlação entre a porosidade total de diferentes tijolos cerâmicos e a absorção de

anteriormente, não há evidências claras de relação direta entre resistência à compressão e resistência de aderência à tração.

⁷ Jackson, N. e Dühr, R.K. Civil Engineering Materials. London: MacMillan press Ltd., 1994.

⁸ WHITELEY, P. et al. Porosity of building materials – a collection of published results. Journal of Oil and Colors Chemists Association, n.60, p.142-150, 1977.

água por parte desses. Gallegos (1995) corrobora com este pensamento, ao comentar que o índice de absorção inicial de água, por si só, não reflete na capacidade de aderência entre a argamassa e a base.

A constituição de um produto cerâmico e as suas características de resistência e porosidade dependem, segundo Grun (2007) da natureza e da quantidade dos minerais ou compostos químicos presentes e de outros parâmetros próprios da matéria-prima. É no processo de produção, contudo, que são desenvolvidas as propriedades finais de um substrato cerâmico, sendo fundamentais cuidados com a secagem prévia das peças e a queima controlada dos mesmos. Pureza (2004) define a secagem como o processo de retirada da água utilizada durante o processo de conformação da peça cerâmica. O processo de secagem das cerâmicas é de fundamental importância. Segundo Vicenzi (1999), caso as peças sejam introduzidas muito úmidas no forno para a sua queima, ao elevar-se rapidamente a temperatura, de imediato surgem tensões na peça, em função da evaporação brusca, o que leva à deterioração da unidade cerâmica. Já a queima constitui-se no processo onde se promove a vitrificação e/ou sinterização⁹ da massa cerâmica, em temperaturas variadas dependentes das matérias primas e das propriedades desejadas. Pureza (2004) descreve ainda que essas propriedades estão ligadas às transformações físico-químicas que ocorrem em função da temperatura de queima, as quais podem ser resumidamente assim descritas:

- a) Até 200°C: eliminação da água higroscópica ou residual;
- b) De 350°C a 650 °C:: combustão das substâncias orgânicas e dissociação de sulfetos;
- c) De 600°C a 800°C: colapso do retículo dos argilominerais com liberação da água de constituição;
- d) De 800°C a 950°C: decomposição dos carbonatos com liberação de CO₂;
- e) De 900°C a 1000°C: reações da sílica e da alumina com outros elementos e formação de silicoaluminatos complexos que conferem ao corpo cerâmico as propriedades físico-mecânicas características;

⁹ Sinterização é um processo onde forças de compactação são fortalecidas a altas temperaturas, e envolve redução da área superficial e volume, densificação e aumento da resistência mecânica (PUREZA, 2004)

- f) Acima de 1000°C amolecimento e fusão dos silicoaluminatos e formação de uma fase vítrea, que confere dureza, compactação, impermeabilidade e resistência mecânica.

Cultrone et al. (2004) estudaram a influência da mineralogia e da temperatura de queima na porosidade de tijolos cerâmicos. Dois tipos de argilas utilizadas como matérias-primas foram analisados. Uma contendo considerável quantidade de carbonatos em sua composição, com dimensão dos grãos da ordem de 1 mm, e outra predominantemente quartzosa e sem presença de carbonatos. O efeito de mudanças de porosidade foi avaliado em temperaturas de queima que variavam de 700 a 1100°C. Os autores demonstram que a presença ou ausência de carbonatos influencia fortemente o desenvolvimento da porosidade das peças e, além disso, a textura e as propriedades mecânicas dos tijolos. Consideram que os carbonatos presentes na argila promovem a formação de fissuras e poros abaixo de 1 µm quando os tijolos são queimados entre 800 e 1000°C. A ausência de carbonatos na argila, por sua vez, promove uma redução contínua da porosidade e incremento significativo de uma fração de poros com raios superiores a 1 µm à medida que a temperatura de queima aumenta.

Por sua vez, o conhecimento das propriedades higrométricas de elementos cerâmicos e a influência exercida pela sua microestrutura são fundamentais para o entendimento de fenômenos ligados ao transporte de umidade nesses materiais (RAIMONDO et al. 2007).

Paes (2004), a partir dos resultados obtidos em sua tese, argumenta que a estrutura mais refinada dos poros (menores diâmetros) de blocos cerâmicos, bem como a superfície mais lisa e compacta, faz que este substrato absorva a água da argamassa em tempos mais prolongados e em menor quantidade. Da mesma forma, substratos de blocos de concreto geram condições mais favoráveis à penetração da pasta aglomerante no seu interior, em função da presença de poros de maior diâmetro, que em conjunto com a sua rugosidade superficial, favorece a ancoragem do revestimento.

Macroscopicamente, a fase sólida de um concreto é formada pela pasta hidratada do cimento e seu esqueleto granular, constituído pelos agregados presentes. Considerando-se que os agregados possuem baixa permeabilidade, a

pastas e a interface entre a pasta e os agregados passam a ser as responsáveis pela efetiva porosidade de substratos de concreto, variando numa faixa bastante extensa de diâmetros de poros, que pode ser de alguns ângstrons à vários micrometros (SATO, 1998).

Por sua vez, Candia (1998) nos diz que, em substratos não porosos (por exemplo, de concretos de baixa permeabilidade), a perda de água da argamassa se dará predominantemente por evaporação, ao passo que em substratos porosos esta perda se dá tanto por sucção como por evaporação. Em ambos os casos, contudo, há de se considerar também a espessura do revestimento (PAES, 2004; CANDIA, 1998).

Ainda sobre as características da base, Bauer, E. e Paes (2004) deixam claro que:

“pelas características de absorção da base, pode ocorrer que, ao se utilizar um substrato com elevada capacidade de absorção de água da argamassa, conjuntamente com a evaporação na face livre do revestimento, nos instantes iniciais, surjam microfissuras na interface devido à retração plástica, que por sua vez, podem diminuir a aderência. Por outro lado, blocos que succionam menos água da argamassa, supostamente com baixos valores de IRA, podem gerar também condições desfavoráveis na interface, com a criação de uma fina camada na região, o que gera, possivelmente, uma interface bastante porosa”.

Dentre as técnicas para a determinação da porosidade total de substratos porosos e das quantidades de poros em função das dimensões, estão aquelas baseadas na intrusão de mercúrio (PAES et al., 2005; KJELSEN e ATASSI, 1999; SATO, 1998) e na adsorção de nitrogênio (SATO, 1998). Podem-se citar outras técnicas também como as que utilizam ressonância magnética nuclear (BROCKEN et al., 1998; KAUFMANN E STUDER, 1995), transmissão elétrica (KHALAF e WILSON, 1999) e adsorção de vapor de água (PAES, 2004). Foram desenvolvidas também técnicas de análise e tratamento de imagens obtidas com microscopia eletrônica de varredura que permitem descrever quantitativamente a distribuição e a conectividade de poros (SATO, 1998; FERNANDES, 1994; LANGE et al., 1994; KJELSEN et al., 1991; QUÉNARD & SALLÉE, 1991).

Diversos autores (PAES, 2004; GONÇALVES, 2004; SCARTEZINI, 2002; PEREIRA, 2000; CARASEK, 1996) identificaram em seus trabalhos valores médios de resistência de aderência bastante superiores para argamassas de revestimento assentadas em

substratos de concreto, em relação aos substratos cerâmicos. Na maioria deles, esse comportamento se manteve independente da natureza da argamassa empregada. Conforme Paes (2004), uma mesma argamassa, aplicada em substratos com porosidades distintas, desenvolve resistências de aderência igualmente distintas. Parece claro, com isso, que a condição do substrato tem uma influência preponderante em relação ao tipo de argamassa, quando da avaliação da aderência de um sistema de revestimento.

Pereira (2000) estudou substratos de blocos de concreto e cerâmicos, assentados com diferentes argamassas (industrializadas, mistas de cimento e cal, com agregados leves, com adições minerais) em diferentes condições de cura (úmida ou ao ar livre). De forma geral, no tocante à resistência de aderência à tração, a cura úmida exerceu maior influência no aumento desta aderência em substratos de concreto revestidos de argamassas industrializadas, e em substratos cerâmicos assentados com argamassas mistas.

Já foi comentado a importância da estrutura de poros do substrato, e como esta tem reflexos na aderência. Para Dupin et al. (1988), o diâmetro dos poros capilares do substrato exerce influência nos valores de tensão de ruptura do revestimento. O mecanismo que rege este fenômeno estaria associado ao diâmetro das agulhas de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que se formam no interior destes poros, motivo pelo qual uma boa retenção de água da argamassa garantiria a correta hidratação desses cristais. A formação de cristais de etringita no interior dos poros dos substratos é, também, colocada por Carasek (1996) e por Taha e Shrive (2001) como um dos principais mecanismos de intertravamento junto à interface de ligação. Não existem, contudo, evidências de que a etringita seja, de fato, a principal responsável pela microancoragem de um revestimento.

Além disso, a existência de uma porosidade favorável à adesão inicial e posterior aderência do revestimento argamassado, por si só, não é garantia de que tais propriedades serão alcançadas de maneira eficiente. Assim sendo, Candia (1998) estabelece, a partir das especificações sugeridas em boletins técnicos nacional e

internacional¹⁰, algumas recomendações prévias para o preparo de uma base para revestimento de argamassa. Estas seriam:

- a) remoção de resíduos: materiais pulverulentos, óleos e graxas desmoldantes, fungos, musgos e eflorescências;
- b) remoção de irregularidades: excessos de argamassas de assentamento, rebarbas de concretagem;
- c) remoção de incrustações metálicas: pregos deixados pelas formas, fios e barras;
- d) preenchimento dos furos, rasgos e depressões localizadas.

Após estes cuidados preliminares da base, pode-se ou não, conforme a exigência técnica, promover uma preparação da camada superficial do substrato. São conhecidas diversas formas de preparo da superfície visando seu revestimento em argamassa. A escolha do método mais adequado vai depender, segundo Bélair (2005), das condições locais da edificação para execução do serviço e da textura final desejada. De maneira genérica, estruturas de concreto (lisas) demandam aumento da rugosidade superficial através de tratamentos específicos ou incorporação de uma camada de argamassa de chapisco; tijolos e blocos cerâmicos e de concreto, por sua vez, podem receber também esta camada de chapisco ou tratamentos com aditivos. A tabela 4 reúne alguns tratamentos apresentado por diversos autores.

Tabela 4: exemplos de tratamentos superficiais de preparação e/ou aumento da rugosidade do substrato.

| Tipo de substrato | Tratamento | Autor(es) | Exemplo |
|-------------------|-----------------|--|---|
| Concreto | Hidrojateamento | Pretto (2007); Galecki et al. (2006). |  <p>(Galecki et al., 2006)</p> |
| | | | (continua na página seguinte) |

¹⁰ SABBATINI, F.H.; FRANCO, L.S. Desenvolvimento tecnológico de métodos construtivos par alvenarias e revestimentos. EPUSP, Projeto EP/EN-1, documento 1.D., São Paulo, 1988.

¹⁰ CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT. Conditions générales d'imperméabilisation de murá base de liants hydrauliques faisant l'objet: un avis technique. Paris, CSTB, 230 (1777). Jin 1982, 7p.

| | | | |
|-------------------|--|---|--|
| Concreto | Retardador de superfície + hidrojateamento | Pretto (2007); Cabredo et al. (2003). |  <p>(Pretto, 2007)</p> |
| Concreto | Escovação | Pretto (2007) |  <p>(Pretto, 2007)</p> |
| Concreto | Lixamento | Pretto (2007) |  <p>(Pretto, 2007)</p> |
| Concreto | Apicoamento | Pretto (2007) |  <p>(Pretto, 2007)</p> |
| Cerâmico/concreto | Chapisco tradicional | Moura (2007); Pretto (2007); Ceotto et al. (2005); Scartezini et al. (2002) |  <p>(Ceotto et al., 2005)</p> |
| | | | (continua na página seguinte) |

| | | | |
|-------------------|---|--|--|
| Cerâmico/concreto | Chapisco convencional com aditivos adesivos | Nascimento et al. (2005); Scartezini et al. (2002) |  (Nascimento et al., 2005) |
| Cerâmico | Solução de cal | Scartezini et al. (2002) | - |
| Cerâmico/concreto | Chapisco rolado | Candia (1998); Candia e Franco (1998) |  (revista SIM) ¹¹ |
| Cerâmico/concreto | Chapisco desempenado | Moura (2007); Pretto (2007) |  (Moura, 2007) |

Pretto (2007) estudou a influência de diversos tratamentos superficiais de substratos de concreto, visando a melhor aderência de argamassas de revestimento. A autora utilizou técnicas de hidrojateamento (a frio e a quente), escovação, lixamento, apicoamento e tratamento com retardador de superfície, em concretos com três diferentes resistências à compressão (fck respectivamente de 45 MPa, 35 MPa e 25 MPa), com e sem auxílio de camada de chapisco. Com auxílio de técnicas de digitalização a laser propostas por Silva, F. (2006), verificou que tais tratamentos proporcionam aumento da área potencial de contato na interface. A autora considerou que os todos os tratamentos, à exceção do retardador de superfície, foram satisfatórios para melhorar as condições de aderência da base. Ressalta, ainda, que a lavagem com hidrojato (utilizando os mais comuns disponíveis no mercado nacional) deve ser considerada apenas como um tratamento preliminar

¹¹ Disponível em: <http://www.revistasim.com.br/asp/materia.asp?idtexto=603> Acesso em dezembro de 2008.

para remoção de poeiras e de desmoldante, pois não auxilia no aumento da rugosidade.

Por questões de estrutura deste trabalho, os aspectos referentes à camada de preparo em argamassa de chapisco são descritos no item 2.2.3.2, uma vez que estes são partes integrantes dos materiais assentados **sobre** os substratos, e não características do substrato **em si**.

Passa-se, assim, ao próximo item de análise, referente à influência que o revestimento em argamassa (e seus materiais constituintes) exerce sobre a questão da resistência de aderência de todo o sistema.

2.2.3 Aspectos Relacionados às Argamassas

2.2.3.1 Argamassa de Revestimento

A NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) define o conceito de argamassa, colocando que ela constitui-se em **“mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada)”**. Por sua vez, a NBR 13529 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995) especifica que um revestimento é **“o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final”**. Dentro, ainda, dessa etapa de conceituação, Pandolfo (2006) lembra que a NBR 13530 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995) não especifica a camada argamassa de chapisco como um revestimento, e sim, como um procedimento de preparação da base, eventualmente presente no sistema, quando necessário.

Para ser considerado satisfatório, uma argamassa depende não apenas do conhecimento das propriedades dos materiais constituintes, mas também na seleção apropriada da proporção (“traço”) destes materiais na mistura, a fim de

que o mesmo torne-se compatível com o substrato no qual é aplicado. Além disso, deve proporcionar boa trabalhabilidade e condições de aplicação por parte do executor do revestimento.

A supressão de traços empíricos para a produção de argamassas do texto da norma NBR 7200 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998) é um indicativo de que o proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa deve ser realizado de maneira racionalizada e cientificamente embasada (PANDOLFO, 2006; SILVA, N. 2006, MIRANDA, 2000). Esse pensamento é corroborado, por exemplo, por autores como Antunes (2005) que cita a consideração de parâmetros reológicos no processo de dosagem como fundamentais para a aplicação e consolidação dos revestimentos de argamassa.

Nesse sentido, o desempenho de um revestimento de argamassa em um sistema deve levar em conta a otimização das principais propriedades citadas por diversos autores na literatura técnica, tais como densidade de massa, teor de ar incorporado, trabalhabilidade, retenção de água, adesão inicial e consistência (estas propriedades no estado fresco), bem como resistência mecânica, aderência, capacidade de absorver deformações, permeabilidade e retração (propriedades no estado endurecido), além de “durabilidade”¹² (PRETTO, 2007; MOURA, 2007; COSTA, F., 2005; MATTOS, 2001; SABBATINI, 2000; SELMO, 1989, dentre outros)

Assim, cada um dos materiais constituintes das argamassas exerce influência em alguma característica nas mesmas, seja no seu estado fresco, durante seu processo de produção, aplicação e adesão inicial ao substrato, seja no estado endurecido.

A resistência mecânica de concretos e argamassas é relacionada, via de regra, ao consumo de cimento Portland. No caso de argamassas de revestimento, Tristão (1995) afirma muitas vezes não haver necessidade de elevadas resistências mecânicas, principalmente por este fato levar à redução da capacidade de deformação, da resistência ao impacto e até mesmo da capacidade de aderência. Argamassas muito ricas tendem a apresentar uma maior fissuração e, conseqüentemente, menor durabilidade e perda de algumas condições de serviço (aderência, estanqueidade). Mattos (2001) relembra, por outro lado, que baixos

¹² “Durabilidade” geralmente é citado por alguns trabalhos de forma genérica; todavia, está relacionado a propriedades muito amplas de concretos e argamassas. Por isso, o uso das aspas, no texto.

consumos podem reduzir a resistência à abrasão dos revestimentos, tornando-os pulverulentos.

Pereira et al. (1999) identificaram em seu trabalho que o aumento do teor de cimento da argamassa pode contribuir para um aumento da resistência de aderência. No mesmo trabalho os autores ressaltam, todavia, que é importante considerar que argamassas muito ricas em cimento geram revestimentos mais rígidos, que podem fissurar e, por conseqüência, perder resistência de aderência ao longo do tempo.

A influência do tipo de cimento em argamassas foi estudada por Bolorino e Cincotto (1997), que avaliaram argamassas mistas de cimento, cal e areia, na proporção de 1:1:6, em massa, aplicadas em revestimentos. O trabalho apresentou resultados de argamassas produzidas com os cimentos CP II-E, CP II-F, CP-III, CP-V e CP-V-RS. Os autores não constataram alterações significativas nas propriedades no estado fresco. No estado endurecido, em contrapartida, verificaram-se variações nas resistências à compressão e à tração na flexão, na absorção de água por capilaridade e na retração por secagem. A resistência de aderência à tração do revestimento também sofreu influência da reatividade e da composição dos cimentos, todavia de maneira menos pronunciada.

A cal também se constitui em um importante insumo na produção de argamassas. Segundo Quarcioni e Cincotto (2005), a cal é determinante na retenção de água da argamassa, o que é algo desejável devido ao fato de que a evaporação e a absorção do substrato podem diminuir muito a quantidade de água disponível para as reações de hidratação, prejudicando o desempenho do sistema.

A cal hidratada é formada a partir de reação de hidratação de carbonatos, calcário (CaCO_3) ou dolomita (MgCO_3), compostos que possuem características aglomerantes. Para John (2003), a capacidade aglomerante da cal é determinada pelas suas características químicas. A qualidade dos produtos (carbonatos) formados possui relação direta com a garantia de regulação da retração dos revestimentos, obtidos a partir da maior deformabilidade conferida pela cal. Segundo Guimarães (1997), a cal apresenta pequenos cristalitos que retêm a água no seu entorno, sob a forma de uma película firmemente aderida. Este mecanismo é que estaria associado à capacidade de retenção de água por parte da cal.

Ensaio realizados por Carasek e Campagnolo (1990) comprovaram que esta retenção de água é uma propriedade que exerce, também, influência sobre a aderência de argamassas. Nesse sentido, inclusive, Pavia e Hanley (2009) defendem em seu trabalho que a resistência de aderência não seria determinada preferencialmente pela presença de aglomerantes hidráulicos (como em argamassas de cimento Portland ou mistas de cimento e cal), mas sim cresceria proporcionalmente à maior capacidade de retenção de água, como a existente em argamassas de cal.

A utilização de argamassas industrializadas tem contribuído para a redução da utilização da cal, em detrimento de aditivos substitutivos, que são produtos químicos e adições minerais inertes (QUARCIONI e CINCOTTO, 2005). Pelo nível de estudos acadêmicos até o momento, estes substitutivos, embora preencham os requisitos esperados pela cal no estado fresco, pouca ou nenhuma contribuição trazem às propriedades no estado endurecido. Sob esta perspectiva, John (2003) enaltece a necessidade de estudos maiores sobre o necessário papel da cal na construção civil, descartando as bases empíricas ainda vigentes em muitas especificações e relatos técnicos. No Rio Grande do Sul, a realidade atual do mercado é um pouco diferenciada, com os produtores de argamassa industrializada utilizando a cal em suas composições.

No caso de optar-se por argamassas industrializadas, é muito importante cuidar precisamente da velocidade de mistura (CASALI, 2003). Rotações muito rápidas permitem uma maior incorporação de ar, comparativamente a velocidades mais lentas de mistura, prejudicando a consistência (YOSHIDA E BARROS, 1995). Nakakura e Cincotto (2003), ao analisar o texto da NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) vigente na época (a norma encontrava-se em processo de revisão), reiteram essa questão do tempo de mistura, principalmente para argamassas industrializadas. A incorporação de ar, embora benéfica em alguns casos, pode reduzir a capacidade de adesão inicial dessas argamassas e, por conseguinte, prejudicar a aderência final das mesmas à parede. Bauer, R. e Rago (1999) levantam também a necessidade de cuidado quanto à consistência destas argamassas, ressaltando o fato de que o consumo de água para a determinação do índice via mesa de consistência, muitas vezes difere do consumo proposto pelo fabricante.

Para Silva, C. e Nakakura (2001), o uso de argamassas industrializadas do tipo múltiplo uso ("massa única"), à época do trabalho, não contribuiria para o desempenho satisfatório de revestimentos, motivo pelo qual chegam a sugerir a supressão, por parte dos fabricantes, desse tipo de argamassa. Em direção contrária, o trabalho de Regattieri e Silva, L. (2003) afirma serem as argamassas industrializadas um material com grande potencial para ganhos de eficiência, principalmente em aspectos relacionados a ganhos de produção e racionalização de canteiro. Novamente, a realidade atual de aquecimento do mercado da construção e o desenvolvimento tecnológico tem conduzido ao uso de argamassas industrializadas com bons resultados.

Os agregados, por sua vez, embora possam ser encarados como insumos menos "nobres", comparativamente ao cimento e à cal, possuem fundamental importância na maior parte das propriedades esperadas em um revestimento, e em especial em questões relacionadas à adesão e aderência.

No tocante aos tipos de areias utilizadas em argamassas de revestimento, as mesmas apresentam-se das mais diferentes formas, com as mais variadas procedências, e naturalmente isso tem um efeito igualmente diferenciado sobre as características do produto final.

Para Tristão (2005), a variabilidade das areias utilizadas em argamassas se deve tanto aos minerais formadores quanto aos fenômenos de intemperismo e desintegração, seguido de erosão de materiais. Para o caso de areias naturais, o vento e a água são os principais agentes associados à desintegração e conformação morfológica. Já no caso das chamadas areias industrializadas, a relação entre o tipo de rocha e o equipamento de britagem passa a ter grande importância na forma final dos grãos. Mehta e Monteiro (1994) exemplificam isso ao afirmar que britadores do tipo mandíbula ou de impacto tendem a produzir grãos lamelares a partir de rochas sedimentares laminadas.

Araújo, G. (2001) comenta ser prática comum no meio técnico referenciar a composição granulométrica dos agregados através de diâmetros, muito embora se saiba que essa classificação não corresponde, necessariamente, à realidade, uma vez que grãos de areia não são perfeitamente esféricos. Através da figura 5, pode-se observar que diferentes esfericidades estão associadas às areias.

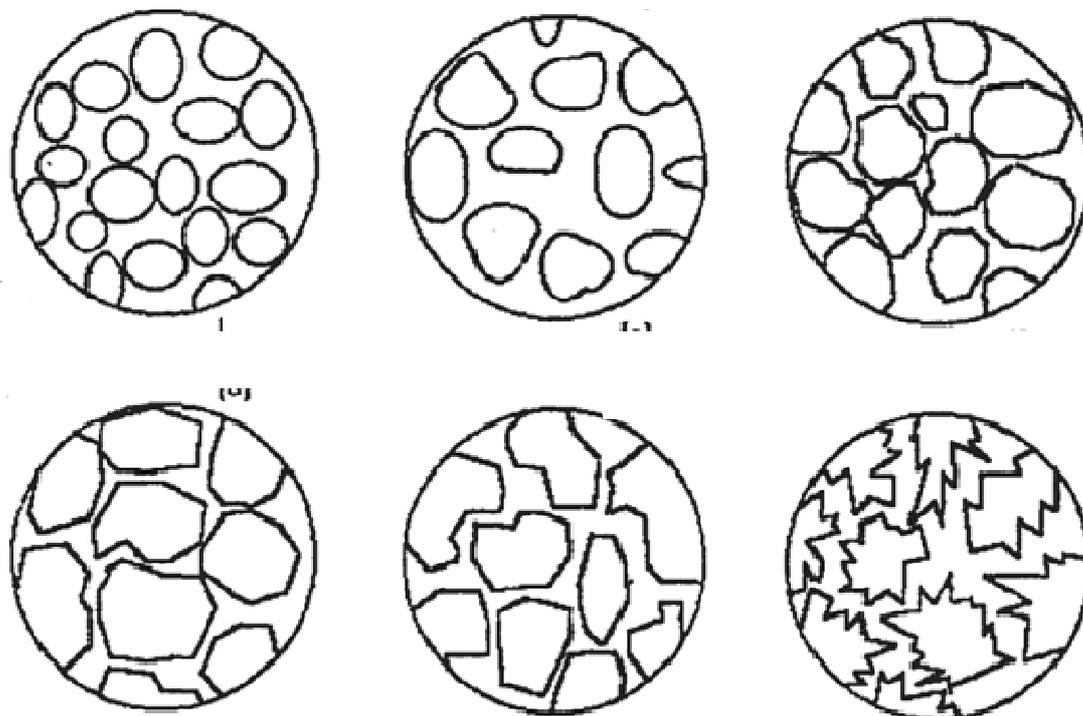


Figura 5: forma dos grãos de areias relacionados com diferentes esfericidades (TRISTÃO, 2005).

A influência da forma e tamanho dos grãos de areias foi estudada por Yu e Standish (1993), em composições binárias entre grãos esféricos e grãos cilíndricos. Como resultado, colocam que o aumento do diâmetro das esferas aumenta a porosidade até um determinado limite, a partir do qual passa então a haver um decréscimo. Há, ainda, uma indicação dos autores de que o desenvolvimento de métodos para definir o empacotamento de grãos não esféricos é muito difícil.

De modo geral, vários autores colocam que areias eólicas possuem grãos com maior grau de arredondamento, ao passo que areias de britagem possuiriam os grãos mais angulares e irregulares (PANDOLFO, 2006; D'AGOSTINHO E SOARES, 2001; BEAL E SHEPARD¹³, 1956 *apud* TRISTÃO, 2005)

O grau de arredondamento dos grãos de um agregado pode ser feito através de análise visual comparativa, tal qual proposto pela NBR 7389 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992), e exposto na figura 6.



Figura 6: classes de arredondamento (NBR 7389/92).

Tanto o trabalho de Carneiro (1999) como o de Tristão (1995) ressaltam a variação do volume de vazios como função da distribuição granulométrica, sendo que Tristão (1995) sugere a utilização de faixas granulométricas definidas em função do emprego da argamassa. Ressalva, contudo, que especificar composições granulométricas sem quantificar a forma dos grãos constitui-se em um erro, pois pode levar a produção de argamassas inadequadas em decorrência da variação no volume de vazios inicialmente esperado.

Ainda no mesmo tema o trabalho de Tristão e Román (2005) procurou investigar a questão da morfologia dos agregados e sua relação com a porosidade das argamassas por eles produzidas. Foram estudadas três areias para produção de argamassas, sendo uma de origem eólica, uma areia de leito de rio e uma areia proveniente de britagem de rocha granítica. Os resultados obtidos confirmaram as mesmas conclusões citadas por Yu e Standish (1993). A porosidade final advinda da mistura de grãos de diversos tamanhos é menor do que para mistura de grãos de um só tamanho, para grãos esféricos. Geralmente, ressaltam os autores, “desvios na forma esférica dos grãos tendem a aumentar a porosidade de misturas de um só tamanho”. No caso de grãos não esféricos, o volume de vazios varia de maneira inversamente proporcional com o arredondamento, a esfericidade e o fator de forma dos grãos.

¹³ BEAL, M. A.; SHEPARD, F. P. A use of roundness to determine depositional environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 26, n. 1, p. 49–60, 1956.

A granulometria dos agregados empregados também é um fator importante a ser levado em consideração, com relação aos mecanismos microestruturais de aderência entre argamassa e substrato. Desde que se mantenha a trabalhabilidade necessária, quanto maior a granulometria da areia utilizada, menor será a quantidade dos poros de pequenos diâmetros no interior da argamassa, contribuindo para a ancoragem ao substrato devido à presença de uma quantidade maior de produtos de hidratação junto à zona de interface. Isto porque, nesta situação, os poros de argamassa terão menor interação com os poros do substrato, facilitando o transporte de água (PAES, 2004; DETRICHÉ e MASO, 1986).

Corroborando com este raciocínio, Scartezini (2002) e Carasek (1996) identificam que argamassas que contenham areias mais finas tendem a ter o transporte de água do revestimento para o substrato dificultado. Esta restrição seria causada pela menor quantidade de produtos de hidratação que deveriam precipitar no interior dos poros da base, e que não são transportados devido à formação de uma rede capilar mais refinada na argamassa. Segundo Paes (2004), essa rede de poros mais finos diminui o raio médio dos capilares da argamassa, o que acarreta em uma redução da capacidade de sucção do substrato.

2.2.3.2 Argamassas de Chapisco

No capítulo de aspectos influentes na aderência relativos aos substratos, já haviam sido citados brevemente exemplos de tratamentos superficiais à base de uma camada em argamassa de chapisco. Neste item do trabalho, procura-se buscar mais referências sobre o assunto.

Pouquíssimos trabalhos se detêm nas características e fatores intervenientes das argamassas da camada de preparo dos revestimentos – o chamado chapisco. A dificuldade de encontrar literatura tanto nacional como internacional, nesse aspecto, é gritante.

Pandolfo (2006) vincula a existência de uma camada de preparo em argamassa de chapisco, dentre outros, aos seguintes fatores, comumente citados no meio técnico:

- a) limitação na capacidade de aderência da base: quando a superfície é muito lisa ou com capacidade de sucção incompatível com a aderência do revestimento;
- b) revestimento sujeito às ações de maior intensidade, como os revestimentos externos em geral e revestimentos de teto;
- c) e, além deste dois citados pela autora, também a uniformização da absorção da base.

Para Moura (2007), nas estruturas de concreto atuais, que via de regra apresentam altos valores de resistência à compressão, torna-se imprescindível a utilização da argamassa de chapisco. Isto porque estes substratos se caracterizam por superfícies lisas e de baixa porosidade, e tais características desfavorecem a micro ancoragem proporcionada pelo transporte da água e produtos de hidratação aos poros do substrato, e a macro ancoragem (proporcionada através do aumento da rugosidade). Pretto (2007) lembra pertinentemente que, além de superfícies com baixa capacidade de aderência, revestimentos externos também demandam uma camada de chapisco, independente do substrato. Afinal, estes são sujeitos às ações mecânicas de maior intensidade na interface base/revestimento, exigindo maior capacidade de aderência, o que pode ser alcançado com o uso de chapisco.

Segundo a Comunidade da Construção (2005), é importante frisar a necessidade de um correto proporcionamento dos materiais constituintes dos chapiscos, mais especificamente a utilização de areias mais grossas em relação aos agregados da argamassa de revestimento. Esta característica, além de conferir maior rugosidade ao substrato, facilitaria a absorção de água que promove a ancoragem da argamassa de revestimento.

Argamassas de chapisco industrializado tiveram seu uso disseminado de forma mais contundente nos últimos anos. Existem diversas técnicas de aplicação de chapiscos industrializados, dentre os quais se podem destacar os chapiscos rolados (aplicados com rolo) e os chapiscos desempenados (aplicados com desempenadeira dentada). Segundo Moura (2007, p.51), a “superfície com a aplicação desta argamassa de chapisco caracteriza-se por uma superfície ‘nervurada’, em função dos dentes da desempenadeira, o que favorece a

ancoragem da argamassa de revestimento". Através da figura 7, pode-se ter uma idéia de como são executadas tais camadas de preparo.

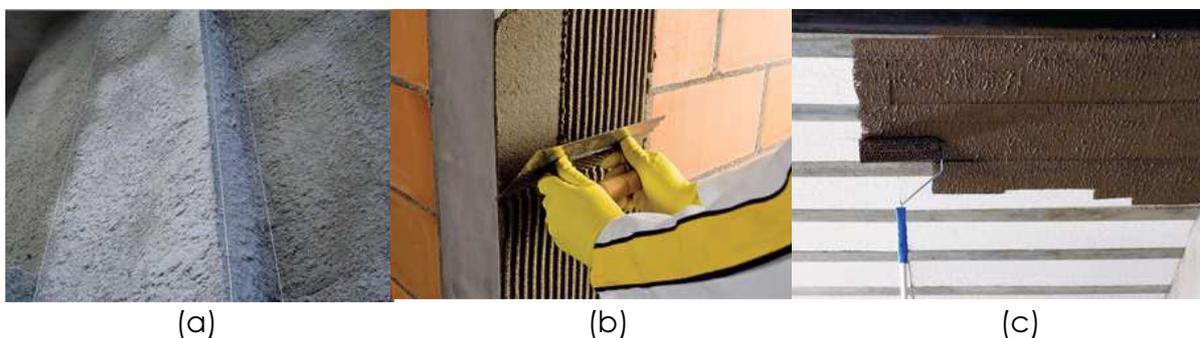


Figura 7: tipos de chapisco mais comuns utilizados em obras de edificações - (a) convencional (b) desempenado (c) rolado (COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 2005 e WEBER, 2013¹⁴).

Moura (2007) estudou a influência de diferentes condições de temperatura e ventilação na cura da argamassa de chapisco sobre substrato de concreto. A autora moldou em seu programa experimental prismas de concreto nas dimensões 40x45x10cm, com resistência característica aos 28 dias de 28MPa. Os mesmos foram utilizados como o substrato no qual foram preparados revestimentos de argamassa. A partir daí, a autora desenvolveu uma extensa matriz experimental onde foram utilizadas três argamassas de chapisco e três argamassas de revestimento. Para cada um dos conjuntos, foram combinadas argamassas de chapisco e/ou revestimento convencional, e argamassas de chapisco e/ou revestimento industrializadas. O modo de preparo das mesmas também foi levado em consideração. O cruzamento de todas as variáveis de controle gerou um total de noventa combinações diferentes, aplicados em quarenta e cinco prismas de concreto. Para a autora, o efeito da temperatura é preponderante na cura, e conseqüentemente reflete na capacidade de aderência dos revestimentos. Em todas as combinações formadas pelos três tipos de argamassa de chapisco e de revestimento, o efeito do calor resultou na queda de resistência, sendo que nas combinações formadas pela argamassa de chapisco convencional com argamassa de revestimento convencional ocorreu variação de até 0,25MPa; nos chapiscos industrializados esta variação foi de até 0,15MPa.

¹⁴ Disponível em <http://www.weber.com.br/solucoes-tecnicas/o-guia-weber/produtos/chapiscar/>

Ruduit (2009) avaliou que além da temperatura de cura, também o tipo de cimento utilizado na composição do chapisco tem relevância no desempenho da aderência à tração dos revestimentos. Para o autor, chapiscos na proporção 1:3 com cimento Portland CP-II possuíam um mesmo desempenho para a aderência à tração que chapiscos produzidos em um proporcionamento de 1:2 com cimento Portland tipo CP-IV.

Para Silva, V. e Libório (2005), devido à baixa absorção de alguns substratos, há necessidade de cuidados na especificação e confecção da argamassa de chapisco, quanto à quantidade de água empregada. Por outro lado, Candia (1998) ressalta que quando a capacidade de absorção inicial de água por parte do substrato é alta, é necessário preparar esta base com algum material (por exemplo, resinas) que ajude a regularizar a capacidade de absorção e, assim, evitar a perda rápida e prematura de umidade da argamassa do revestimento.

Nascimento et al. (2005) estudaram a incorporação de aditivos adesivos à argamassa de chapisco, para aplicação na preparação de bases de concreto, tendo apresentado bons resultados. O trabalho indica que a adição de adesivos à base de PVAc (poli-acetato de vinila) nas argamassas de chapisco, proporciona valores mais elevados de resistência de aderência à tração e uma alteração das formas de ruptura. Em sentido contrário, o trabalho de Scartezini et al. (2002), embora reitere que o uso de camada de preparo em argamassa de chapisco favorece o desenvolvimento de resistência de aderência, ressalva que a modificação (do chapisco) com polímeros não resulta necessariamente em melhoria de qualidade. Resinas à base de estireno-butadieno, citados pelos autores, produziram substratos menos permeáveis, prejudicando a aderência.

2.2.3.3 Aspectos reológicos das argamassas

O termo **reologia** é utilizado para definir a ciência que estuda a deformação e o escoamento da matéria. Pode ser entendida também como o ramo da física que estuda fenômenos associados à viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria, ou seja, um estudo das mudanças na forma e no fluxo de um material.

Avaliar o comportamento de argamassas no estado fresco com o intuito de prever características no estado endurecido, através de parâmetros reológicos das argamassas tem sido objeto de estudos recentes (ANTUNES et al., 2005; BANFILL, 2005; CARDOSO, et al., 2005). Para Bauer, E. (2005), em geral pode-se assumir que as composições de uma argamassa são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento e/ou cal). Neste contexto, poder-se-ia, segundo o autor, aplicar teorias clássicas de escoamento de fluidos.

A argamassa, seja qual for a utilização que se dê a ela (revestimento ou assentamento) é um material aplicado no estado fresco, mas que deve ter suas funções (estética, resistência mecânica, estanqueidade, aderência, dentre outros) perfeitamente consolidados no estado endurecido. Contudo, conforme reitera Pandolfo (2006), este desempenho durante a vida útil está diretamente relacionado a muitas das características que a argamassa apresentar no curto período correspondente ao estado fresco. É justamente a partir desses pressupostos que a reologia dos materiais passa a adquirir maior importância.

Quando se fala sobre reologia de argamassas, a viscosidade é um importante, senão o principal, parâmetro a ser considerado. Bauer, E. (2005) conceitua que a viscosidade expressa a resistência do fluido ao escoamento (em situação de fluxo), podendo ser considerada “como o atrito interno, que resulta quando uma película do fluido é forçada a mover-se em relação à outra adjacente”. A viscosidade é um indicativo da capacidade de escoamento contínuo de um material, sob a ação de tensões externas de cisalhamento. As características de viscosidade da argamassa afetam os demais parâmetros reológicos da mesma, e podem ter influência sobre a extensão de aderência entre a argamassa e o substrato.

Pandolfelli et al. (2000) citam que para os chamados fluidos newtonianos, existe uma relação direta de proporcionalidade entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, sendo chamada de “viscosidade do fluido” (η). Esse tipo de fluido é conhecido como “corpo viscoso ideal”. A equação 4 (PANDOLFELLI, 2000) ilustra esta relação.

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} = \eta \gamma^* \quad (\text{Pa.s})$$

(Equação 4)

Onde:

γ = taxa de cisalhamento;

T = tensão de cisalhamento;

η = viscosidade do fluido.

F/A = razão entre força (F) e área (A)

dv/dx = razão entre as velocidades de duas lâminas de fluido (dv) separadas por uma distância infinitesimal (dx), de acordo com o modelo proposto por Newton.

Cabe salientar, entretanto, que muitos fluidos e sólidos comumente utilizados na construção civil apresentam um comportamento não newtoniano, aqui entendido como a não reprodutibilidade da constante de proporcionalidade “ η ” encontrada por Newton para estes materiais. Para Pandolfo (2006), a incorporação de partículas a um fluido newtoniano interfere na viscosidade, alterando o fluxo homogêneo, como pode ser observado na figura 8.

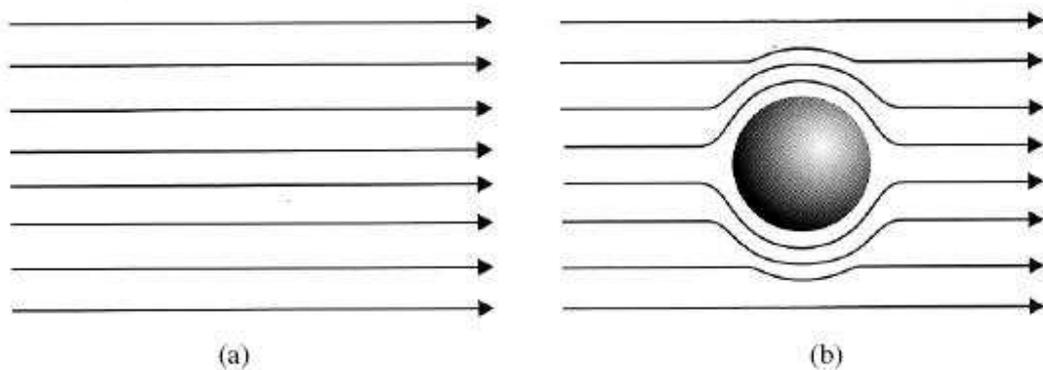


Figura 8: representação da diferença entre as linhas de fluxo de um fluido sem (a) e com (b) a presença de uma partícula (PANDOLFELLI, 2000).

Sousa (2005) classifica os fluidos não-newtonianos em três grandes grupos:

- a) Grupo 1 - Fluidos com comportamento não dependente do tempo: fluidos cuja relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento permanece constante ao longo do tempo;
- b) Grupo 2 - Fluidos com comportamento dependente do tempo: onde a relação entre a tensão e taxa de cisalhamento varia em função do tempo;
- c) Grupo 3 - Fluidos viscoelásticos: sistemas que apresentam características de fluxo viscoso com comportamento elástico.

Entre os fluidos cujo comportamento não depende do tempo, estão associados outros fenômenos como pseudoplasticidade, dilatância e viscoplasticidade, citados por Sousa (2005). Segundo Pandolfo (2006), para facilitar as operações de aplicação e acabamento do revestimento, o ideal é que as argamassas apresentem comportamento pseudoplástico, ou seja, diminuição da viscosidade aparente do fluido com aumento da taxa e/ou tensão de cisalhamento. Oliveira et al. (2000) julgam que as causas fundamentais da pseudoplasticidade estão associadas a aglomerados surgidos a partir de forças de Van der Waals. Estas forças são citadas no trabalho de Paes (2004) e Carasek (1996) como possíveis responsáveis por interações entre partículas da pasta aglomerante que redundam na micro aderência entre argamassa e substrato.

Segundo pondera Sousa (2005), existem maneiras distintas de se abordar a questão da reologia das argamassas. Primeiramente, podem-se desenvolver expressões matemáticas, que descrevam fenômenos reológicos sem fazer maiores referências às suas causas. Esta seria, por exemplo, a abordagem de áreas da Engenharia Civil como a Hidráulica e a Engenharia Estrutural, onde resultados de reologia são combinados com requisitos de mecânica e resistência dos materiais para obter respostas relevantes sobre materiais de interesse. Por outro lado, pode-se estudar a reologia dos materiais correlacionando o comportamento mecânico observado com a estrutura interna detalhada do material em questão. Shaw¹⁵ (1975) *apud* Sousa (2005) ressalta, nesta última abordagem, a consideração de teorias aplicadas ao estudo da química dos sistemas coloidais e suspensões, onde são levadas em conta não só nas características das partículas individualmente, mas também as interações partícula-partícula e partícula-solvente.

Nessa perspectiva, Paes (2004) considera que a diminuição da tensão superficial existente entre a interface dos materiais é um fator preponderante no que conceitua como “molhabilidade”, uma propriedade que estaria relacionada à extensão na qual o líquido se espalha por uma superfície sólida. A atração das moléculas desbalanceadas da camada mais externa, por aquelas que se encontram no interior do material (circundadas por outras moléculas) seria a causa da diminuição da tensão superficial. Com isso, alteram-se as condições de molhagem, aqui entendidas como a capacidade de um líquido fluir pela superfície de um sólido, geralmente devido às suas características de viscosidade.

A partir do conhecimento conceitual de alguns aspectos ligados à reologia, o passo seguinte consiste em saber como avaliar algumas dessas características em materiais de construção. Na contramão do desenvolvimento cada vez mais acelerado de tecnologia de materiais e da influência destes nas características das argamassas no estado fresco, as técnicas de avaliação da trabalhabilidade permanecem inalteradas há muitos anos. Para Cascudo et al. (2005), existe uma dificuldade muito clara em se especificar e avaliar, por exemplo, a trabalhabilidade da argamassa por meio de ensaios. Isso porque mais do que a consideração das propriedades dos materiais em si, a trabalhabilidade considerada “ideal” depende muitas vezes da experiência do pedreiro que executa o revestimento e das características que ele considera desejáveis, além das condições do substrato.

Bauer, E. et al. (2004) também afirmam ser insuficiente o conhecimento puro e simples da consistência inicial para definir se uma argamassa é ou não trabalhável. A avaliação empírica de um pedreiro ou laboratorista com certa experiência no manuseio e aplicação de argamassas permanece ainda uma das formas mais empregadas para definir tais características, utilizada inclusive por centros de pesquisa e também produtores de argamassas industrializadas.

O método mais tradicional para avaliação da trabalhabilidade da argamassa se dá através da chamada mesa de consistência. Embora seja um equipamento prático e disseminado pela quase totalidade dos laboratórios de pesquisa em engenharia civil, recaem sobre ele muitas críticas, principalmente pela não correspondência, muitas vezes, entre os valores nele encontrados e as

¹⁵ SHAW, D. J. Introdução à química dos colóides e de superfícies. São Paulo: Edgard Blücher, 1975. 184p.

trabalhabilidades julgadas adequadas, para diferentes argamassas. Selmo (1989), em seu estudo com argamassas mistas de cimento e cal, identificou redução nos resultados da mesa de consistência em função da plasticidade da argamassa empregada.

Isto posto, muitos pesquisadores têm proposto novas formas de avaliar propriedades reológicas no estado fresco de argamassas. Gomes et. al (1995) foi o primeiro a apresentar, no Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas (SBTA), um novo método para avaliação da trabalhabilidade e consistência, através da utilização de um penetrômetro (chamado *K slump tester*), originalmente concebido para análise de concretos. Dez diferentes argamassas mistas foram preparadas para análise. Os resultados, comentam os autores, demonstram correlação entre os valores encontrados via ensaio de mesa de consistência com os valores obtidos por meio do penetrômetro.

Um método que tem sido bastante enaltecido é o chamado *vane test*, devido a sua simplicidade de execução e seus resultados qualificados (BAUER, E. et al., 2004; AUSTIN, 1999). O *vane test*, coloca Sousa (2005), é um ensaio advindo da mecânica dos solos (tensão de cisalhamento em solos argilosos) e que permite avaliar a tensão de escoamento de argamassas. O princípio que rege o ensaio, de maneira resumida, é cravar uma palheta em cruz na amostra e aplicar um carregamento com uma taxa pré-determinada. Durante o ensaio registra-se a carga e a deformação imposta à amostra, bem como a tensão última de ruptura.

No tocante à questão específica da consistência, Bauer, E. et al. (2005) propõem o uso do método de penetração estática do cone como uma alternativa relevante. Ponderam os autores que:

“Quanto ao ensaio de penetração de cone, este é outro método simples, porém eficiente para se avaliar a consistência de argamassas de revestimento. Este método adota um procedimento de ensaio que, em parte, se assemelha a alguns tipos tradicionalmente utilizados na avaliação de materiais de construção civil como, por exemplo, o aparelho de Vicat utilizado para avaliar a consistência de pastas de cimento, o penetrômetro utilizado na mecânica dos solos para avaliar a consistência de solos e asfalto, dentre outros. As vantagens deste método resulta de uma melhor reprodutibilidade dos resultados e, principalmente, uma menor variação devido aos operadores e equipamentos (BAUER, E. et al., 2005).”

O método consiste na utilização de um aparelho de Vicat modificado e um cone com massa e dimensões padronizadas e descritas na ASTM C 780-01. Após o preparo da amostra em recipientes cilíndricos, a mesma é posicionada na parte inferior do cone, sendo este liberado em queda livre. O ensaio fornece uma avaliação indireta da consistência a partir da profundidade de penetração do cone, expresso em milímetros (BAUER et al., 2005).

Bauer, E. et al. (2005) concluem sua pesquisa afirmando que o método de penetração do cone possui melhor correlação de resultados com equipamentos como o *vane test* do que com a mesa de consistência. Citam, ainda, que o método pode auxiliar na interpretação dos resultados de espalhamento pela mesa de consistência, principalmente em argamassas com uso de aditivo incorporador de ar.

Sousa (2005) cita o ensaio de cisalhamento direto, para ele “o mais antigo ensaio de determinação de cisalhamento”. Nele, o material a ser ensaiado é colocado parcialmente em uma caixa de cisalhamento, ficando com sua metade superior dentro de um anel. A seguir, aplica-se uma força vertical para em seqüência um deslocamento horizontal ser provocado, na parte inferior do anel, a uma taxa de cisalhamento constante. Registra-se a força suportada pela amostra (definida como força tangencial). Sousa (2005) ainda ressalta que em outra configuração, uma força tangencial pode ser aplicada, sendo registrado o deslocamento horizontal.

Silva, R. et al. (2005) realizaram testes comparativos em argamassas utilizando, além da mesa de consistência, técnicas como o *squeeze flow* e o *dropping ball*. O método do *squeeze flow* (agora normalizado pela NBR 15839:2010) consiste em medir o esforço necessário para comprimir o material entre duas placas paralelas gerando deformações por cisalhamento e alongação no mesmo, sendo amplamente utilizado por diversos setores de pesquisa (alimentos, cosméticos, cerâmicas). Afirmam os autores ser o *squeeze flow* o que melhor permite avaliar propriedades reológicas como viscosidade e tensão de escoamento. O *squeeze flow* também é apontado por Cardoso et al. (2005) como a técnica mais versátil para avaliação da reologia de argamassas no estado fresco. Os mesmos autores distinguem um perfil típico de carga versus deslocamento, com três diferentes

estágios: deformação elástica, deformação plástica (fluxo viscoso) e enrijecimento por deformação (FIGURA 9).

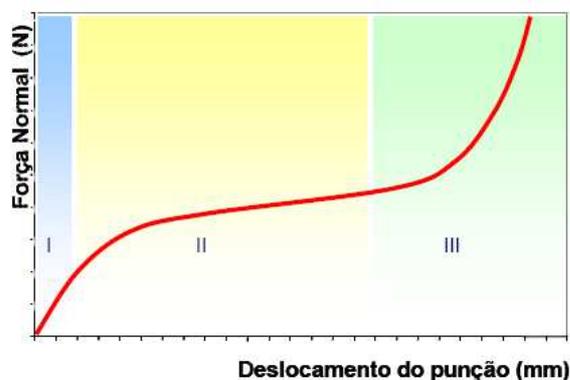


Figura 9: perfil típico de carga versus deslocamento do ensaio de Squeeze flow (CARDOSO et al., 2005)

Por sua vez, o *dropping ball* é baseado na queda livre de uma esfera (onde o tamanho e peso da esfera e a altura da queda são padronizados) sobre uma argamassa moldada em um cilindro metálico (SILVA, R. et al, 2005) . Os resultados são expressos na forma de índice de penetração. Tanto a técnica do *squeeze flow* como o *dropping ball* têm sido apresentados em trabalhos recentes do Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, mas , segundo este autor, ainda sem que se possam traçar interpretações definitivas sobre seus resultados, como base comparativa com outros métodos de ensaio.

2.2.4 Influência das Condições de Cura dos Revestimentos

A cura de uma pasta, argamassa ou concreto consiste nos procedimentos adotados para promover a hidratação dos compostos de cimento Portland dessas misturas (PEREIRA, 2000).

Segundo Detriché et al. (1983), revestimentos externos estão particularmente sujeitos a severas condições de exposição durante o processo de cura. Estas estariam relacionadas com a razão entre a extensão da superfície de aderência e o volume de material aplicado, onde os revestimentos estão expostos a diferentes condições atmosféricas – incluindo variações de temperatura, ventilação e higrometria. Além disso, os autores ressaltam também a ação da quantidade de poros do substrato

capazes de extrair por absorção capilar uma fração da água de mistura. O'Farrell et al. (2001), não obstante, relatam que a estrutura de poros da argamassa é desenvolvida durante os processos de hidratação dos materiais cimentícios presentes, sendo influenciada pela interação entre os agregados e a pasta hidratada. Segundo os autores, a fase porosa é um importante componente presente na microestrutura da pasta de cimento hidratada, razão pela qual influencia decisivamente aspectos de resistência mecânica, porosidade, durabilidade, difusão, dentre outros. Détriche et al. (1983) atribuem à falta de hidratação dos aglomerantes das argamassas, em situações específicas, o fato de que muitos revestimentos de fachada não cumprirem com algumas de suas principais funções. Tais situações específicas levam em consideração, dentre outros, fatores relacionados à cura das argamassas.

A influência do correto processo de enrijecimento de materiais à base de cimento Portland como argamassas e concretos é ainda mais importante se os mesmos possuírem adições minerais tais como escórias de alto-forno, cinza volante ou sílica ativa, ou ainda se estiverem expostos a ambientes quentes e secos imediatamente após sua produção. Tais considerações, de acordo com Ramezani pour e Malhotra (1995) são fundamentais se características potenciais de resistência mecânica e durabilidade quiserem ser alcançadas.

Para Ezziane et al. (2007), concretos expostos a processos de cura em ambientes com temperaturas mais elevadas apresentam uma hidratação mais acelerada e uma distribuição não-uniforme dos produtos de hidratação. Isso tem consequência direta tanto na porosidade como na evolução da resistência mecânica do material. Tais conceitos podem ser também aplicados às argamassas de revestimento. A falta de cura do revestimento em regiões de maior insolação (e, portanto, maior gradiente térmico) reflete diretamente na velocidade nas quais as reações de hidratação irão ocorrer, bem como a taxa na qual a água contendo pasta de cimento será succionada para o interior dos poros do substrato.

Metha e Monteiro (1994) ressaltam a importância da cura de produtos a base de cimento, no sentido de garantir adequadas condições de controle de temperatura e umidade. O cuidado com estes fatores seria muito importante para possibilitar a correta de hidratação do cimento. Iserhard (2000) corrobora com este argumento ao afirmar que a quantidade de água da pasta é regulada pela umidade atuante

durante o processo de enrijecimento. A falta de água disponível não só inibe as reações de hidratação como pode ocasionar um processo de retração das argamassas já no estado fresco.

Iserhard (2000) lembra que a umidade é indiretamente influenciada pela temperatura, através da ocasional aceleração da evaporação de água. Moura (2007) afirma que quanto maior a temperatura, maior a evaporação, o que remete ao efeito da falta de umidade no processo de cura, ocasionando, da mesma forma, a inibição da reação de hidratação e a retração no estado fresco. Mehta e Monteiro (1994) afirmam, reiterando este ponto de vista, que como em todas as reações químicas, a temperatura tem um efeito acelerador sobre as reações de hidratação.

Rattanadecho et al. (2007) usam o exemplo de indústrias de pré-moldados como situações onde a cura térmica (à vapor) acelerada é algo desejável. Para argamassas de assentamento e revestimento, entretanto, a lógica se inverte, pois o processo de endurecimento em temperaturas mais elevadas pode afetar a extensão de aderência devido a não-uniformidade dos produtos de hidratação formados o longo da interface com a parede/bloco/tijolo. Esse argumento está presente também no trabalho de Tan e Gjørv (1996) que ponderam ser bem conhecido que propriedades como permeabilidade e resistência mecânica sofrem reflexo de um baixo grau de hidratação do cimento por conta de elevações da temperatura de cura.

Estudos realizados pela Cement & Concrete Association of Australia (2001) avaliaram a cura de argamassas para alvenaria em ambientes externos e fechados (laboratório). Diversos tipos de tijolos, cimentos e argamassas foram utilizados, e como resultado a publicação pondera existirem variações na resistência de aderência, em função da cura. Na maior parte dos casos (embora não em todas as combinações estudadas), as condições de aderência das amostras curadas em áreas externas foram menores do que as curadas em ambientes fechados, ainda que essas tendências variassem bastante em função do tipo de argamassa e tijolo utilizados.

Utilizando-se de técnicas de ressonância magnética nuclear (RMN), Ortiz (2005) apresenta resultados de estudos de cura de pastas e argamassas de cimento

Portland simulando condições de inverno e verão. O autor destaca que embora a quantidade de C-S-H¹⁶ formado ao final de 28 dias de cura tenha sido similar para ambas as condições, a evolução do mesmo até esta idade variou muito em função das condições climáticas simuladas. Nas primeiras 48 horas de cura, a quantidade de C-S-H formada nos ciclos de inverno foi substancialmente menor do que nas pastas submetidas a condições de verão. Por outro lado, nas condições de verão, a quantidade de C-S-H manteve-se praticamente inalterada entre 48 horas e 7 dias, o que segundo o autor indica uma inibição das reações de hidratação. Nas pastas em condições de inverno, ocorreu crescimento do C-S-H formado entre 48 horas e 7 dias. A partir do sétimo dia, a taxa de formação de C-S-H foi uniforme par ambas as situações.

Temperaturas muito baixas podem, também, representar problemas à hidratação de compostos a base de cimento Portland, muito embora na realidade brasileira essa situação seja mais difícil de ocorrer. Estudando concretos, Husem e Gozutok (2005) identificaram decréscimo nos resultados de resistência mecânica a compressão em peças curadas a baixas temperaturas (10, 5, 0 e -5°C).

Moura (2007) e Scartezini (2002) também citam o vento como um importante fator a ser considerado, pois tem efeito sobre o fluxo de evaporação. Conseqüentemente, este também influencia no processo de endurecimento das argamassas e, por conseguinte, na qualidade da aderência dos revestimentos. Conforme Soroka e Carmel (1987), a durabilidade de revestimentos de argamassa está associada às condições do ambiente no seu entorno. No caso de ambientes litorâneos, por exemplo, a distância dos elementos de fachada em relação ao mar e a intensidade e direção dos ventos dominantes exerce grande influência sobre a velocidade de deterioração desses elementos.

2.3 TRANSPORTE DE ÁGUA EM REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

Para Barbosa et al. (2009), existem 4 etapas distintas onde mecanismos de interação de uma argamassa sobre uma superfície porosa absorvente atuam: primeiramente, durante a molhagem do substrato pelo contato com a argamassa,

¹⁶ C-S-H é a notação simplificada do $(n)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (m)\text{H}_2\text{O}$, formado durante a hidratação do cimento Portland.

com a posterior ocorrência de sucção capilar; a segunda etapa consiste no transporte de materiais finos para a interface devido ao fluxo capilar; em seguida, o equilíbrio de umidade entre substrato e argamassa, e por fim a hidratação do cimento e formação de uma fase sólida coesiva entre substrato e argamassa.

Seguindo a lógica proposta pelos autores, pode-se deduzir que, das quatro etapas citadas, três delas, ou seja, a maior parte dos fenômenos de interação entre argamassa e substrato que redundarão na resistência de aderência final do conjunto, dependem de propriedades relacionadas ao transporte de água e pasta, ainda no estado fresco. Corroborando com esta hipótese, colocam Antunes (2005) e Honório e Carasek (2009) que o transporte de água contendo aglomerantes da argamassa para o substrato influencia o desenvolvimento de aderência entre esses materiais.

O transporte de água em argamassas e concretos é um fenômeno mais complexo do que outros tipos de meios porosos. Segundo Neithalath (2006), a grande variedade de tipos de poros presentes no material, e a forte interação entre água, vapor d'água e o sistema de poros, bem como a mudança da estrutura de poros durante o processo de cura (dos materiais à base de cimento) são fatores importantes a serem considerados. A estrutura de poros, segundo Carasek (1996), pode apresentar dimensões e formas variadas, as quais podem ser classificadas da seguinte forma:

- a) microporo – diâmetro $< 0,1 \mu\text{m}$;
- b) poro capilar – $0,1 \mu\text{m} < \text{diâmetro} < 20 \mu\text{m}$;
- c) macroporo – diâmetro $> 20 \mu\text{m}$;
- d) cavidades fechadas – poros não acessíveis pelo exterior.

A mesma autora relata, ainda, que apenas os poros com capacidade de succionar água das argamassas (os poros capilares), seriam os que interessam no estudo dos mecanismos de aderência.

Por sua vez, Bauer, E. e Paes (2004) ponderam que a base do revestimento, através de sua capacidade de absorção de água, é a maior responsável pela perda de umidade da argamassa após a aplicação. Logo, consoante com o que foi

comentado em capítulos anteriores, as características superficiais e microestruturais do substrato seriam tão importantes quanto as propriedades adesivas da argamassa aplicada, pois afetam os mecanismos de transporte de água.

Nesse sentido, a baixa capacidade de sucção de um substrato pode favorecer formação de elevada relação água/cimento na interface, gerando elevada porosidade na região. Igualmente, em bases com elevada capacidade de sucção, a retirada em excesso da água da argamassa pode dificultar a hidratação da pasta na região da interface. Em ambos os casos, a consequência pode ser prejuízos à aderência final do revestimento (HONORIO e CARASEK, 2009).

Brocken et al. (2000) lembram que não só a capacidade de sucção da base, mas também a retenção de água da argamassa utilizada devem ser consideradas em conjunto para o entendimento do processo de extração de água, o que torna difícil a predição de desempenho do sistema substrato/argamassa em função dos muitos parâmetros envolvidos. Pavia e Hanley (2009), ao citarem o trabalho de Groot (1993)¹⁷ complementam que, se a dinâmica de transferência de umidade entre argamassa e substrato é fundamental após o contato entre as superfícies para desenvolver a aderência entre ambos, então a retenção de água da argamassa, de fato, exerce tanta influência nesta transferência de fluidos quanto na habilidade da argamassa resistir a perda de água para o substrato.

A questão que se coloca, então, é de que forma ocorre a transferência de água em um meio poroso, mas especificamente em materiais de construção.

Hall (1977), estudando os fenômenos associados ao transporte de umidade em meios porosos, coloca que o mesmo ocorre através de dois mecanismos principais. Primeiramente, se o teor de umidade é muito baixo, e não existe continuidade de líquidos no interior do sólido, a transferência de vapor d'água ocorre devido a gradientes de pressão de vapor existentes nos poros. Neste regime, gradientes de temperatura também podem levar a movimentação de água. Em outra situação, ocorrendo continuidade de líquido no interior do material sólido, a movimentação passa a ser, predominantemente, decorrente da ação de forças capilares agindo sobre a água no estado líquido (PAES, 2004).

¹⁷ Groot, C. Effects of water on mortar brick bond. University of Delft, The Netherlands (1993)

Quénard e Sallée (1991) refinam este conceito inicial apresentado por Hall (1977), apresentando quatro possíveis modelos de fluxo em um poro cilíndrico, que podem ser visualizados na figura 10.

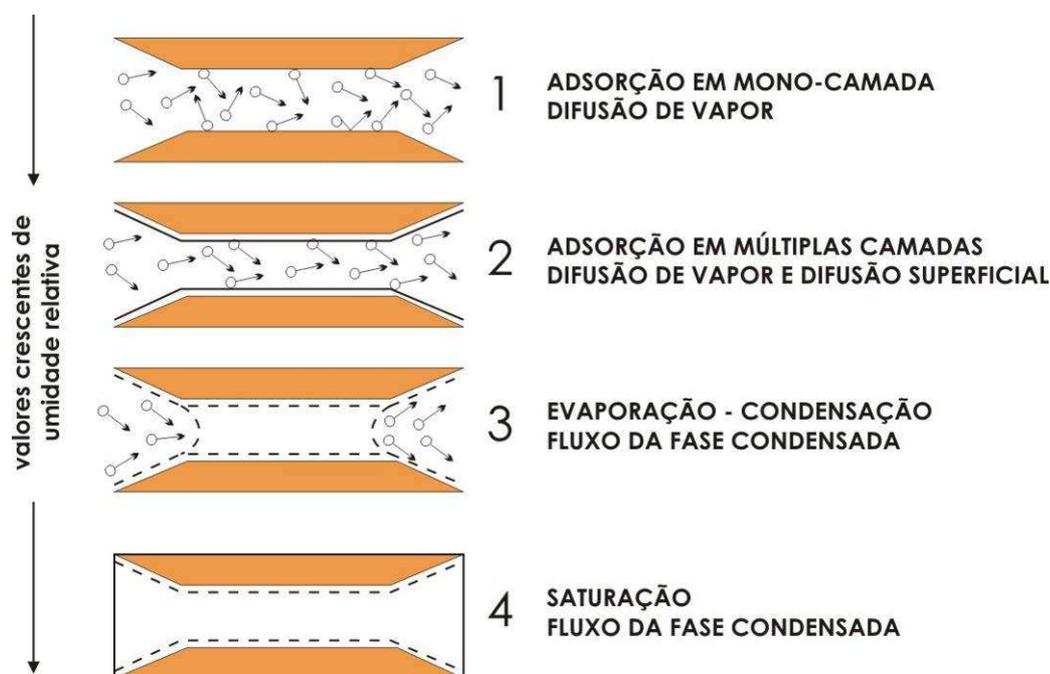


Figura 10: os quatro tipos de fluxo possível num poro cilíndrico à medida que a umidade relativa aumenta (Adaptado de Quénard e Sallée, 1991).

A situação de difusão de vapor, segundo os autores, pode acontecer em mono-camada ou em múltiplas camadas; o fluxo de fase condensada, por sua vez, pode ocorrer junto com parte do vapor d'água, ou em condição plenamente saturada, dependendo do aumento da umidade relativa.

Drabowski (2001) destaca o mecanismo de **adsorção** física como fundamental para a absorção capilar. Atkins (1999) define adsorção como o fenômeno que ocorre quando uma partícula de um material se deposita na superfície de outro sem que ocorra interação química. A substância que é adsorvida é o **adsorvato**, ao passo que o material que adsorve é o **adsorvente**. As forças de Van der Waals, ainda segundo Drabowski (2001), seriam as grandes responsáveis pela fixação da água da argamassa transportada (por adsorção) para o interior dos poros do substrato.

Gummerson et al. (1980) apresentaram um dos primeiros trabalhos descrevendo o comportamento de sucção de água de tijolos e outros materiais através do conceito de **sortividade** (do inglês, *sorptivity*), que é tratado por Carasek (1996) como “coeficiente de absorção de água”, ou como define Paes (2004) em seu trabalho, simplesmente “absortividade” relacionada ao transporte em materiais porosos. Tal conceito advém da simplificação de da Lei de Darcy, expresso pela equação 5.

$$u = -K \cdot \Phi \text{ (equação 5)}$$

O fluxo do líquido (u) é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico total (Φ) – K é a constante de proporcionalidade.

Philip¹⁸ (1957) foi o primeiro a utilizar a expressão “sortividade”, terminologia que posteriormente foi adaptada por Hall (1977) para descrever fenômenos de transporte de água em materiais de construção.

Neithalath (2006) propõe a análise do transporte de umidade em argamassas e concretos através de uma abordagem conjunta entre os fenômenos de sortividade e difusão. Além dele, outros autores (HALL, 1989; MARTYS e FERRARI, 1997) utilizam a equação de sortividade (equação 6) para explicar o transporte de umidade através de concretos e argamassas, baseados no modelo de tubos paralelos de meios porosos.

$$\frac{M}{A} = St^{\frac{1}{2}} + \bar{S} \text{ (equação 6)}$$

Onde M é a massa de água absorvida através da superfície de área A , S é o coeficiente de sortividade (ou simplesmente, sortividade), t é o tempo e \bar{S} é o termo de correção.

Como se pode notar, as transferências de umidade são características de muitos materiais, e também notoriamente próprias de produtos à base de cimento Portland, onde a água está presente desde sua produção, hidratação, secagem e posterior vida útil (SANTOS et al., 2006). Para Paes (2004) a interação direta entre os

¹⁸ Philip, J.R. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. 1957. Soil Sci., 84, p. 257-264.

poros de argamassa e os poros do substrato são fatores que contribuem substancialmente para o transporte de água.

Inicialmente se pode considerar que a argamassa, imediatamente após o seu preparo, é constituída por um sistema de poros saturados. No momento que a mesma é aplicada sobre um substrato poroso, passa a ocorrer uma interação entre a interface de contato dos materiais. A água tende a migrar para alguns dos poros capilares do substrato, carregando consigo também partículas de cimento. Essa movimentação de água tem duas conseqüências importantes. Primeiramente na adesão e densificação da região de interface, o que auxilia na aderência da argamassa ao substrato. Além disso, conforme Paes (2004), esta sucção de água dos poros acarreta perda da plasticidade inicial da argamassa, o que é uma propriedade necessária para as operações de acabamento do revestimento (corte, sarrafeamento e desempenho) – o que coloquialmente os operários que executam essas tarefas costumam chamar de “esperar a argamassa puxar”.

A sucção da base porosa ocorre devido ao menor potencial de pressão hidrostática em relação à argamassa, cujos poros são bem maiores que os do substrato. O volume, diâmetro e a conectividade dos poros influenciam a pressão capilar ao longo do sistema (ANTUNES, 2005; GALLEGOS, 1995; DETRICHE E MASO, 1986). Nos instantes iniciais, a argamassa constitui-se em um sistema de poros saturados e o substrato em um sistema de poros não saturados. Nos momentos seguintes à aplicação, essa condição vai paulatinamente se invertendo e o substrato adquire a conformação (junto à interface) de uma rede de poros saturados. À medida que os produtos de hidratação vão se formando, a água vai sendo consumida no processo e ambos – argamassa e substrato – passam à condição de um meio poroso não saturado.

Contudo, não somente o potencial de absorção do substrato no qual está assentado o revestimento, mas também a própria espessura do revestimento em si, influencia no processo de transporte de água. Dentro desta ótica, Paes (2004, p.146) coloca que:

“O transporte de água da argamassa fresca para o substrato poroso é influenciado por diversos fatores, dentre eles, a espessura do revestimento. Logo que a argamassa fresca é colocada em contato com o substrato poroso, essa dispõe de uma grande quantidade de

água relativamente livre a ser transportada para o interior do substrato. Este transporte de água será mais ou menos intenso, de acordo com o potencial de sucção do substrato (diretamente relacionado com a sua natureza) e com a espessura do revestimento”.

As propriedades intrínsecas da pasta de cimento que irá ser transportada para o interior dos poros do substrato são determinadas pela sua natureza química e sua microestrutura, e estes fatores irão afetar, por conseguinte, também a microestrutura da interface e os mecanismos que regem a aderência da argamassa de revestimento. Para Ramachandram et al. (2002), a “microestrutura” deve ser entendida como a natureza do corpo sólido em si e da parte não-sólida – a estrutura porosa. No caso da pasta de cimento, os autores afirmam ser a microestrutura dependente de muitos fatores, tais como as características físico-químicas do cimento, o tipo e quantidade de adições minerais existentes, a temperatura e o período de hidratação e a relação água/cimento inicial.

De maneira geral, o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, ou simplesmente etringita ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) é, para Carasek (1996) e Carvalho Jr. (2005) o principal produto de hidratação do cimento formado no interior dos poros dos substratos absorventes. O aumento de etringita nessas regiões ocorreria por serem estes os primeiros produtos de hidratação a serem formados, resultado da dissolução da gipsita adicionada ao clínquer de cimento Portland, liberando íons sulfato e cálcio que reagem com os aluminatos e o cálcio provenientes da dissolução do C_3A ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$). Esses seriam os primeiros produtos a serem succionados junto com a água para o interior dos poros, e responsáveis pela microancoragem da argamassa à base absorvente.

Outro aspecto relevante relacionado ao transporte de água de água em substratos porosos é a consideração da taxa inicial de absorção do substrato, já citada anteriormente neste trabalho. A IRA (*initial rate absorption*, do inglês) é determinado pelo método proposto pela ASTM C-67. De maneira muito simplificada, o ensaio consiste em imergir a face de um componente, previamente seco em estufa, em uma lâmina de água de aproximadamente três milímetros durante um minuto. O resultado é expresso em $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$, padronizado para uma massa absorvida em uma área de 30 polegadas quadradas (194 cm^2). Tanto Paes (2004) como Carasek (1996) descrevem que o IRA se assemelha a outros dois índices bastante conhecidos, o IRS (*initial rate of suction*) e o Índice de Haller, cujos métodos de

ensaio se diferenciam por não secar previamente o componente de ensaio (bloco, tijolo) em estufa, usar uma lâmina de água de 1cm e, no caso do Índice de Haller, levar em consideração também a área lateral imersa.

Carasek (1996) cita que a chamada taxa inicial de absorção de água (IRA) foi empregada ao longo dos anos por muitos pesquisadores como definidor da capacidade de aderência de substratos. Gallegos (1995), entretanto, considera que o IRA não representa de maneira fidedigna o comportamento absorvente dos blocos, pois se relaciona muito mais com o conteúdo de poros capilares do substrato e não com a distribuição dos diâmetros dos mesmos. Por este motivo, o mesmo autor, assim como Scartezini (2002) e Paes (2004), afirmam que a capacidade de aderência de um revestimento, via de regra, não possui relação direta com o IRA do material da base porosa. Para Lange et al. (1999), a limitação do uso do IRA como um indicativo de previsão da eficiência da aderência se deve ao fato de que ele não leva em conta a interação entre a argamassa e o substrato, e sim apenas a interação entre o substrato e a água livre disponível. A sucção de água livre pela superfície de um tijolo ou bloco é diferente da sucção de pasta da argamassa por estes mesmos substratos. Sob esta perspectiva, qualquer análise de transporte de umidade da argamassa em meios porosos tendo como base unicamente o valor de IRA dos materiais envolvidos carece de verossimilhança com o seu comportamento real.

Detriché et al. (1983) propuseram um estudo partindo do pressuposto que diferentes transportes da água deveriam ser observados na região de interface de revestimentos de argamassa aplicados em alvenarias, em função das condições de aplicação e cura, do tipo de substrato e das características da argamassa. Como resultado desse estudo, os autores colocam que substratos porosos que absorvem uma fração da água da mistura diminuem a parcela de contribuição da evaporação por dessecação, todavia contribuem para a aceleração da perda de água total. A influência de parâmetros externos – tais como temperatura, vento e fatores higrométricos - seria menor quanto maior fosse a sucção do substrato.

Assim sendo, todo o transporte de água e pasta será condicionado por uma complexa dinâmica que envolve fatores relacionados ao substrato (quantidade, forma e diâmetro de poros capilares), à argamassa utilizada (seus

materiais constituintes, seus aspectos reológicos) e às condições ambientais. Identificar a influência de cada um destes parâmetros, portanto, tem sido a seara de muitos pesquisadores, algo que ainda parece abranger um longo espectro de trabalho científico e aplicado.

2.3.1 Técnicas de avaliação de transporte de umidade em materiais porosos

A bibliografia, tanto nacional como internacional, ilustra uma série de técnicas para avaliação do transporte de fluidos em materiais porosos.

Araújo, J. (2002) desenvolveu em sua dissertação de mestrado dezessete protótipos de sensores de umidade, visando estudos de avaliação em materiais de construção. Segundo o autor, o resultado foi considerado satisfatório, muito embora tenham sido observados alguns pontos de aperfeiçoamento necessários. Estes seriam relacionados principalmente a:

- a) dificuldade na calibração dos instrumentos, no sentido de “dotar cada modelo de uma escala de funcionamento que possibilitasse seu uso em qualquer situação”. A principal dificuldade no estabelecimento dessas condições estaria relacionada com a heterogeneidade de cada ambiente de inserção dos sensores, e as características físico-químicas de cada meio, tais como porosidade, rede capilar, pressões internas e composição química;
- b) alterações nas leituras de capacitância, entre a escala do instrumento aferida em laboratório, e os valores encontrados quando os protótipos foram embutidos em estruturas como paredes de alvenaria e maciços de argamassa. Segundo Araújo (2002) supõe-se que esse efeito seja causado pela contribuição capacitiva derivada da polarização do ambiente no entorno do sensor.

Paes (2004), em outra pesquisa, monitorou o transporte de água nos momentos pós-aplicação de três diferentes argamassas (A, B e C), com duas diferentes espessuras (30 e 50 mm), variando também a natureza e geometria do substrato (cerâmico ou

de concreto). Tal monitoramento foi executado utilizando sensores de umidade, com sucesso. Primeiramente, foram produzidas as argamassas e posicionados os sensores (saturados) sobre o substrato, em diferentes disposições. Com o auxílio de uma caixa de queda, as argamassas foram lançadas a uma altura controlada de 50 cm, e após breve sarrafeamento, mantidas em ambiente controlado (22°C e umidade relativa próxima de 100%). Estes ensaios levaram à apresentação de perfis de umidade, onde a migração de água ao longo da espessura do revestimento, devido à sucção da base, foi mensurada. Como resultados, a autora salienta que tanto os tipos de argamassas como a natureza dos substratos exerceram influência no transporte de água. A interação direta entre os diferentes poros da argamassa e os poros do substrato se mostrou determinante no transporte de água, razão pela qual a mudança das faixas granulométricas das areias utilizadas **“...foi um fator decisivo. As argamassas executadas com areias de granulometria mais grossa foram as que transportaram maior quantidade de água”** (PAES, 2004, p.133). Tal argumento é validado também Carasek (1996) e Scartezini (2002), que consideram que revestimentos produzidos com areias mais finas dificultam a capacidade de sucção da água presente na argamassa, prejudicando a formação de produtos de hidratação que não são conduzidos ao interior dos poros do substrato.

Ainda comentando sobre os resultados apresentados por Paes (2004), a mesma afirma que a espessura da argamassa aplicada também é significativa na alteração do comportamento de migração da umidade do revestimento. Na região de interface, por exemplo, o revestimento com 50 mm de espessura perdeu menos água para o substrato do que o revestimento de 30 mm. Os efeitos de interconectividade, tortuosidade, tensão superficial, forças capilares e adsorção da rede de poros (da argamassa) são apontados como as principais justificativas desse fenômeno.

Honório e Carasek (2009) realizaram estudos de absorção de água de blocos cerâmicos e de concreto com argamassas sobre eles assentadas. Em laboratório, foi adotado um método não normalizado de retirada de amostras (FIGURA 11), com o objetivo de medir o percentual de água perdido pela argamassa fresca.

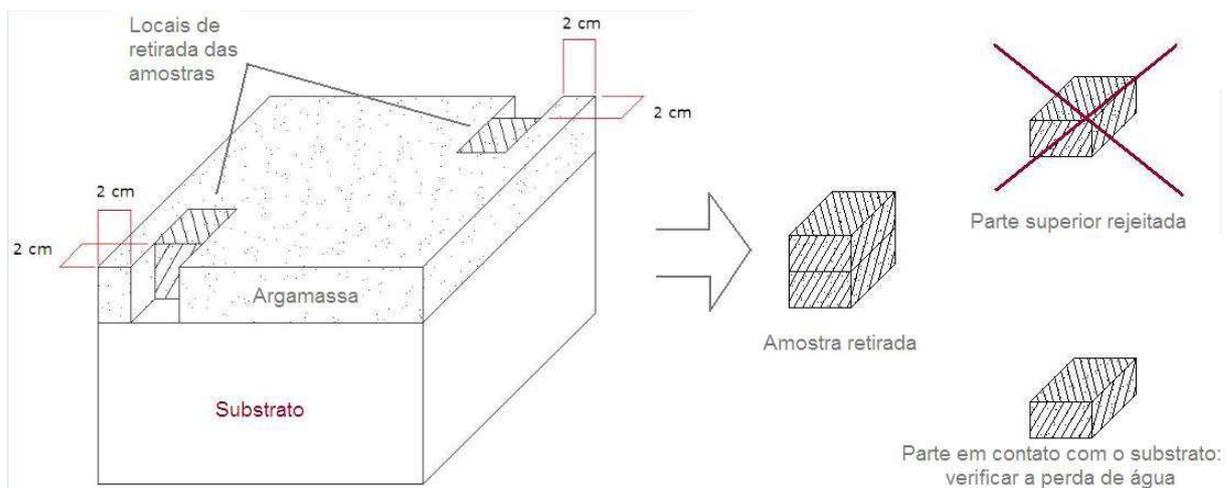


Figura 11: proposta de ensaio de avaliação da absorção de água da argamassa pelo substrato (HONORIO e CARASEK, 2009).

Adicionalmente, foram realizados dois ensaios que, segundo os autores, podem ser executados em obra para avaliar a absorção de água dos blocos. O primeiro, chamado “método da moeda”, consiste em distribuir 20 gotas de água durante aproximadamente 10 segundos em uma área circular de aproximadamente 25 mm de diâmetro, medindo o tempo em que esta água leva para ser absorvida. O segundo método de campo, chamado de “método volumétrico para o índice de absorção de água inicial”, é similar ao originalmente descrito na ASTM C 67 para determinação da taxa de absorção inicial de tijolos e blocos (HONORIO E CARASEK, 2009). Como resultados, os autores afirmam, dentre outras considerações, que o método de avaliação de absorção de água da argamassa proposto apresentou baixas correlações lineares com parâmetros de absorção de água dos blocos nos momentos iniciais, mas correlações melhores com relação a ensaios que levaram em conta absorção em tempos posteriores, tais como absorção total de água e porosidade aparente.

O uso de técnicas de ressonância magnética nuclear (RMN) também tem sido colocado por muitos autores (quase na sua totalidade estrangeiros) como uma interessante solução para análise de fenômenos de transporte de fluidos, nas mais diferentes áreas do conhecimento. Grande parte destes trabalhos é de pesquisadores advindos da *Eindhoven University of Technology*, que desenvolvem trabalhos com o auxílio de técnicas de RMN (PETKOVIC et al., 2004; PEL et al., 2003;

BROCKEN et al., 1998; PEL, 1995). Petkovic et al. (2004) apresentam a RMN como uma técnica que pode ser usada para medir efetivamente a difusão de água, hidrocarbonetos e íons em materiais porosos. Contudo, além do elevado custo, a técnica demanda alguns cuidados especiais, conforme consideram Pel et al. (2003). Estes citam ser muito difícil a obtenção de imagens de materiais de construção via RMN caso eles contenham impurezas como ferro e manganês, que prejudicam a leitura dos gradientes magnéticos. Os mesmos autores, porém, reiteram que ensaios onde os tempos de relaxação e os gradientes magnéticos são compatíveis, resultam em perfis fidedignos do transporte de fluidos em meios porosos. Nesse sentido, artigos internacionais reportam resultados para fluxo de fluidos em rochas (Padhy et al., 2007), difusão em poros de tijolos cerâmicos e corpos vítreos (PETKOVIC et al., 2004), distribuição de poros em pastas de cimento (PLASSAIS et al., 2003; MILLA et al., 1998), transporte de sais em materiais de construção (PEL et al., 2003), transporte de umidade entre argamassas e tijolos cerâmicos ou sílico-calcários (BROCKEN et al., 1998).

No caso de materiais a base de cimento Portland (como argamassas), as mudanças na estrutura de poros resultantes da hidratação do cimento são acompanhadas por mudanças nas dinâmicas das fases líquidas contidas no sistema de poros da matriz. Métodos de RMN como relaxometria e difusimetria permitiriam observações não-destrutivas dessas mudanças (NESTLE et al., 2007).

A figura 12 ilustra um exemplo de análise de transporte de água entre argamassa e tijolos, obtidos via ressonância magnética nuclear.

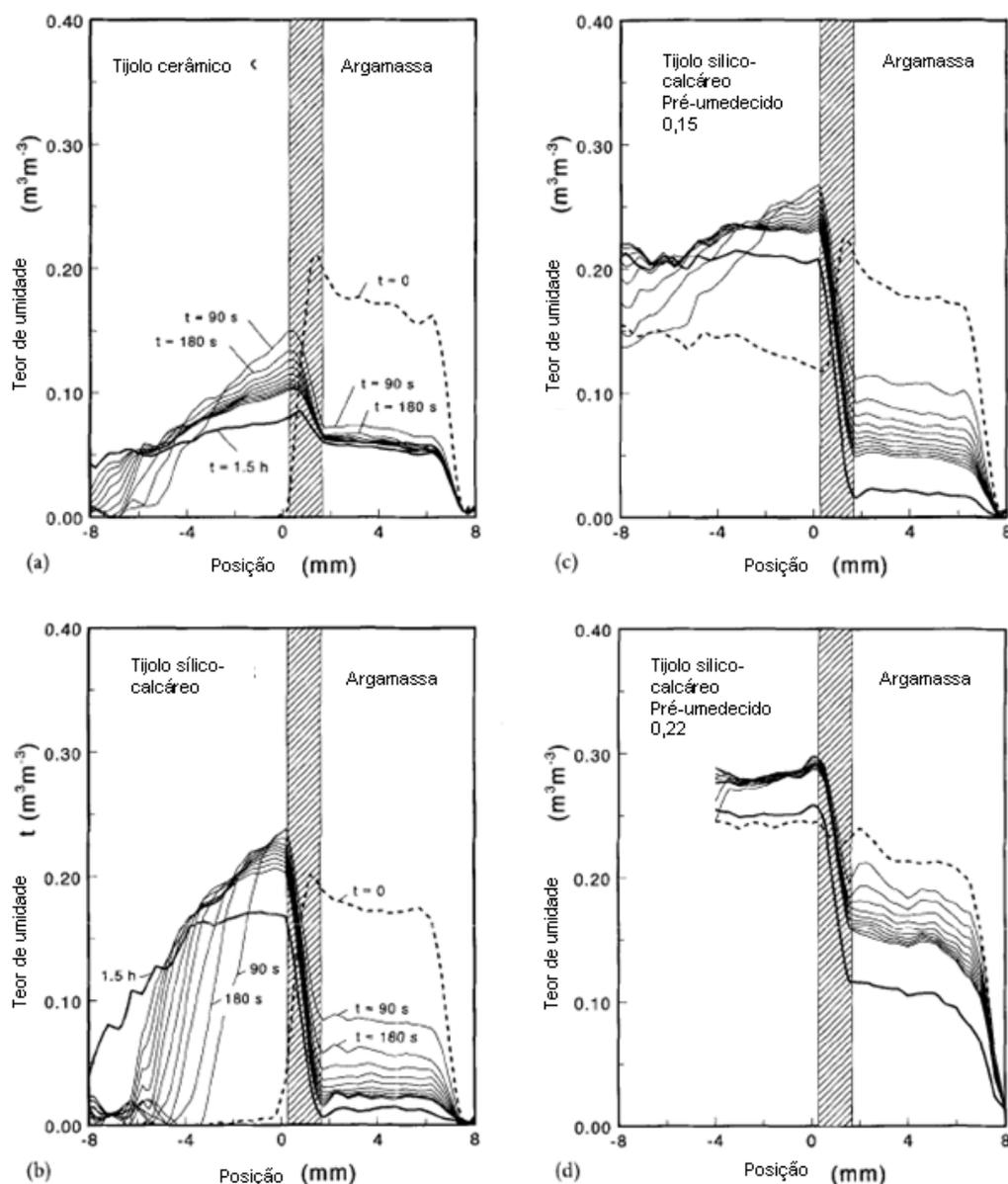


Figura 12: perfis de umidade (obtidos através de ressonância magnética nuclear) durante o transporte inicial de água entre a argamassa e tijolos: a) cerâmico; b) sílico-calcáreo; c) e d) sílico-calcáreo com diferentes pré-umidificações. (BROCKEN et al., 1998)

Vendo a figura 12, a técnica de RMN parece ser uma das mais interessantes para a análise do transporte de água entre argamassa e substrato. A aquisição de um equipamento desse porte, todavia, é extremamente impeditiva, em muitos casos de pesquisa. A maior parte dos centros de pesquisa nacionais consultados por este autor, durante o planejamento do trabalho, dispõe (excetuando-se os equipamentos utilizados pela área médica) de equipamentos de RMN específicos para análises microbiológicas, que em geral só avaliam amostras líquidas. Consultas

realizadas junto aos laboratórios do LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncroton) dão conta de que, no futuro, um equipamento para análise de sólidos possa ser implementado naquele local, o que pode abrir um novo campo de pesquisa, também em nível nacional, para pesquisas de RMN aplicadas à construção civil.

Outras técnicas são apresentadas na literatura para identificar propriedades relacionadas a porosidade e transporte de fluidos em meios porosos de materiais de construção. Wong et al. (2006) criaram estimativas analíticas de propriedades de transporte em argamassas, a partir de análise de imagens de microscopia de elétrons retro-espalhados (BSE). Tais pesquisadores ressaltam, obviamente, certas limitações, como no texto que segue:

“Propriedades que são relevantes no transporte molecular são o volume de poros interconectados, a área superficial da interface sólido/vazio, forma do poro. (...) Contudo, uma imagem obtida via microscopia de elétrons retro-espalhados é uma representação 2D de uma estrutura 3D. Enquanto a porosidade e a área superficial são facilmente obtidas a partir de uma seção 2D, a forma, conectividade e tortuosidade são impossíveis de definir a partir de uma imagem em 2D” (WONG et al., 2006).

Tomógrafos de raios-x também surgem como uma técnica alternativa, como no trabalho de Baker et al. (2006) e Appoloni et al. (2002), que analisaram, respectivamente, imagens de tijolos sob ação de umidade e microestrutura de poros de rochas-reservatório de petróleo. Avdelidis et al. (2003), por sua vez, utilizaram termógrafos de infravermelho para aquisição de imagens, visando traçar perfis de deposição de água em pedras de paredes de edificações históricas. Procedimento similar também pode ser encontrado no trabalho de Poblete e Pascual (2007).

Outra técnica possível é a utilização de marcadores fluorescentes. Segundo Hunt (1993), existem várias maneiras nas quais a marcação fluorescente pode ser utilizada para investigar problemas em construções, tais como fissurações em muros de pedra ou penetração de água em paredes. Nesta mesma linha de raciocínio, técnicas de microscopia associadas à marcação fluorescente também se constituem em uma valiosa ferramenta de análise, de modo a determinar materiais constituintes e possíveis reações entre estes.

A técnica mais comum de análise microscópica através de marcação fluorescente é a utilização de seções delgadas, muito utilizadas em análises petrográficas. Seções delgadas são utilizadas por petrógrafos e petrologistas para estudar rochas há mais de 150 anos. Uma das grandes vantagens deste método é que ele constitui uma oportunidade para identificar tanto os minerais constituintes e, ao mesmo tempo, estudar a sua interdependência mútua e a sua morfologia. Por esse motivo, o uso de seções finas acabou naturalmente ganhando espaço para análise de materiais como concretos (ROY et al., 1993).

Uma seção delgada (ou seção fina) é uma lâmina de aproximadamente 30 μm , passível de observação em microscópio ótico. Durante o processo de preparação, os materiais são impregnados com uma resina epóxi de baixa viscosidade, na qual o marcador fluorescente pode ser adicionado. Através da utilização de uma fonte de luz ultra-violeta, a marcação fluorescente permite que fissuras, vazios, microporos, cristais e outros compostos possam ser melhor observados (HUNT, 1993). Roy et al. (1993) complementam afirmando que o uso de resinas marcadas com corantes fluorescentes permite uma melhor análise de interfaces porosas e microfissuradas. Por outro lado, ressaltam também que a determinação de propriedades como a relação água/cimento já é bem mais difícil de ser observada, uma vez que a análise é visual e comparativa da intensidade da fluorescência. Jakobsen e Brown (2006) buscaram estudar a reprodutibilidade da determinação da relação água/cimento através da análise de imagens fluorescentes. A figura 13 mostra alguns dos resultados obtidos nos testes realizados por eles. Para os autores, um petrógrafo experiente consegue, a partir de padrões de comparação pré-estabelecidos, distinguir os valores de relação água/cimento com um desvio padrão máximo de 0,02 à 0,03.

Head e Buenfeld (2006) utilizaram resinas marcadas com corantes fluorescentes para análise de imagens em microscópios confocal e de elétrons retro-espalhados, visando uma análise 3D da porosidade de concretos no estado endurecido. Na pesquisa ficou demonstrado que a técnica de reconstrução de imagens em 3D é válida e permitiu identificar vazios e poros muito finos, embora ainda exista uma demanda de trabalho para refinar e quantificar claramente os limites do método.

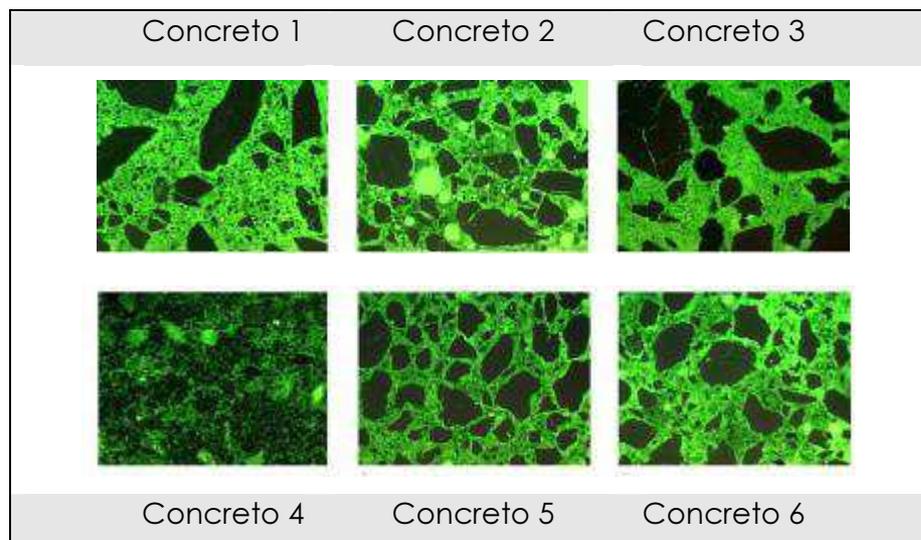


Figura 13: imagens de seis seções delgadas de concretos com diferentes relações água/cimento impregnadas com marcadores fluorescentes. O tom do verde fluorescente é função da relação a/c; os agregados apresentam-se em um tom verde-escuro e os vazios, mais claros em relação à pasta (JAKOBSEN e BROWN, 2006).

Durante todo o processo de revisão bibliográfica, não foram encontrados trabalhos que versassem especificamente no uso de seções delgadas marcadas com corantes fluorescentes para análise do transporte de água e pasta na interface de substratos/revestimentos de argamassa. Brocken et al. (1998) citam a utilização da técnica de lâminas petrográficas para verificar a extensão de aderência na região de interface. Porém, na análise do transporte de umidade, preferiram o uso de técnicas de ressonância magnética.

A partir do conhecimento adquirido na revisão bibliográfica, percebe-se que de fato o desenvolvimento de pesquisas científicas na área de argamassas é bastante abrangente. No que tange a questão de mecanismos de aderência revestimento/substrato, o entendimento é de que persistem muitas lacunas para serem exploradas. Assim, o passo seguinte desta tese de doutorado foi de desenvolver o método de pesquisa proposto, o qual está descrito no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A partir do conhecimento adquirido na revisão de literatura, apresentam-se neste capítulo os parâmetros experimentais implementados nas atividades de pesquisa em laboratório.

3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO E DAS VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O método de pesquisa adotado neste trabalho é de caráter experimental. Uma pesquisa experimental caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas ao objeto de estudo. A relação entre causa e efeito de um fenômeno se dá pela manipulação destas variáveis, através da criação de situações de controle (CERVO E BERVIAN, 2002). Ribeiro e ten Caten (2001) ressaltam a importância de se definir uma seqüência de ensaios econômicos e eficientes, com uma avaliação estatística dos resultados que respalde cientificamente o experimento. Os mesmos autores avaliam que decisões e soluções importantes são baseadas a partir dos resultados experimentais obtidos, motivo pelo qual não é recomendável buscar soluções de um problema apenas na intuição ou em uma pretensa perspectiva de desempenho.

Isto posto, o planejamento de experimentos torna-se fundamental, pois os resultados encontrados tendem a ser mais eficientes em termos de informação em relação a qualquer outra seqüência não estruturada. Dal Molin (1995) também destaca a importância da relação entre planejamento e análise de dados, pois:

“no momento em que se faz uso de métodos estatísticos para avaliação de experimentos, resalta-se a importância de um planejamento prévio para que se obtenha, a um custo mínimo, a maior quantidade de informações sobre as características dos fatores considerados. (...) Além disso, ensaios não sistematizados, quando muitos fatores estão envolvidos, inviabilizam a análise estatística posterior dos dados” (DAL MOLIN, 1995).

Em outras palavras, o uso de ferramentas estatísticas de análise é extremamente benéfico, porém só tem sentido se realizado em experimentos bem concebidos desde sua fase inicial.

O conjunto de todos os parâmetros a serem analisados constitui os chamados parâmetros de sistema. A correta definição destes é que permitirá que a expressão dos resultados se aproxime o máximo possível do comportamento que se deseja avaliar, sem perda de informação.

Consoante com tais premissas, o planejamento deste trabalho visou contemplar de maneira adequada a concretização dos objetivos propostos no item 1.1, no sentido de auxiliar na compreensão de alguns dos mecanismos de adesão e aderência de sistemas de revestimento de argamassa, em função da variação das condições dos substratos.

Feitas tais considerações, apresentam-se as variáveis analisadas experimentalmente. O planejamento dos parâmetros experimentais buscou contemplar a existência de:

a) **variáveis de resposta (dependentes)**: são aspectos que quantificam a qualidade ou desempenho de um produto e que podem ser medidos;

Desta forma, como aspectos quantificáveis, definiram-se: a resistência de aderência à tração dos sistemas avaliados. Este foi o principal parâmetro avaliado, do qual se buscaram correlacionar as respostas com todas as demais análises realizadas. Além desta, foram avaliadas a quantidade de material transportado entre argamassa e substrato, em função das condições de absorção do substrato nos quais as argamassas foram assentadas; e também a própria absorção capilar do substrato, em função da variação de sua estrutura de poros.

b) **fatores controláveis (independentes)**: são os parâmetros do processo que são estudados em diferentes níveis, podendo ou não ter efeito sobre as variáveis de resposta;

Assim sendo, foram definidos como fatores controláveis, dos quais se buscaram correlacionar as variações com a resistência de aderência à tração:

- textura e área superficial macro geométrica (potencial) de contato do substrato cerâmico, através do uso de blocos de superfície lisa e blocos com maior área de contato superficial, através da presença de estrias verticais;
- temperatura de queima dos blocos cerâmicos: 700, 800, 900 e 1000°C, e conseqüentemente,
- a condição de porosidade e absorção (em função da variação da estrutura de poros formados) dos blocos, obtida a partir da porosidade livre ou restringida dos blocos cerâmicos através do selamento de parte dos poros da sua superfície, a ser descrita na seqüência deste trabalho.

c) **fatores constantes:** constituem os parâmetros que não entram no experimento, mas que podem também influenciar nas variáveis de resposta, devendo ser mantidos constantes.

Como fator constante foi definido a utilização apenas de substratos de origem cerâmica. Conforme comentado no capítulo 1 deste trabalho e ressaltado durante a revisão bibliográfica, há uma grande variedade de fatores intervenientes no processo de adesão e aderência de argamassas de revestimento a substratos porosos. Ainda que alguns trabalhos já citados tenham buscado identificar questões como o transporte de água e pasta sobre superfícies cerâmicas e de concreto comerciais com diferentes porosidades, identificou-se, durante o processo de concepção e qualificação desta tese de doutorado, a necessidade de estabelecer critérios para que se pudesse entender da melhor forma o fenômeno em si do transporte de água e pasta para substratos porosos. Nesse sentido, optou-se pela utilização de um substrato de natureza única (cerâmica), variando-se diferentes condições superficiais (textura, porosidade, absorção), em detrimento de uma matriz com substratos de várias naturezas.

Além do substrato cerâmico, foi definida também a utilização de apenas uma argamassa que seria assentada sobre os diferentes blocos cerâmicos. Originalmente, durante a concepção inicial deste trabalho, imaginou-se trabalhar com argamassas produzidas com agregados com diferentes curvas granulométricas, variando-se diferentes condições de cura e utilizando ou não

camada de preparo em argamassa de chapisco. Isto retornaria uma matriz experimental extensa com quantidade significativa de variáveis e com grande profusão de resultados experimentais. Entretanto, durante discussões técnicas do grupo de pesquisa do qual o autor faz parte e durante o processo de avaliação para qualificação da tese, debateu-se que esta proposta resultaria em um trabalho com muitos dados potencialmente passíveis de análise, mas que talvez não respondessem àquilo que a tese estava se propondo prioritariamente: entender mais claramente a relação da porosidade da base advinda da queima dos blocos cerâmicos e sua influência sobre a questão da aderência, pretensamente a partir de condições de transporte de água e pasta diferenciadas. Dessa forma, chegou-se ao entendimento de que seria mais interessante estudar previamente a escolha de uma única argamassa com condições técnicas determinadas e específicas. A definição do proporcionamento e dos materiais utilizados na sua confecção estão descritos na sequência deste trabalho. Assim, todas as variáveis independentes do trabalho dizem respeito ao substrato cerâmico, e não à argamassa nele assentada.

d) **fatores não controláveis (ruído):** Além dos parâmetros descritos anteriormente, também é importante destacar a existência de variáveis sem possibilidade de controle experimental, que são responsáveis pela incerteza e variabilidade inerentes ao processo experimental.

A partir da definição dos parâmetros de sistema da matriz experimental, a metodologia de pesquisa foi dividida em duas etapas distintas. Primeiramente, um estudo exploratório para definição de alguns parâmetros relacionados ao processo de produção da argamassa de revestimento utilizada, o qual pode ser melhor visualizado no fluxograma da figura 14. Posteriormente, procedeu-se a execução da matriz experimental do trabalho desta tese, descrito no fluxograma da figura 15.

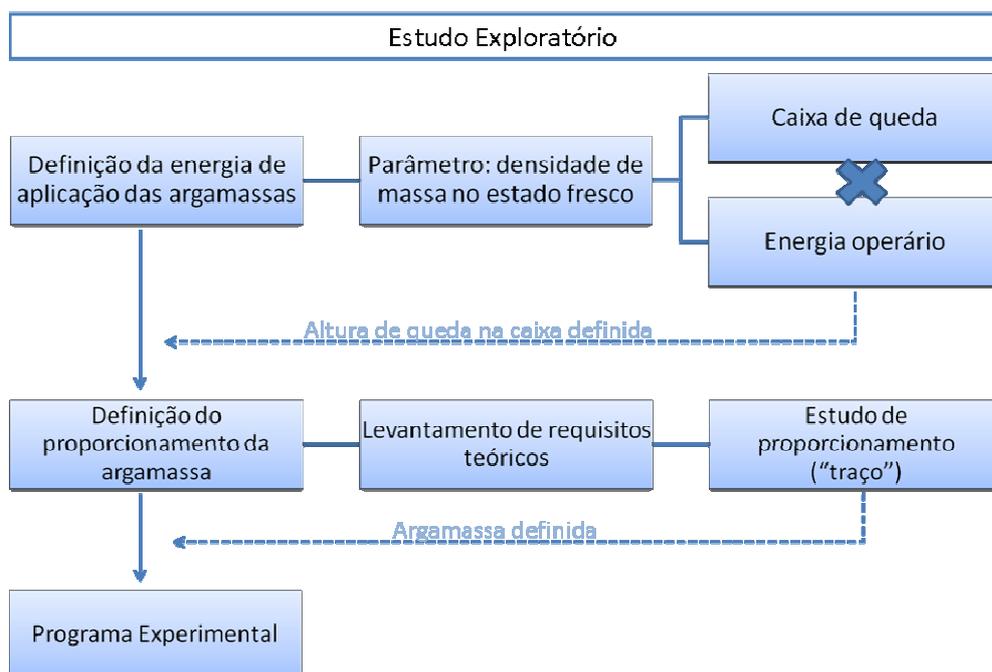


Figura 14: fluxograma do estudo exploratório realizado.

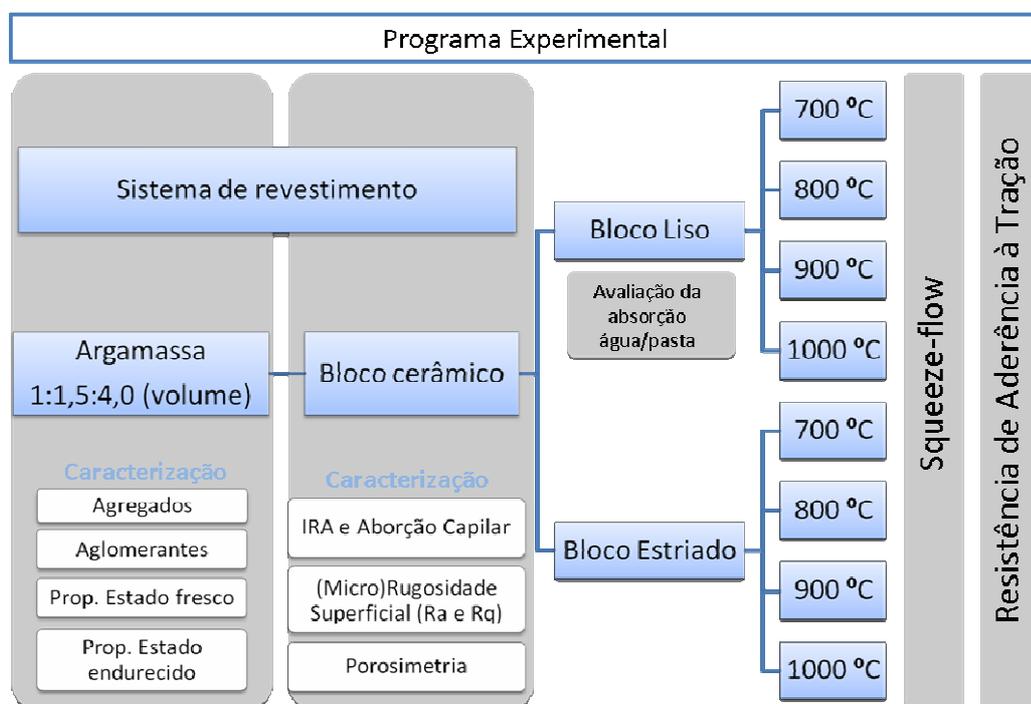


Figura 15: fluxograma do programa experimental realizado.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir estão descritos os materiais utilizados na fase experimental do trabalho.

3.2.1 Agregados

O agregado miúdo utilizado nas argamassas, de uso recorrente tanto em obras de edificação da região da grande Porto Alegre, bem como nas atividades de laboratório desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do NORIE/UFRGS, é uma areia quartzosa proveniente do rio Jacuí/RS. A composição granulométrica original do lote de areia, em ensaio conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003) a enquadra dentro da zona utilizável da NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). A areia natural possui uma dimensão máxima característica (DMC) de 4,8 mm, massa específica de 2,58 g/cm³ e módulo de finura de 2,54, obtidas, respectivamente, através de ensaios preconizados pelas NBR NM 52/02 e NBR NM 45/95.

A partir da composição granulométrica original, o agregado miúdo selecionado para a produção das argamassas foi utilizado compondo-se uma curva granulométrica com quatro frações iguais do material retido nas peneiras de 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm. Foram peneiradas grandes quantidades da areia coletada, sendo as mesmas previamente secas em estufa e posteriormente armazenadas em bombonas, até sua utilização. O objetivo deste peneiramento consistiu basicamente em evitar que, em função do armazenamento de grandes quantidades do agregado, pudessem ser utilizados lotes de material coletado com variações de composição granulométrica que influenciassem os resultados experimentais. Além disso, o uso desta rotina permite melhores condições de reprodutibilidade e comparabilidade dos resultados com outros que por ventura possam ser realizados utilizando areias de natureza similar. Assim, as características da areia utilizada após o peneiramento estão descritas na tabela 5:

Tabela 5: distribuição granulométrica e caracterização física do agregado miúdo após peneiramento.

| Abertura | % retida | % acumulada |
|--|-----------------|--------------------|
| 1,2 mm | 25 | 25 |
| 600 µm | 25 | 50 |
| 300 µm | 25 | 75 |
| 150 µm | 25 | 100 |
| Dimensão Máxima Característica (DMC): 2,4 mm | | |
| Massa unitária = 1,68 g/cm ³ | | |
| Massa específica = 2,58 g/cm ³ | | |
| Módulo de finura = 2,50 | | |

3.2.2 Aglomerantes

A cal utilizada na produção das argamassas foi uma CH-I, disponível comercialmente, que atende às especificações normativas do material, constantes na NBR 7175 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). Esta possuía uma massa específica de 2,40 kg/dm³ e área superficial de 135 m²/kg. A tabela 6 ilustra as características químicas da mesma, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6: características químicas da cal utilizada no trabalho

| Componente | CaO | MgO | CO₂ | Óxidos totais não hidratados | Perda ao fogo | Resíduo insolúvel |
|--------------------|------------|------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------|
| Valores (%) | 40,7 | 28,5 | 2 | 3,8 | 28,2 | 2,2 |

Embora na região sul do Brasil a maior parte das argamassas seja produzida com cimento Portland pozolânico (CP – IV), especificado pela NBR 5736 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991), a escolha do cimento utilizado ocorreu após o processo de qualificação da tese, onde foi sugerido que o mesmo fosse um cimento isento de adições minerais. Tal decisão iria ao encontro da perspectiva de novamente utilizar materiais onde a quantidade de adições e de fatores de ruído não controláveis fosse a menor possível. Desta forma, pela impossibilidade de adquirir-se um cimento CP-I ou CP-I-S (atualmente restritos para comercialização no mercado), optou-se pela utilização de um cimento Portland uruguaio, CP-N-32, cujas características químicas estão expressas na tabela 7.

Tabela 7: características químicas do cimento utilizado no trabalho

| Componente | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | CaO livre | K ₂ O | SO ₃ | Perda ao fogo | Resíduo insolúvel |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-----------|------------------|-----------------|---------------|-------------------|
| Valores (%) | 20,10 | 4,19 | 2,84 | 2,94 | 60,32 | 0,43 | 1,47 | 2,03 | 4,39 | 4,1 |

O cimento utilizado possuía ainda uma massa específica de 3,09 kg/dm³.

3.2.3 Água

A água utilizada para a produção das argamassas foi obtida através da rede de abastecimento local, estando isenta de contaminações ou impurezas orgânicas.

3.2.4 Substratos Cerâmicos

As peças cerâmicas utilizadas como substratos neste trabalho (blocos de 14 x 19 x 29 cm - L x H x C) foram obtidas a partir da doação de material de uma fábrica de blocos da região metropolitana de Porto Alegre, sendo todos pertencentes a um mesmo lote de argila. A caracterização química da argila utilizada na produção dos blocos, fornecida pelo fabricante, consta na tabela 8. Esta empresa é a principal fornecedora deste tipo de insumo para a região metropolitana de Porto Alegre, atendendo um grande número de construtoras. Os mesmos foram coletados crus, ou seja, sem que ainda houvessem passado por qualquer processo de sinterização. Após a amostragem, foram remetidos ao laboratório do Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde permaneceram estocados protegidos de intempéries até sua utilização.

Tabela 8: características químicas da argila utilizada na produção dos blocos cerâmicos do trabalho

| Componente | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | SO ₃ | Perda ao fogo |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| Valores (%) | 70,4 | 15,0 | 4,22 | 1,05 | 0,22 | 0,35 | 2,62 | 0,11 | N.D. | 5,24 |

Foram coletados blocos com superfície lisa e blocos com estrias verticais. O aspecto visual dos mesmos pode ser observado na figura 16.

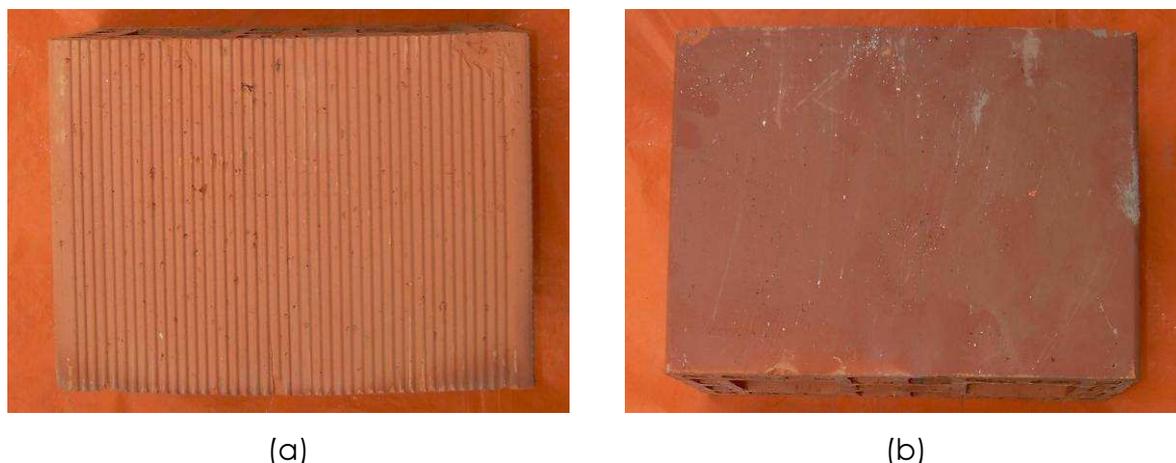


Figura 16: substratos cerâmicos - (a) detalhe da face do bloco com ranhuras verticais ("estriado"); (b) detalhe da face do bloco liso.

Uma vez selecionados, os blocos foram queimados em diferentes temperaturas, visando utilizá-los como substratos para assentamento de revestimentos de argamassa. O objetivo, tal qual já exposto anteriormente, consistia em garantir que as diferentes temperaturas de queima influenciassem a resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassa nele assentados, em função de uma porosidade e uma absorção diferenciada de água de tais elementos cerâmicos.

Antes do processo de queima propriamente dito, os blocos passaram previamente por um processo de secagem por 24 horas, à temperatura de 85°C, para retirada do excesso de umidade (fundamental dentro do processo de sinterização das peças para evitar trincas e fissuras pela evaporação rápida de água dos poros). Após este período, os mesmos foram queimados em quatro diferentes temperaturas: 700, 800, 900 e 1000 °C, com uma taxa de incremento de temperatura de 2,5°C/min e um patamar de queima de 6 horas. Após a queima, os blocos permaneciam no forno desligado, de onde eram retirados quando a temperatura fossem menor do que 85°C. A figura 17 ilustra o aspecto dos blocos nas diferentes temperaturas.



Figura 17: aspecto visual dos blocos cerâmicos submetidos à queima em laboratório com diferentes temperaturas.

A escolha da faixa de amplitude de temperaturas a serem estudadas foi definida a partir do conhecimento adquirido durante a revisão bibliográfica e de informações técnicas debatidas com pesquisadores do laboratório de materiais cerâmicos (LACER/UFRGS). Conforme citado no capítulo 2, o colapso do retículo dos argilominerais com liberação da água de constituição ocorre em temperaturas na faixa de 600-800 °C, porém somente na faixa aproximada de 800 – 950 °C começa a ocorrer a decomposição dos carbonatos com liberação de CO₂, com significativas modificações na microestrutura, e a partir de 900°C é que as reações da sílica e da alumina com outros elementos e formação de silicoaluminatos complexos passam a conferir ao corpo cerâmico propriedades físico-mecânicas características. Desta forma, pensou-se em um primeiro momento em se trabalhar com blocos cerâmicos em faixas de temperatura mais estreitas, tais como 800, 850, 900 e 950 °C. Porém, desejava-se não necessariamente trabalhar com substratos cerâmicos em faixas de queima próximas de condições de fabricação ideais, mas sim com blocos que pudessem ter comportamentos claramente diferenciados em função da temperatura de queima e que ajudassem a entender o fenômeno da aderência à tração das argamassas na sua essência. Como consequência destas ponderações, estabeleceu-se uma faixa de análise de 700°C à 1000°C, com um

passo de 100°C, mesmo que as temperaturas inferiores conduzissem à produção de unidades de baixa qualidade comercial.

Em função das mesmas serem variáveis de resposta estudadas para a compreensão dos fenômenos em estudo nesta tese, as diferentes características de absorção dos substratos obtidas a partir do processo de queima estão expressas no capítulo de resultados.

3.3 ETAPAS DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Uma vez escolhidos e caracterizados os materiais a serem empregados no programa experimental, neste capítulo são descritos os processos de investigação preliminares e a conseqüente definição dos critérios e procedimentos de ensaio adotados e que foram balizadores para a busca das respostas ao problema de pesquisa proposto.

3.3.1 Determinação da energia de aplicação da argamassa utilizada no assentamento dos revestimentos

Conforme estabelecido previamente durante o planejamento dos experimentos, era preciso eliminar ou minimizar todos os fatores não-controláveis que pudessem resultar em fatores de ruído sobre os resultados. Desta forma, uma das primeiras decisões, baseadas no embasamento teórico adquirido durante a revisão de literatura e nas experiências de trabalhos do grupo de pesquisa do NORIE/UFRGS, foi a de eliminar o efeito do operador que executasse os revestimentos. Não há como ter confiabilidade total em um oficial pedreiro ou laboratorista, por maior capacidade ou experiência que possam ter, sem que fatores como ergonomia para lançamento, quantidade de argamassa projetada por vez e cansaço eventual do operador, por exemplo, gerem variabilidades que são inerentes ao processo. Experiências anteriores do grupo de pesquisa do NORIE/UFRGS, como os trabalhos de Moura (2007) e Pretto (2007), apresentavam indicativos claros desta variabilidade.

Com isso, a opção natural passou a ser a utilização de uma caixa de queda, similar às descritas por outros autores (PAES, 2004; CARASEK, 1996). Foi desenvolvida, então, uma caixa de queda metálica para projeção vertical de argamassas por gravidade, ilustrada na figura 18. O equipamento permite que o alçapão para queda da argamassa seja ajustado em diferentes alturas, entre 55 cm e 155 cm em relação ao solo, com um passo de 10 cm. Tal equipamento foi utilizado para projeção por gravidade da argamassa, em alturas pré-determinadas.



Figura 18: caixa de queda desenvolvida para a realização do trabalho

Uma vez definido o equipamento, iniciaram-se testes de operação desta caixa de queda com blocos cerâmicos nas mesmas dimensões que seriam utilizadas nos ensaios definitivos. A colocação da argamassa sobre o alçapão era realizada com auxílio de uma fôrma de 5 X 25 X 35 cm (altura x largura X profundidade), ou seja, com um volume aproximado de argamassa de 4, 375 litros. Superior, portanto, ao volume a ser revestido, que era de 1,102 litros (equivalente à aplicação de um revestimento de 2 cm sobre uma face de 19 X 29 cm do bloco). A fôrma era retirada antes da abertura da caixa de queda. Observou-se que, ao liberar a queda da argamassa pelo alçapão, em alguns momentos nem toda a face dos blocos cerâmicos (19 X 29 cm) era preenchida. Mesmo que a quantidade

colocada fosse mais do suficiente para o revestimento da amostra, grande parte da argamassa era projetada em uma área perimetral ao bloco cerâmico (figura 19). Tal fato motivou um estudo complementar, onde moldes retangulares com diferentes dimensões e volumetrias foram testados.



Figura 19: detalhe do molde utilizado para colocação da argamassa sobre o alçapão da caixa de queda e detalhe da argamassa projetada para fora da superfície de contato com o bloco.

Moldes com grandes volumes de argamassa eram eficientes no revestimento dos blocos, mas geravam muitas perdas de material. Ao final destes testes, percebeu-se que bastava um molde com dimensões próximas da face a ser revestida, porém com maior altura. Assim, um molde de aproximadamente 10 x 15 X 29 cm foi definido como o que melhor preenchia, em uma única queda, a face dos blocos cerâmicos, sem perdas excessivas de argamassa e com um espalhamento mais homogêneo na superfície, para posterior sarrafeamento. O mesmo pode ser visto na figura 20.



Figura 20: molde final utilizado para colocação da argamassa sobre o alçapão da caixa de queda. Note-se também o menor desperdício de argamassa e o preenchimento homogêneo da face do bloco.

Além disso, verificou-se que muitas vezes parte da argamassa ficava aderida à superfície metálica das abas do alçapão da caixa de queda, resultando em um preenchimento não homogêneo do substrato cerâmico. A aplicação de desmoldante na superfície do alçapão foi imediatamente descartada, uma vez que não se desejava que o mesmo contaminasse a argamassa que posteriormente entraria em contato com o bloco cerâmico. Tal problema foi sanado simplesmente aplicando um filme de PVC às abas do alçapão, que garantiu um escorrimento imediato da argamassa no momento do acionamento do dispositivo, permitindo sua queda de forma uniforme e melhorando ainda mais a homogeneidade da aplicação.

Era preciso, então, estabelecer um padrão de energia de lançamento. Conforme já citado no capítulo 2, pesquisadores e autores de diversos trabalhos acadêmicos divergem quanto a um valor ideal para aplicação de argamassa. Na literatura foram encontrados exemplos de aplicação que variavam de 15 cm à 1,8 metros, conforme a simulação proposta.

Neste trabalho, buscou-se, prioritariamente, um padrão que pudesse ter repetitividade e reprodutividade com o equipamento proposto. Além disso, uma energia de aplicação da caixa de queda que pudesse ser minimamente correlacionada à energia de aplicação de um operador. O parâmetro de comparação mensurável proposto foi a densidade de massa - similar ao proposto por Paes (2004) - no estado fresco, em revestimentos de mesma espessura. Para tal, foi proposto um estudo piloto com uma argamassa industrializada classificada pelo fabricante sendo uma P5,M4,R5,D4,U4,A3, de acordo com a NBR 13.281/2005.

Um recipiente cilíndrico de 9,5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura foi utilizado para execução do ensaio de densidade de massa no estado fresco. O mesmo foi fixado a uma parede, onde um laboratorista com experiência como oficial pedreiro, ao rebocar parte da área disponível, procedia o preenchimento do recipiente com argamassa. Cabe salientar que o recipiente descrito pela NBR 13278 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005) para o ensaio de densidade de massa foi inicialmente pensado para a realização deste estudo piloto; todavia, evidenciou-se dificuldade para o pedreiro encher de maneira uniforme o recipiente, na posição horizontal, dada a profundidade do pote.

Uma vez preenchido o recipiente com argamassa, o mesmo era retirado da parede e o excesso de argamassa rasado com auxílio de uma espátula metálica. O cálculo da densidade de massa era realizado, então da mesma forma que o preconizado pela NBR 13278/05, adaptando-se ao volume do recipiente utilizado. Esse procedimento foi realizado repetidamente, totalizando 10 amostras. O resultado final pode ser visto na tabela 9.

A partir do resultado obtido, a mesma argamassa foi projetada no mesmo recipiente, porém desta vez com o uso da caixa de queda, em diferentes alturas de queda (Figura 21). O cálculo da densidade de massa resultante pode ser observado pela tabela 10, para as diferentes alturas de queda ensaiadas.

Tabela 9: densidade de massa no estado fresco de argamassa aplicada em parede durante estudo piloto

| AMOSTRA | DENSIDADE DE MASSA (kg/m ³) |
|--------------|--|
| 01 | 1580 |
| 02 | 1563 |
| 03 | 1616 |
| 04 | 1604 |
| 05 | 1585 |
| 06 | 1501 |
| 07 | 1599 |
| 08 | 1661 |
| 09 | 1597 |
| 10 | 1580 |
| Média | 1590 |
| C.V. | 2,70 % |



Figura 21: detalhe do recipiente utilizado no ensaio de densidade de massa no estado fresco na caixa de queda

Tabela 10: valores médios de densidade de massa no estado fresco de argamassa aplicada com auxílio de caixa de queda, nas alturas de projeção indicadas

| ALTURA DE QUEDA | | DENSIDADE DE MASSA (g/cm ³) |
|-----------------|---------------|---|
| 40 cm | Média: | 1489 |
| | C.V. | 2,12% |
| 70 cm | Média: | 1532 |
| | C.V. | 5,22% |
| 100 cm | Média: | 1597 |
| | C.V. | 3,6% |
| 130 cm | Média: | 1580 |
| | C.V. | 0,9% |

A partir dos resultados deste estudo piloto, estabeleceu-se como padrão para os ensaios do trabalho experimental uma altura de queda de 100 cm em relação à face dos blocos cerâmicos, por ter sido a que apresentou resultados mais próximos ao alcançado pelo laboratorista, durante o revestimento das faces das paredes-teste.

3.3.2 Definição do proporcionamento de materiais da argamassa utilizada

Uma vez estabelecido o procedimento de assentamento dos revestimentos, partiu-se para a definição de qual argamassa utilizar nos ensaios do programa experimental definitivo. A escolha de uma argamassa industrializada, tal qual utilizada nos estudos-piloto no item 3.3.1, seria mais prática a princípio, pois não demandaria atividades prévias de seleção e preparação de aglomerantes e agregados. Todavia, haveria maior dificuldade de caracterizarem-se os cimentos, cales e areias utilizados, bem como os aditivos que a maioria destes produtos contém, uma vez que nem sempre são, por motivos comerciais, claramente expressos pelos fabricantes. A decisão de dosar uma argamassa convencional em laboratório, então, foi estabelecida em função de propiciar ao pesquisador maior

controle dos insumos, bem como a possibilidade de sua caracterização. Esta caracterização dos insumos já foi descrita no capítulo 3.2 desta tese.

Além disso, era intenção de que se desenvolvesse uma argamassa com características específicas.

Sob este aspecto, estabeleceram-se algumas premissas que a argamassa deveria possuir, em função dos tipos de análise de aderência e transporte de água/pasta propostos.

Primeiramente, decidiu-se que a argamassa deveria apresentar uma alta retenção de água, de modo que a absorção de água para o substrato ocorresse fundamentalmente pela maior ou menor capacidade de sucção do mesmo, e não pela disponibilidade de umidade ocasionada por uma eventual e considerável perda por parte do revestimento. Em outras palavras, foi definido como desejável a criação de um cenário experimental onde uma baixa retenção de água da argamassa não mitigasse os potenciais ganhos de sucção do substrato poroso, em diferentes condições. Em segundo lugar, era esperado que a argamassa apresentasse uma trabalhabilidade que permitisse boas condições de assentamento e uma resistência mecânica considerável, de modo que os ensaios de aderência à tração dos sistemas ensaiados fornecessem o mínimo de resultados de ruptura na interface argamassa/argamassa ou argamassa/cola e sim o máximo possível na interface argamassa/substrato. Cabe lembrar também que neste trabalho foi definida a não utilização de camada de chapisco sobre a face dos blocos cerâmicos antes do revestimento.

Assim, traços em volume comumente encontrados em artigos técnicos durante a revisão de literatura, como 1:1:6 e 1:2:9, foram preteridos por uma argamassa com um conteúdo ainda maior de aglomerante, especialmente cal (em função de sua capacidade de retenção de água) em relação aos agregados. Ainda que não sejam comumente utilizadas em campo, tais argamassas permitiriam, como já exposto, melhores condições para a criação do cenário de investigação proposto. Desse modo, após alguns estudos de proporcionamento, as argamassas foram produzidas com uma proporção em volume de 1:1,5:4,0 (cimento:cal:areia seca), posteriormente desdobrado em massa para produção das mesmas em laboratório.

A caracterização desta argamassa encontram-se na tabela 10, no capítulo de resultados.

3.3.3 Ensaios de caracterização das argamassas

Os ensaios de caracterização da argamassa utilizada tiveram por objetivo quantificar as principais propriedades das mesmas, bem como eventualmente auxiliar a interpretação dos resultados das avaliações da interação entre elas e os substratos, e sua relação com os resultados de resistência de aderência à tração obtidos.

Os ensaios de caracterização das argamassas incluíram:

- a) índice de consistência (NBR 13276/05);
- b) densidade de massa no estado fresco (NBR 13278/05);
- c) densidade de massa aparente no estado endurecido (NBR 13280/05);
- d) retenção de água (NBR 12277/05);
- e) absorção de água por capilaridade (NBR 15259/05);
- f) resistência à compressão e à tração na flexão (NBR 13279/05).

Os ensaios mecânicos foram realizados em prensa da marca Shimadzu – AG 100 kN disponível no Laboratório de ensaios e modelos estruturais (LEME) da UFRGS, com aplicação de carga de 50 ± 10 N/s para o ensaio de resistência à tração na flexão e de 500 ± 50 N/s para o ensaio de resistência à compressão. A prensa foi utilizada para a determinação da resistência à flexão e compressão da argamassa utilizada, bem como a resistência à compressão dos blocos cerâmicos produzidos.

3.3.4 Ensaios de avaliação dos substratos cerâmicos e do sistema argamassa/substrato cerâmico

Este subitem do capítulo 3.3 - Etapas do Procedimento Experimental - descreve a metodologia adotada para avaliação dos substratos cerâmicos, os quais foram tratados através de um processo de queima em laboratório já descrito anteriormente. Igualmente, faz uma descrição dos ensaios propostos para a avaliação dos sistemas argamassa/substrato, de modo a verificar posteriormente os resultados e a inferência das variáveis controláveis estabelecidas sobre as variáveis de resposta.

No caso dos substratos cerâmicos, a avaliação destes foi feita com base na análise de três propriedades dos mesmos: porosidade, rugosidade superficial¹⁹, e absorção capilar de água. Aqui cabe uma explicação acerca da caracterização de tais propriedades. De nada valeria o esforço de produzir blocos com diferentes temperaturas de queima e avaliar o efeito deste processo no entendimento dos mecanismos de transferência de água e pasta entre revestimento e substrato, se os mesmos não apresentassem alguma mudança substancial ou na sua estrutura de poros, ou na rugosidade (micro geométrica, a despeito das variações macro geométricas de forma superficial entre os blocos lisos e os estriados). Ao se avaliar a estrutura de poros/superfície dos blocos cerâmicos, buscou-se garantir que haveria diferenças entre os blocos produzidos.

Analogamente, os sistemas de revestimento - argamassa/substrato cerâmico - estudados foram avaliados em três momentos: através dos ensaios de resistência de aderência à tração, nas condições variáveis descritas em 3.1 e 3.2; através da adaptação do ensaio do *squeeze flow* como uma ferramenta de avaliação da interação entre os substratos cerâmicos e a argamassa de revestimento, ao longo do tempo, nos momentos pós-aplicação; e através da avaliação da perda de água/pasta da argamassa para os substratos cerâmicos.

¹⁹ Irregularidades de superfície, segundo Rosa (2007) podem ser caracterizadas como macro geométricas e micro geométricas. O conceito de **rugosidade** estaria relacionado, assim, à irregularidades de superfície micro geométricas, diferenciando-se de ondulações ou características macro geométricas de forma.

3.3.4.1 Avaliação da rugosidade superficial dos substratos cerâmicos

Com o intuito de verificar se os blocos cerâmicos, ao serem queimados em diferentes temperaturas, alteravam substancialmente suas características de rugosidade superficiais, propôs-se a verificação das mesmas através da análise com o uso de um scanner tridimensional a laser, marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D (Figura 22). O mesmo encontra-se instalado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento, segundo Pretto (2007), foi desenvolvido em parceria do LdSM com a empresa Tecnodrill, de Novo Hamburgo – RS, durante projeto fomentado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP no ano de 2002. O software de operação do equipamento também foi localmente desenvolvido.



Figura 22: Scanner 3D do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM).

Esta verificação é importante no sentido de, no momento da análise dos resultados, evitar eventuais dúvidas quanto à possibilidade de mudanças de resistência de aderência nos sistemas de revestimento estarem sendo ocasionadas não somente pela alteração da porosidade e da absorção de água, mas também pela existência de micro rugosidades diferentes igualmente oriundas dos processos de queima. Nesse caso, ocorrendo perfis de rugosidade diferenciados, a análise deveria ser feita levando-se em conta esse efeito na extensão de aderência, que

poderia inclusive sobrepor-se à micro ancoragem por penetração de água e/ou pasta no interior dos poros, tal qual algumas linhas de pesquisa brasileiras pressupõem. Entretanto, caso os perfis de (micro)rugosidade se mantivessem relativamente homogêneos para todos os perfis de queima dos blocos, tornar-se-iam mais sólidos quaisquer argumentos em favor da questão do efeito da porosidade e da absorção de água dos blocos, caso os mesmos retornassem valores de resistência de aderência à tração diferenciados.

Para melhor entender os parâmetros de medição propostos, é preciso entender o que coloca Preto (2007), que destaca que não há normalização para parâmetros de rugosidade realizados em 3D, sendo que a norma NBR/ISO 4287/2002 estabelece somente critérios para análise de perfis de rugosidade a partir de dados em duas dimensões. Embora autores como Beláir (2005) utilizem parâmetros próprios para medição em 3D, neste trabalho optou-se por análises a partir de parâmetros 2D, considerados suficientes para explicar o que é proposto.

O parâmetro de rugosidade mais reconhecido, e o mais utilizado, é o chamado R_a – rugosidade média - definido segundo DIN 4768 (1990-05) e DIN EN ISO 4287 (1998 - 10). O mesmo também foi utilizado para a avaliação das superfícies dos blocos cerâmicos. Conforme consideram Preto (2007) e Rosa (2007), o chamado parâmetro R_a é “a média aritmética entre os valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (L_m)” conforme ilustra a figura 23. Essa grandeza é correspondente à altura de um retângulo. A área deste retângulo corresponderia à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição, o chamado *cutt-off*.

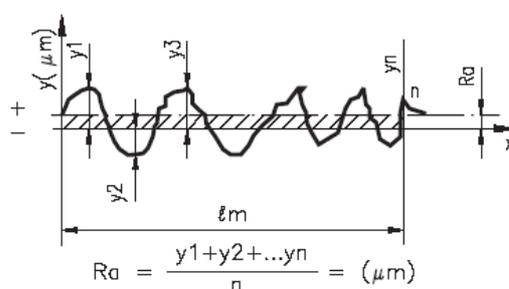


Figura 23 – Rugosidade Média - R_a
(Adaptado de PRETTO, 2007)

Embora o valor de Ra não defina a forma das irregularidades do perfil, sendo ele o parâmetro mais usado na indústria, principalmente nas áreas metal-mecânica que exigem grande precisão dimensional, é uma importante ferramenta para verificar a uniformidade de uma superfície, em diferentes amostras.

Outro parâmetro avaliado foi o chamado desvio médio quadrático (R_q), que segundo Silva (2006) é particularmente interessante para a análise de superfícies onde o Ra pode perder resolução. A principal vantagem desse parâmetro reside no fato de que o mesmo evidencia mais claramente os picos e vales do que o Ra, no entanto também não define o formato destas irregularidades.

Define-se o R_q como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro de um comprimento de amostragem (SILVA, 2006; PRETTO, 2007).

Para os blocos cerâmicos deste trabalho, foram ensaiadas 5 amostras de superfície de um bloco para cada temperatura de queima. Cada amostra correspondia a uma varredura do scanner 3D por uma linha de 10,727 mm, com um *cutt-off* de 0,08 mm. Isso significa que cada ponto analisado é a média resultante de 134 leituras do scanner sobre a superfície do substrato cerâmico.

3.3.4.2 Avaliação da porosidade e da absorção de água dos substratos cerâmicos

Para a avaliação do volume e distribuição do tamanho dos poros dos blocos cerâmicos queimados em laboratório foi utilizada a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio. Esta tem sido largamente utilizada como uma técnica experimental para se caracterizar diversos aspectos de materiais porosos. Segundo LMTP (2012) a técnica é baseada no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias. Gouvea (20__) complementa este raciocínio ao afirmar que o mercúrio possui um ângulo de contato que varia entre 130° e 140° em relação à superfície da maioria dos sólidos. Assim, materiais porosos colocados em contato com este elemento não serão

penetrados por ele a menos que seja introduzida uma força externa, superior à tensão superficial do mercúrio (Figura 24).

A técnica de avaliação da porosidade por porosimetria reside justamente nisso. Ao confinarmos uma amostra de um sólido poroso em um recipiente dotado de um capilar, realizando vácuo sobre a mesma e preenchendo o recipiente e o capilar com mercúrio, ao se aumentar a pressão sobre o líquido, este penetrará nos poros da amostra reduzindo seu nível no capilar. Uma curva porosimétrica é obtida informando que volume de poros do material foi penetrado pelo mercúrio a uma dada pressão (LMTP, 2012).

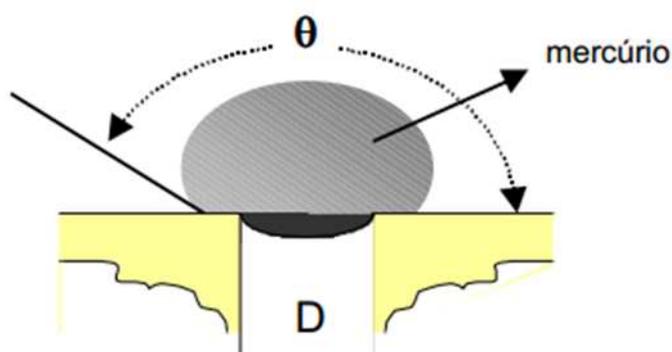


Figura 24: mercúrio em contato com um sólido poroso, sendo D o diâmetro do poro e Φ o ângulo de contato com a superfície (GOUVEA, 20__)

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNISINOS²⁰, nos blocos queimados em laboratório, nas diferentes temperaturas.

Por sua vez, para a determinação do IRA (Initial Rate Absorption) e da absorção dos blocos ao longo do tempo foi estabelecida uma seqüência de preparação e ensaio, descrita a seguir:

- a) secagem dos blocos em estufa a $100\pm 5^{\circ}\text{C}$, até constância de massa (mínimo de 24 horas);

²⁰ Universidade do Vale do Rio dos Sinos, em São Leopoldo/RS

- b) determinação, após esfriamento, de sua massa seca (m_s);
- c) determinação da massa do bloco úmido (m_u) após imersão da face do bloco cerâmico, durante 1 minuto (IRA) e nos tempos de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180 min e 24 hrs, em lâmina de água de 3,2 mm de profundidade;
- d) cálculo do IRA e da absorção total em 24 hrs, por meio da equação 7.

$$ABS(g/194cm^2/min) = \frac{(m_u - m_s)}{A} \times 194 \quad (\text{Equação 07})$$

Onde:

ABS = Taxa de absorção de água livre (g/194cm²/min);

m_u = massa úmida (g);

m_s = massa seca (g);

A = Área do bloco em contato com a lâmina de água (cm²).

De posse dos dados do ensaio, foi possível também determinar a absorptividade (S) dos blocos cerâmicos queimados em diferentes temperaturas. A aqui chamada “absorptividade”, difere-se da absorção total por capilaridade dos blocos. Tal qual denominação proposta por Paes (2004), é uma livre tradução do termo “sorptivity”, proposto por Hall et al. (1980), através da equação 8 descrita a seguir:

$$i = S \times t^{1/2} \quad (\text{Equação 08})$$

onde:

i = volume de água absorvida por unidade de área (mm³/mm²);

S = coeficiente de absorção de água, “absorptividade” (mm.min^{-1/2});

t = tempo (min).

Conforme coloca Paes (2004), a absorptividade pode ser entendida como um parâmetro que avalia indiretamente a velocidade do fluxo de água para o interior da microestrutura do substrato, enquanto a reta da relação $i \times t^{1/2}$ apresenta linearidade.

3.3.4.3 Adaptação do ensaio do *squeeze flow* como ferramenta de avaliação da interação entre os substratos cerâmicos e a argamassa de revestimento

Como já comentado na revisão bibliográfica, a técnica do *squeeze flow* é utilizada para realizar a caracterização reológica de argamassas. O princípio básico do ensaio, conforme descrevem Cardoso et. al (2005) consiste na medida do esforço necessário para a compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, gerando deformações por cisalhamento e alongamento da mesma, conforme mostra a figura 25.

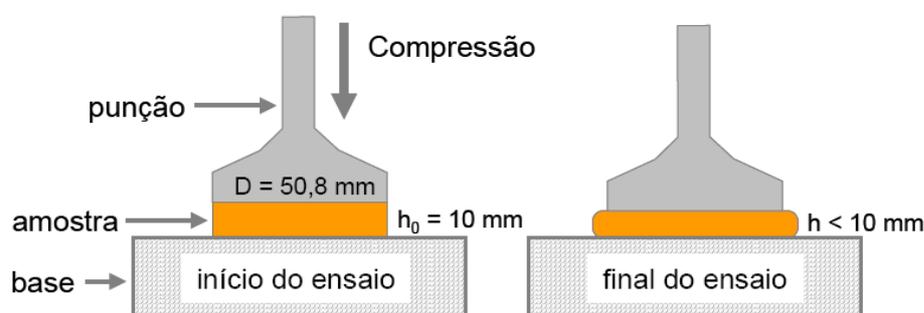


Figura 25: ensaio squeeze-flow (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005)

Foi proposta neste trabalho uma análise comparativa da mudança de perfil de deformação da argamassa de revestimento no ensaio do *squeeze flow*, em função da perda de água da mesma, a partir do seu contato com os substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima, em diferentes tempos. Assim, cabe salientar que a técnica do *squeeze flow* serviu neste trabalho não necessariamente para a caracterização reológica da argamassa utilizada, mas sim para avaliar a perda de plasticidade da argamassa, nos momentos pós-aplicação da mesma, em função do fluxo de transferência de água e pasta para o interior dos poros dos substratos cerâmicos.

Para tal, primeiramente foi realizada a caracterização inicial da argamassa em condições normais de ensaio. A mesma foi preparada conforme as prescrições normativas da NBR 15839 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010), nas mesmas condições das argamassas utilizadas em todos os demais ensaios deste trabalho. Em seguida, optou-se por ensaiar as amostras em tempos distintos da

norma. Ao invés dos 15 e 65 minutos ou 10 e 60 minutos (dependendo da velocidade de aplicação de carga), a mesma foi ensaiada com 5, 15 e 60 minutos, os mesmos tempos em que foram ensaiadas as amostras desta argamassa em contato com os blocos cerâmicos. O objetivo da inserção de um tempo de 5 minutos foi de verificar as condições da argamassa logo após sua aplicação ao substrato poroso. Originalmente pensou-se em realizar leituras com 1 minuto, mas as mesmas não foram possíveis em função do tempo entre a preparação da argamassa no anel de ensaio, a retirada do anel e a colocação da amostra na prensa. O resultados dos ensaios referência da argamassa com os pratos metálicos conforme o padrão da norma, e os resultados dos ensaio realizados sobre os substratos cerâmicos, geraram gráficos com diferentes comportamentos, que foram analisados e discutidos no capítulo de resultados desta tese. Na figura 26 pode-se observar um exemplo de amostra de argamassa assentada sobre bloco cerâmico sendo ensaiada através da adaptação do ensaio de *squeeze flow*.

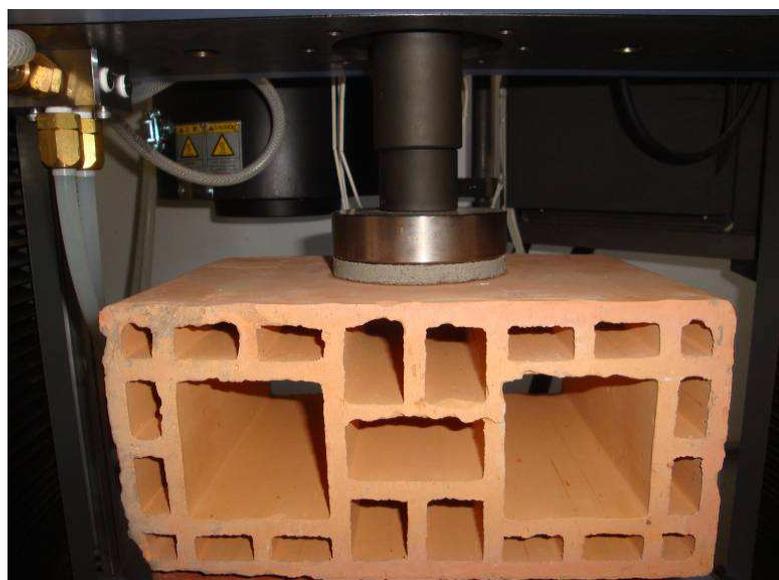


Figura 26: demonstração do ensaio squeeze-flow realizado sobre os blocos cerâmicos

3.3.4.4 Avaliação da perda de água/pasta da argamassa para os substratos cerâmicos

Na inexistência de sensores de umidade disponíveis no laboratório, tais quais os utilizados por PAES (2004), foi proposta uma metodologia de avaliação da transferência de água e pasta das argamassas para os substratos cerâmicos que pudesse ser mensurada através de diferenças de massa entre os dois componentes, quando em contato direto. Estes ensaios foram realizados no LBTEC - Laboratório de Tecnologia Construtiva da Universidade de Caxias do Sul. Ainda que não possa ser diretamente correlacionada, a técnica adotada foi similar a proposta (não-normalizada) por Honório e Carasek (2009) e descrita na revisão bibliográfica deste trabalho, de retirada e pesagem de amostras de argamassa assentadas sobre substratos porosos. Nos estudos iniciais foi prospectada a possibilidade de utilização de uma termo-balança analisadora de umidade por infra-vermelho, típico para avaliação de grãos, sementes e materiais em pó. Como o mesmo demonstrou-se muito variável nos resultados, optou-se então pelo uso de balanças analíticas de precisão, com resoluções de até 0,0001 g, que demandavam amostras de pequeno tamanho (figura 27).

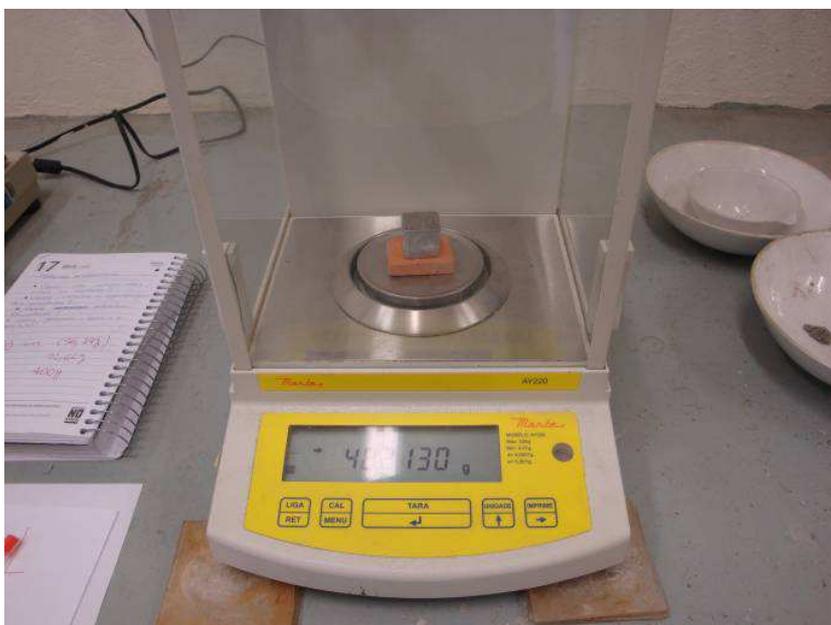
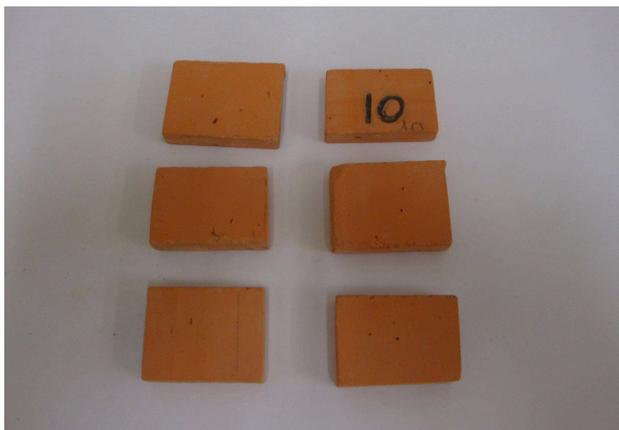


Figura 27: vista geral da amostra no momento da pesagem em balança de precisão de 0,0001 g

A metodologia proposta, não normalizada, consistiu nas seguintes etapas:

- a) corte de amostras de unidades cerâmicas de aproximadamente 2 X 2,5 cm, a partir de blocos cerâmicos queimados nas temperaturas de 700, 800, 900 e 1000°C;
- b) secagem das unidades cerâmicas a $90 \pm 2^\circ\text{C}$ até que as mesmas atingissem constância de massa, com registro da massa final seca (M_0) em balança de precisão de 0,0001 g
- c) preparação das argamassas de revestimento, conforme NBR 13276/05;
- d) moldagem da argamassa sobre a unidade cerâmica, utilizando um molde metálico de largura/profundidade/altura de 1,0X1,0X1,0 cm, adensada com o auxílio de um arame metálico; após, procedia-se sua imediata colocação sobre o prato da balança de precisão;
- e) registro da massa inicial (M_1) do conjunto unidade cerâmica + molde metálico + argamassa;
- f) retirada da amostra em tempos pré-definidos (1, 5, 10, 30, 60 min), registrando previamente a massa do conjunto (M_2), de modo a verificar a perda de água por evaporação em relação à massa inicial (M_1-M_2);
- g) retirada do molde metálico e raspagem da superfície da unidade cerâmica com auxílio de uma espátula plástica, separando a argamassa da cerâmica;
- h) registro da massa da unidade cerâmica (M_3) e da argamassa retirada (M_4);
- i) cálculo da massa absorvida pela peça cerâmica (M_3-M_0).

Um resumo desta sequência de etapas pode ser observada através das fotos da figura 28.



Etapa 1: Corte das amostras cerâmicas a partir de um bloco



Etapa 2: preparação da argamassa



Etapa 3: pesagem das unidades cerâmicas secas



Etapa 4: Moldagem e pesagem do conjunto cerâmica+argamassa+molde



Etapa 5: pesagem da unidade cerâmica após "n" minutos de contato com argamassa



Etapa 6: pesagem da argamassa retirada de cima da superfície cerâmica

Figura 28: etapas do ensaio de avaliação de transferência de água e pasta proposto.

3.3.4.5 Avaliação da resistência de aderência à tração dos sistemas de revestimento estudados

O ensaio de resistência de aderência à tração das argamassas de revestimento ao substrato foi realizado adaptando-se as prescrições da NBR 13528 (1995)²¹. Os blocos que serviram como substrato foram os descritos no capítulo 3.2.4, nos quais foram assentadas as argamassas de revestimento e submetidas à cura em câmara climatizada à temperatura de 23 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade, por 28 dias. Após o tempo de cura das argamassas, foram executados os cortes referentes aos pontos de arrancamento em cada bloco, correspondendo a quatro amostras por bloco, espaçadas em 5 cm.

A figura 29 ilustra a sequência de execução dos revestimentos sobre as unidades cerâmicas.



Preparação do bloco na forma



Moldagem dos revestimentos



Retirada da forma após 24 hrs



Aspecto final do bloco revestido

Figura 29: sequência de execução dos revestimentos sobre os substratos cerâmicos

²¹ À época da realização dos ensaios, ainda não estava vigendo a última versão da norma, de 2010.

Da mesma forma, a sequência de fotos ilustrada na figura 30 descreve o procedimento de preparo e execução dos ensaios de resistência de aderência à tração.



Corte dos blocos



Pastilhas coladas nos revestimentos



Registro fotográfico da amostra após a execução do ensaio de tração



Aspecto da amostra após ensaio nos quatro pontos dos blocos

Figura 30: sequência de preparo e execução dos ensaios de resistência de aderência à tração

3.3.4.6 Estudo piloto para alteração das condições dos substratos

Conforme exposto no capítulo 3.2, uma das variáveis independentes propostas para a avaliação era a deliberada restrição da entrada de água e/ou pasta para o interior dos poros do substrato, e seu conseqüente efeito (ou não) sobre a aderência à tração dos revestimentos produzidos. Isto posto, foi definido um estudo exploratório para determinar, dentro das condições de contorno desta tese, formas de restringir a área com potencial de absorção do substrato, obstruindo ou selando parcial ou totalmente sua superfície porosa.

Novamente, foram produzidos revestimentos sobre uma superfície da face de 19 X 29 cm de blocos cerâmicos disponíveis comercialmente, provenientes do mesmo lote do fabricante dos blocos utilizados para queima em laboratório. A mesma argamassa industrializada do estudo exploratório de altura de queda ideal (descrito no capítulo 3.3.1), uma P5,M4,R5,D4,U4,A3, de acordo com a classificação NBR 13.281/2005, foi utilizada também nesta etapa. Sobre o revestimento de cada bloco, eram realizados quatro amostras para o ensaio de resistência de aderência à tração. Para cada teste, foram ensaiados dois blocos, totalizando oito amostras de aderência à tração. A figura 31 ilustra parte destes blocos ensaiados no estudo piloto.



Figura 31: blocos ensaiados durante o estudo-piloto.

Foram testadas inicialmente as seguintes alternativas:

- a) revestimento sobre um bloco 100% saturado de água por 24 hrs;
- b) revestimento sobre um bloco que recebeu uma camada de solução à base de aditivo hidrofugante;

Comparados os resultados dos testes de resistência de aderência à tração com blocos em condições padrão (superfície seca), não foram identificadas diferenças significativas que indicassem qualquer obstrução dos poros que pudessem gerar conseqüente perda de aderência. Em alguns dos blocos, inclusive, a resistência de aderência foi igual ou superior.

Optou-se, então, por testar o selamento dos poros da superfície dos blocos com parafina (C_nH_{2n+2} ($n > 20$)). No primeiro teste, o procedimento consistiu em selar totalmente a superfície do bloco com a parafina líquida. Depois de seco, o filme superficial formado pela parafina foi inicialmente retirado com uma espátula e a superfície em seguida foi levemente lixada. Os resultados, como pode ser observado pela figura 32, demonstraram, como esperado devido ao efeito hidrorrepelente da parafina, um deslocamento total do revestimento sobre o bloco, já na fase de corte das amostras para ensaio.



Figura 32: detalhe do revestimento deslocado após selamento dos poros com parafina.

O deslocamento do revestimento pode ser explicado pela diminuição da área efetiva de contato entre a argamassa e a superfície do substrato, devido à parafina. A figura 33 ilustra o ensaio de medição da área de contato efetivo entre uma gota de água e a superfície do bloco cerâmico selada com parafina. O ensaio foi realizado com equipamento existente no LACER/UFRGS. Nota-se que o ângulo de contato resultante foi da ordem de 120° .

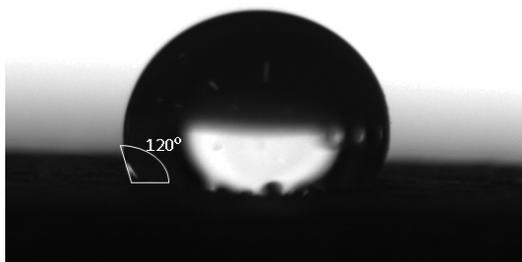


Figura 33: ângulo de contato entre gota d'água e superfície do bloco cerâmico selado com parafina

Conforme descrito na revisão bibliográfica, ângulos de contato superiores a 90 - 100° são considerados de superfícies hidrófobas, onde a molhabilidade - o contato efetivo entre as superfícies - fica comprometida.

Finalmente, os testes deste estudo exploratório levaram a consideração do uso da parafina para a realização de uma obstrução parcial de 50% da superfície porosa de contato. Uma vez comprovada a capacidade da parafina de interromper o contato entre a superfície porosa e a argamassa, com perda da capacidade de aderência à tração, a manutenção de 50% da superfície com uma porosidade "disponível" para contato com a argamassa permitiria verificar se a resistência de aderência à tração resultante deste conjunto ainda seria influenciada por uma pretensa relação entre a estrutura de poros remanescente dos blocos com diferentes temperaturas de queima, ou se seria influenciada predominantemente pela restrição imposta pela parafina.

Para a execução do acima exposto, foi utilizada o seguinte expediente de preparo, ilustrado esquematicamente na figura 34. As faces dos blocos foram divididas em 28 feixes de 1 cm de espessura. 50% destes feixes foram cobertos, de maneira alternada, com listras de 1 cm de fita gomada²², de modo a proteger a superfície do bloco. Após este procedimento, os feixes livres receberam uma aplicação superficial de um filme de parafina líquida. Após a secagem da parafina, o excesso da camada superficial foi raspado com uma espátula metálica e levemente lixado, resultando no aspecto da figura 35b. Após este procedimento, a fita gomada foi retirada dos demais feixes, preservando 50% da superfície original (figura 35a).

²² Popularmente também conhecida como "fita-adesiva" ou "fita-durex"

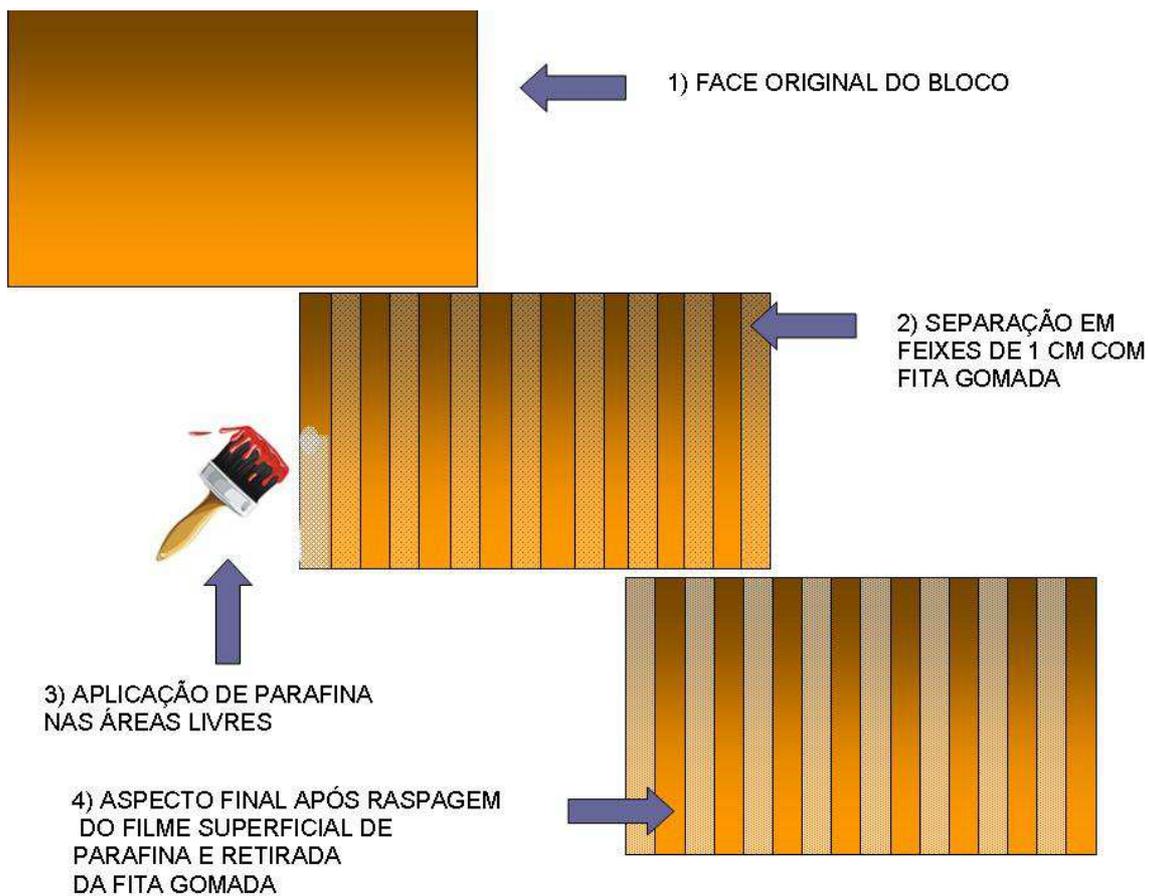


Figura 34: Representação do procedimento de selamento de 50% da superfície do blocos.

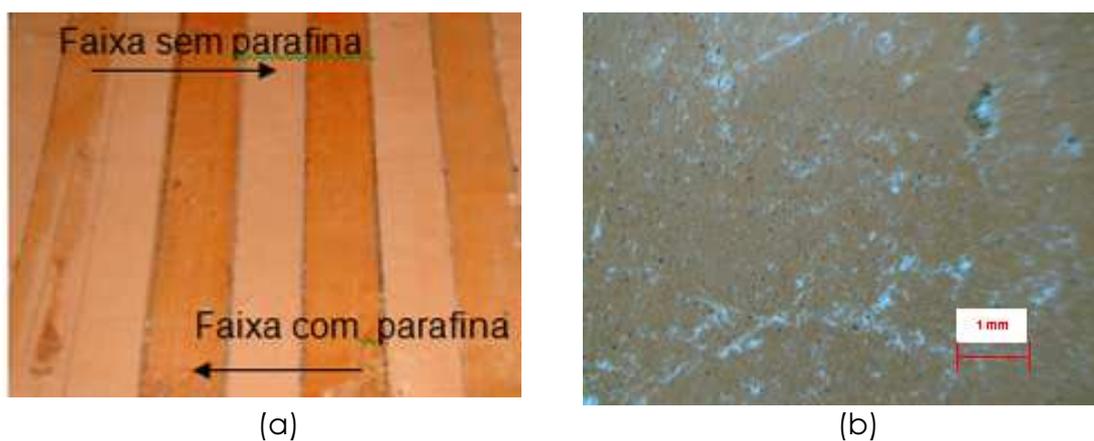


Figura 35: a) aspecto visual do selamento com parafina derretida de 50% da área potencial de contato da superfície porosa do substrato cerâmico e b) imagem de lupa estereoscópica da superfície com parafina.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados desenvolvidos durante a pesquisa experimental da tese, em conformidade com o exposto no capítulo anterior.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

Inicialmente, são apresentados na tabela 11 os resultados da caracterização da argamassa utilizada para o revestimento dos blocos. Face aos resultados, a mesma pode ser caracterizada, a partir das prescrições da NBR 13281, como uma R2, P5, D4, M5, C4, U6.

Tabela 11: resultados dos ensaios de caracterização da argamassa selecionada

| Ensaio | Norma | Resultado |
|--|--------------|--|
| Resistência à tração na flexão aos 28 dias | NBR 13279/05 | 1,62 MPa |
| Resistência à compressão aos 28 dias | NBR 13279/05 | 5,99 MPa |
| Densidade de massa no estado fresco | NBR 13278/05 | 1770,8 kg/m ³ |
| Densidade de massa aparente no estado endurecido | NBR 13280/05 | 1928,7 kg/m ³ |
| Coefficiente de capilaridade | NBR 15259/05 | 6,13 g/dm ² .min ^{1/2} |
| Retenção de água | NBR 13277/05 | 96% |
| Classificação da argamassa | NBR 13281/05 | R2, P5, D4, M5, C4, U6 |

A partir do descrito na tabela anterior, pode-se perceber que a argamassa apresentou as características inicialmente desejadas, de uma alta retenção de água, obtida a partir da seleção de um traço com alto conteúdo de cal. A

resistência à compressão e a densidade de massa no estado endurecido também podem ser consideradas com valores altos, à luz da NBR 13281 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). Mas, como debatido anteriormente, um dos objetivos da utilização da argamassa dosada foi de justamente criar um revestimento que aliasse alta retenção de água ("exigindo" mais dos diferentes poros nas diferentes temperaturas de queima a sucção da água disponível) e uma resistência mecânica mais alta para eventualmente compensar a falta do chapisco. Evidentemente, o uso de uma argamassa mais rica poderia levar à ocorrência de revestimentos mais fissuráveis, em função da retração. Entretanto, dadas as condições laboratoriais de ensaio - caixa de queda, área de aplicação restrita e tempo definido para sarrafeamento e desempenho, o índice de regiões com fissuras superficiais foi muito pequeno.

4.2 POROSIDADE E ABSORÇÃO DOS BLOCOS

Na seqüência, a tabela 12 e a figura 36 ilustram os resultados de caracterização dos blocos utilizados.

Tabela 12: caracterização dos blocos cerâmicos produzidos

| | Bloco 700 °C | Bloco 800 °C | Bloco 900 °C | Bloco 1000°C |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Absorção inicial de água (IRA) (g/194cm ² /min) | 9,08 | 9,78 | 14,43 | 14,73 |
| Absorção por capilaridade em 24 hrs (%) | 7,04 | 8,2 | 10,87 | 11,28 |
| Resistência mecânica à compressão (MPa) | 3,77 | 6,93 | 11,89 | 12,57 |

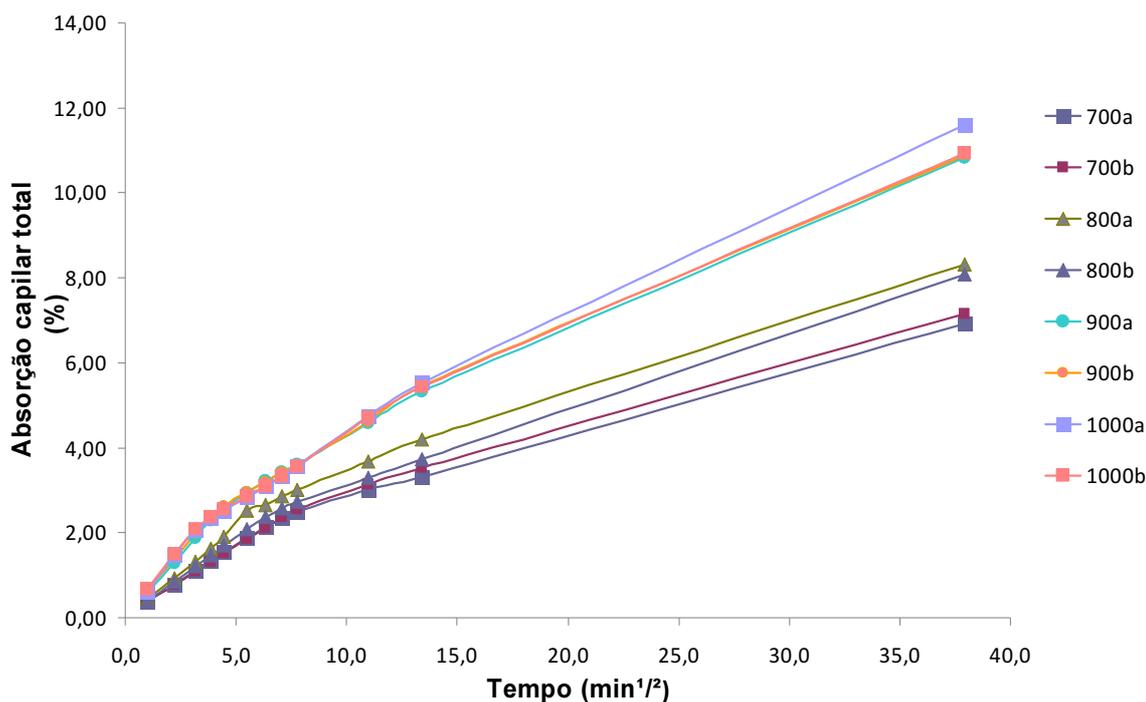


Figura 36: IRA e absorção capilar dos blocos ao longo do tempo, em função da temperatura de queima dos blocos cerâmicos.

Pode-se perceber claramente que há um comportamento muito parecido entre os blocos de 700 °C e 800°C quanto ao IRA (absorção inicial) e a absorção por capilaridade total. Da mesma forma, o comportamento dos blocos de 900 °C e 1000°C são similares entre si. Tal fato pode ser explicado novamente buscando-se a informação descrita por Pureza (2004) e já descrita na revisão bibliográfica deste trabalho. A faixa de temperatura de queima dos blocos entre 600°C e 800°C é responsável pelo colapso do retículo dos argilominerais, com a consequente liberação da água de constituição; entretanto, é próximo de uma faixa entre 900°C a 1000°C que as reações da sílica e da alumina com outros elementos ocorrem, formando silicoaluminatos complexos que conferem ao corpo cerâmico as suas propriedades físico-mecânicas características. Era de se esperar, possivelmente, que justamente essa densificação em temperaturas maiores devesse conduzir a um corpo cerâmico de 900°C ou 1000°C com uma quantidade de poros menor e consequentemente uma absorção capilar igualmente menor. Cabe lembrar, porém, que novamente Pureza (2004) coloca que a formação de uma fase vítrea, devida ao amolecimento e fusão dos silicoaluminatos, que confere dureza, compactação, impermeabilidade e resistência mecânica aos blocos, ocorre em

temperaturas próximas ou acima de 1000°C. Aparentemente, nenhum dos blocos disponíveis, queimados a 1000°C, atingiu este patamar, nas condições propostas em laboratório. O gráfico apresentado no trabalho Vieira et. al. (2009), e expresso na figura 37, corrobora com este raciocínio, ao demonstrar que somente amostras com 1100 °C tiveram uma queda brusca de absorção de água devido à sinterização, em relação a blocos de 700 e 900°C.

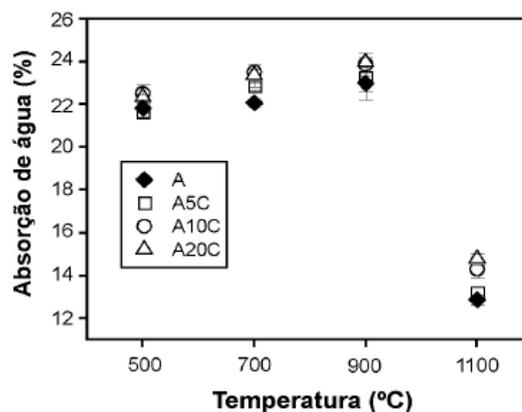


Figura 37: Absorção total de água de blocos cerâmicos apresentados no trabalho de Vieira et al. (2009).

Uma vez que em nenhuma das temperaturas avaliadas neste trabalho o amolecimento e fusão dos silicatos e aluminatos parece ter conduzido a uma vitrificação e impermeabilização completa das superfícies, é de se supor que o aumento das temperaturas de queima conduziu um refinamento gradual dos poros existentes/ remanescentes, e que isto esteja influenciando a maior sucção capilar dos substratos de 900 e 1000°C.

As figuras 38 e 39 ilustram o comportamento de absorção de água dos blocos cerâmicos, já descrita em conjunto pela figura 36, mas agora focando separadamente em cada amostra, nos momentos iniciais pós-contato entre a lâmina d'água e os blocos (primeiros 180 minutos). Estes seriam considerados os tempos fundamentais de contato necessários para, no caso posterior dos revestimentos, haver a migração de água e/ou pasta para o substrato e o início das reações de hidratação e endurecimento da argamassa.

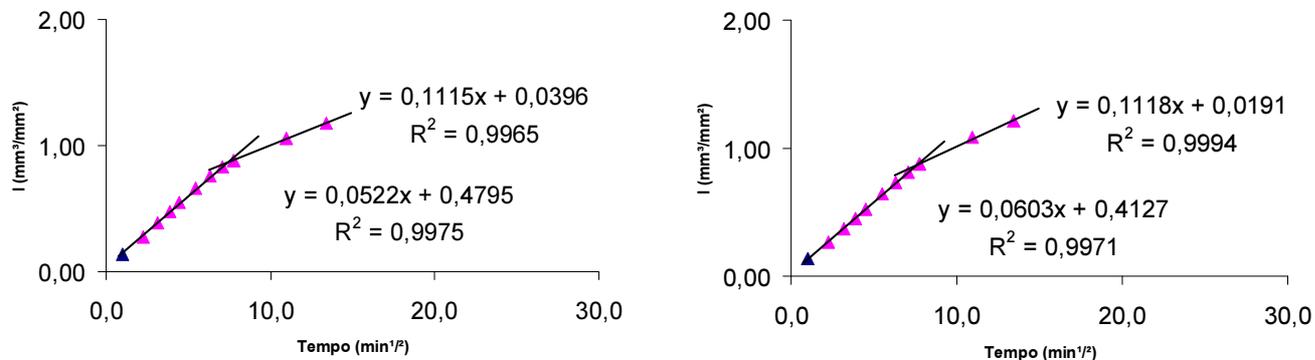
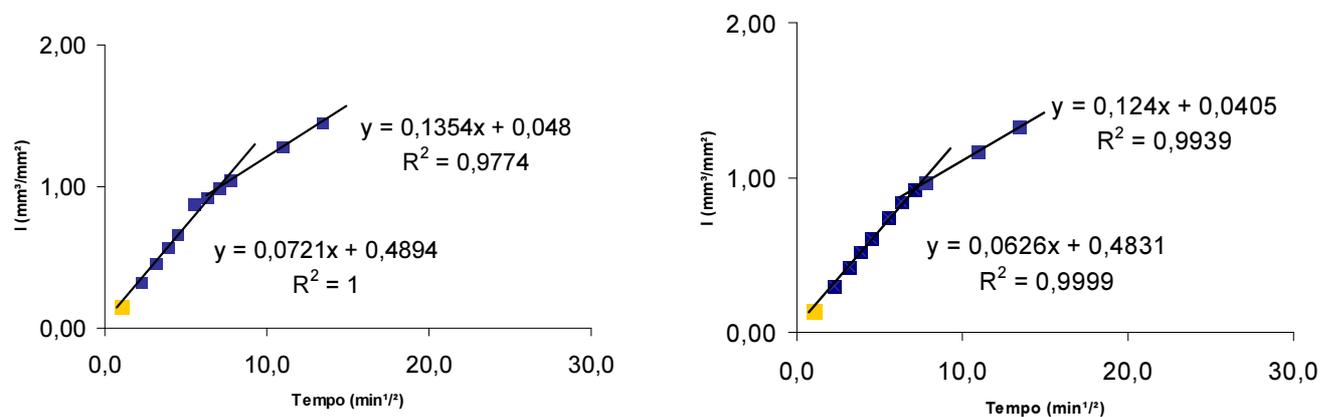
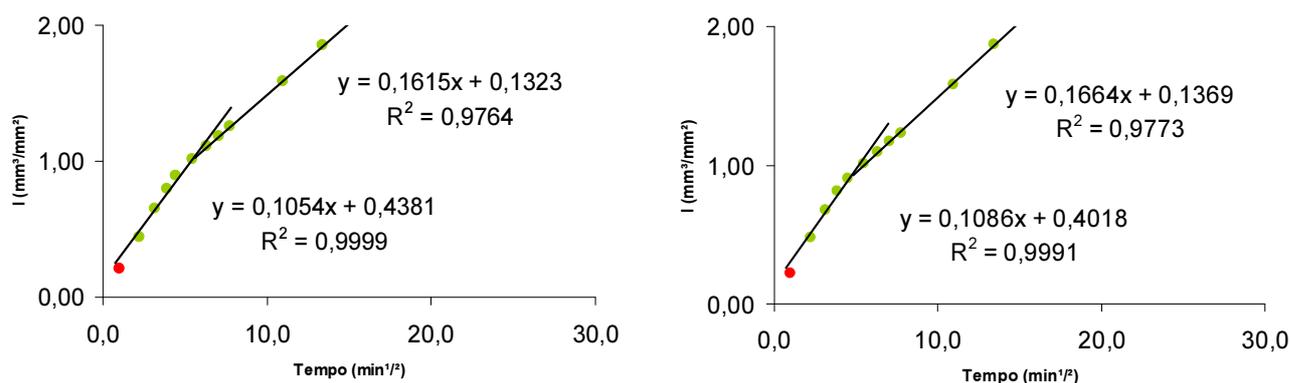
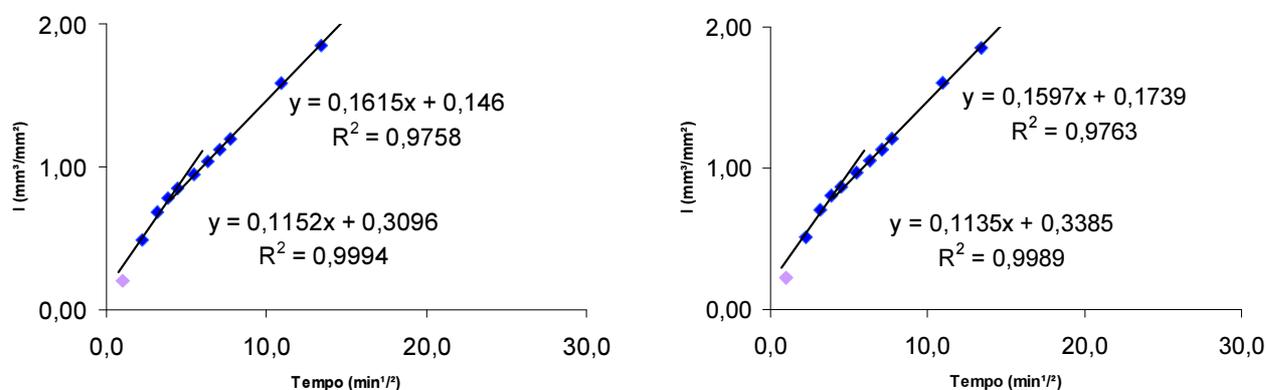
(a) Blocos de 700°C (b) Blocos de 800°C

Figura 38: Perfil Intensidade de absorção (mm^3/mm^2) versus raiz do tempo ($\text{min}^{1/2}$) - blocos de a) 700°C e b) 800°C



(a) Blocos de 900°C



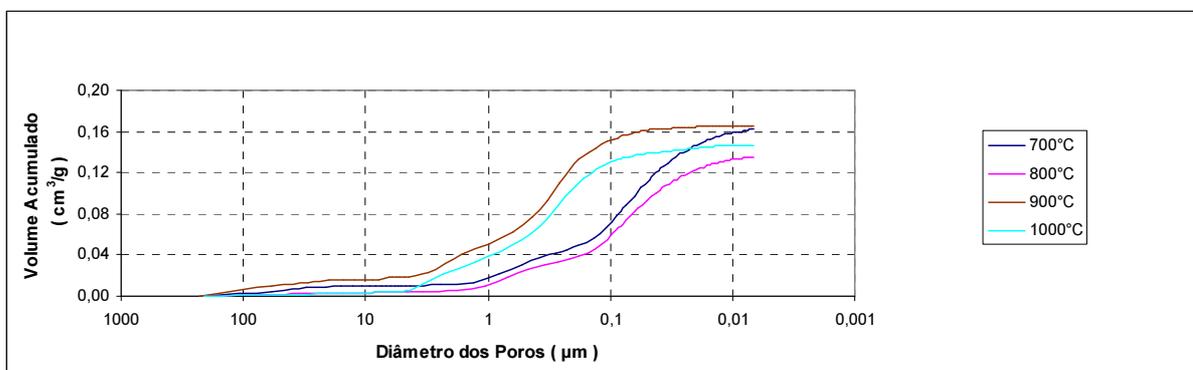
(b) Blocos de 1000°C

Figura 39: Perfil Intensidade de absorção (mm^3/mm^2) versus raiz do tempo ($\text{min}^{1/2}$) - blocos de a) 900°C e b) 1000°C.

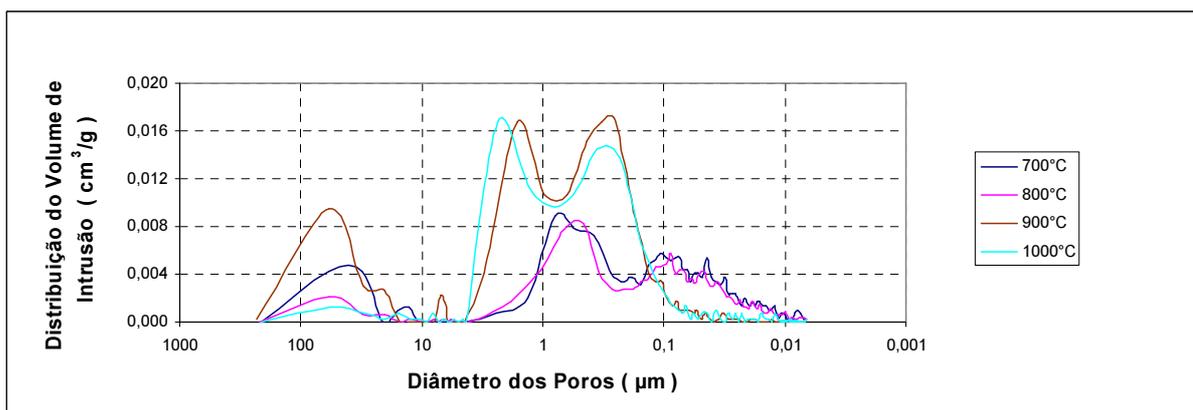
Buscou-se traçar linhas de tendência entre pontos de mesmo comportamento, de modo a identificar o momento onde ocorreu uma mudança de regime de transferência de água (ou uma mudança de absorvidade). Tal procedimento é similar ao proposto no ensaio de Kelham (1988) para concretos, muito embora seja importante ressaltar as devidas diferenças entre o comportamento de concretos em relação a blocos cerâmicos, bem como o ensaio aqui realizado. Percebe-se que nos blocos de 700°C e 800°C esta mudança de regime de absorvidade é bem clara e ocorre por volta de 60 minutos da aplicação (aproximadamente $7,7 \text{ min}^{1/2}$). Essa mudança no perfil de transporte é similar ao identificado por Paes (2004) no transporte de água pela argamassa fresca em blocos cerâmicos. Nos blocos de 900°C e 1000°C, esse regime se altera, sendo bem mais difícil a definição inequívoca de dois patamares diferenciados de absorvidade. O ponto de intersecção entre as

duas linhas de tendência ficou mais próximo de valores entre 30 e 40 minutos de contato (aproximadamente $5 \text{ a } 6 \text{ min}^{1/2}$). A melhor manutenção da velocidade de sucção de água pelos blocos de 900°C e 1000°C nos primeiros 180 minutos pode ser explicada pela maior quantidade de poros capilares presentes nestas amostras, em relação aos blocos de menor temperatura deste trabalho.

Coerente com esta perspectiva, os resultados dos ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio, ilustrados nos gráficos da figura 40, demonstram esta tendência. Novamente, nota-se (principalmente na faixa de $0,1$ a $10 \mu\text{m}$) um comportamento parecido entre os blocos de 700°C e 800°C , bem como entre os de 900°C e 1000°C . Os blocos de 900°C e 1000°C apresentaram um maior volume de intrusão de mercúrio na faixa de poros capilares.



(a)



(b)

Figura 40: distribuição de poros nas amostras de blocos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima: a) volume acumulado x diâmetro de poros e b) volume de intrusão x diâmetro dos poros.

4.3 ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

As figuras 41 à 44 ilustram exemplos dos resultados obtidos para a análise da rugosidade superficial dos blocos queimados em laboratório, nas diferentes temperaturas estudadas. Os perfis completos podem ser visualizados no apêndice 2.

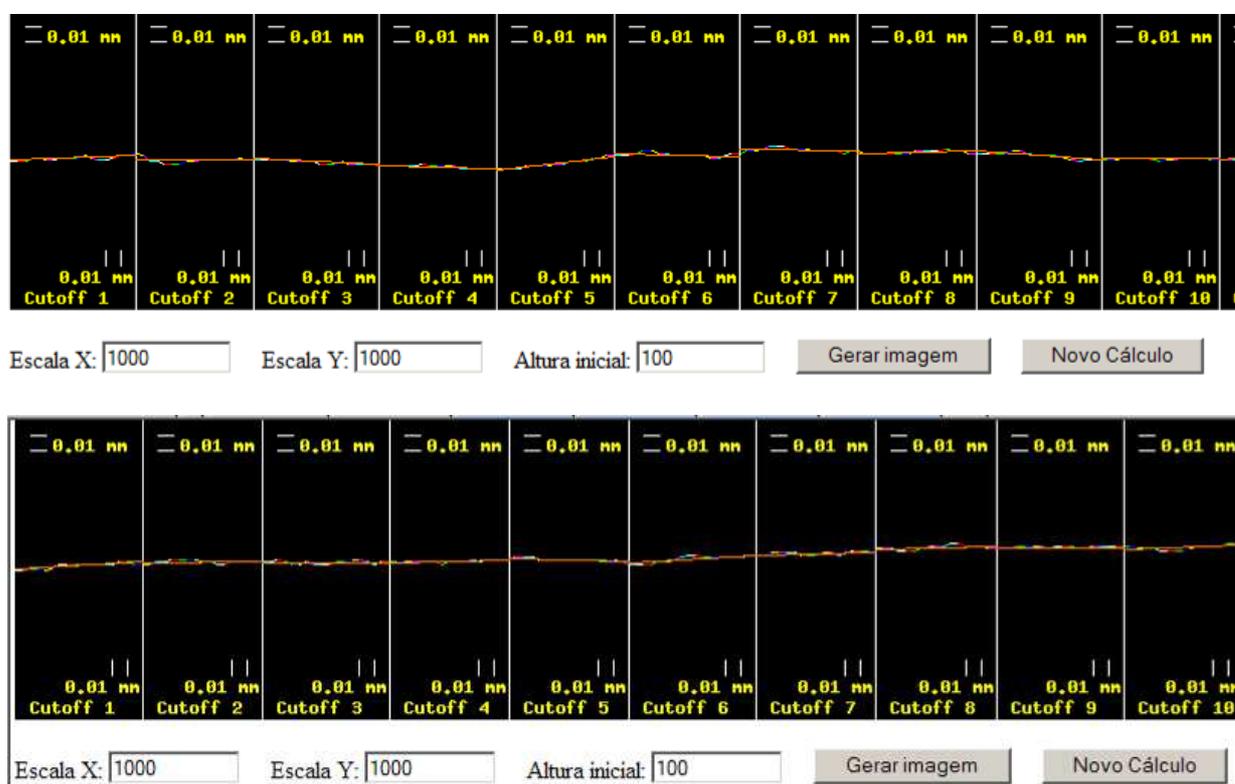


Figura 41: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 700°C

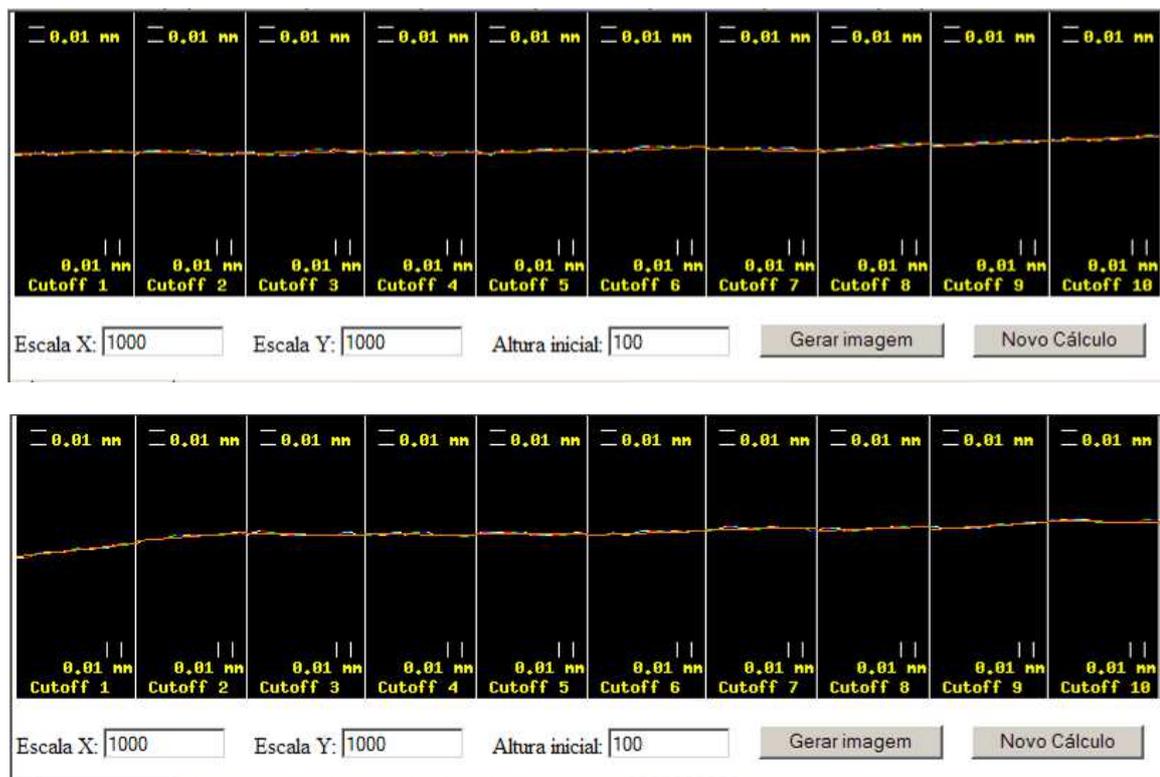


Figura 42: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 800°C

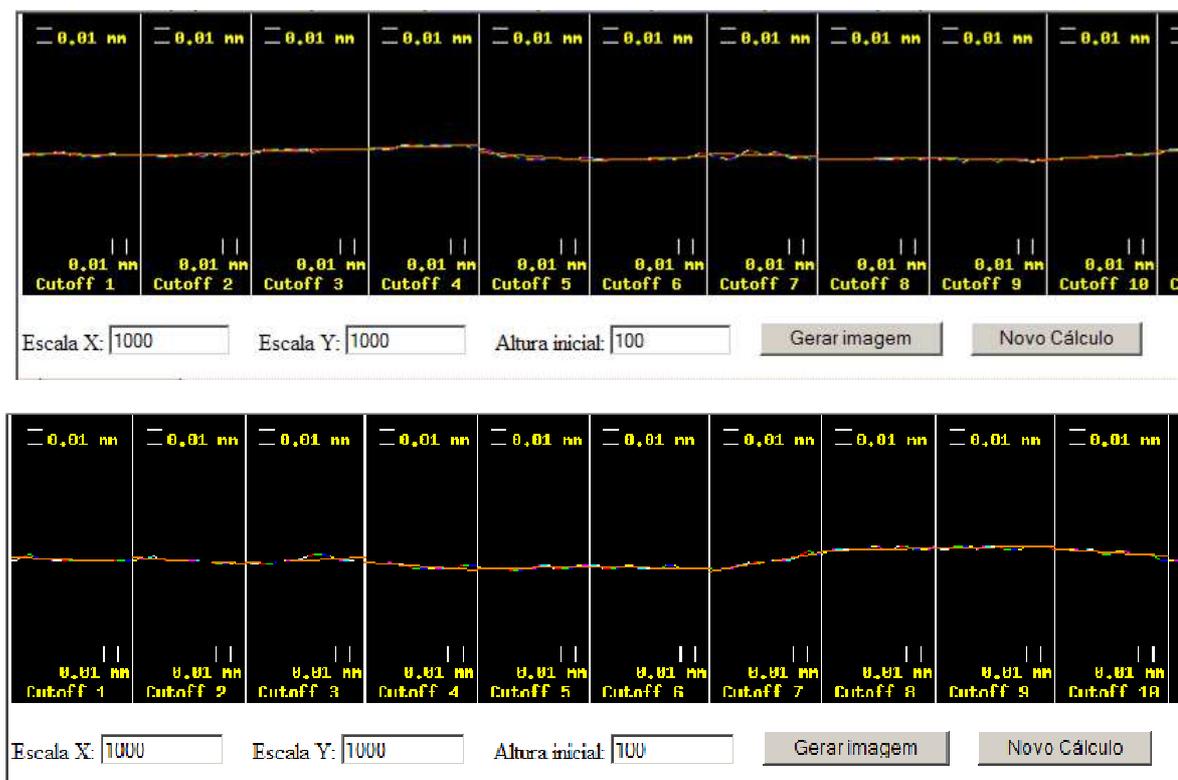


Figura 43: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 900°C

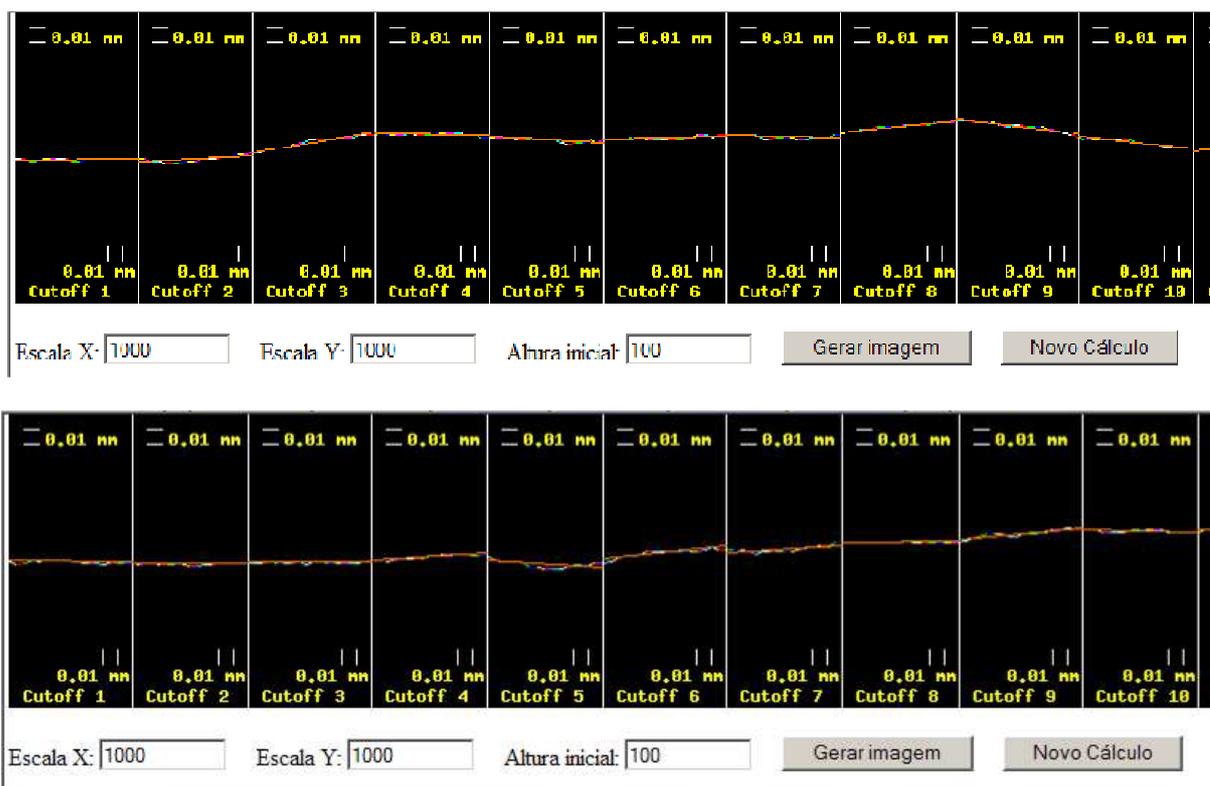


Figura 44: Exemplos de perfis de rugosidade para amostra de bloco de 1000°C

A tabela 13 ilustra os valores da rugosidade Ra média (em μm), para cada um dos cinco pontos analisados. Lembrando que cada ponto corresponde à média de 134 leituras, equivalente à rugosidade de uma linha de 10,727 mm, com um cut-off de 0,08 mm.

Tabela 13: rugosidade média Ra das áreas superficiais dos blocos cerâmicos lisos com diferentes temperaturas de queima.

| Temp. de queima do bloco | Ra médio (μm) – Áreas superficiais ensaiadas | | | | |
|--------------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 700 °C | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| 800 °C | 0,6 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,7 |
| 900 °C | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,9 |
| 1000 °C | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | 0,7 |

Da mesma forma, a tabela 14 ilustra os valores da rugosidade média R_q (em μm), para cada um dos cinco pontos analisados. Analogamente, cada ponto corresponde à média de 134 leituras, equivalente à rugosidade de uma linha de 10,727 mm, com um *cut-off* de 0,08 mm.

Tabela 14: rugosidade média R_q das áreas superficiais dos blocos cerâmicos lisos com diferentes temperaturas de queima.

| Temp. de queima do bloco | R_q (μm) – Áreas superficiais ensaiadas | | | | |
|--------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 700 °C | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 800 °C | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 900 °C | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,1 |
| 1000 °C | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 |

Através da análise de rugosidade com o uso do Scanner 3D, pode-se perceber que as diferenças de micro rugosidade dos blocos lisos praticamente inexisteram, tanto quando é analisada a rugosidade R_a como a Rugosidade R_q ²³. Esta informação é importante durante o momento da análise das resistências de aderência dos sistemas de revestimento com as diferentes porosidades e padrões de absorção, oriundas das diferentes temperaturas de queima dos blocos. Isto porque os resultados demonstram que, *a priori*, possíveis diferenças de resistência de aderência à tração das argamassas assentadas sobre os substratos cerâmicos podem ser advindas de outros fatores como a porosidade/absorção da base, das diferenças de macrorugosidade (da topografia da superfície lisa/estriada do bloco), mas não necessariamente de variações da micro rugosidade da base, e conseqüentemente da área potencial de contato em escala microscópica, em função de variações de temperatura de queima dos blocos cerâmicos.

A análise das imagens do ângulo de contato das superfícies dos blocos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima, corroboram com este argumento, uma vez que de fato todos apresentaram comportamento hidrofílico, ou seja, ângulos

²³ Lembrando que R_a é a média aritmética entre os valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição, e R_q a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro de um comprimento de amostragem.

inferiores a 90° . Uma amostra dos ensaios de ângulo de contato realizados nos blocos de diferentes temperaturas de queima estão ilustrados nas imagens da figura 45. Todos os ensaios foram realizados em equipamento disponível no LACER/UFRGS.

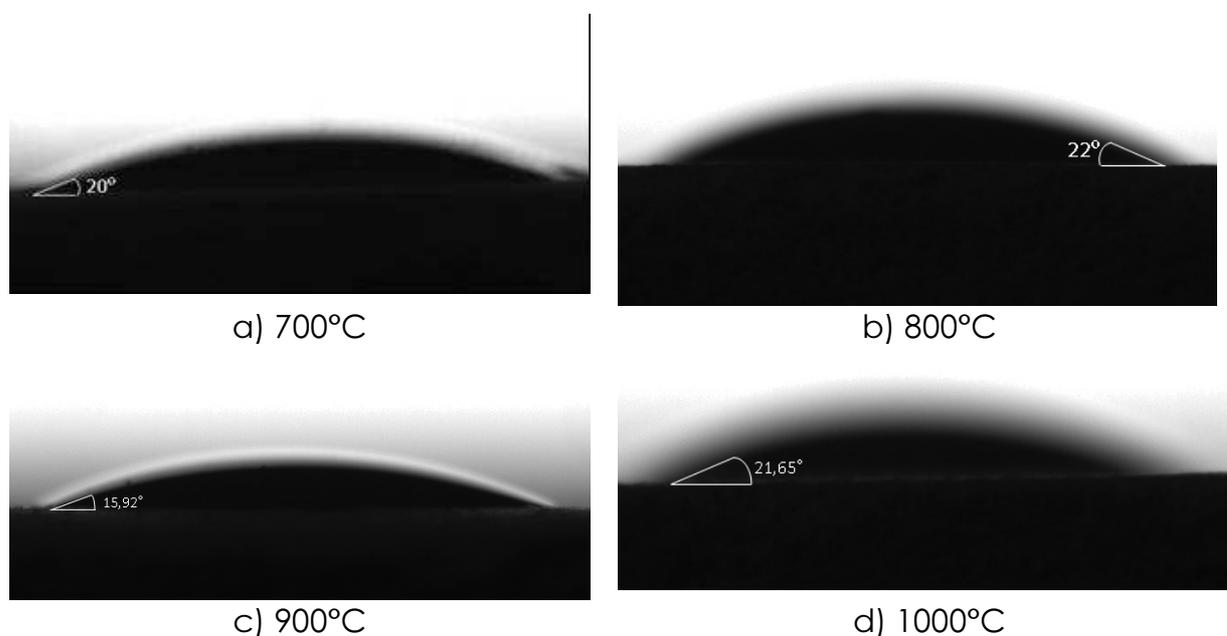


Figura 45: exemplos de ângulos de contato da superfície encontrados em amostras de blocos cerâmicos queimados nas temperaturas de a) 700°C b) 800°C c) 900°C e d) 1000°C

A tabela 15 ilustra os valores médios de ângulo de contato de cada bloco ensaiado, ao passo que a tabela 16 ilustra que não houve diferenças significativas entre as temperaturas de queima, neste quesito de ângulo de contato, quando realizado o teste de análise de variância, como auxílio do software *Statistica 7.0*.

Tabela 15: ângulo médio de contato da superfície dos blocos cerâmicos

| Temperatura de queima | Ângulo médio de contato |
|-----------------------|-------------------------|
| 700°C | 22,57° |
| 800°C | 25,15° |
| 900°C | 25,94° |
| 1000°C | 30,27° |

Tabela 16: análise estatística do efeito da temperatura de queima sobre o ângulo de contato superficial dos blocos cerâmicos.

| | SOMA QUADRÁTICA | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA QUADRÁTICA | Fator F | Valor p | VARIÂNCIA SIGNIFICAVA |
|-------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|---------|-----------------------|
| TEMPERATURA | 122,81 | 3 | 40,94 | 0,582 | 0,638 | NÃO |
| ERRO | 844,24 | 12 | 70,35 | | | |

4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA/PASTA NOS SUBSTRATOS

A figura 46 ilustra a média dos resultados do ensaio proposto para identificação do perfil de penetração de água e pasta nos substratos cerâmicos, com diferentes temperaturas de queima. Novamente, percebe-se claramente um padrão diferenciado entre os blocos de 700°C e 800°C em relação aos blocos de 900°C e 1000°C.

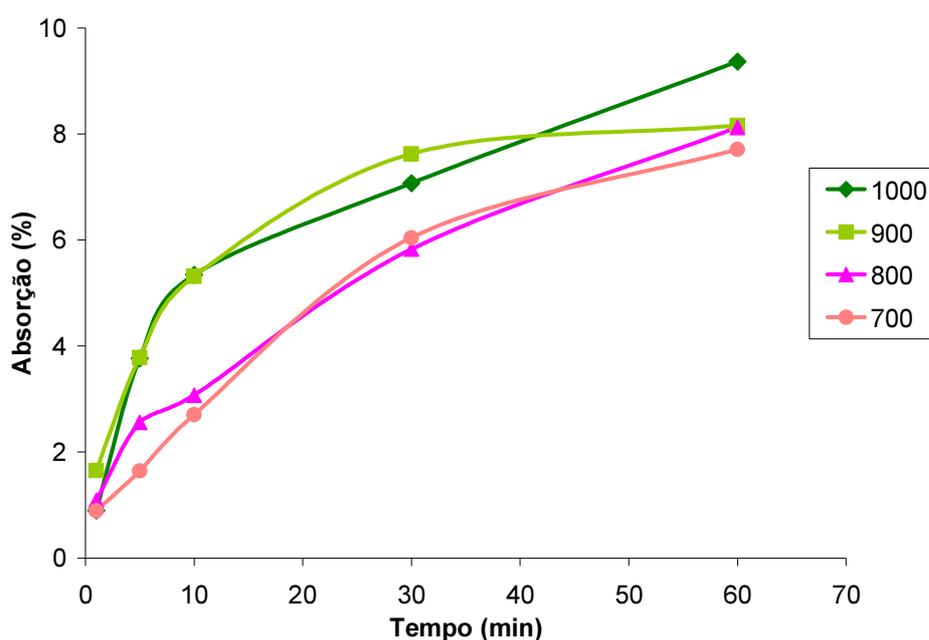


Figura 46: resultados do ensaio de absorção de água/pasta da argamassa nos substratos cerâmicos, em função da temperatura de queima dos blocos.

Comparando lado a lado os gráficos do ensaio de penetração de água e/ou pasta proposto com o gráfico do IRA e absorção capilar dos blocos, nos mesmos tempos de verificação (de 0 a 60 min, ou 0 a 7,5 min^{1/2}) são vistas semelhanças e diferenças

entre os mesmos (Figura 47). Em ambos novamente persiste uma "fronteira de comportamento" entre os blocos de 700 e 800°C em relação aos blocos de 900 e 1000°C. Esta fronteira é mais evidente, contudo, nestes momentos pós-aplicação da argamassa, em relação aos momentos pós-contato do bloco com a lâmina d'água do ensaio de absorção capilar. O ensaio da argamassa sobre a pastilha cerâmica resultou, após 60 minutos, em uma absorção de água e/ou pasta da ordem de 7% (para os blocos de 700°C) a 9% (para os blocos de 1000°C) da massa das pastilhas cerâmicas de aproximadamente 15 - 18 gramas.

As técnicas utilizadas nesta tese para medição do transporte de água e pasta evidentemente ainda não permitiram esclarecer de maneira definitiva o quanto deste percentual absorvido da argamassa corresponde à água e o quanto à pasta que migraram para o interior dos poros. Entretanto, na mesma linha do raciocínio empregado no capítulo anterior, servem para apontar que, se as diferentes temperaturas de queima não redundaram em perfis de rugosidade superficiais diferentes, redundaram em padrões diferentes de absorção de água e/ou pasta, sejam eles em que percentuais relativos (água/pasta) ocorrem.

A tabela com as medições completas deste trabalho constam no apêndice 3.

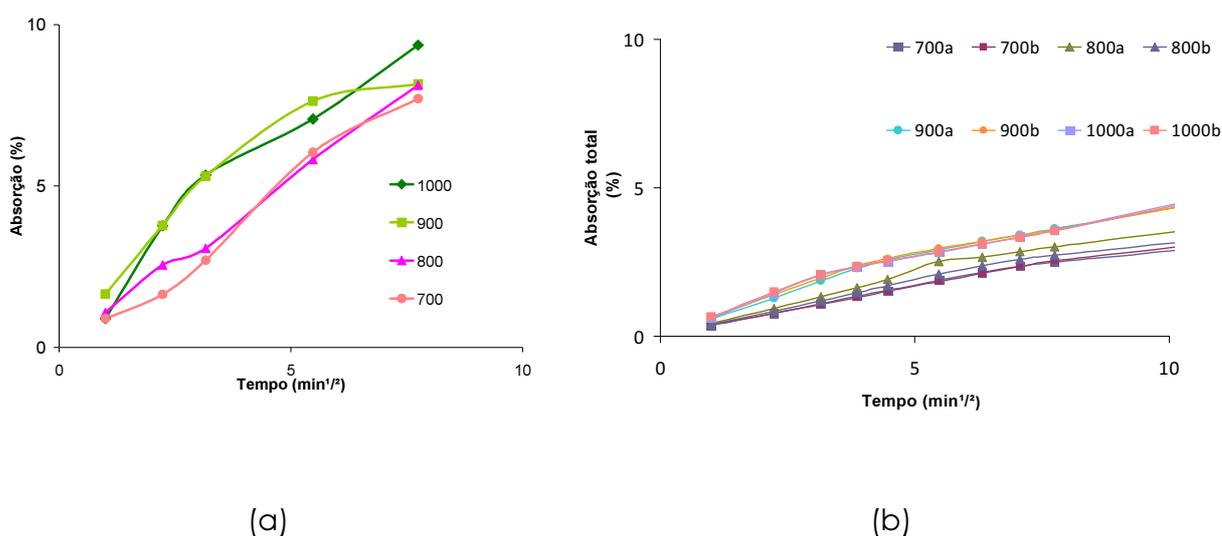


Figura 47: curvas do ensaio de absorção de a) água/pasta da argamassa nos substratos cerâmicos em comparação ao ensaio b) de absorção capilar.

4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SQUEEZE FLOW

A figura 48 ilustra o resultado do ensaio do *squeeze flow* realizado com uma argamassa com o mesmo proporcionamento utilizado neste trabalho, em conformidade com os procedimentos prescritos na NBR 15839/10, ou seja, tendo como base sobre a qual foi moldada a argamassa o disco metálico padrão (do ensaio). Este foi considerado o resultado de referência para ser comparado com os demais ensaios realizados, onde a base para a moldagem do disco de argamassa foram os blocos cerâmicos, lisos e estriados, em diferentes temperaturas de queima. Lembrando novamente que a intenção da realização do ensaio do *squeeze flow* não era de necessariamente caracterizar reologicamente as argamassas, mas sim, a partir de um ensaio dito de caracterização reológica, identificar mudanças no comportamento plástico da argamassa em função da alteração das condições de porosidade/ absorção de água e pasta da base durante o ensaio. Eventuais mudanças no comportamento reológico, quando identificadas, poderiam ser cruzadas com outros ensaios realizados e servir de suporte para o debate sobre possíveis alterações da resistência de aderência dos sistemas de revestimento com os substratos cerâmicos aqui estudados.

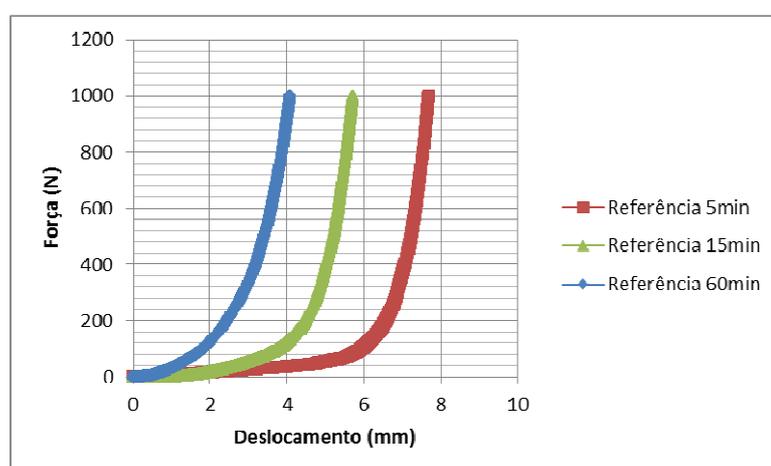


Figura 48: resultado do ensaio do *squeeze flow* segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada.

Nota-se que para as três curvas nos diferentes tempos de leitura, o chamado estágio de deformação elástica foi praticamente insignificante, sendo diferenciadas os estágios de deformação plástica de cada tempo de leitura. Para a curva representativa dos cinco minutos, tempo transcorrido entre a moldagem do

anel de argamassa na base metálica e a leitura na prensa, os deslocamentos registrados foram superiores a 5 mm com cargas inferiores a 200 N. Na amostra deixada em repouso por 15 min. antes do carregamento, a deformação da argamassa foi diferenciada, havendo um incremento significativo de carga já para deslocamentos próximos de 5 mm. Na leitura de 60 min., deslocamentos próximos de 3 mm já necessitaram de cargas muito superiores. Em outras palavras, a zona de deformação plástica (zona de fluxo viscoso) descrita por autores citados na revisão bibliográfica como Cardoso et al. (2005) se alterou. À medida que a argamassa foi perdendo água por evaporação e as reações de hidratação do cimento foram gradativamente ocorrendo na argamassa o estágio de enrijecimento por deformação foi ocorrendo com deslocamentos menores. Sempre levando em conta as controvérsias existentes nas interpretações do ensaio do *squeeze flow*, pode-se dizer que este comportamento era de certa forma esperado, uma vez que, à medida que a argamassa perde sua plasticidade com o tempo, diminui a sua zona de deformação plástica.

Através da figura 49, pode-se visualizar esta mudança de comportamento da argamassa.



(a) Ensaio sobre base padrão - argamassa com 5 minutos



(b) Ensaio sobre base padrão - argamassa com 60 minutos

Figura 49: imagens do ensaio do *squeeze flow* segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada, nos tempos de a) 5 minutos e b) 60 minutos.

Feita a análise do ensaio de referência, as figuras 50 e 51 ilustram o comportamento da mesma argamassa, agora se adaptando o ensaio do *squeeze flow*, e utilizando-se os blocos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima como bases porosas sobre as quais estas argamassas foram assentadas. Foi usada como nomenclatura de cada gráfico a temperatura de queima (700, 800, 900 e 1000) e se o bloco era de superfície lisa (L) ou estriada (E).

Aqui, pode-se inferir uma diferença no comportamento das argamassas aplicadas sobre os blocos cerâmicos em relação à base metálica padrão do ensaio. A chamada zona de enrijecimento por deformação ocorreu muito mais cedo, para todos os blocos ensaiados, quando os deslocamentos não ultrapassavam 4 mm (em relação ao referênci). Isso diminuiu, conseqüentemente, o estágio de deformação plástica. Essa resposta se dá coerentemente com a expectativa da argamassa que, perdendo parte de sua água de amassamento para os blocos, perde sua plasticidade mais rapidamente.

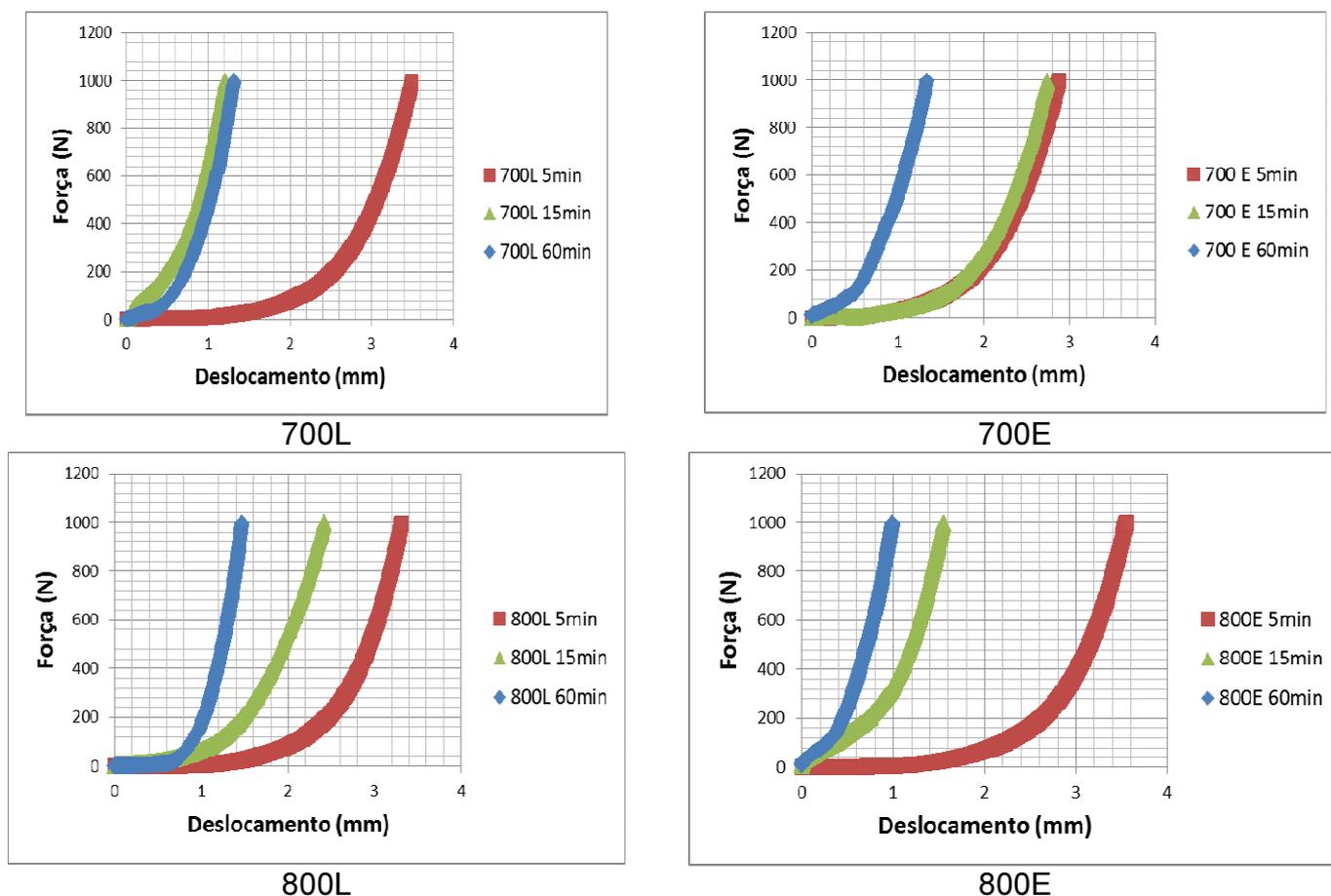


Figura 50: resultado do ensaio do *squeeze flow* segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada nos blocos lisos (L) e estriados (E) de 700°C e 800°C.

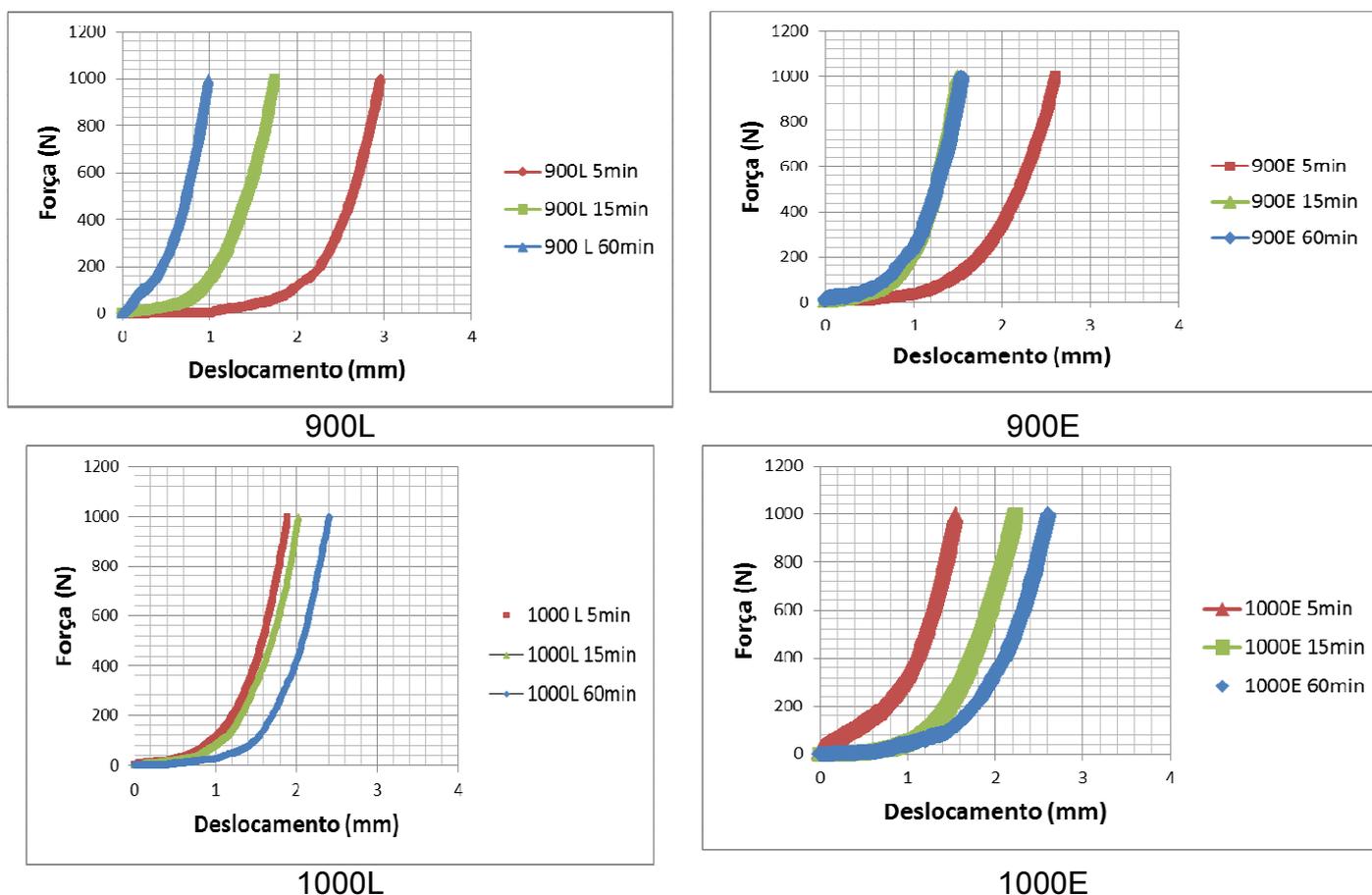


Figura 51: resultado do ensaio do *squeeze flow* segundo a NBR 15839/10 para a argamassa utilizada nos blocos lisos (L) e estriados (E) de 900°C e 1000°C.

O segundo ponto de análise consistiu em identificar diferenças entre as curvas das argamassas ensaiadas sobre a superfície dos diferentes blocos cerâmicos. Neste ponto, perceberam-se diferenças entre as argamassas assentadas sobre os blocos de 700°C e 800°C, em relação aos blocos de 900°C e 1000°C. Apesar da já citada diminuição geral do estágio plástico das argamassas sobre as peças cerâmicas, nos blocos de 700°C e 800°C, a fase plástica conseguiu manter-se por um tempo levemente superior nos primeiros 5 minutos, fato evidenciado através da curvatura dos gráficos em relação aos equivalentes em 15 e 60 minutos.

Nos blocos de 1000°C, a diminuição do estágio plástico foi significativa já aos 5 minutos, de modo que deslocamentos de 2 mm já demandaram cargas superiores. Nos blocos de 1000°C, o comportamento reológico das argamassas nele ensaiadas foi muito parecido tanto aos 5 minutos, como nos 15 e 60 minutos sendo que,

inclusive, os gráficos de 60 minutos inverteram levemente seu comportamento, apresentando uma leve tendência de possuir, ainda que minimamente, um estágio plástico maior do que aos 5 e 15 minutos. Conforme pode ser identificado em outras referências bibliográficas (CARDOSO, 2009; STOLZ, 2011) estas variações de carga podem ser explicadas pela ocorrência de fluxos descontínuos do material durante o espalhamento radial. Cardoso (2009) ainda afirma que fenômenos como estes podem estar relacionados aos mecanismos internos de deformação e fluxo dos materiais, principalmente quando a separação de fases atua aumentando a concentração localizada de agregados e o atrito na região central. Nesse sentido, partindo destes pressupostos teóricos, pode-se levantar a hipótese que, no caso dos blocos de 1000°C, a maior presença de poros capilares capazes de succionar água (e/ou pasta) em maior velocidade, pode ter criado um regime de vazão nos primeiros minutos pós-aplicação que aumentou a concentração localizada de agregados, gerando um fluxo descontínuo do material durante o espalhamento radial. Transcorridos 60 minutos, a gradativa diminuição da velocidade de fluxo de água/pasta em direção ao substrato e uma possível reorganização das partículas de agregados e pasta no meio visco-plástico da argamassa, permitiram que os deslocamentos fossem levemente maiores para uma mesma carga aplicada anteriormente, gerando esta variabilidade.

Além disso, em função da natureza do ensaio, ocorreram variações nas leituras de algumas amostras, tais como nos blocos 700E e 700L onde a curva de 15 minutos apresentou um comportamento anômalo. As mesmas explicações anteriores cabem aqui, além de possíveis ruídos experimentais.

Através do registro fotográfico descrito na figura 52, pode-se notar claramente que os blocos com maior temperatura de queima, como os de 1000°C, por exemplo, com 15 minutos de contato entre argamassa e substrato absorvente já apresentavam uma zona de umidade absorvida superior ao próprio diâmetro de contato entre ambos, fossem nos blocos lisos ou estriados. Nos blocos com temperaturas de queima inferiores, como os de 700°C, mesmo aos 60 minutos esse padrão de absorção não foi verificado.



Figura 52: imagens das argamassas moldadas sobre os blocos cerâmicos, em diferentes tempos, antes dos ensaios de *squeeze flow*.

Este comportamento pode ser correlacionado com os resultados de porosimetria por intrusão de mercúrio, apresentados no início do capítulo 4. Uma vez que os poros capilares apresentam-se em maior quantidade em blocos como o de 1000°C, era de se esperar que os mesmos apresentassem um maior grau de sucção em relação aos blocos de 700°C, onde a sucção capilar é mais limitada em função do diâmetro de poros existentes. A própria remoção da argamassa sobre os blocos, após o ensaio, foi um indicativo de como o comportamento de transferência de água e/ou pasta para o interior dos poros ocorre de maneira diferenciada, em

função das temperaturas de queima. Também demonstrou, conseqüentemente, como a adesão inicial das argamassas se diferencia, em função do tipo de bloco colocado como substrato. Através das imagens da figura 53, isso pode ser melhor observado.

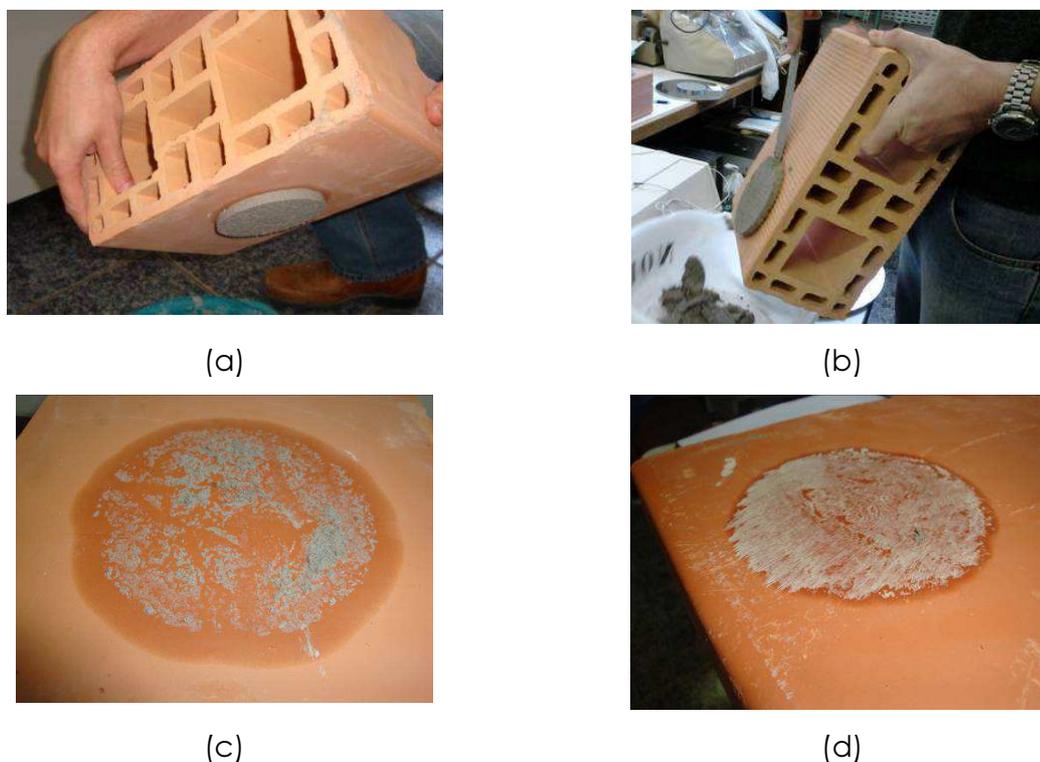


Figura 53: detalhes das argamassas moldadas sobre os blocos cerâmicos, após ensaios de squeeze flow - (a) argamassa aderida sobre bloco liso de 900°C após 5 min de contato; (b) argamassa aderida sobre bloco estriado de 900°C após 5 min de contato; (c) detalhe da interface bloco/argamassa após ensaio em bloco de 900°C - 5 minutos; (d) detalhe da interface bloco/argamassa após ensaio em bloco de 700°C - 5 minutos.

Como pode ser observado nas figuras 53a e 53b, já com 5 minutos de contato a argamassa assentada nos blocos de 900 °C, fossem estes lisos ou estriados, apresentava uma grande adesão, sendo difícil sua remoção sem o auxílio de uma espátula (comportamento igualmente visto nos blocos de 1000°C). A imagem da figura 53c ilustra como a argamassa, após sua retirada do substrato, ainda ficava de fato aderida em muitos pontos, sendo necessária uma raspagem da mesma. Já nos blocos de 700°C, como ilustra a imagem da figura 53d, era possível retirar facilmente a argamassa. Mais do que isso, percebia-se que sobre a face do bloco a argamassa havia simplesmente "escorrido", uma vez que sua adesão era menor ao

substrato, e possivelmente sua relação água/cimento junto à interface ainda permanecida alta, dado o fato de estarmos trabalhando com uma argamassa de alta retenção de água associada a um substrato com menor capacidade de absorção.

As fotos completas de todos os ensaios de *squeeze flow* estão colocadas junto ao apêndice 4.

4.6 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados individuais de resistência de aderência à tração dos blocos, lisos e estriados, estão disponíveis nas tabelas 17 a 20. O registro fotográfico das amostras ensaiadas consta no apêndice 1.

Tabela 17: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 700°C e 800°C.

| Substrato 700°C Liso | | | | | | Substrato 800°C Liso | | | | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|----------------------|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,12 | | 90 | 10 | | 1 | 0,13 | | | 90 | 10 |
| 2 | 0,18 | 20 | 80 | | | 2 | > 0,35 | | | 100 | |
| 3 | 0,11 | 100 | | | | 3 | > 0,21 | | | 100 | |
| 4 | 0,03 | 90 | 10 | | | 4 | > 0,21 | | | 100 | |
| 5 | 0,18 | | 100 | | | 5 | 0,18 | | 60 | 40 | |
| 6 | > 0,17 | | | 100 | | 6 | > 0,24 | | | 100 | |
| 7 | 0,13 | | 100 | | | 7 | 0,23 | | 90 | 10 | |
| 8 | 0,18 | | 90 | 10 | | 8 | 0,17 | | 20 | 80 | |
| Média | 0,14 | C.V.= | 39% | | | Média | 0,22 | C.V.= | 29% | | |

Tabela 18: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 900°C e 1000°C.

| Substrato 900°C Liso | | | | | Substrato 1000°C Liso | | | | | | |
|----------------------|------------------------|----------------------|---------|-----|-----------------------|--------------|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,15 | | 70 | 30 | | 1 | 0,26 | | 80 | 20 | |
| 2 | 0,15 | | 80 | 20 | | 2 | 0,25 | | 80 | 20 | |
| 3 | 0,18 | | 70 | 30 | | 3 | 0,46 | | 80 | 20 | |
| 4 | > 0,52 | | | 100 | | 4 | 0,33 | | 70 | 30 | |
| 5 | 0,42 | | 20 | 80 | | 5 | > 0,24 | | 100 | | |
| 6 | 0,47 | | 10 | 90 | | 6 | 0,31 | | 90 | 10 | |
| 7 | 0,20 | | 80 | 20 | | 7 | 0,20 | | 100 | | |
| 8 | - | | | | | 8 | 0,31 | | 80 | 20 | |
| Média | 0,3 | C.V.= | 54% | | | Média | 0,3 | C.V.= | 27% | | |

Tabela 19: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 700 °C e 800°C.

| Substrato 700°C Estriado | | | | | Substrato 800°C Estriado | | | | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|---------|-----|--------------------------|------|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,18 | 20 | 80 | | | 1 | 0,26 | 100 | | | |
| 2 | 0,24 | 100 | | | | 2 | 0,20 | 100 | | | |
| 3 | 0,03 | 30 | 70 | | | 3 | 0,30 | | | | |
| 4 | 0,17 | | 90 | 10 | | 4 | 0,53 | 50 | 50 | | |
| 5 | 0,33 | | 100 | | | 5 | 0,30 | | 100 | | |
| 6 | 0,37 | | 100 | | | 6 | 0,42 | | 90 | 10 | |
| 7 | 0,16 | 20 | 20 | 60 | | 7 | 0,28 | | 95 | 5 | |
| 8 | 0,23 | | 95 | 5 | | 8 | 0,18 | | 90 | 10 | |
| Média | 0,21 | C.V.= | 50% | | Média | 0,31 | C.V.= | 38% | | | |

Tabela 20: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 900 °C e 1000°C.

| Substrato 900°C Estriado | | | | | Substrato 1000°C Estriado | | | | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|---------|-----|---------------------------|------|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,55 | | 100 | | | 1 | 0,37 | | 100 | | |
| 2 | 0,40 | | 100 | | | 2 | 0,43 | | 100 | | |
| 3 | 0,29 | | 100 | | | 3 | 0,4 | | 100 | | |
| 4 | 0,37 | | 100 | | | 4 | 0,51 | | 100 | | |
| 5 | 0,34 | | 80 | 20 | | 5 | 0,44 | | 70 | 30 | |
| 6 | 0,23 | | 100 | | | 6 | 0,39 | | 70 | 30 | |
| 7 | 0,20 | | 100 | | | 7 | 0,36 | | 60 | 40 | |
| 8 | 0,36 | | 100 | | | 8 | 0,37 | | 90 | 10 | |
| Média | 0,34 | C.V.= | 32% | | Média | 0,41 | C.V.= | 12% | | | |

A norma de especificação para revestimentos de paredes e tetos, NBR 13749/96, preconiza que para cada grupo de seis pontos ensaiados, pelo menos quatro (ou seja 66% dos valores) devem apresentar valores de resistência de aderência à tração maiores do que os especificados (0,3 MPa para revestimentos externos e 0,2 MPa para revestimentos internos de paredes e tetos). Dessa forma, os resultados foram agrupados de modo a ilustrar como os conjuntos argamassa + diferentes blocos cerâmicos se comportaram quanto a estes requisitos.

A figura 54 ilustra os gráficos com o percentual de incidências de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa obtidos nos substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima.

Percebe-se que os blocos estriados apresentaram maior incidência de valores de resistência de aderência elevados em relação aos blocos lisos, e que a temperatura de queima também exerceu influência, elevando o percentual de valores acima

de 0,3 MPa à medida que aumentava-se a temperatura de queima dos blocos. Para os blocos de 700°C, a incidência de valores de resistência de aderência acima de 0,3 MPa foi ínfima, independentemente do uso do bloco liso ou estriado.

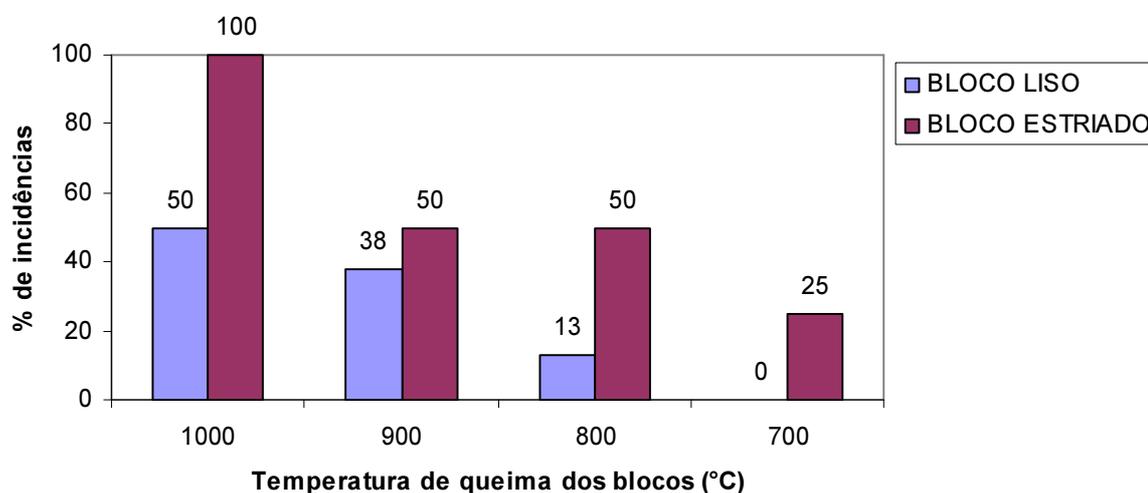


Figura 54: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa, nos substratos estudados.

Na sequência, a figura 55 ilustra os gráficos com o percentual de valores de aderência à tração superiores a 0,2 MPa, ou seja, acima dos requisitos mínimos para revestimentos de paredes e tetos em ambientes internos, obtidos nos substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima.

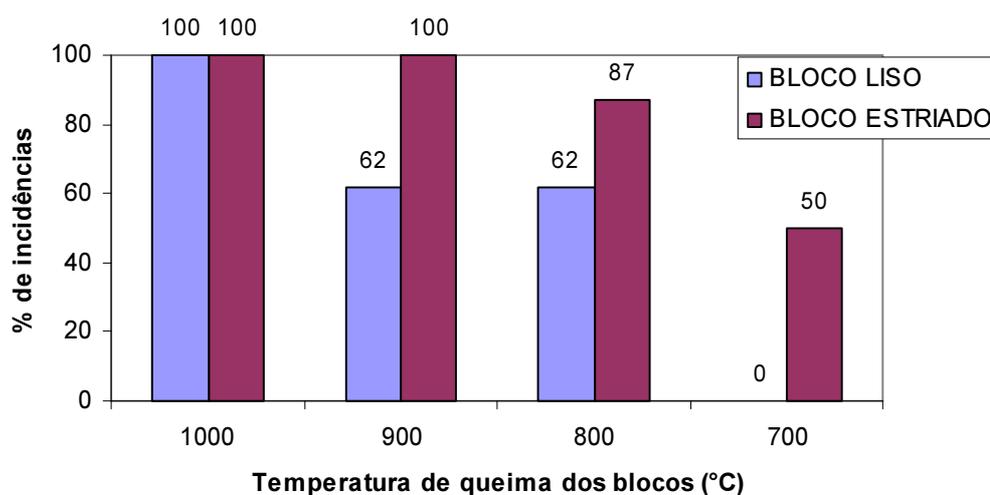


Figura 55: Percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados.

Analisando os resultados expressos na figura 55, pode-se perceber que, novamente, a temperatura de queima dos blocos, que gerou uma estrutura de poros diferenciada e por conseqüência uma absorção diferente dos blocos, retornou valores diferenciados de resistência de aderência. Neste caso, entretanto, os blocos estriados de 800, 900 e 100°C apresentaram alta incidência de valores acima dos 0,2 MPa para revestimentos internos. Os blocos lisos queimados a 1000°C apresentaram o mesmo comportamento dos blocos estriados, ou seja, 100% de incidências acima do mínimo para revestimentos internos, ainda que, para revestimentos externos (valores acima de 0,3 MPa), conforme visto na figura 54 os blocos de 1000°C apresentaram comportamento superior aos blocos de 900 °C. Novamente, os blocos com queima insuficiente (700°C) e consequentemente com uma estrutura de poros diferenciada em relação aos demais, apresentaram valores de resistência de aderência à tração muito baixos. No caso do bloco liso de 700°C, 100% das amostras ensaiadas apresentaram valores de resistência de aderência abaixo dos 0,2 MPa.

Por fim, buscando ressaltar o comportamento diferenciado dos blocos, a figura 56 ilustra, a partir dos mesmos dados amostrais obtidos em laboratório, os gráficos com o percentual de valores de aderência à tração inferiores a 0,2 MPa, ou seja, daquelas amostras que tiveram seu desempenho considerado insatisfatório, estando abaixo dos requisitos mínimos para revestimentos de paredes e tetos.

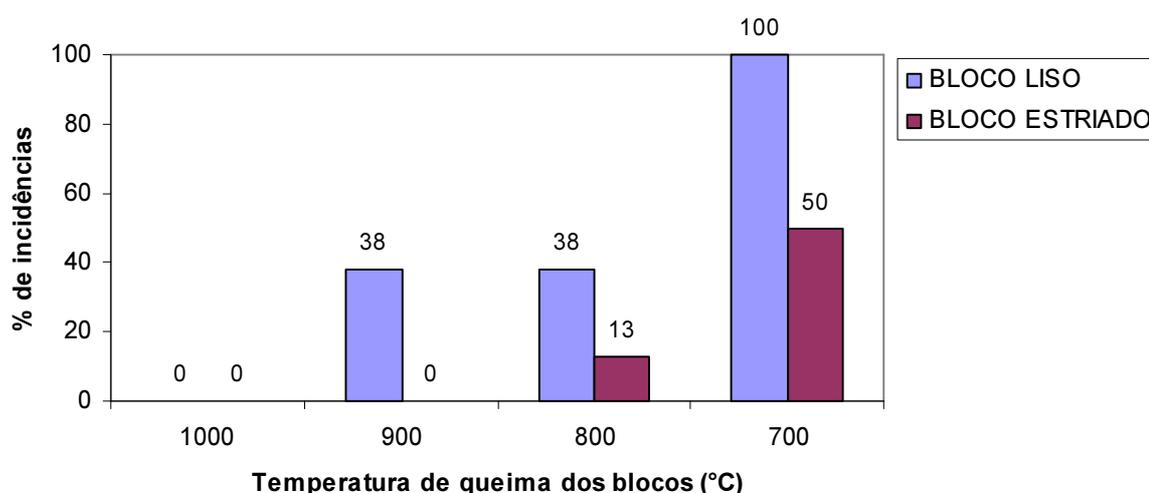


Figura 56: Percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados.

Percebe-se que o maior percentual de incidências de valores abaixo de 0,2 MPa ocorreu, analogamente ao comportamento apresentado nas figuras anteriores, para os blocos com menor temperatura de queima e, conforme esperado, foi mais pronunciado nos blocos de superfície lisa em relação aos blocos estriados. A estrutura de poros e o padrão de absorção de água dos blocos de 1000°C queimados em laboratório, independentemente da condição da superfície lisa ou estriada, foi suficiente para que não ocorressem, dentro das amostras ensaiadas no programa experimental, nenhum valor de aderência à tração inferior a 0,2 MPa, o mínimo estabelecido para revestimentos internos de paredes e tetos.

Esse aspecto é ainda mais relevante se for lembrado que todas as argamassas foram moldadas diretamente sobre os substratos cerâmicos, sem a presença de uma camada de preparo de chapisco. Obviamente, há de se considerar as condições de laboratório nas quais foram moldados os revestimentos, já descritos anteriormente, com o uso de uma caixa de queda vertical, seguida de cuidadoso e homogêneo processo de cura, além da própria argamassa utilizada. Reiterados estes aspectos, variações de aderência ocorreram, como pode ser bem visualizado pela figura 56, e, novamente o bloco de 700°C, mesmo com todas estas condições de contorno experimentais, apresentou alto índice de resultados insatisfatórios de resistência de aderência à tração, chegando à 50% das amostras de argamassa assentadas sobre os blocos estriados, e 100% nas amostras de argamassas assentadas sobre o substrato liso. Nos blocos de 800 e 900°C, os comportamentos foram similares entre si.

Cabe salientar que durante a realização dos ensaios (conforme pode ser visualizado anteriormente nas tabelas 17 a 20) praticamente não ocorreram rupturas dos revestimentos na interface argamassa/argamassa, sendo a maioria delas apresentadas na interface argamassa/substrato.

Com o intuito de comprovar a variabilidade amostral e a influência dos fatores controláveis, a tabela 21 apresenta a análise de variância (ANOVA) de todos os blocos ensaiados. A mesma foi realizada com o auxílio do software *Statistica 7.0*. Pelos resultados apresentados na tabela, pode-se admitir que, para o conjunto de amostras ensaiadas, ocorreu variação significativa dos valores de resistência de aderência à tração, sendo os mesmos influenciados diretamente pela mudança de absorção de água causada temperatura de queima dos blocos e pelo tipo de

superfície do bloco (liso ou estriado). Não foi verificada, contudo, influência estatística do efeito interativo temperatura x superfície.

Tabela 21: análise estatística do efeito da temperatura de queima e do tipo de superfície sobre a resistência de aderência à tração.

| | SOMA QUADRÁTICA | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA QUADRÁTICA | Fator F | Valor p | VARIÂNCIA SIGNIFICAVA |
|--------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|----------|-----------------------|
| TEMPERATURA | 0,285011 | 3 | 0,095004 | 9,93 | 0,000025 | SIM |
| SUPERFÍCIE | 0,102145 | 1 | 0,102145 | 10,67 | 0,001874 | SIM |
| TEMP. X SUP. | 0,009799 | 3 | 0,003266 | 0,34 | 0,795498 | NÃO |
| ERRO | 0,526285 | 55 | 0,009569 | | | |

Através das figuras 57 e 58, geradas também com o auxílio do software Statistica 7.0, pode-se identificar mais visualmente a variação da resistência de aderência à tração, em função do tipo da superfície dos blocos e da alteração da temperatura de queima.

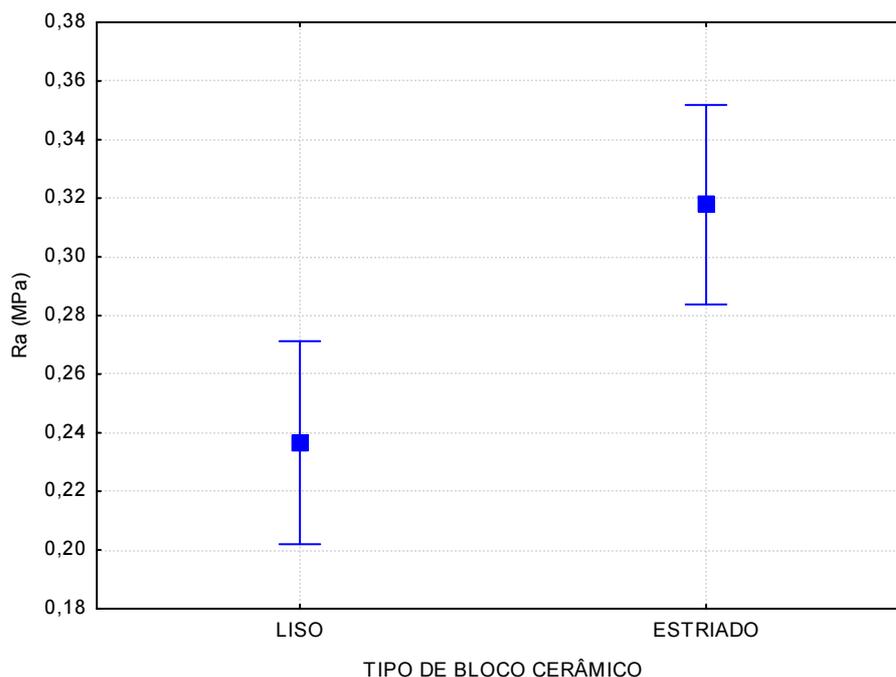


Figura 57: efeito do tipo de superfície do substrato cerâmico sobre a resistência de aderência à tração da argamassa de revestimento utilizada.

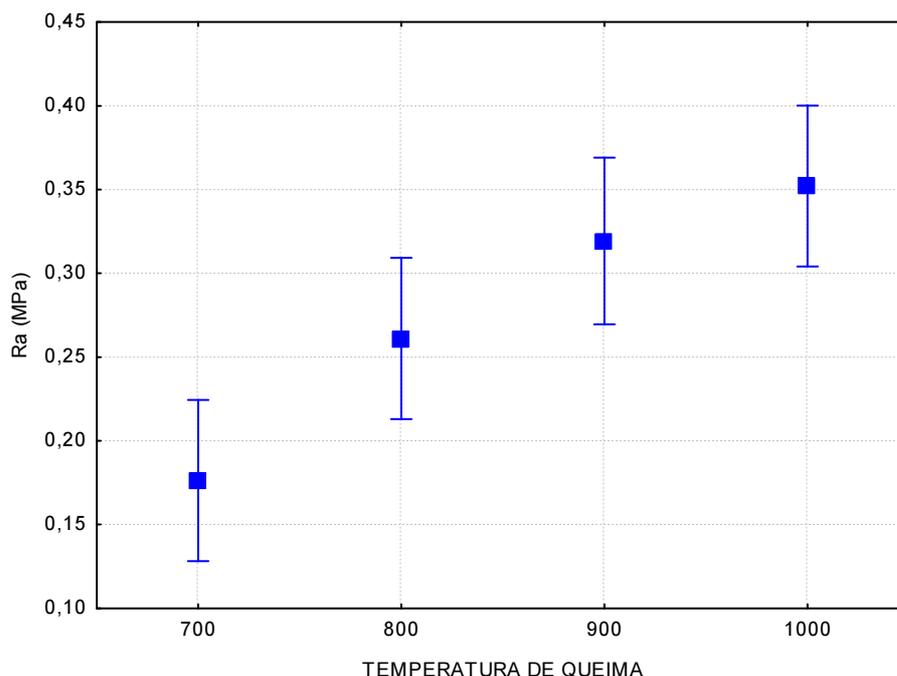


Figura 58: efeito da temperatura de queima do bloco cerâmico sobre a resistência de aderência à tração da argamassa de revestimento utilizada.

Como ilustram as figuras 57 e 58, à medida que se aumentou a temperatura de queima dos blocos (e assim alterou-se a absorção de água e a porosidade das superfícies), consequentemente aumentaram significativamente os valores de resistência de aderência à tração. Da mesma forma, para o conjunto total de amostras ensaiadas, o uso de substratos estriados (com maior área potencial de contato) retornou valores de aderência estatisticamente superiores em relação aos substratos lisos.

Na sequência deste trabalho pode-se observar o comportamento das argamassas produzidas quando assentadas sobre os mesmos substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima, mas agora com parte de sua porosidade/área de contato restringida pela parafina inserida em 50% da área superficial do substrato. Estes resultados estão expressos a seguir nas tabelas 22 à 25 e ilustram como o comportamento dos revestimentos alterou-se substancialmente.

Tabela 22: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 700 °C e 800°C com 50% de parafina na face de contato.

| Substrato 700°C Liso com 50% de parafina | | | | | | Substrato 800°C Liso com 50% de parafina | | | | | |
|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,10 | | 100 | | | 1 | 0,03 | | 100 | | |
| 2 | 0,00 | | 100 | | | 2 | 0,26 | | 100 | | |
| 3 | 0,00 | | 100 | | | 3 | 0,06 | | 90 | 10 | |
| 4 | 0,03 | | 100 | | | 4 | 0,12 | | 100 | | |
| 5 | 0,03 | | 100 | | | 5 | 0,09 | | 80 | 20 | |
| 6 | 0,00 | | 100 | | | 6 | 0,00 | | 100 | | |
| 7 | 0,10 | | 100 | | | 7 | 0,03 | | 100 | | |
| 8 | 0,03 | | 100 | | | 8 | 0,11 | | 100 | | |
| Média | 0,04 | C.V.= | | | | Média | 0,09 | C.V.= | | | |

Tabela 23: resultados de aderência à tração - blocos lisos de 900 °C e 1000°C com 50% de parafina na face de contato.

| Substrato 900°C Liso com 50% de parafina | | | | | | Substrato 1000°C Liso com 50% de parafina | | | | | |
|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|---|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,16 | | 100 | | | 1 | 0,27 | | 100 | | |
| 2 | 0,16 | | 100 | | | 2 | 0,12 | | 100 | | |
| 3 | 0,12 | | 100 | | | 3 | 0,18 | | 100 | | |
| 4 | 0,03 | | 100 | | | 4 | 0,17 | | 100 | | |
| 5 | 0,05 | | 100 | | | 5 | 0,11 | | 100 | | |
| 6 | 0,03 | | 100 | | | 6 | 0,3 | | 90 | 10 | |
| 7 | 0,03 | | 100 | | | 7 | 0,16 | | 100 | | |
| 8 | 0,12 | | 100 | | | 8 | 0,08 | | 100 | | |
| Média | 0,09 | C.V.= 69% | | | | Média | 0,17 | C.V.= 45% | | | |

Tabela 24: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 700 °C e 800°C com 50% de parafina na face de contato.

| Substrato 700°C Estriado com 50% de parafina | | | | | | Substrato 800°C Estriado com 50% de parafina | | | | | |
|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0,16 | | 100 | | | 1 | 0,14 | | 100 | | |
| 2 | 0,18 | | 100 | | | 2 | 0,11 | | 100 | | |
| 3 | 0,08 | | 100 | | | 3 | 0,16 | | 100 | | |
| 4 | 0,03 | | 90 | 10 | | 4 | 0,2 | | 100 | | |
| 5 | 0,03 | | 100 | | | 5 | 0 | | 100 | | |
| 6 | 0 | | 100 | | | 6 | 0,13 | | 100 | | |
| 7 | 0,07 | | 100 | | | 7 | 0 | | 100 | | |
| 8 | 0,07 | | 100 | | | 8 | 0 | | 100 | | |
| Média | 0,08 | C.V.= 81% | | | | Média | 0,09 | C.V.= 86% | | | |

Tabela 25: resultados de aderência à tração - blocos estriados de 900 °C e 1000°C com 50% de parafina na face de contato.

| Substrato 900°C Estriado com 50% de parafina | | | | | | Substrato 1000°C Estriado com 50% de parafina | | | | | |
|--|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|---|------------------------|----------------------|---------|-----|----------|
| n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | | n | Carga de ruptura (MPa) | Forma de ruptura (%) | | | |
| | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola | | | Sub. | Sub/Arg | Arg | Arg/cola |
| 1 | 0 | | 100 | | | 1 | 0,26 | | 100 | | |
| 2 | 0,26 | 10 | 90 | | | 2 | 0,09 | | 100 | | |
| 3 | 0,09 | | 100 | | | 3 | 0,34 | | 100 | | |
| 4 | 0,37 | 10 | 90 | | | 4 | 0,14 | | 100 | | |
| 5 | 0,06 | | 100 | | | 5 | > 0,27 | | | 100 | |
| 6 | 0,21 | | 100 | | | 6 | 0,17 | | 100 | | |
| 7 | 0,15 | | 100 | | | 7 | 0,13 | | 100 | | |
| 8 | 0,04 | | 100 | | | 8 | 0,16 | | 80 | 20 | |
| Média | 0,15 | C.V.= | 86% | | | Média | 0,2 | C.V.= | 43% | | |

A figura 59 ilustra o número absoluto de incidências e o percentual de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa, ou seja, acima dos requisitos mínimos para revestimentos de paredes em ambientes externos, obtidos nos substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima.

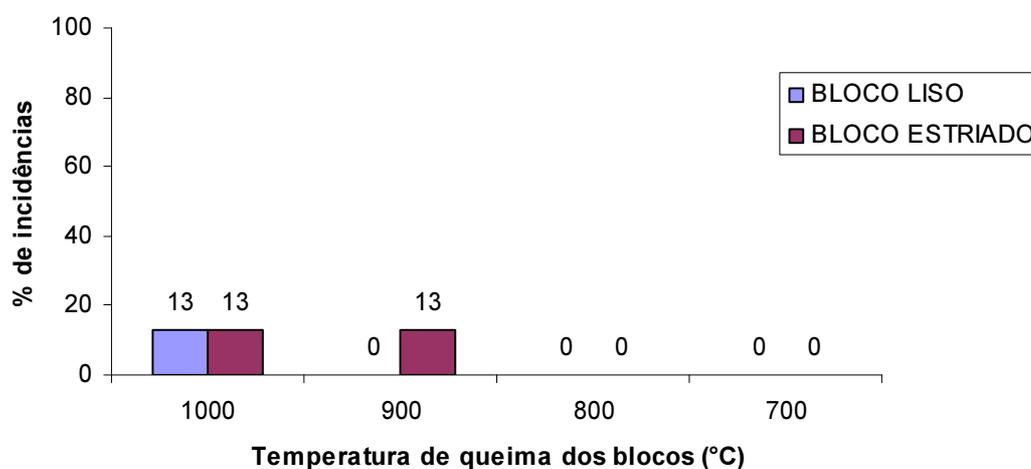


Figura 59: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,3 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada.

No momento que 50% da área superficial do substrato tem seus poros selados e seu contato superficial restringido com a argamassa de revestimento, caem vertiginosamente os valores de resistência aderência à tração superiores a 0,3 MPa. A incidência de valores acima deste valor só aconteceu para os blocos de 900 e 1000 °C, e ainda assim em um percentual quase residual. Se a temperatura de

queima dos blocos, nestas condições, pareceu ter pouca influência na garantia da aderência em valores acima de 0,3MPa, o mesmo não ocorre para valores acima de 0,2 MPa, conforme ilustra a figura 60.

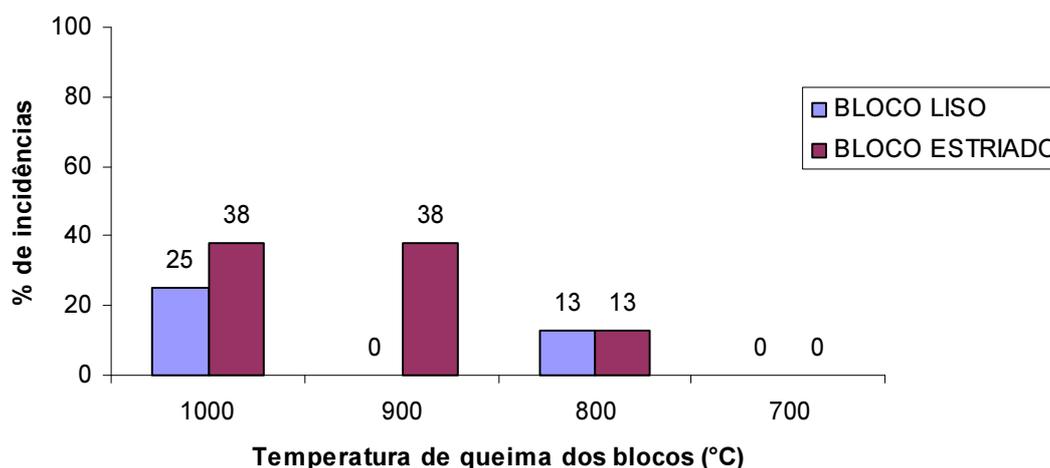


Figura 60: percentual de incidência de valores de aderência à tração superiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada.

Aqui, percebe-se claramente que, embora os valores de resistência de aderência continuem baixos em relação à primeira situação ideal de contato pleno e de porosidade 100% aberta, os blocos de 900°C e 1000°C conseguiram retornar um percentual de valores acima de 0,2 MPa superior aos blocos de 800 e 700 °C, podendo chegar a 38% do total de amostras, como foi o caso dos blocos estriados em temperaturas mais elevadas.

Já a figura 61 ilustra os percentuais de amostras, dentre os blocos ensaiados, cujos valores de resistência de aderência à tração foram inferiores a 0,2MPa. Novamente, à primeira vista, há a idéia de que o comportamento foi mais ou menos uniforme para todos os blocos, independentemente da temperatura de queima dos mesmos, a partir do momento que ocorreu o selamento dos poros com parafina. Entretanto, ao se buscar os valores individuais das amostras ensaiadas (tabelas 21 a 24), percebe-se que a incidência de valores muitíssimo baixos (menores do que 0,1 MPa) foi muito mais pronunciada nos blocos de 700 e 800°C. Se os mesmos forem dispostos em um gráfico, tal qual apresentado na figura 62, pode-se visualizar mais

claramente que sim, a temperatura dos blocos retornou valores diferenciados de resistência de aderência.

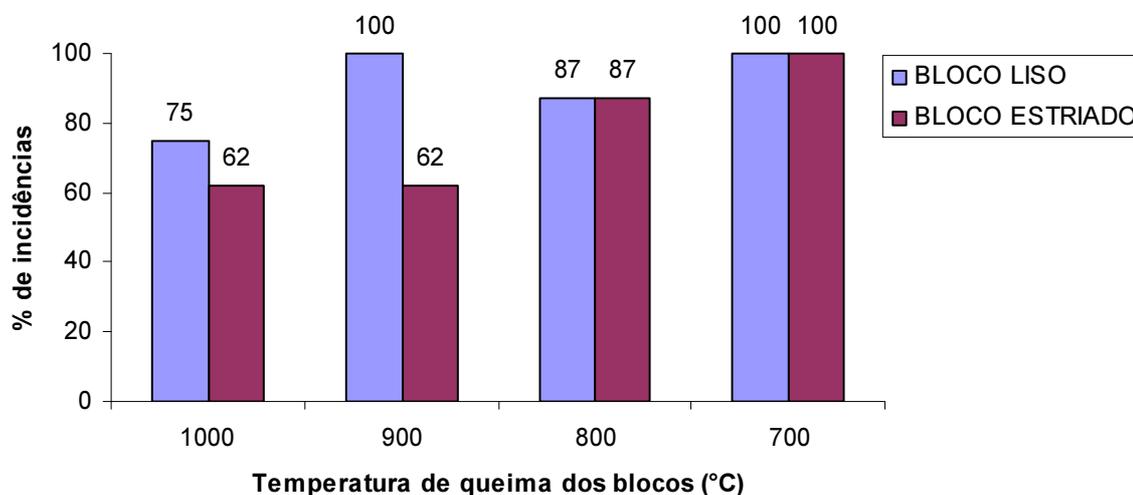


Figura 61: percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,2 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada.

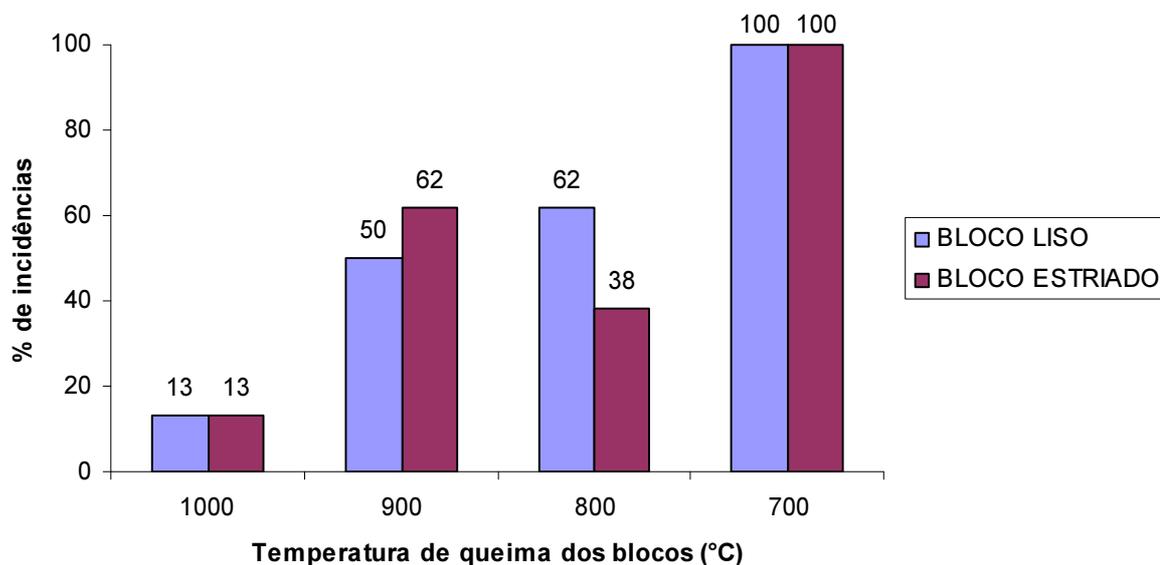


Figura 62: Percentual de incidência de valores de aderência à tração inferiores a 0,1 MPa, nos substratos estudados, quando 50% da área potencial de absorção do substrato é selada.

Nos blocos queimados a uma temperatura de 700°C, 100% dos valores de aderência ficaram abaixo de 0,1 MPa, em um claro indício de quase ausência de aderência entre a argamassa e o substrato. Já para os blocos queimados a 1000°C, este valor não passa de 13%.

Novamente, visando compreender os dados, procedeu-se a análise estatística com auxílio do software *Statistica 7.0*. O selamento dos poros de parte da superfície de contato reduziu consideravelmente os valores de resistência de aderência à tração. Pela tabela 26 percebe-se, entretanto, que a temperatura de queima dos blocos permanece apresentando variância estatística significativa, demonstrando que, independentemente do uso de parafina e do selamento de parte dos poros, a capacidade de absorção dos blocos advinda da queima influenciou significativamente os resultados de resistência de aderência à tração. Por outro lado, a existência de uma superfície lisa ou estriada, neste caso, não alterou estatisticamente os resultados de resistência de aderência à tração.

Tabela 26: análise estatística (ANOVA) do efeito da temperatura de queima e do tipo de superfície (lisa ou estriada) sobre a resistência de aderência à tração, quando se reduz em 50% o potencial de absorção do substrato.

| | SOMA QUADRÁTICA | GRAU DE LIBERDADE | MÉDIA QUADRÁTICA | Fator F | Valor p | VARIÂNCIA SIGNIFICAVA |
|--------------|-----------------|-------------------|------------------|---------|----------|-----------------------|
| TEMPERATURA | 0,143387 | 3 | 0,047796 | 7,4948 | 0,000265 | SIM |
| SUPERFÍCIE | 0,016473 | 1 | 0,016473 | 2,5831 | 0,113634 | NÃO |
| TEMP. X SUP. | 0,006107 | 3 | 0,002036 | 0,3192 | 0,811438 | NÃO |
| ERRO | 0,357124 | 56 | 0,006377 | | | |

Visando dar um panorama geral de todos os resultados até então apresentados no ensaio de aderência, a tabela 27 faz uma compilação de todas as amostras com valores acima de 0,3 MPa (acima do mínimo exigido para revestimentos externos), abaixo de 0,2 MPa (abaixo do mínimo para revestimentos internos) e abaixo de 0,1 MPa (aqui a critério desta tese considerados os valores críticos de resistência de aderência).

Ainda com o intuito de melhor visualizar essa mudança de comportamento das resistências de aderência à tração em função das mudanças de absorção oriundas das temperaturas de queima dos blocos cerâmicos, os dados da tabela 26 estão descritos de forma gráfica na figura 63. Estão descritos os valores de incidências de

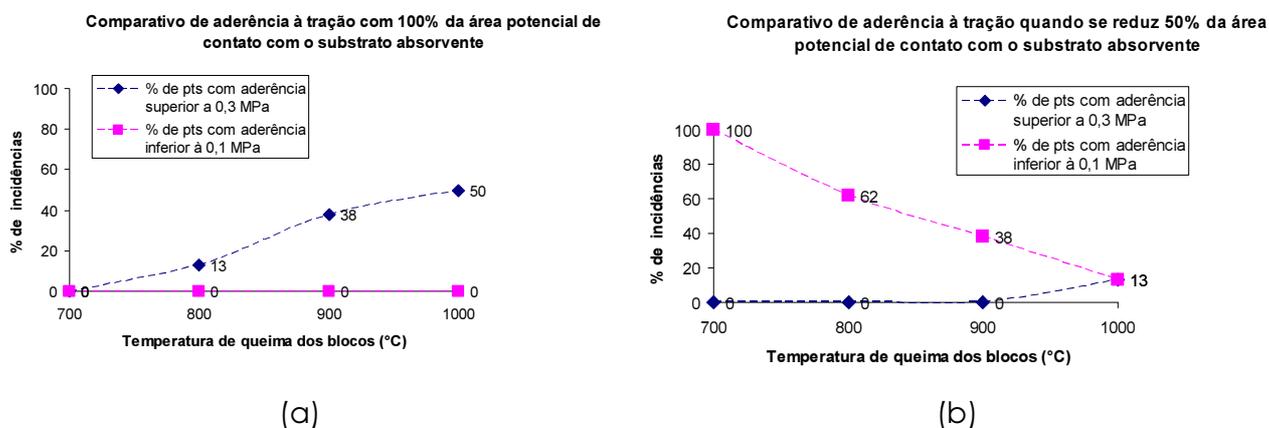
aderência à tração nas condições de exigência superior da norma NBR 13749/96, ou seja, acima de 0,3 MPa, bem como o percentual de incidências de valores abaixo de 0,1 MPa, aqui considerados como os valores críticos.

Tabela 27: resumo das incidências de valores de resistência de aderência à tração (Ra) nos ensaios realizados do trabalho.

| Substrato Cerâmico | Temperatura | % de valores de Rad acima de 0,30 MPa | % de valores de Rad abaixo de 0,20 MPa | % de valores de Rad abaixo de 0,10 MPa | Rad médio (MPa) |
|--|--------------------|--|---|---|------------------------|
| LISO | 1000°C | 50 | 0 | 0 | 0,30 |
| | 900°C | 38 | 0 | 0 | 0,30 |
| | 800°C | 13 | 38 | 0 | 0,22 |
| | 700°C | 0 | 100 | 0 | 0,14 |
| ESTRIADO | 1000°C | 100 | 0 | 0 | 0,41 |
| | 900°C | 50 | 0 | 0 | 0,34 |
| | 800°C | 50 | 13 | 0 | 0,31 |
| | 700°C | 25 | 50 | 0 | 0,21 |
| LISO COM 50% DE PARAFINA NA SUPERFÍCIE | 1000°C | 13 | 75 | 0 | 0,17 |
| | 900°C | 0 | 100 | 38 | 0,09 |
| | 800°C | 0 | 88 | 62 | 0,09 |
| | 700°C | 0 | 100 | 100 | 0,04 |
| ESTRIADO COM 50% DE PARAFINA NA SUPERFÍCIE | 1000°C | 13 | 62 | 13 | 0,20 |
| | 900°C | 13 | 62 | 62 | 0,15 |
| | 800°C | 0 | 88 | 38 | 0,09 |
| | 700°C | 0 | 100 | 100 | 0,08 |

Através da figura 63 pode-se perceber que a restrição do contato de 50% da área superficial do substrato poroso redundou em significativas perdas de aderência. Entretanto, é possível perceber também que as temperaturas de queima (e portanto as porosidades diferentes da superfície) proporcionaram um efeito residual de resistência de aderência diferenciado de acordo com o tipo de bloco. Por exemplo, se nos blocos de 700°C e 1000°C com 100% de potencial contato o número de incidências de valores de Rad inferiores a 0,1 MPa era zero, ao se restringir 50% da área de contato da superfície, os valores de Rad inferiores a 0,1 MPa subiram para 100% das incidências nos blocos lisos de 700°C, mas apenas 13% nos blocos lisos de 1000°C.

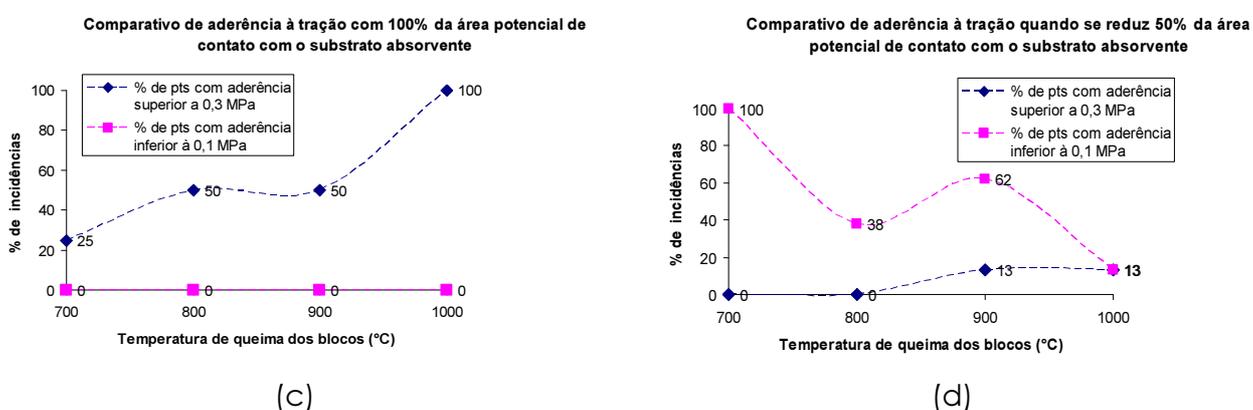
BLOCO CERÂMICO LISO



(a)

(b)

BLOCO CERÂMICO ESTRIADO



(c)

(d)

Figura 63: resumo dos resultados de ensaio de aderência à tração a) bloco liso, 100% da área potencial de contato com o substrato absorvente; b) Bloco liso, 50% da área potencial de contato com o substrato absorvente; c) bloco estriado, 100% da área potencial de contato com o substrato absorvente; d) Bloco estriado, 50% da área potencial de contato com o substrato absorvente.

Uma análise diferenciada entre as regiões de ruptura com e sem restrição pela parafina pode ser observada através da figura 64. As mesmas foram obtidas através do uso de uma lupa estereoscópica, com resolução de 20 vezes. Ali estão ilustradas as regiões de interface do bloco cerâmico e da amostra de argamassa arrancada por tração.

Percebe-se pelo detalhe “D” da figura 64 que onde havia possibilidade de migração de água e/ou pasta para o interior dos poros do substrato, a ruptura ocorreu microfraturando a região de interface, com parte da pasta ficando retida junto à superfície do bloco cerâmico, despreendendo-se da amostra tracionada. A

interface da amostra ficou com alguns agregados de maior granulometria expostos (detalhe "B"), diferentemente do detalhe "A", onde a pasta/argamassa da interface foi quase totalmente removida do substrato junto com a amostra tracionada. Na região onde a parafina foi aplicada selando a superfície (e os poros), a ruptura aparentemente ocorreu por deslocamento (detalhe "C"), sendo que a superfície do substrato na região ficou praticamente "limpa", ou seja, apenas com ocorrências muito pontuais de pasta aderida. Esse comportamento teve como reflexo a incidência de valores de aderência à tração menores, como se pode notar, para os blocos com 50% da porosidade superficial selada.

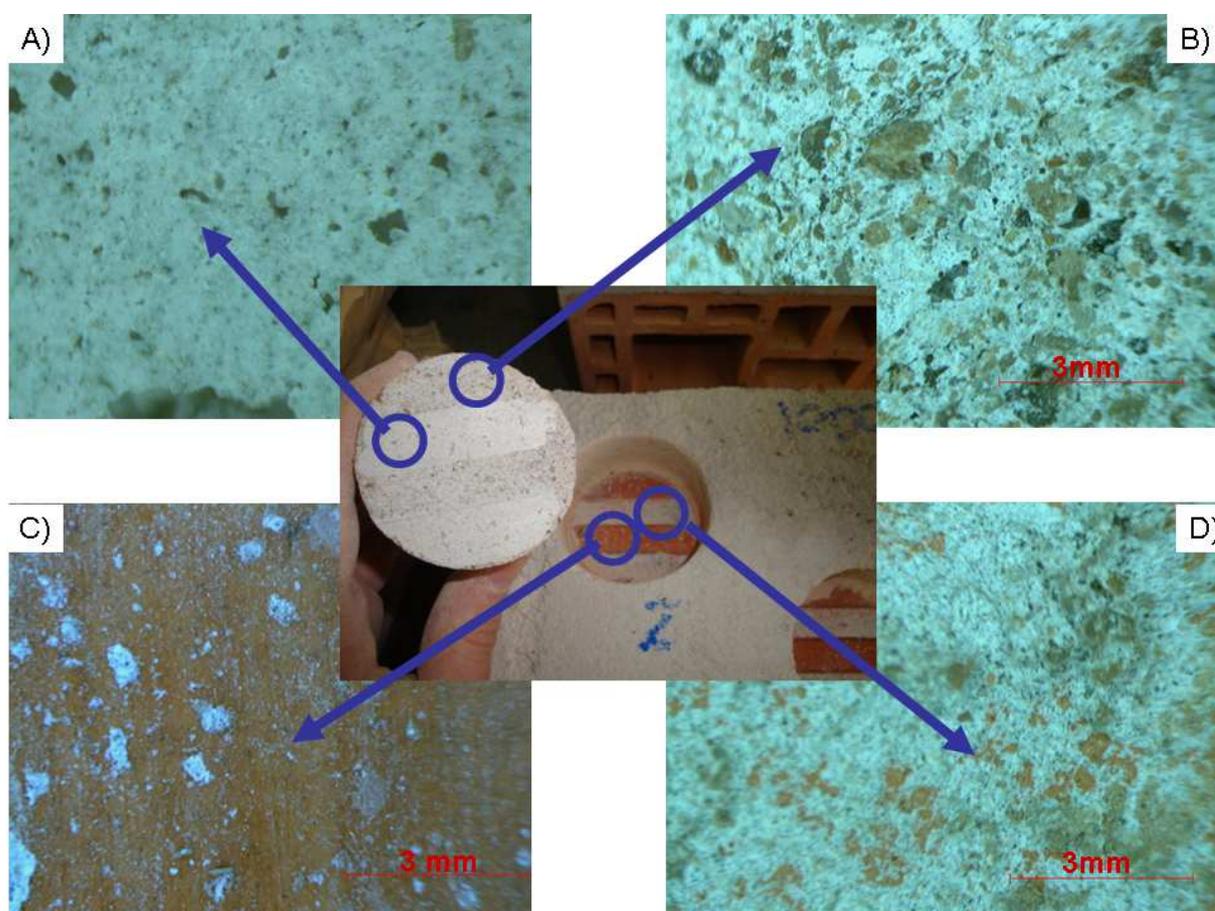


Figura 64: a) imagem da superfície da amostra da pastilha de arrancamento em contato com a região do substrato com parafina; b) imagem da superfície da amostra da pastilha de arrancamento em contato com a região do substrato sem parafina (porosidade livre); c) imagem da superfície do substrato com parafina, após o ensaio de aderência à tração; d) imagem da superfície do substrato com sem parafina (porosidade livre), após o ensaio de aderência à tração;

Com o auxílio do scanner tridimensional a laser disponível no LdSM/UFRGS traçou-se um perfil da superfície de uma pastilha de argamassa, após seu arrancamento. A imagem da figura 65 ilustra a zona que estava em contato com a superfície do substrato, onde ocorreu o arrancamento por tração. Nota-se que, coerente com as imagens da figura 64, a região "A" apresentou pasta depositada sobre a superfície, enquanto a região "b" permaneceu com o perfil liso do substrato original.

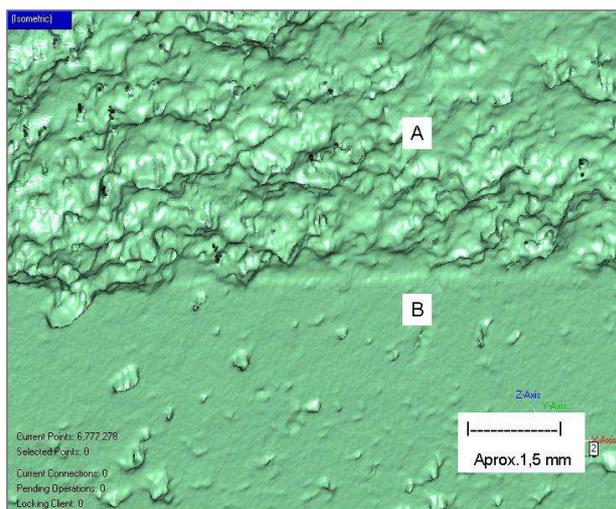


Figura 65: detalhe da amostra de argamassa arrancada no ensaio de aderência – (A) área que estava em contato com os poros abertos do substrato cerâmico e (B) área que estava em contato com a superfície do substrato cerâmico selada por parafina.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, dividido em duas etapas, primeiramente propõe-se uma discussão acerca dos resultados experimentais e suas implicações sobre o tema aderência de revestimentos de argamassa. A segunda parte, por sua vez, debate o que ainda não conseguiu ser respondido por esta tese, dentro do tema proposto, abrindo espaço para trabalhos futuros. Também propõe uma reflexão sobre as teorias (e suas controvérsias) atualmente debatidas pelo meio técnico dentro do tema.

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESPECÍFICAS DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como elementos a serem considerados para o fechamento do tema debatido dentro dos limites desta tese, primeiramente retoma-se o objetivo principal descrito no início deste documento. Buscava-se contribuir para o entendimento de alguns dos fatores intervenientes no fenômeno de aderência entre substratos cerâmicos e argamassas de cimento Portland, visando identificar, prioritariamente, a influência de substratos cerâmicos com diferentes temperaturas de queima (e conseqüentemente diferentes padrões de porosidade e absorção de água). Nesse sentido, os resultados indicam que a temperatura de queima dos blocos teve, sim, efeito significativo sobre a resistência de aderência dos revestimentos.

A caracterização dos blocos cerâmicos ao longo do trabalho demonstrou que houveram alterações na estrutura de poros dos mesmos, à medida que se alteraram as temperaturas de queima. Ato contínuo, a taxa de absorção capilar dos mesmos também foi afetada. Entretanto, como visto nas avaliações do scanner 3D, não houveram mudanças de micro rugosidade entre os blocos lisos que conduzissem a diferentes ângulos de contato, sendo que apenas as variações de topografia superficial foram significativas para a resistência de aderência à tração, quando do uso de blocos estriados comparativamente aos lisos.

Se não houve mudança de rugosidade superficial com a queima, e sim mudança de porosidade, e a temperatura de queima foi significativa para a aderência à

tração final dos revestimentos, parece claro afirmar que a absorção dos substrato, nas condições de ensaio propostas, teve influência na aderência do sistema. Ainda que evidentemente a discussão sobre quais os mecanismos preponderantes para a resistência de aderência à tração não se esgote com esta tese, a mesma, na visão de seu autor, contribui para que teorias de fluxo de água e/ou pasta em função de uma determinada cinética oriunda da relação entre os poros da base e as argamassas neles assentadas permaneçam como verossímeis.

Para que tenhamos valores elevados de resistência de aderência, a extensão de aderência (ou extensão de contato) permanece fundamental, mas a porosidade diferenciada de uma base e sua capacidade de sucção demonstraram-se importantes para mitigar (ou, dependendo, potencializar) as eventuais falhas de contato pontuais de um sistema de revestimento, tal qual quando do selamento de 50% da superfície com parafina.

Em outras palavras, no caso dos blocos cerâmicos estudados, demonstrou-se que uma boa extensão de contato, embora fundamental, não é necessariamente suficiente para garantir uma boa ancoragem, caso a porosidade do substrato varie em função da temperatura de queima, o que aumenta de certa forma a importância da chamada microancoragem e das teorias que as sustentam.

Sobre esta perspectiva, a extensão de aderência e a porosidade do substrato parecem ser condições necessárias, mas isoladamente não são suficientes para garantir uma boa aderência à tração de um sistema de revestimento de argamassa.

Sobre a inserção de estrias verticais na superfície dos blocos, as mesmas parecem contribuir para uma melhoria da aderência notadamente mais eficiente à medida que a qualidade de queima do bloco cerâmico cai, ou seja, que sua estrutura de poros não é suficientemente eficiente para garantir a aderência pura e simplesmente pelo efeito combinado entre a porosidade da base e a extensão de aderência com a superfície lisa. Em termos estatísticos, contudo, não foi evidenciada interação significativa entre a temperatura de queima e a superfície (lisa ou estriada), de modo que esta interação pode ser objeto de outras pesquisas, quem confirmem ou contestem este item em específico.

Ainda a partir do trabalho experimental descrito neste trabalho, podem-se tecer também algumas considerações específicas, descritas abaixo:

- a) uma mesma argamassa, aplicada em um mesmo tipo de substrato, mas com características de contato diferentes (seja pelo tipo queima do bloco cerâmico que influencia na absorção de água do mesmo, ou pela ausência de possibilidade de transferência de água e pasta para o substrato, como executado na simulação de laboratório), apresentou, conforme esperado, comportamentos diferenciados quanto à resistência de aderência à tração resultante dos revestimentos produzidos;
- b) o desempenho do revestimento de argamassa, quanto à resistência de aderência à tração, foi melhor (maior incidência de valores elevados) à medida que aumentou a temperatura de queima dos blocos cerâmicos;
- c) a taxa inicial de absorção (IRA) e a sucção capilar dos blocos nas primeiras horas (equivalente aos momentos pós-aplicação do revestimento) é mais pronunciada para os blocos com maior temperatura de queima, dentro dos limites propostos no trabalho experimental;
- d) Tal qual identificado na literatura, no trabalho apresentado por Murray (1983) e citado por Paes (2004), foi constatada relação entre o coeficiente de absorvidade (S) dos blocos cerâmicos e a resistência de aderência à tração dos revestimentos de argamassa neles assentados. Blocos que possuíam os maiores valores médios do coeficiente S , nos momentos pós-aplicação da argamassa, apresentaram também as maiores resistências de aderência;
- e) a introdução na superfície do substrato cerâmico de zonas onde o contato superficial e a penetração de água e pasta fica restringida diminuiu sensivelmente a resistência de aderência à tração;
- f) a alta retenção de água da argamassa produzida também não deve ser negligenciada como um fator importante a ser considerado, uma vez que pode ter influenciado na relação combinada com as diferentes capacidades de sucção de água dos substratos cerâmicos.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO E QUESTIONAMENTOS PARA DEBATE

Nesta tese, algumas perguntas em específico ainda ficaram sem respostas, mas podem ser justamente objeto de pesquisas posteriores.

Não foi possível comprovar categoricamente como ocorre a interação entre a cinética de transporte de água e pasta para os poros e a conseqüente resistência de aderência de um sistema de revestimento tal qual proposto. Parece claro, contudo, a partir dos resultados experimentais, que ainda não é possível desvencilhar totalmente a questão da aderência à tração de uma argamassa das condições de absorção do substrato onde a mesma foi assentada. Dessa forma, a contribuição da tese é importante no sentido de tornar robusto o ponto de vista da parcela do meio técnico nacional que sustenta que existe uma relação entre estrutura de poros do substrato e absorção de água e/ou pasta nestes, com a conseqüente contribuição para a ancoragem. As diferentes temperaturas de queima dos blocos cerâmicos geraram substratos com diferentes condições de absorção, e esta condição reverteu resultados estatisticamente diferenciados quanto à resistência de aderência dos sistemas de revestimento. Quando a porosidade da base foi restringida, e conseqüentemente a capacidade de sucção do substrato, caiu drasticamente a resistência de aderência dos conjuntos analisados. Entretanto, a diferença de porosidade/absorção de água do substrato devido às distintas temperaturas de queima propostas ainda foram capazes de gerar diferenças significativas de resistência de aderência entre os grupos. Em outras palavras, ainda que exista alguma controvérsia quanto ao fato da parafina utilizada (posteriormente removida superficialmente) ter simplesmente selado os poros, ou também inibido o contato físico-químico da interface, fica evidente, na opinião deste autor e dentro do universo de ensaios desta tese, que a contribuição relativa à penetração de água e/ou pasta no interior dos substratos não pode ser desprezada. Isto fica tanto ou mais evidente à medida que a condição superficial (maior área de contato potencial devido à superfície estriada em relação à lisa), que foi estatisticamente significativa em um primeiro momento, passa a não ser (estatisticamente significativa) quando do selamento de 50% da superfície de interface do substrato cerâmico.

Karl Popper²⁴ argumenta que uma teoria científica será sempre conjectural e provisória, não sendo a ciência necessariamente um sistema que avança para um estado de conhecimento final. Thomas Kuhn²⁵, por outro lado, contrapõe que a ciência progride pela tradição intelectual de um paradigma, avançando mesmo

²⁴ Popper, K. filósofo, autor, dentre outros de "A lógica da descoberta científica (1934)"

²⁵ Khun, T. físico e filósofo, autor de " A estrutura das revoluções científicas" (1962)

antes de que o paradigma seja posto em dúvida. No paradigma atual de tecnologia de argamassas, muitas perguntas estão sendo respondidas ao longo dos últimos 15 anos de pesquisas, mas também há espaço para muitas discussões. Dentro de uma visão Popperiana, ainda há muito por avançar pois "toda solução para um problema cria novos problemas não solucionados" ²⁶.

Nesse contexto, o debate realizado nas edições de 2011 e 2013 do Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas parece indicar que há um grande interesse da comunidade técnica em confirmar ou alterar os paradigmas hoje assumidos para a questão da aderência de revestimentos de argamassa. Esse debate passa pelo questionamento do papel da porosidade dos substratos, pela cinética dos elementos transportados/hidratados ou não nestes poros, pela relevância ou preponderância das questões relativas à extensão de contato. Assim, esta tese propõe uma pequena contribuição ao tema, a partir do momento que debate a questão da influência (no fenômeno de aderência) da porosidade de substratos cerâmicos advinda de diferentes temperaturas de queima. Pelo aqui exposto, independentemente do rumo das teorias que ressaltam a importância da extensão de contato superficial para a aderência, ou da parcela de formação de produtos de hidratação específicos na interface, a contribuição da transferência de água e/ou pasta para os poros substratos (onde este "e/ou" deva ser o palco de uma possível continuidade de pesquisa) parece ser relevante.

²⁶ POPPER, K. apud Atkinson, S (editor) - O Livro da Filosofia. Ed. Globalivros (2012)

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como questões para trabalhos futuros, sugere-se:

- a) Avaliação da relação entre a retenção de água de diferentes argamassas, a penetração de pasta em substratos de diferentes porosidades e a resistência de aderência à tração de revestimentos;
- b) Modelagem numérica de resultados de ensaios de resistência de aderência à tração, levando em consideração fatores intervenientes como macro e micro-rugosidade dos substratos e propriedades das argamassas;
- c) Avaliação da eficácia de técnicas não convencionais de avaliação do transporte de água e pasta em substratos porosos, tais como uso de tomógrafos, ressonância magnética, marcadores fluorescentes, etc.
- d) Avaliação do efeito do uso de diferentes tipos de argamassa de chapisco na alteração e regularização do potencial de absorção de substratos.
- e) Reproduzir em escala maior (parede em dimensões reais) o ensaio de resistência de aderência à tração com a porosidade da base restringida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, M.T.P. in: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. IBRACON, 2007. 2ª edição - Editor: Geraldo Isaia.

AMMOUCHE, A.; RISS, J.; BREYSSE, D.; MARCHAND, J. Image analysis for the automated study of microcracks in concrete. **Cement & Concrete Composites**, v.23, 2001. p.267-278.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V.; PILEGGI, R. G. Influência da seqüência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliada por squeeze-flow. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC/ANTAC, 2005. p. 158-179.

ANTUNES, R. P. N; JOHN, V.M. Determinação e controle da energia de impacto de argamassas lançadas manualmente. Boletim Técnico BT/PCC/455 da escola Politécnica da USP. São Paulo, 2007.

APPOLONI, C. R., A. MACEDO, C. P. FERNANDES, AND P. C. PHILIPPI. 2002. Characterization of porous microstructure by x-ray microtomography. **IX-Ray Spectrometry**, no. 2, 31:124-127.

ARAÚJO, G.S. **Estudos de parâmetros textuais das areias para argamassas de revestimento através da análise de imagens**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

ARAÚJO, J.M. Contribuição à instrumentação de Engenharia Civil através da construção de um sensor de umidade. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

ARAÚJO JUNIOR, J. M. **Contribuição ao Estudo das Propriedades Físico-Mecânicas das Argamassas de Revestimento**. 2004. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF.

AUSTIN, S.A. et al. The rheological performance of wet process sprayed mortars. **Magazine of Concrete Research**, v. 51, n. 5, 1999, p. 341-352.

AVELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A.; THEOULAKIS, P. Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging. **Infrared Physics and Technology**. v.44, 2003 p. 183-190.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5.736: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 7.200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7.389**: Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13.276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13.528**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13529**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 13530**: Revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânicas - classificação. Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 45**: Agregado miúdo - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 47**: Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e de massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

BAKER, P.H.; BAILLY, D.; CAMPBELL, M.; GALBREITH, H.G.; McLEAN, R.C. The application of X-ray absorption to building moisture transport studies. **Measurement** (2006), doi:10.1016/j.measurement.2006.10.1016

BANFILL, P. F. G. The reology of fresh mortar - a review. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, 1, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 73-82.

BAUER E. et al. Estudo da tensão de escoamento de argamassas, no estado fresco, utilizando o equipamento vane tester de laboratório. In: XXXI Jornada Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Mendoza, 2004. **Anais...** Maio, 2004.

BAUER, E.; PAES, I. L. Avaliação da movimentação e fixação de água em argamassas mistas para substratos porosos, nos momentos iniciais (pós-aplicação). In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ANTAC, 2004. v. 2, p. 900-907.

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

BAUER, R. J. F. Patologia em Revestimentos de Argamassa Inorgânica. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Salvador. **Anais...** Salvador: 1997. p. 321-333.

BÉLAIR, N. **Contribution à la Mise au Point d'une Procédure de Caractérisation Quantitative des Surfaces en Béton en vue de Travaux de Réfection.** Maîtrise en Génie Civil. Faculté des Sciences et Génies. Université Laval. Québec. Décembre, 2005.

BENINGFIELD, N.E. A Review of CEN Mortar Tests. **Masonry International.** v.8 n.1 p.5-8.

BISSCHOP, J.; van MIER, J.G.M. How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy? **Cement & Concrete Research** V. 32, (2002). p. 279–287.

BLAKE, T.D.; CONINCK, J. The influence of solid liquid interactions on dynamic wetting. **Advances in Colloid and Interface Science** v. 96 (2002) p. 21-36

BOLORINO, H.; CINCOTTO, M. A. A influência do tipo de cimento nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997. p. 15-25.

BROCKEN, H.J.P.; SPIEKMAN, M.E.; PEL, L.; KOPINGA, K.; LARBI, J.A. Water straction out of mortar during brick laying: a NMR study. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions** v.31, 1998. p. 49-57.

CABREDO, L. V; MADRAZO, J. A. P.; STAMBUK, J. C.; MERIÑO, J. F. Influencia de Distintos Tratamientos Superficiales em Paneles Prefabricados de Hormigón Armado Expuestos a Diferentes Condiciones Ambientales. In: **XIV Jornadas Chilenas del Hormigón.** 2003.

CANDIA, M.C. **Contribuição ao estudo das técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa.** São Paulo, 1998. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. Avaliação do tipo de preparo da base nas características superficiais do substrato e dos revestimentos de argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2000, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 2000. v. 2, p. 900-907.

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

CARASEK, H.; CAMPAGNOLO, J.L. Aderência de argamassa de assentamento para Alvenaria estrutural. In: 10º Encontro Nacional da Construção. 1990, Gramado, RS. **Anais...** Gramado, RS p. 331-347.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L.M.B. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 4., 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: UnB/ANTAC, 2001. p.43 – 67.

CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R.; JOHN, V. M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de Squeeze-Flow. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, 1, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: [s.n.], 2005. p. 121-143.

CARNEIRO, A.M.P. **Contribuição ao estudo da influência do agregado nas propriedades de argamassa compostas a partir de curvas granulométricas.** Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. 170p + anexos.

CARVALHO JR., A.N.; BRANDÃO, P.R.G.; FREITAS, J.M.C. Relação entre a resistência de aderência de revestimento de argamassa e o perfil de penetração de pasta de aglomerante nos poros do bloco cerâmico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 518-529.

CASALI, J. **Estudo comparativo de diferentes tipos de argamassa de assentamento par alvenaria estrutural de blocos de concreto.** 2003. 205 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CEMENT & CONCRETE ASSOCIATION OF AUSTRALIA. Bond strength in Masonry Construction. **Technical note**, n. 65, p. 1-8, 2001.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAKURA, E. H. Revestimentos de argamassas: boas práticas em projeto, execução e avaliação. Porto Alegre: ANTAC, 2005. 96 p.

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

CINCOTTO, M. A; SILVA; CARASEK, H. Argamassas de revestimento: propriedades, características e métodos de ensaios. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p.

COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO DE PORTO ALEGRE. Projeto de racionalização das estruturas de concreto e revestimentos de argamassa. In: COMUNIDADE DA CONSTRUÇÃO, 1., 2005, Porto Alegre. **Cd-rom...** Porto Alegre, 2005.

COSTA, E.B.C.; DUARTE, R.; CARASEK, H. Análise da influência do tipo de equipamento e do operador nos resultados de resistência de aderência dos revestimentos de argamassa. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

COSTA, F.N. **Processo de execução de revestimento de fachada de argamassa: problemas e oportunidades de melhoria**. 2005. 195 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CULTRONE, G.; SEBASTIÁN, E.; ELERT, K.; TORRE, M.J.; CAZALLA, O.; RODRIGUEZ-NAVARRO, C. Influence of mineralogy and firing temperature on the porosity of bricks. **Journal of European Ceramic Society**, n.24. 2004. p. 547-564.

D'AGOSTINO, L. Z.; SOARES, L.; D'AGOSTINO, L. F. Preparo de argamassas utilizando a fração fina da britagem de rochas. In: SEMANA IBERO-AMERICANA DE ENGENHARIA DE MINAS, 1, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 2004. p.27-32.

DETRICHÉ, C.H.; MASO, J.C. Premier èt second retrait des couches minces de mortier. **Matériaux et Constructions/Materials and Structures** n.69 1979. p.185-191.

DETRICHÉ, C.H.; GRANDET, J.; MASO, J.C. Dessiccation des mortiers d'entuit. **Matériaux et Constructions/Materials and Structures** n.94 1983. p.251-258.

DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J.C. Differential hydration in rendering mortars. **Cement and Concrete Research**, vol.16, 1986, p.429-439.

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. Brasília, 2004. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de pós-graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília.

DUALIBE, R. P.; CAVANI, G. R.; OLIVEIRA, M. C. B. Influência do tipo de projeção da argamassa na resistência à tração e permeabilidade à água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 508-517.

DUPIN, I.; DETRICHÉ, C.H.; MASO, J.C. Accrochage direct d'un enduit sur un isolant par une liaison de types mécanique dans le dún procédé d'isolation par l'extérieur. **Materiaux et Constructions**, v.21, p. 370-378, 1988.

DRABOWSKI, A. Adsorption – from theory to practice. **Advances in Colloid and Interface Science**. v.93, p. 136-224, 2001.

ELSEN, J. Microscopy of historic mortars - a review. **Cement and Concrete Research**, v.36. 2006. p.1416-1424.

EZZIANE, K.; BOUGARA, A.; KADRI, A.; KHELAFI, H.; KADRI, E. Compressive strength of mortar containing natural pozzolan under various curing temperature. **Cement & Concrete Composites** v.29. 2007. p. 587–593.

FERNANDES, H. C.; ANTUNES, R. P. N.; BARROS, M. M. S. B; JOHN, V. M. Energia de lançamento da argamassa na projeção por spray a ar comprimido. In: XI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. **Anais...** Florianópolis, 2006. p 4093-4108.

FLORES, A. B. H., KINDLEIN JUNIOR, W.; ALVES, A. K.; STOLZ, C. M. . Influência da Textura Superficial na Molhabilidade de Diferentes Superfícies. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 10, 2012, São Luis. **Anais...** São Luiz, P&D Design, 2012.

GALECKI, G.; CASADEI, P.; MAERZ, N.; NANNI, A.; SUMMERS, D. "The Use of High Pressure Waterjets in Concrete Substrate Preparation for FRP Applications," **FIB Second Congress**, June 4-8, 2006, Naples, Italy, Paper 10-88, pp. 9, CD-ROM II.

GALLEGOS, H. Adhesión entre el mortero y las unidades de albañilería. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG/ANTAC, 1995. p.117 – 133.

GOMES, A.M.; NERO, J.M.G.; APPLETON, J.A.S. Novo método para avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 1995. p. 83-91.

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-DF.

GOUVEA, D. **Porosimetria ao Mercúrio.** Notas de aula da disciplina: PMI2201 - Técnicas de Caracterização de Materiais. Disponível em http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_7_Porosimetria_ao_Mercurio_PMI-2201.pdf> Acesso em fevereiro de 2013.

GUIMARÃES, J.E.P. A Cal – Fundamentos e aplicações na construção civil. Editora Pini. 285 p. São Paulo, 1997.

GUMMERSON, R.J.; HALL, C.; WOFF, W.D. Water movement in porous building materials II: hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials. **Building and Environment**, v.15 p. 101-108, 1980.

GRUN, E. **Caracterização de argilas provenientes de Canelinha - SC e estudo de formulações de massas cerâmicas.** 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

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

HALL, C. Water Sorptivity in Mortars and Concrete: a Review. **Magazine of Concrete Research**, v. 41. n. 147, 1989. p. 51-61.

HEAD, M.K.; BUENFELD, N.R. Confocal imaging of porosity in hardened concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 5, 2006, p. 896-911.

HUNT, B.J. The use of fluorescent dyes in highlights some construction problems. **Structural Survey**, v.12 n.6, 1993. p.4-7.

HUSEM, M.; GOZUTOK, S. The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete. **Construction and Building Materials**. 2005, v.19 p.49–53.

IOSHIMOTO, E. Incidência de manifestações patológicas em edifícios habitacionais. In: **Tecnologia das Edificações**. São Paulo, PINI/IPT, 1988. p. 109-112.

ISERHARD, J. L. R. F. **Contribuição ao estudo da viabilidade da cura do concreto por energia solar**. 2000. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JAKOBSEN, U.H.; BROWN, D.R. Reproducibility of w/c ratio determination from fluorescent impregnated thin sections. **Cement and Concrete Research** v.36, 2006. p.1567–1573.

JOHN, V. M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003. p. 47-62.

JUNG, E. The binding between mortar and brick In: International Brick and Block Masonry Conference, 8th, Dublin. 1988. **Proceedings...**v.1 1988.p. 182-193.

KAUFMANN, J.; STUDER, W. One Dimensional water transport in coverconcrete – application of non-destructive methods. **Materials and Structures**, n.28, p.115-123, 1995.

KELHAM, S.A. Water Absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n°10. Jun/1988, p.106-110.

KHALAF, F.M.; WILSON, J.G. Strength Assessment of Clay Bricks Using Porosity Dependent Techniques. **The Masonry Society Journal**. v.17 n.1, 1999. p.9-19.

KJELSEN, K. O.; ATLASSI, E. H. Pore structure of cement silica fume systems. Presence of hollow-shell pores. **Cement and Concrete Research**. 1999, v.29, p.133-142.

LANGE, D.A.; DeFORD, H.D.; WERNER, A.M. Microestrutural Investigation of Mortar/Unit Interaction. **The Masonry Society Journal**. v.17 n.1, 1999. p.31-42.

LMTP - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da UFSC.

Porosimetria por Intrusão de Mercúrio. Disponível em

<http://www.lmpt.ufsc.br/pesquisa_micro_porosimetria.php> Acesso em janeiro de 2012.

MARTYS, N.; FERRARIS, C.F. Capillary transport in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v.27, n.5, 1997, p.747-760.

MATTOS, L. Identificação e caracterização das argamassas para Revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA. 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994.

MESSLER, R. W. **Joining of materials and structures**. Butterworth-Heinemann, 2004.

MILLA, F.; FARDIS, M.; PAPAVALASSIOU, G.; LEVENTIS, A. NMR in porous materials. **Magnetic Resonance Imaging** v.16, 1998. p.677-678.

MIRANDA, L. F. R. **Estudo de Fatores que Influem na Fissuração de Revestimentos de Argamassa com Entulho Reciclado**. 2000. 172 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MORTAR INDUSTRY ASSOCIATION. Properties of Rendering Mortar. 200_ Disponível em <<http://www.mortar.org.uk/>> Acesso em janeiro de 2007.

MOURA, C.B. **Aderência dos revestimentos externos de argamassa em substratos de concreto: análise da influência das condições de temperatura e ventilação na cura da camada de preparo com argamassa de chapisco**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

MURRAY, I. H. The adhesion of cementitious render to a brick background. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LOAD BEARING BRICKWORK, 8., 22-23 Nov. 1983. **Proceedings**. London, BCS, 1983. p.1-12.

NAKAKURA, E.H.; CINCOTTO, M.A. Análise e classificação das argamassas Industrializadas segundo NBR 13281 e a MERUC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003. p. 129-136.

NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, A. A. P.; RIBEIRO, A. B.; MANSUR, H. S. Estudo da Influência de aditivo adesivo e de tipos de cimento na aderência chapisco em base de concreto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 497-507.

NEITHALATH, N. Analysis of Moisture Transport in Mortars and Concrete Using Sorption-Diffusion Approach. **ACI Materials Journal**, v.103 n.3. 2006. p. 209-217.

NESTLE, N.; GÄDKE, A.; FRIEDEMANN, K.; STALLMACH, F. GALVOSAS, P. NMR diffusometry on cementitious materials: expanding the hydration time window by static field gradient NMR in ultrastrong gradients. **Magnetic Resonance Imaging**, v. 25, n.4, 2007, p. 575-576.

NEVILLE, A. Concrete Research on a Micro and Macro-Scale. **Cement and Concrete Research**, n.6 v.22. 1992. p.1067-1076.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

O'FARRELL, M.; WILD, S.; SABIR, B.B. Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar. **Cement & Concrete Composites** v.23. 2000. p. 81-91.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R. PILEGGI, R. G; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: 2000. 195p.

ORTIZ L., J. A. **Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado** 2005. 423 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Politécnica da Catalunha. Disponível em <<http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0306106-091931/>> Acesso em 22/11/2007.

PADHY, G.S.; LEMAIRE, C.; AMIRTHARAJ, E.S.; IOANNIDIS, M.A. Pore size distribution in multiscale porous media as revealed by DDIF-NMR, mercury porosimetry and statistical image analysis. **Colloids and Surfaces** v. 300, 2007. p.222-234.

PAES, I. N. L. **Avaliação do Transporte de Água em Revestimentos de Argamassa nos Momentos Iniciais Pós-aplicação**. 2004. 242 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF.

PAES, I. L.; BAUER, E.; CARASEK, H. Influência da estrutura de poros de argamassas mistas de blocos de concreto e cerâmico no desempenho dos revestimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 466-476.

PAES, I. L.; BAUER, E.; CARASEK, H. Revestimento em argamassa: influência do substrato no transporte e fixação de água, nos momentos iniciais pós-aplicação. In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003. p. 557-568.

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

PANDOLFO, L. M. Avaliação e controle dos fatores que determinam a viabilidade de uso da areia de britagem basáltica em argamassas de revestimento. 2006. Projeto de Qualificação (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (versão para defesa).

PARAVISI, S. **Avaliação da Produção de Revestimento de Fachada com Aplicação Mecânica e Manual de Argamassa.** 2007. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (versão para defesa).

PAREEK, S. N.; OHAMA, Y.;DEMURA, K. Evaluation Method for Adhesion Test Results of Bonded Mortars to Concrete Substrates by Square Optimization. **ACI Materials Journal**, v.92 n.4. 1995. p. 355-360.

PEL, L. **Moisture transport in porous building materials.** Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology, the Netherlands. 1995.

PEL, L.; HUININK, H.; KOPINGA, K. Salt transport and crystallization in porous building materials. **Magnetic Resonance Imaging** v.21, 2003. p.317-320.

PEREIRA, P. C.; IKEDA, J. A.; IKEDA, N. A.; CAMPOS, C. O.; TEIXEIRA, L. M.; CARASEK, H. Teor de cimento ou a/c: quem exerce maior influência na resistência de aderência? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 3., 1999, Vitória. **Anais...** Vitória, 1999. p. 489-502.

PEREIRA, P. C. **Influência da Cura no Desempenho de Revestimentos Produzidos com Argamassas Inorgânicas.** 2000. 243 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

PETKOVIC, J.; HUININK, H.; PEL, L.; KOPINGA, K. Diffusion in porous building materials with high internal magnetic field gradients. **Journal of Magnetic Resonance.** v.167, 2004. p. 96-106.

PLASSAIS, A.; POMIÈS, M.P.; LEQUEUX, N.; BOCH, P. ; KORB, P.; PETIT, D. BARBERON, E. Micro pore size analysis by NMR in hydrated cements **Magnetic Resonance Imaging**, v. 21, 2003. p.369-371.

POBLETE, A.; PASCUAL, M.A. Thermographic measurement of the effect of humidity in mortar porosity. **Infrared Physics and Technology**. v.49, 2007 p. 224-227

PRETTO, M.E.J. **Influência da rugosidade gerada pelo tratamento superficial do substrato de concreto na aderência do revestimento em argamassa**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

PUREZA, J.C.C. **Utilização de resíduos industriais de baixa granulometria em massas cerâmicas de argila vermelha: aspectos tecnológicos e ambientais**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

QUARCIONI, V. A.; CINCOTTO, M. A. Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 233-250.

QUÉNARD, D.; SALLÉE, H. Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment. **Cahiers du CSTB**. Livraison 323, Cahier 2525, oct./1991.

RAIMONDO, M.; DONDI, M.; MAZZANTI, F.; STEFANIZZI, P.; BONDI, P. Equilibrium moisture content of clay bricks: the influence of the porous structure. **Building and Environment**. V.42, 2007. p. 926-932.

RAMÉ-HART. Glossary of surface Science terms. Disponível em: <http://www.ramehart.com/glossary.htm>. Acesso em: 30/05/13.

RAMEZANIANPOUR, A.A.; MALHOTRA, V.M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly-ash or silica fume. **Cement & Concrete Composites** v.17. 1995. p.125-33.

RATTANADECHO, P.; SUWANNAPUM, N.; CHATVEERA, B.; ATONG, D.; MAKUL, N. Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by

using a continuous microwave thermal processor. **Materials, Science & Engineering**. 2007. doi:10.1016/j.msea.2007.03.035

REGATTIERI, C.E.; SILVA, L.L.R. Ganhos potenciais na utilização de argamassa industrializada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2000. 130p. (Notas de aula)

ROMERO, J. V. **Adherencia al Hormigón de Morteros de Diferentes Bases Químicas** 2010. 367 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid/Espanha.

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>. Acesso em: março de 2010.

ROY, D.M; GRUTZECK, M.W.; SCHEETZ, B.E.; THAULOW, G.M.; ANDERSEN K.T. **Concrete Microscopy**. Strategic Highway Research Program - National Research Council. Washington, 1993. Disponível em <http://www.trb.org/publications/shrp/SHRP-C-662.pdf> (Acesso em 10/08/2007).

RUDUIT, F. G. **Contribuição ao estudo da aderência de revestimentos de argamassa e chapiscos em substrato de concreto**. 2009. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de revestimento de argamassa. São Paulo, 2000.

SANTOS, C.C.N. Critérios de projetabilidade para argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal. Brasília, 2003. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Brasília, UnB.

SANTOS, F.I.G.; CHERIAF, M.; ROCHA, J.C. Transferência de umidade em argamassas: estudo de caso com cinzas pesadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2006.

SATO, N.M.N. **Análise da Porosidade e das Propriedades de Transporte de Massa de Concretos com Vistas à Avaliação de suas Durabilidades.** 1998, 163 p. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, 1998.

SCARTEZINI, L. M. **Influência do Tipo e Preparo do Substrato na Aderência dos Revestimentos de Argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca.** 2002. 262 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

SCARTEZINI, L. M.; JUCÁ, T. R.; LINHARES, H.; TEIXEIRA, F.; ANTONELLI, G.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Influência do Preparo da Base na Aderência e na Permeabilidade à Água dos Revestimentos de Argamassa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre: ANTAC, v. 2, n. 2, p. 85-92, abr/jun. 2002.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachada de edifícios.** São Paulo, 1989. 227 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SILVA, C. O.; NAKAKURA, E. H. A utilização de argamassa de revestimento em obras de pequeno porte – avaliação de estudo de caso de argamassa preparada em obra x argamassa industrializada. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2001, Brasília. **Anais...**, Brasília, 2001. p. 549-565.

SILVA, F. P. **O Uso da Digitalização Tridimensional a Laser no Desenvolvimento e Caracterização de Texturas Aplicadas ao Design de Produtos.** Dissertação (Mestrado). 2006. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM/UFRGS. Porto Alegre. 2006.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia/Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

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. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 106-120.

- SILVA, V. **Aderência de chapiscos em concretos estruturais: melhoria da microestrutura da zona de interface pela adição de sílica de casca de arroz.** 2004. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Carlos.
- SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. Análise microestrutural da interface chapisco/argamassa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 487-496.
- SOROKA, I.; CARMEL, D. Durability of External Renderings in a Marine Environment. **Durability of Building Materials**, v.5 n.1. 1987. p. 61-72.
- SOUSA, J.G.G. **Contribuição ao Estudo das Propriedades das Argamassas de Revestimento no Estado Fresco.** 2005. 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- STOLZ, C. M. **Interação entre parâmetros reológicos de argamassas e a rugosidade de substratos na aderência de argamassas de revestimento.** 2011. 162 p. (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- STOLZ, C. M. **Análise dos parâmetros reológicos influentes na área de contato de argamassas de revestimento aplicadas sobre substratos porosos.** 2013. 77 p. (Doutorado em Engenharia - Exame de Qualificação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Trabalho não publicado.
- TAN, K.; GJORV, O.E. Performance of concrete under different curing conditions. **Cement & Concrete Research** v.26 n.3. 1996. p. 355–361.
- TAHA, M.R.R.; SHRIVE, N.G. The use of pozzolans to improve bond strength. In: 9^o CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 2001. **Proceedings...** New Brunswick, Canada, 2001.
- TRISTÃO, F.A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 286 p. Florianópolis, 2005.
- TRISTÃO, F.A.; ROMAN, H.R. Influência dos parâmetros morfológicos no volume de vazios de areias para argamassas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2005. p. 1-11.

TRISTÃO, F. A. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. Florianópolis, 1995. 197p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1995.

YOSHIDA, A.T. ; BARROS, M.M.S.B. Caracterização de argamassas no estado fresco: peculiaridades na análise de argamassas industrializadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1995, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ANTAC, 1995. p. 53-62.

YU, A. B., STANDISH, N. Characterization of non-spherical particle form their packing behavior. **Powder Technology**, v. 74, n. 3, p. 205-213, 1993.

WALKER, H. N.; D. LANE, D.S.; STUTZMAN, P.E. Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual. Virginia Transportation Research Council. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pccp/pubs/04150/>. Acesso em 12/01/2007.

WONG, H.S.; BUENFELD, N.R.; HEAD, M.K. Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images. **Cement and Concrete Research**. v. 36, 2006. p. 1556-1566.

VICENZI, J. **Efeito da adição de chamota em uma massa cerâmica de argila vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 1999.

VIEIRA,C.M.F.; TEIXEIRA, S.S.; MONTEIRO, S.N. Efeito da temperatura de queima nas propriedades e microestrutura de cerâmica vermelha contendo chamote. **Cerâmica**. vol.55 no.335, São Paulo. 2009. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132009000300014&script=sci_arttext Acesso em 25/05/2012.

APÊNDICE 1

Registro fotográfico do ensaio de resistência de aderência à tração

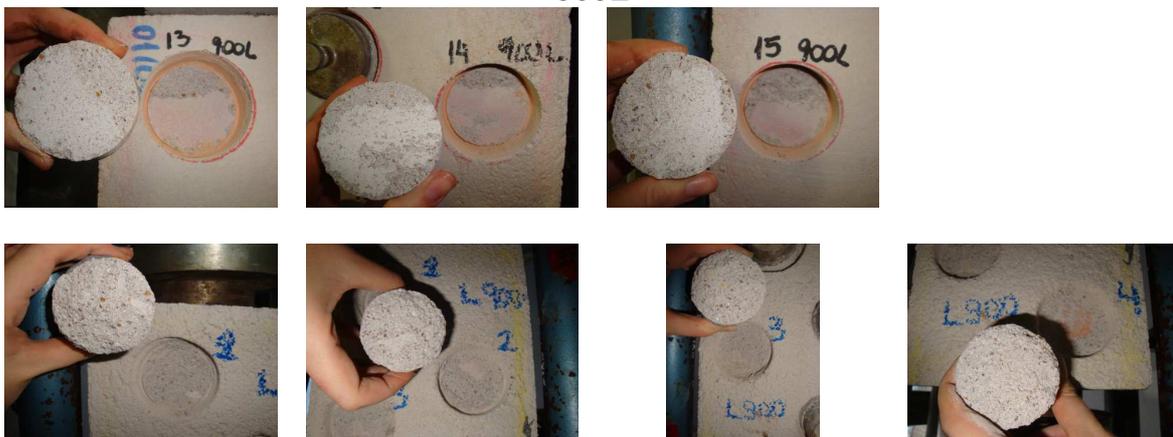
700L



800L



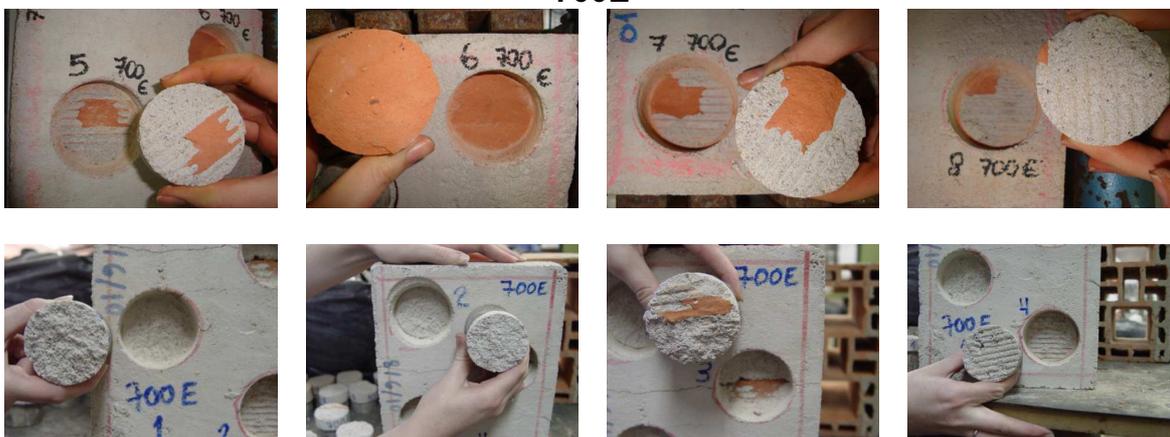
900L



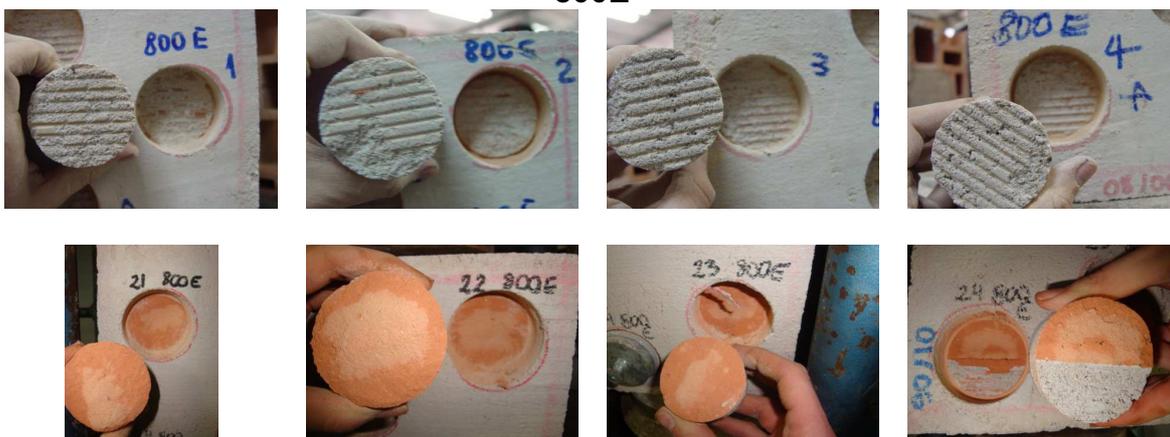
1000L



700E



800E



900E



1000E



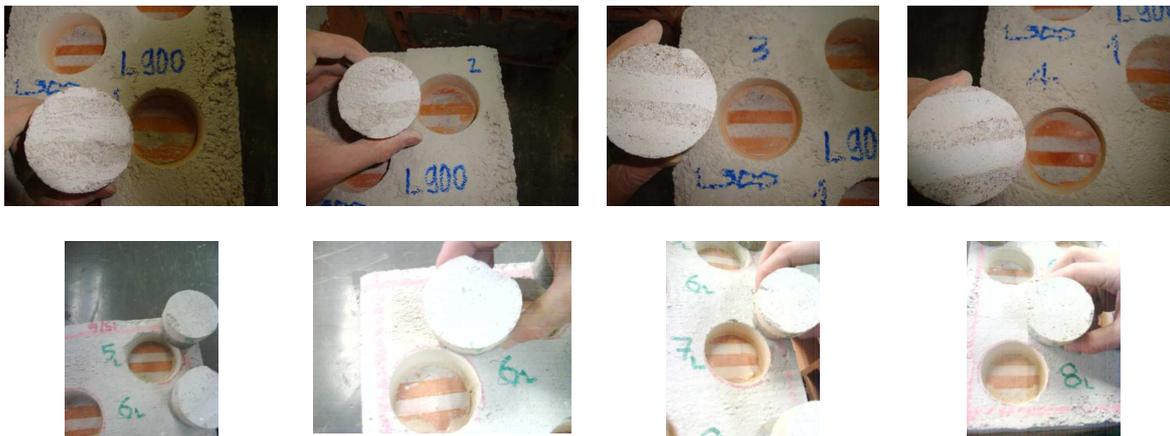
700LP



800LP



900LP



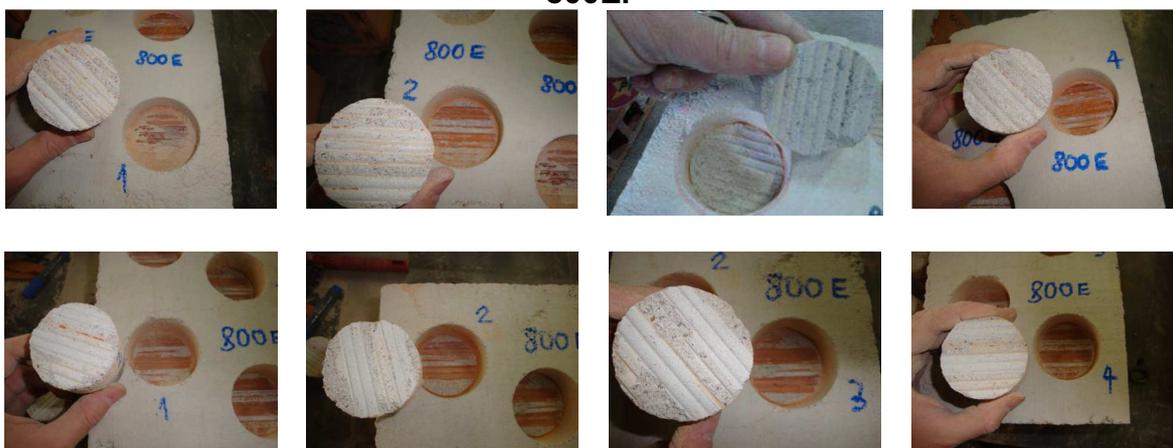
1000LP



700EP



800EP



900EP



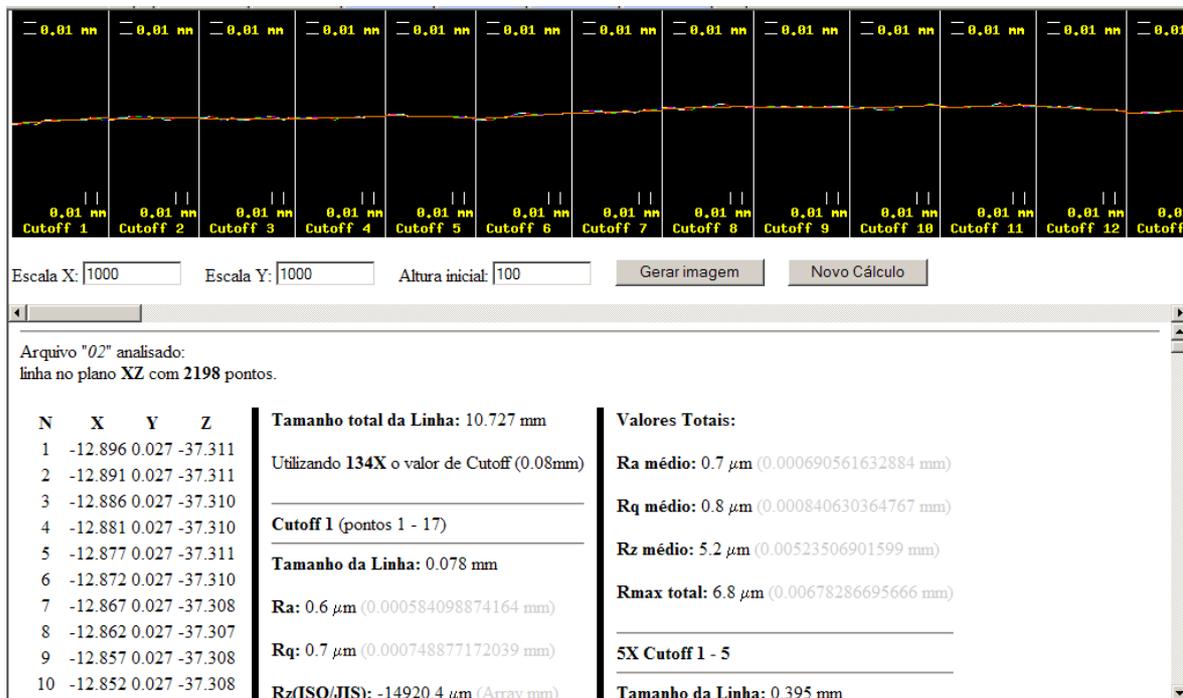
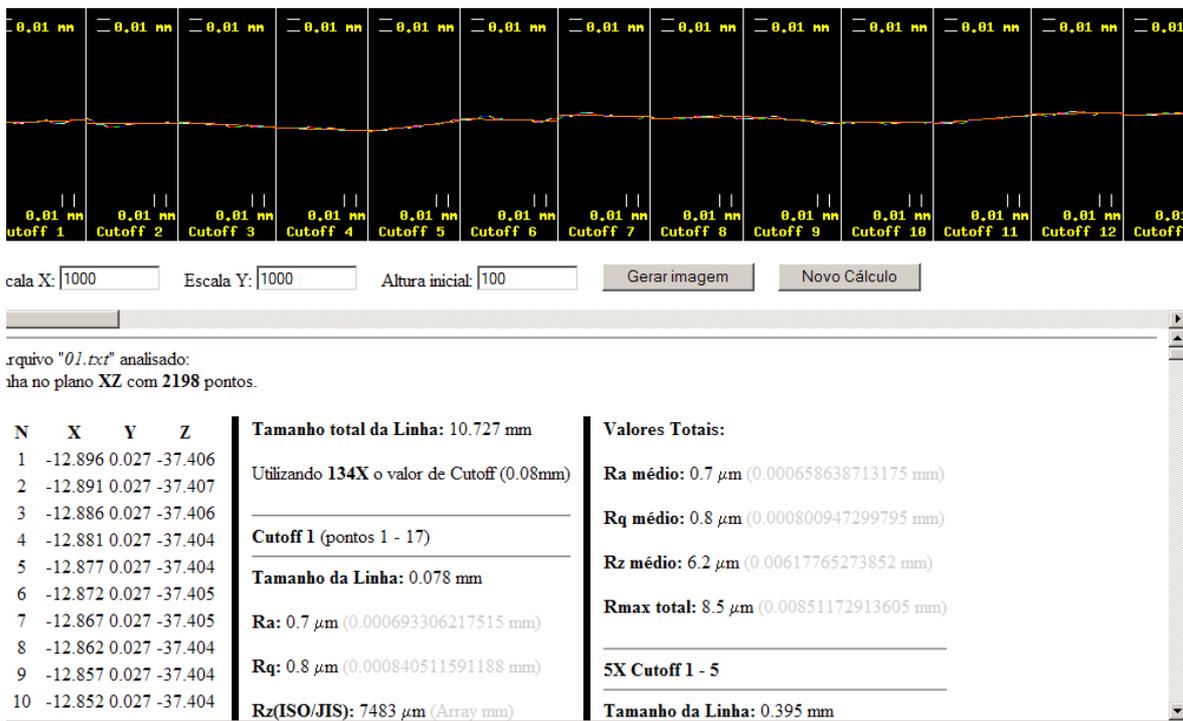
1000EP

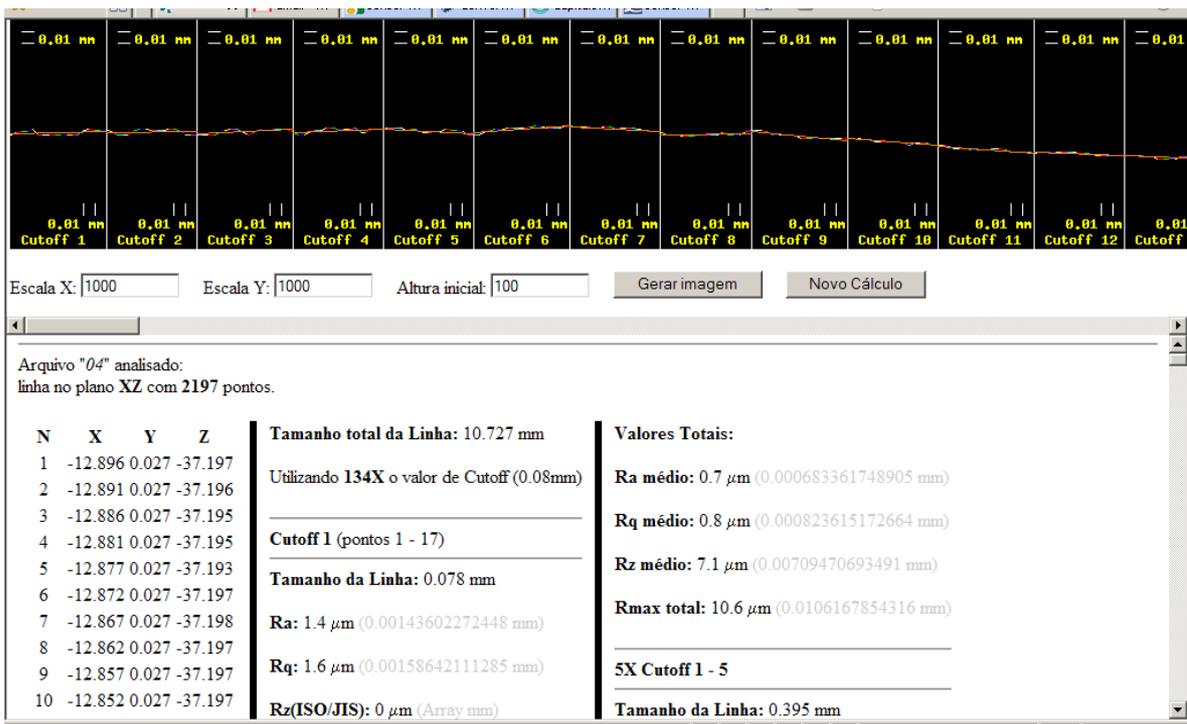
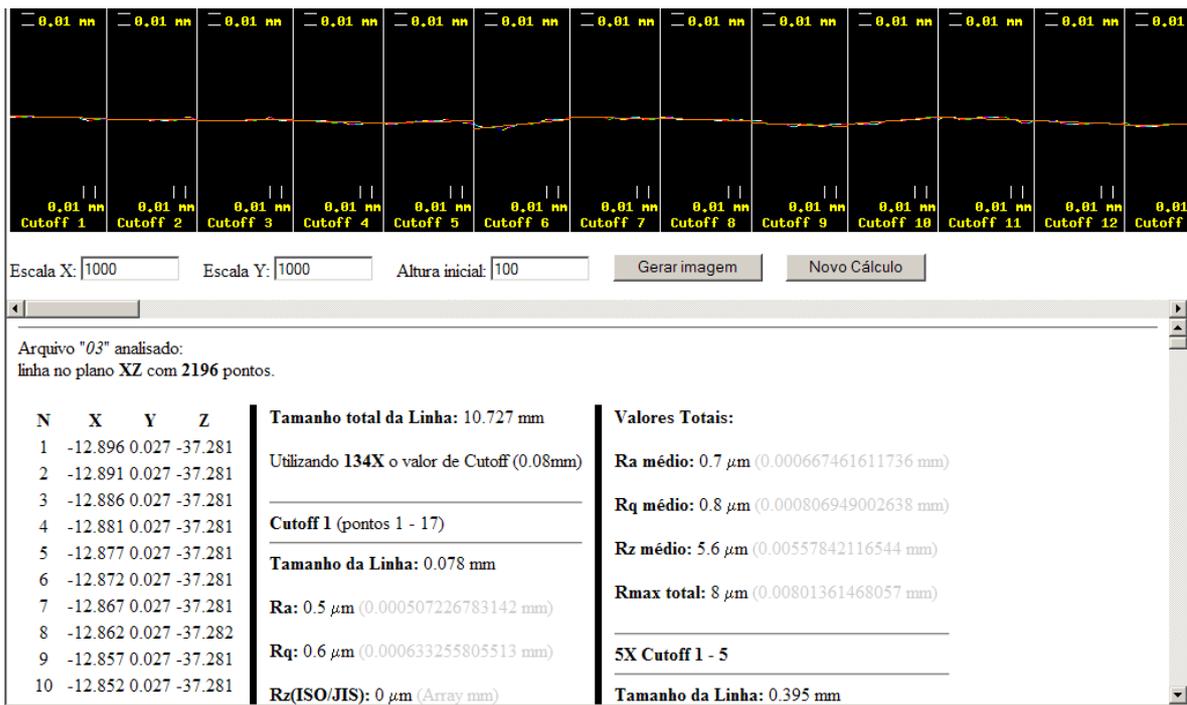


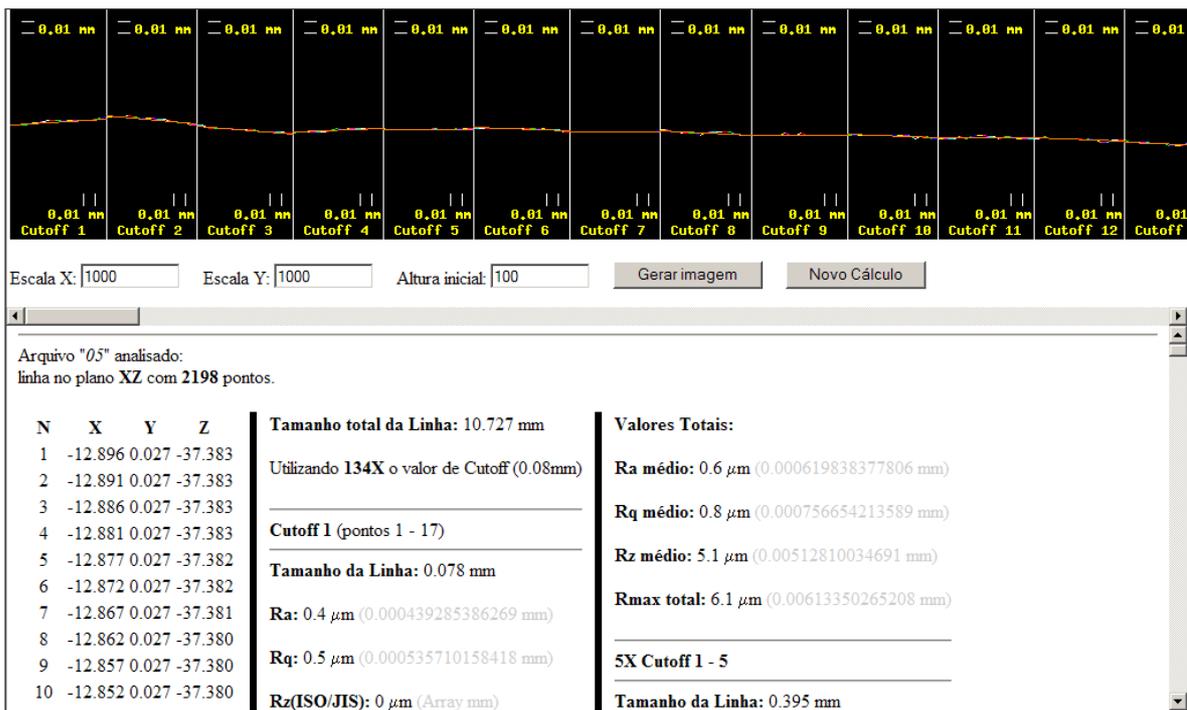
APÊNDICE 2

Prints do registro do software do scanner 3D dos ensaios de rugosidade superficial dos bloco cerâmicos nas temperaturas de 700, 800, 900 e 1000°C

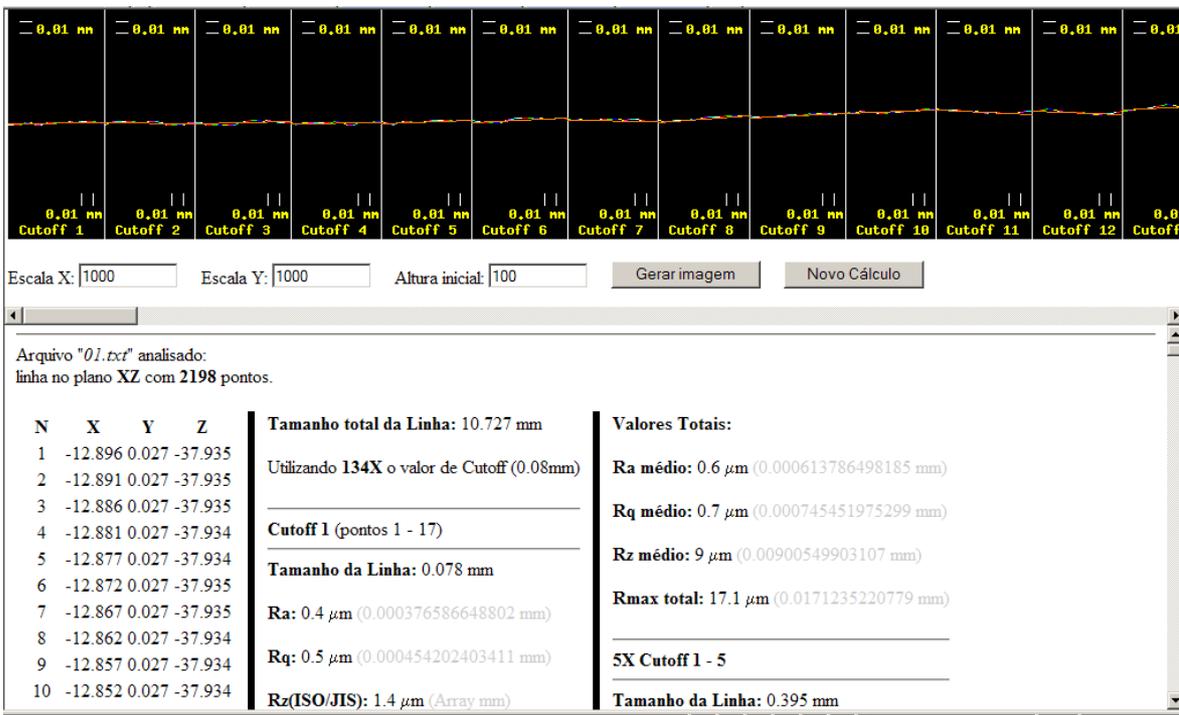
700°C

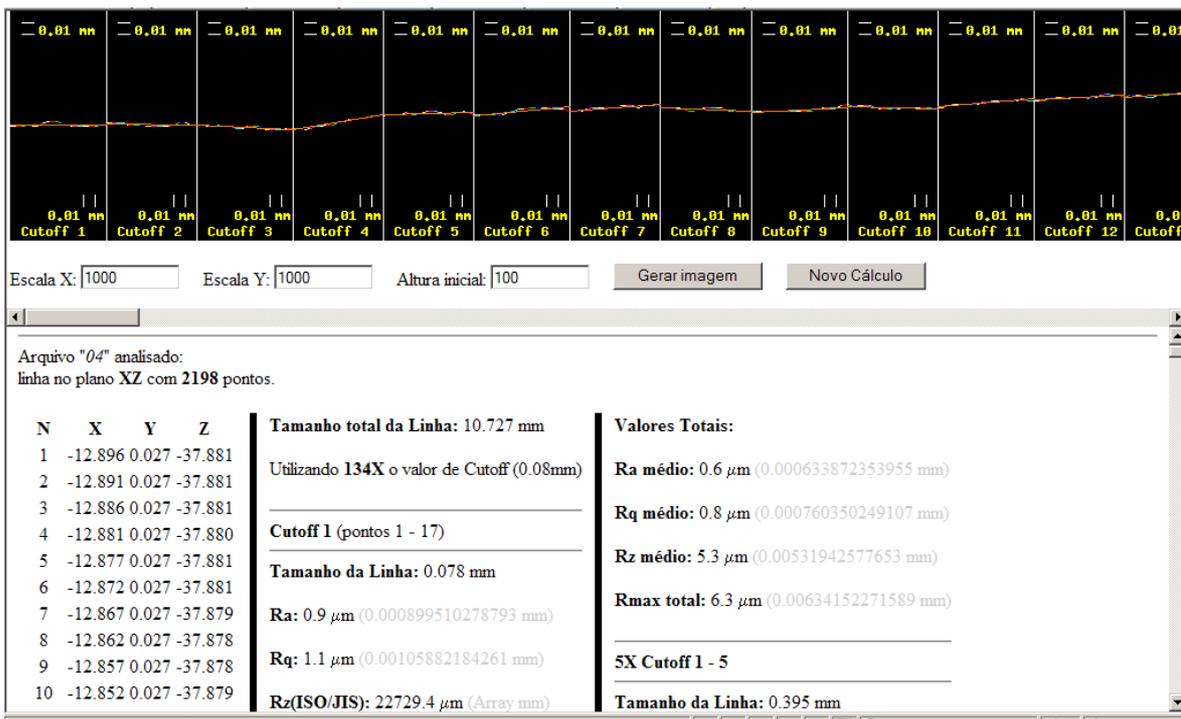
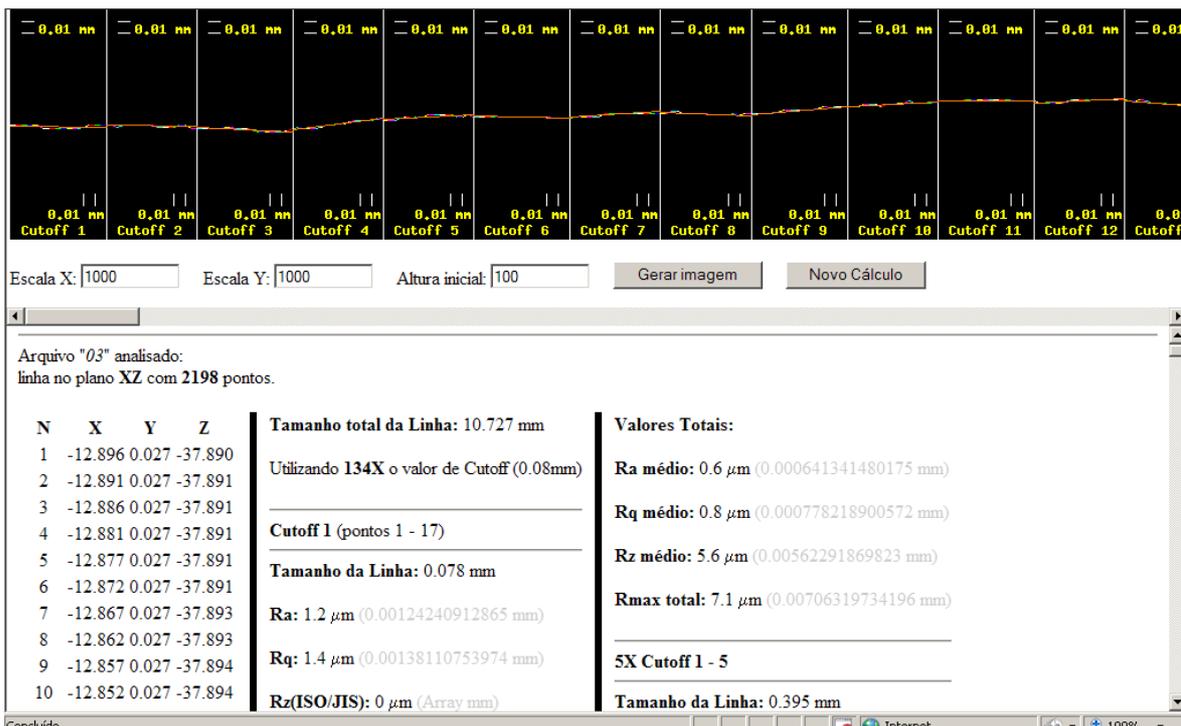


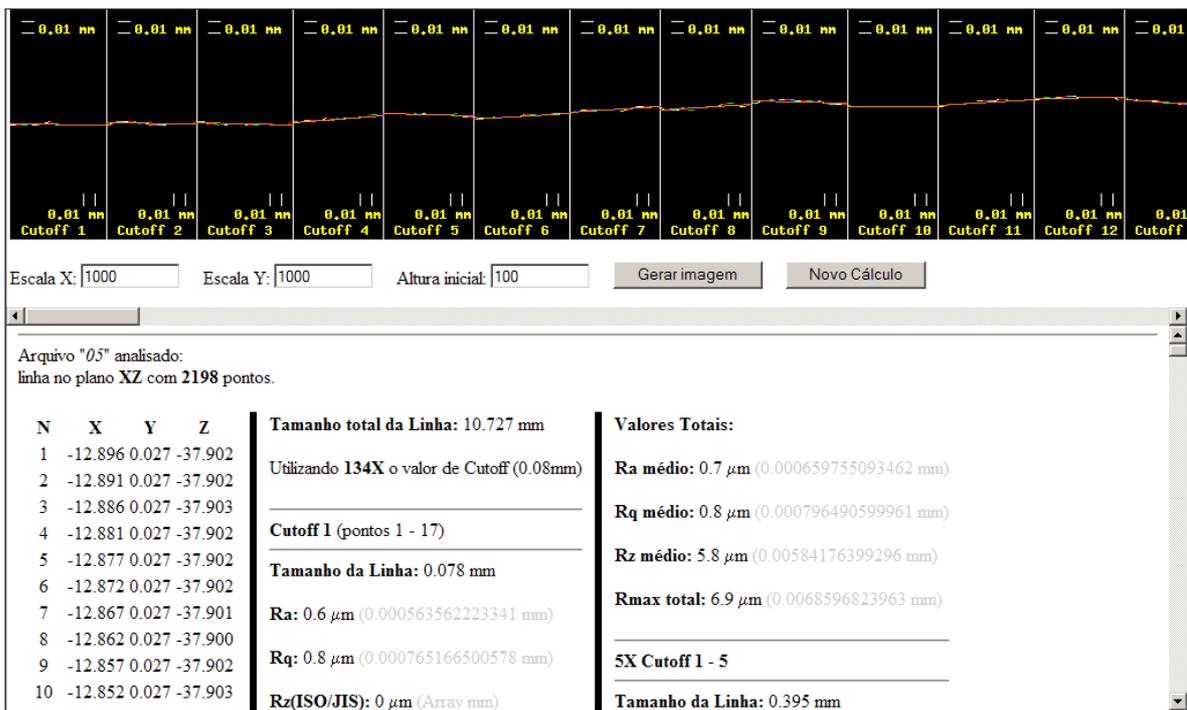




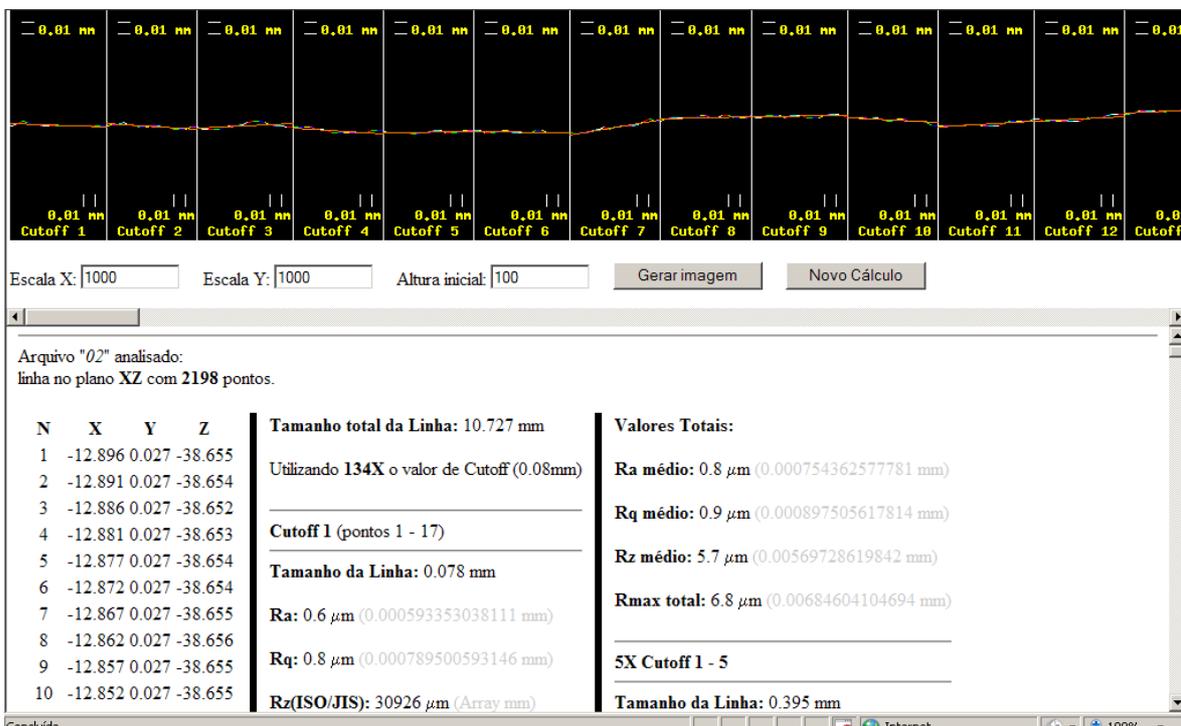
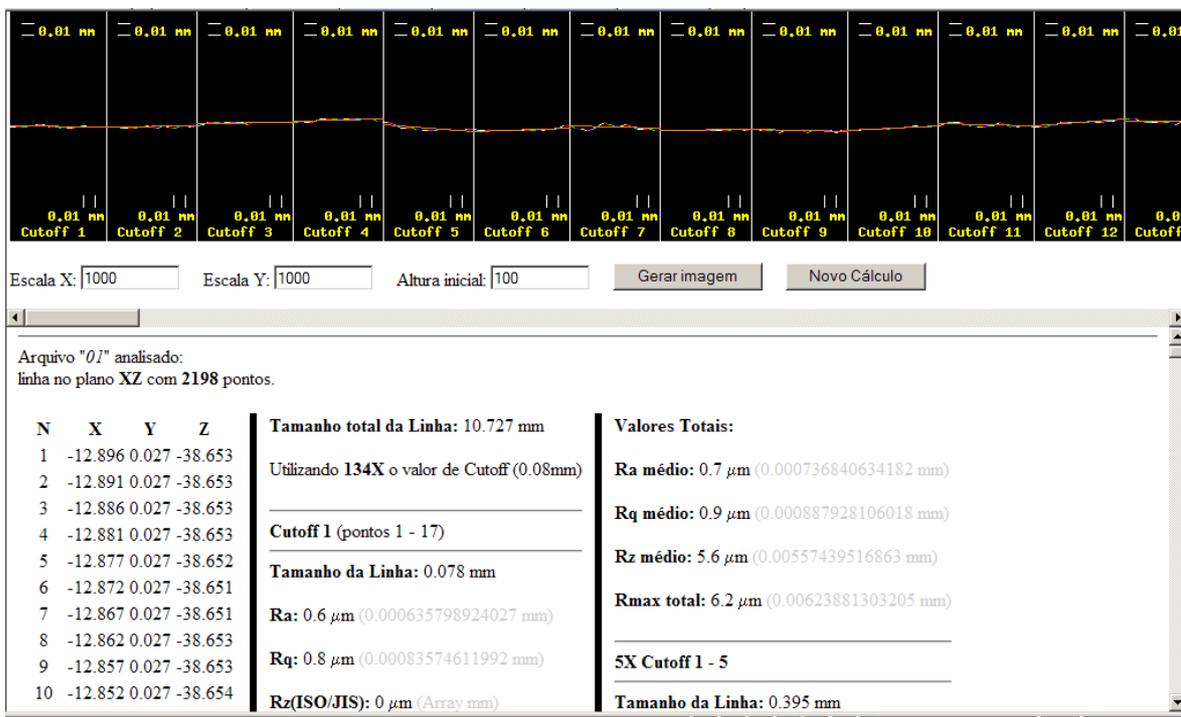
800°C

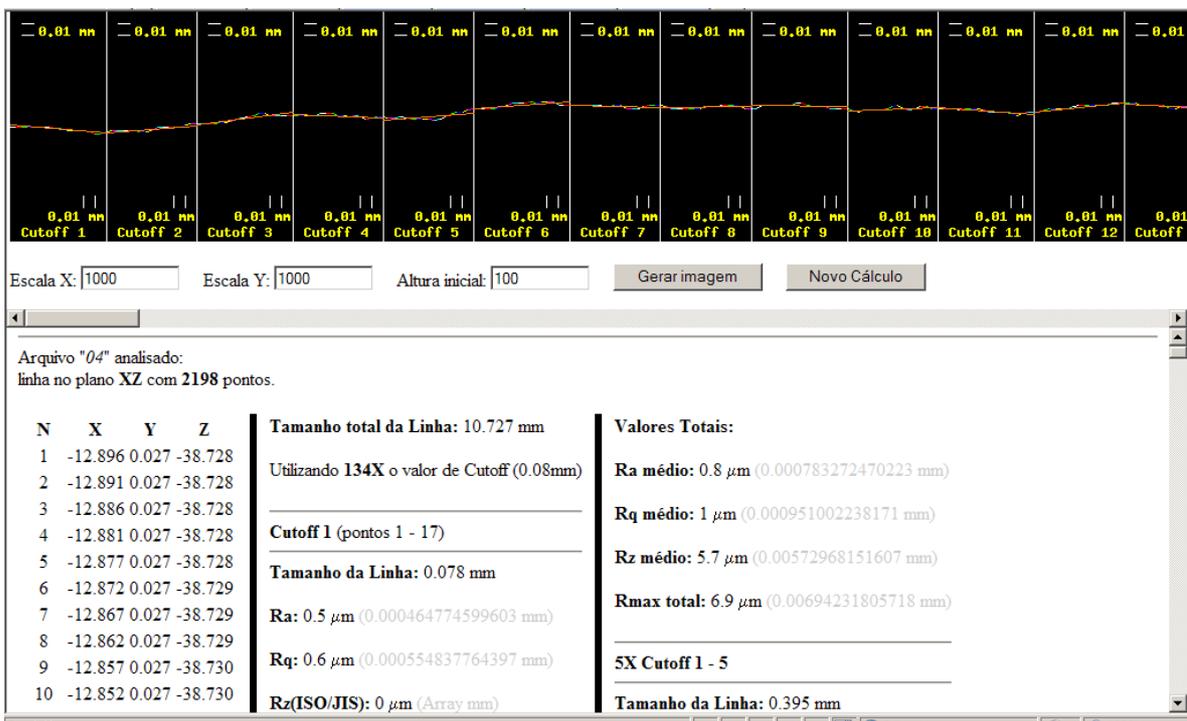
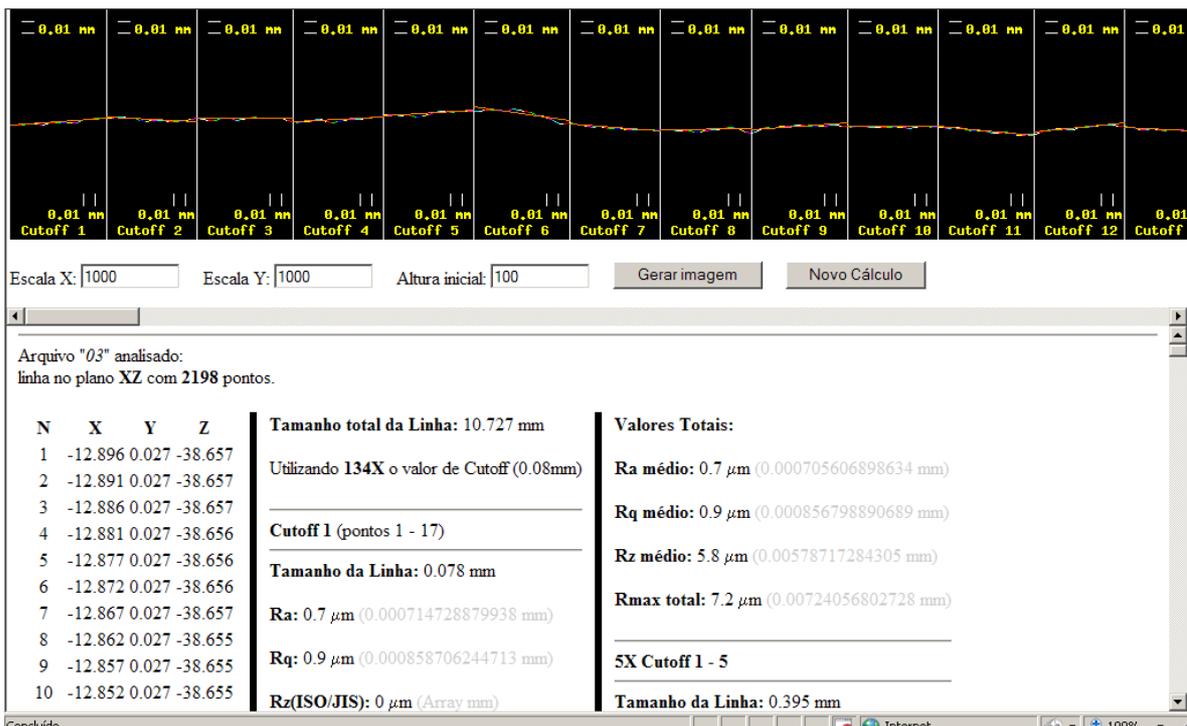






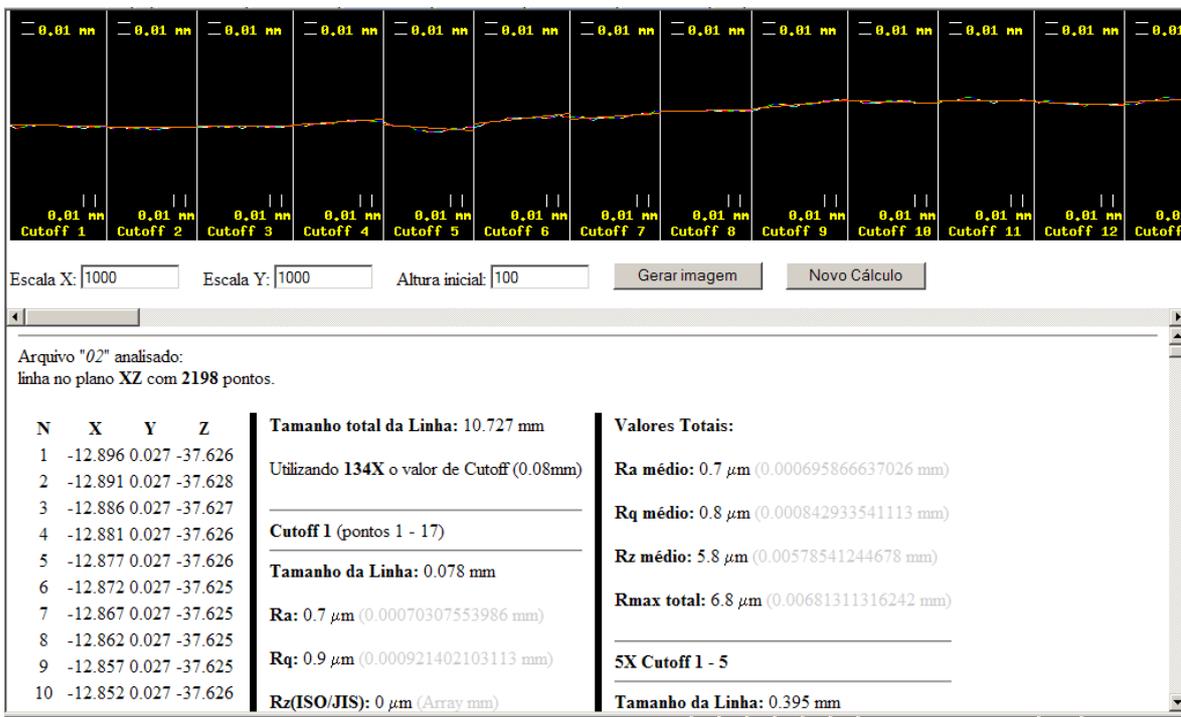
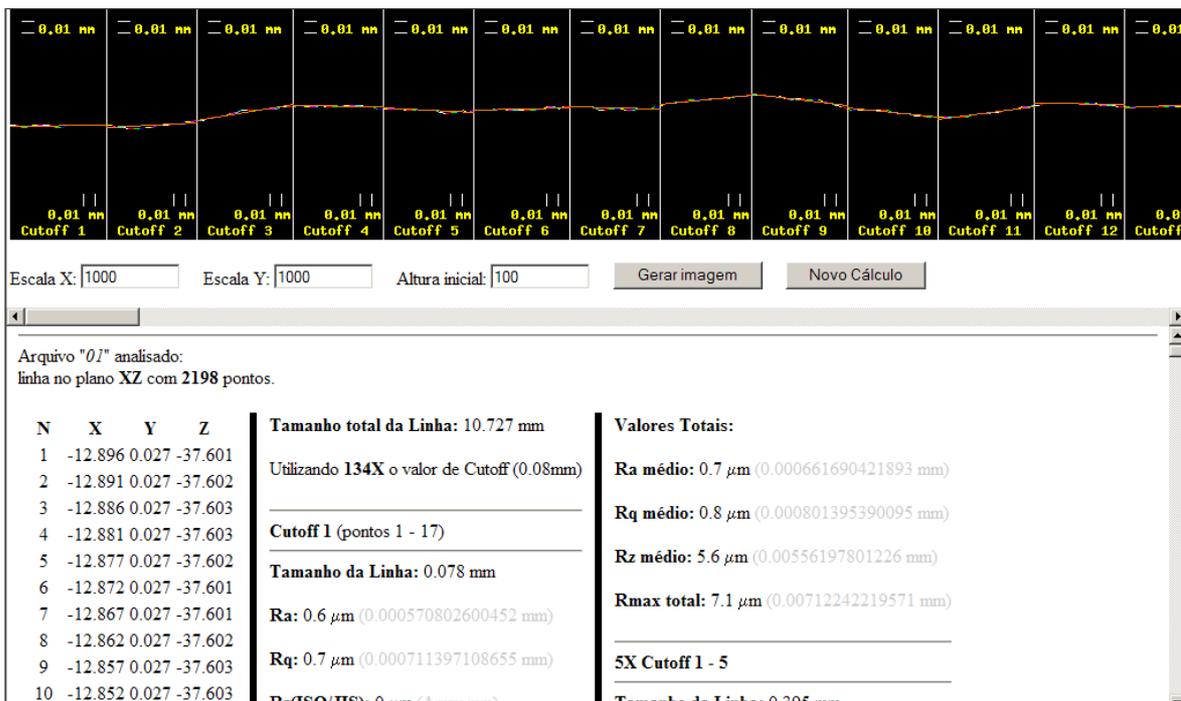
900°C

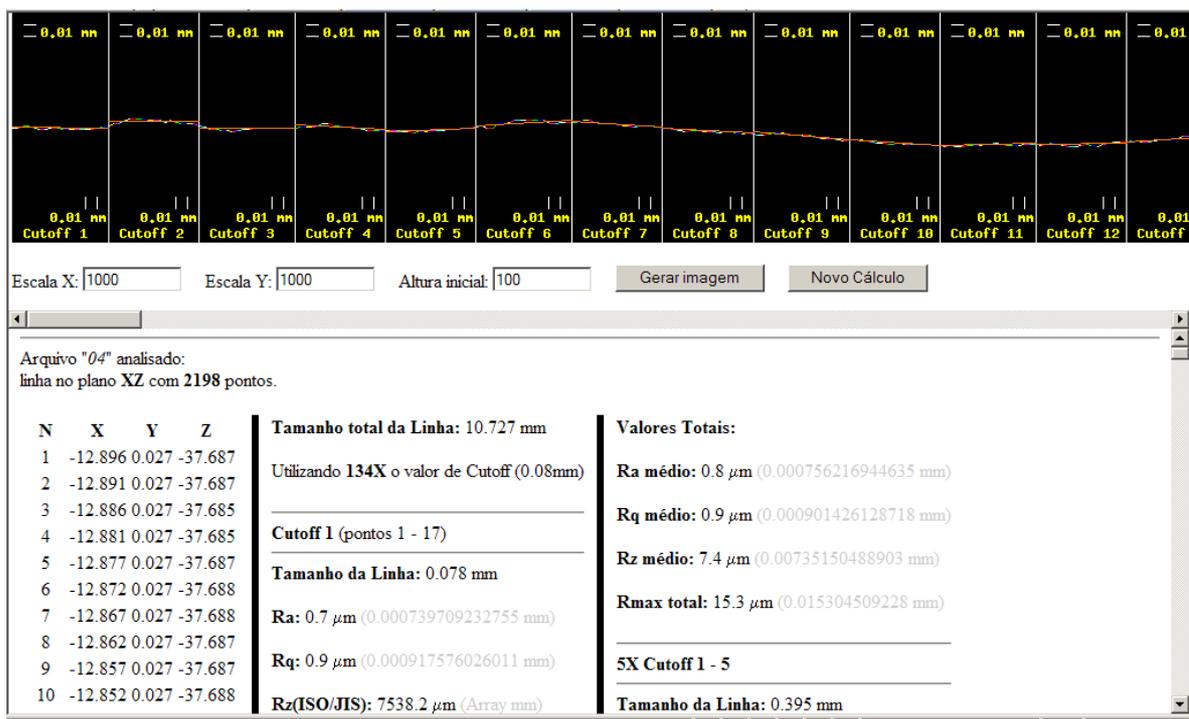
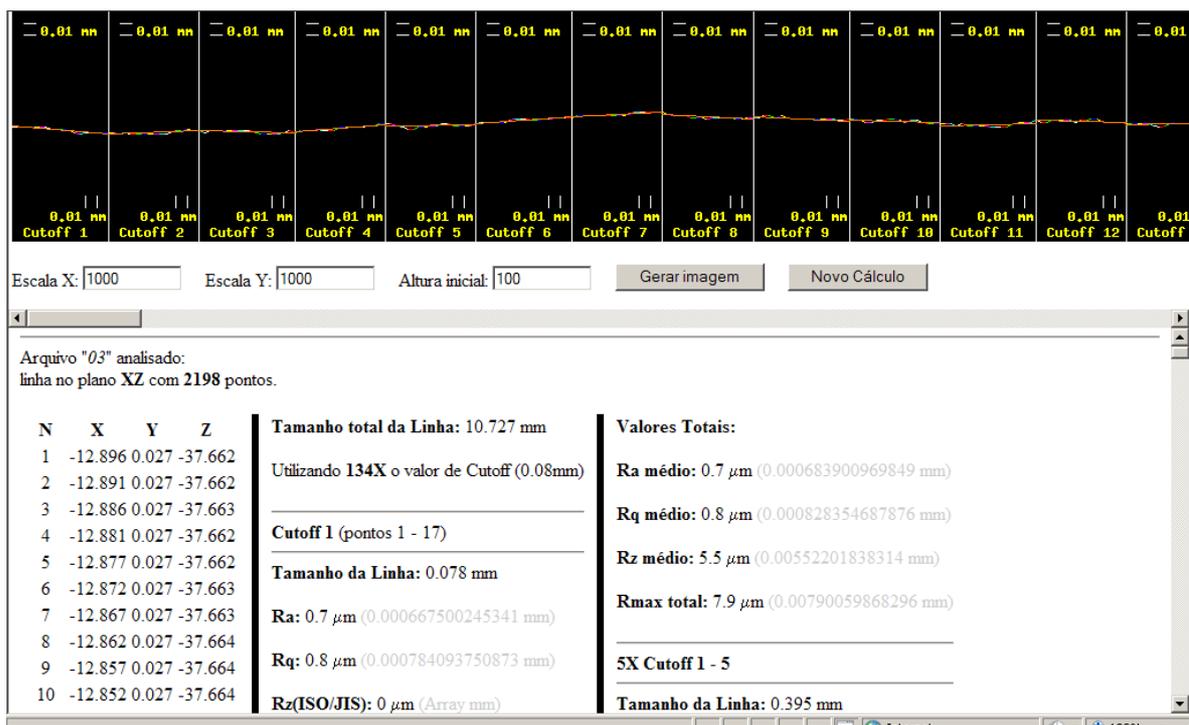


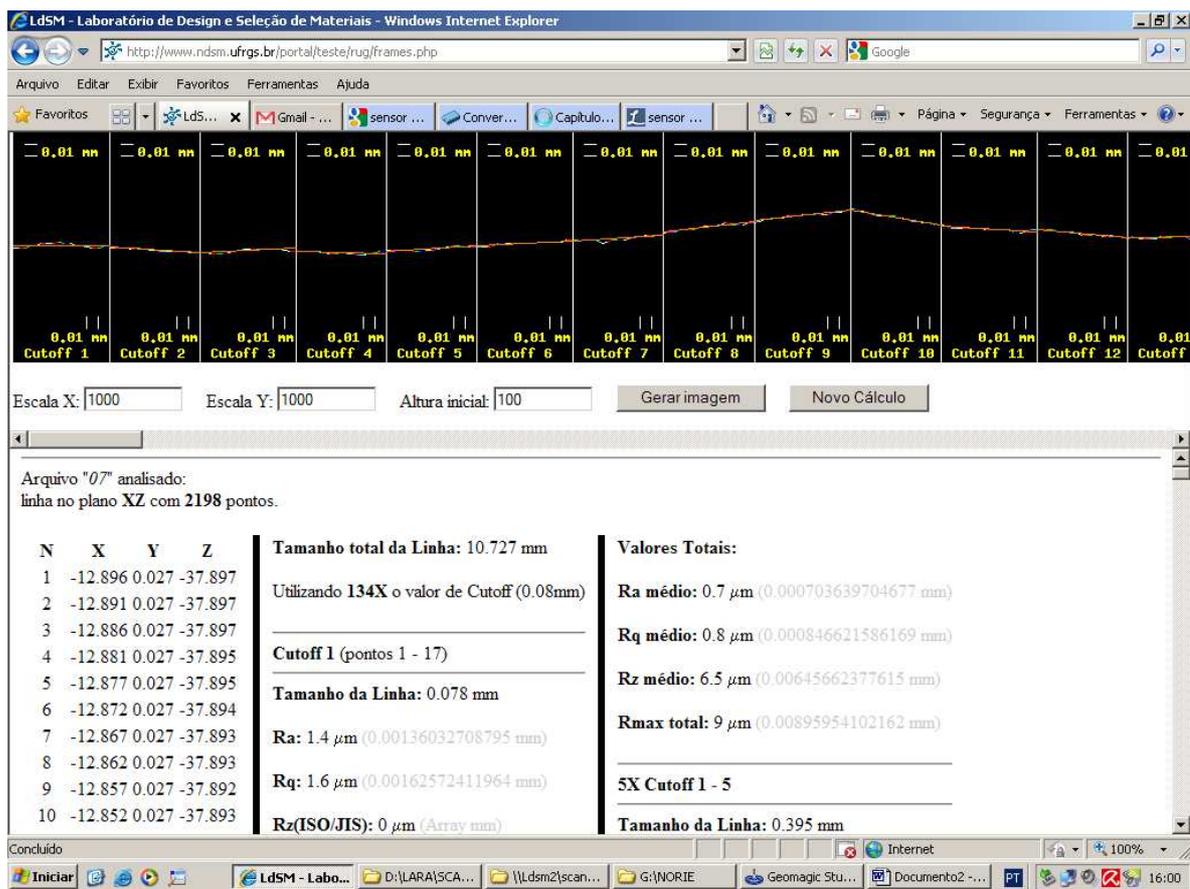




1000°C







APÊNDICE 3

Tabela do ensaio de absorção de água/pasta dos blocos cerâmicos

| | Tempo | Mseca0 | Mconj | Mconj- molde | Marg0 | Mtempo | MtjoloF | Mabs | Marg+molde | MargF | Mevapor. | % evaporação | % absorção |
|--------|-------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|----------|-----------------|---------------|
| 1000°C | 1 | 16,9529 | 44,934 | 33,1455 | 16,1926 | 44,9328 | 17,0977 | 0,1448 | 27,8303 | 16,0418 | 0,0012 | 0,0074 | 0,8942 |
| | 5 | 19,5834 | 48,6146 | 36,8261 | 17,2427 | 48,5784 | 20,2328 | 0,6494 | 28,3456 | 16,5571 | 0,0362 | 0,2099 | 3,7662 |
| | 10 | 21,648 | 51,1839 | 39,3954 | 17,7474 | 51,1173 | 22,5959 | 0,9479 | 28,4845 | 16,696 | 0,0666 | 0,3753 | 5,3411 |
| | 30 | 19,3578 | 46,5384 | 34,7499 | 15,3921 | 46,4532 | 20,4465 | 1,0887 | 26,9867 | 15,1982 | 0,0852 | 0,5535 | 7,0731 |
| | 60 | 21,0632 | 48,2173 | 36,4288 | 15,3656 | 48,079 | 22,5019 | 1,4387 | 26,1771 | 14,3886 | 0,1383 | 0,9001 | 9,3631 |

| | Tempo | Mseca0 | Mconj | Mconj- molde | Marg0 | Mtempo | MtjoloF | Mabs | Marg+molde | MargF | Mevapor. | % evaporação | % absorção |
|-------|-------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|----------|-----------------|---------------|
| 900°C | 1 | 15,8898 | 45,8204 | 34,0003 | 18,1105 | 45,8182 | 16,1892 | 0,2994 | 29,6156 | 17,7955 | 0,0022 | 0,0121 | 1,6532 |
| | 5 | 14,5074 | 43,9304 | 32,1103 | 17,6029 | 43,9169 | 15,1731 | 0,6657 | 28,7292 | 16,9091 | 0,0135 | 0,0767 | 3,7818 |
| | 10 | 19,1977 | 48,9491 | 37,129 | 17,9313 | 48,9203 | 20,1496 | 0,9519 | 28,7468 | 16,9267 | 0,0288 | 0,1606 | 5,3086 |
| | 30 | 13,8481 | 43,1958 | 31,3757 | 17,5276 | 43,1336 | 15,1848 | 1,3367 | 27,9216 | 16,1015 | 0,0622 | 0,3549 | 7,6263 |
| | 60 | 14,7307 | 44,0038 | 32,1837 | 17,453 | 43,8985 | 16,1547 | 1,424 | 27,7218 | 15,9017 | 0,1053 | 0,6033 | 8,1591 |

| | Tempo | Mseca0 | Mconj | Mconj- molde | Marg0 | Mtempo | MtjoloF | Mabs | Marg+molde | MargF | Mevapor. | % evaporação | % absorção |
|-------|-------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|----------|-----------------|---------------|
| 800°C | 1 | 16,915 | 46,883 | 35,0523 | 18,1373 | 46,8809 | 17,1126 | 0,1976 | 29,7529 | 17,9222 | 0,0021 | 0,0116 | 1,0895 |
| | 5 | 16,5192 | 46,1535 | 34,3228 | 17,8036 | 46,1418 | 16,9748 | 0,4556 | 29,1533 | 17,3226 | 0,0117 | 0,0657 | 2,5590 |
| | 10 | 12,9432 | 42,9715 | 31,1408 | 18,1976 | 42,9574 | 13,5024 | 0,5592 | 29,4428 | 17,6121 | 0,0141 | 0,0775 | 3,0729 |
| | 30 | 14,3926 | 44,4392 | 32,6085 | 18,2159 | 44,3706 | 15,4534 | 1,0608 | 28,9025 | 17,0718 | 0,0686 | 0,3766 | 5,8235 |
| | 60 | 16,0334 | 46,2633 | 34,4326 | 18,3992 | 46,1401 | 17,5282 | 1,4948 | 28,5815 | 16,7508 | 0,1232 | 0,6696 | 8,1243 |

| | Tempo | Mseca0 | Mconj | Mconj- molde | Marg0 | Mtempo | MtjoloF | Mabs | Marg+molde | MargF | Mevapor. | % evaporação | % absorção |
|-------|-------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|--------|------------|---------|----------|-----------------|---------------|
| 700°C | 1 | 13,627 | 42,5012 | 30,6819 | 17,0549 | 42,4999 | 13,7792 | 0,1522 | 28,6966 | 16,8773 | 0,0013 | 0,0076 | 0,8924 |
| | 5 | 14,5285 | 43,6564 | 31,8371 | 17,3086 | 43,6478 | 14,8131 | 0,2846 | 28,8269 | 17,0076 | 0,0086 | 0,0497 | 1,6443 |
| | 10 | 14,2277 | 43,8799 | 32,0606 | 17,8329 | 43,8651 | 14,7099 | 0,4822 | 29,1467 | 17,3274 | 0,0148 | 0,0830 | 2,7040 |
| | 30 | 12,5939 | 41,4592 | 29,6399 | 17,046 | 41,4107 | 13,624 | 1,0301 | 27,772 | 15,9527 | 0,0485 | 0,2845 | 6,0431 |
| | 60 | 17,6435 | 47,1234 | 35,3041 | 17,6606 | 47,0379 | 19,0049 | 1,3614 | 28,0136 | 16,1943 | 0,0855 | 0,4841 | 7,7087 |

APÊNDICE 4

Registro fotográfico das argamassas preparadas para ensaio no *squeeze flow* sobre base porosa de substratos cerâmicos



700°C - 5 min



700°C - 15 min



700°C - 60 min



800°C - 5 min



800°C - 15 min



800°C - 60 min



900°C - 5 min



900°C - 15 min



900°C - 60 min



1000°C - 5 min



1000°C - 15 min



1000°C - 60 min



700°C - 5 min



700°C - 15 min



700°C - 60 min



800°C - 5 min



800°C - 15 min



800°C - 60 min



900°C - 5 min



900°C - 15 min



900°C - 60 min



1000°C - 5 min



1000°C - 15 min



1000°C - 60 min

ANEXO 1

Laudos dos ensaios de caracterização das argamassas realizados no CIENTEC/RS



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **26317/96299**
 Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
 Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIOS QUÍMICOS

Cliente: UFRGS/NORIE – CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
 Eng.º Civil, MSc Daniel Tregnago Pagnussat
 Av. Osvaldo Aranha, 99 - Térreo
 90035-190 – Porto Alegre, RS

Itens ensaiados: (05) cinco amostras entregues à CIENTEC pelo Cliente e identificadas como cimento, "Cim. 1 – Jairo", "Cim. 5 – Jairo", "Cim. 9 – Jairo", "Luciana Cordeiro" e "Daniel/Andrea".

Data do recebimento dos itens: 13 de fevereiro de 2009.

Período da realização dos ensaios: 27 de fevereiro a 20 de março de 2009.

Métodos: os óxidos foram determinados por espectrometria de fluorescência de raios X, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Rigaku, modelo RIX3100 ; a perda ao fogo determinada pela ABNT-NBR NM18/2004; o resíduo insolúvel determinado pela ABNT-NBR NM22/2004 e o óxido de cálcio livre determinado pela ABNT – NBR NM13/2004.

RESULTADOS:

| AMOSTRAS: | CIM.1 JAIRO | CIM.5 JAIRO | CIM.9 JAIRO | LUCIANA CORDEIRO | DANIEL/ ANDREA |
|---|----------------|----------------|----------------|---------------------|-------------------|
| Óxido de cálcio(CaO), % | 68,92 | 61,86 | 66,61 | 60,45 | 60,32 |
| Óxido de silício(SiO ₂), % | 21,48 | 17,0 | 21,33 | 20,0 | 20,10 |
| Óxido de alumínio(Al ₂ O ₃), % | 4,18 | 2,89 | 5,17 | 4,05 | 4,19 |
| Óxido de ferro(Fe ₂ O ₃), % | 0,28 | 3,14 | 0,33 | 3,14 | 2,84 |
| Óxido de magnésio(MgO), % | 0,25 | 5,81 | 0,63 | 2,75 | 2,94 |
| Óxido de enxofre(SO ₃), % | <0,5 | 2,14 | 1,44 | 1,94 | 2,03 |
| Óxido de potássio(K ₂ O), % | 0,03 | 1,13 | 0,95 | 1,01 | 1,47 |
| Perda ao fogo(1000°C), % | 2,57 | 2,98 | 1,92 | 5,03 | 4,39 |
| Resíduo Insolúvel, % | 0,54 | 0,64 | 0,43 | 4,0 | 4,1 |
| Óxido de cálcio livre(CaO _{livre}), % | 1,9 | 5,7 | 1,3 | 0,40 | 0,43 |

1/2

Mod. 05

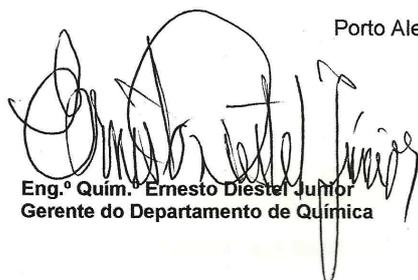
Rua Washington Luiz, 675 CEP 90010-460 Porto Alegre RS Brasil caixa postal 1864 CGC 92.816.685/0001-67
 tel (51) 3287.2000 fax (51) 3226.0207 e-mail cientec@cientec.rs.gov.br homepage www.cientec.rs.gov.br



| | | | |
|-----------|----------------------------|--------|--------------------|
| Documento | RELATÓRIO DE ENSAIO | Número | 26317/96299 |
|-----------|----------------------------|--------|--------------------|

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

Porto Alegre, 23 de março de 2009.



Eng.º Quím.º Ernesto Diestel Junior
Gerente do Departamento de Química



Quím.º Guilherme Alfredo Noschang
Responsável Técnico CRQ 05200689 – 5.ª Região
Coordenador Substituto do Laboratório de Análises
Inorgânicas

2/2

Mod. 05

Rua Washington Luiz, 675 CEP 90010-460 Porto Alegre RS Brasil **caixa postal** 1864 **CGC** 92.816.685/0001-67
tel (51) 3287.2000 **fax** (51) 3226.0207 **e-mail** cientec@cientec.rs.gov.br **homepage** www.cientec.rs.gov.br



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **30492/118340**
 Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
 Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIO EM ARGAMASSA

Cliente: DANIEL PAGNUSSAT
 Rua Eurico Lara, 340
 90880.390 – PORTO ALEGRE – RS

Material ensaiado: três corpos-de-prova prismáticos de argamassa, com dimensões nominais de (4x4x16)cm, entregues à Cientec pelo cliente, já identificados.

Solicitação do Cliente: determinação da resistência à tração na flexão e da resistência à compressão.

Data do recebimento dos materiais: 08 de setembro de 2010.

Data da realização dos ensaios: 11 de setembro de 2010.

Método (s): NBR 13279:2005.

RESULTADOS:

1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

| Identificação do Cliente | Idade (dias) | Resistência à tração na flexão (MPa) | | | | Desvio absoluto máximo (MPa) |
|--|--------------|--------------------------------------|------|------|-------------|------------------------------|
| | | D2-1 | D2-2 | D2-3 | Média | |
| Obra: NORIE/UFRGS Dimensões (4x4x16) cm | 28 | 1,87 | 1,41 | 1,56 | 1,62 | 0,25 |

2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

| Identificação do Cliente | Idade (dias) | Resistência à compressão (MPa) | | | | | | Desvio absoluto máximo (MPa) | |
|--|--------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|------------------------------|-------|
| | | D2-1 | | D2-2 | | D2-3 | | | Média |
| | | A | B | A | B | A | B | | |
| Obra: NORIE/UFRGS Dimensões (4x4x16) cm | 28 | 7,39 | 6,08 | 6,29 | 5,85 | 4,95 | 5,37 | 5,99 | 1,40 |

Porto Alegre, 27 de setembro de 2010.

Eng. Civil Fernando A. Piazza Recena, M. Sc.
Gerente do Dep. de Mat. de Construção Civil

Eng. Civil Dra. Fernanda Macedo Pereira
Responsável Técnico - CREA-RS nº 78176
Coordenadora do Lab. de Mat. Constr. Civil



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **30038/115023**
 Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
 Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIO EM ARGAMASSA

Cliente: DANIEL PAGNUSSAT
 Rua Eurico Lara, 340
 90880.390 – PORTO ALEGRE – RS

Material ensaiado: argamassa preparada na Cientec com os materiais entregues pelo Cliente, com traço em massa 1:1,28:7,03 (cimento:cal:agregado miúdo).

Solicitação do Cliente: determinação da retenção de água.

Data do recebimento dos materiais: 05 de julho de 2010.

Data da realização dos ensaios: 14 de julho de 2010.

Método (s): NBR 13277:2005.

RESULTADOS:

| Determinação | Resultados | Identificação do Cliente |
|-----------------------------|------------|--|
| Retenção de água | 96% | Traço em massa: 1:1,28:7,03; Cimento CP N-40, cal CH I, agregado miúdo constituído por frações idênticas retidas nas peneiras 1,2 mm, 0,6 mm, 0,30 mm e 0,15 mm |
| Consistência | 256 mm | |
| Relação água/argamassa seca | 18% | |

Porto Alegre, 16 de julho de 2010.


 Eng. Civil Dra. Fernanda Macedo Pereira
 Coordenadora do Lab. de Mat. Constr. Civil
 Gerente Subst. do Dep. de Mat. de Const. Civil


 Eng. Civil Felipe Regert Ruduit
 Responsável Técnico – CREA/RS nº 108391