

**PROPORCIONAMENTO DE ARGAMASSAS PARA  
REBOCO DE RECUPERAÇÃO**

**Natália Dilda Posser**

Porto Alegre  
setembro 2004

**NATÁLIA DILDA POSSER**

**PROPORCIONAMENTO DE ARGAMASSAS  
PARA REBOCO DE RECUPERAÇÃO**

Dissertação 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 Mestre em  
Engenharia na modalidade Acadêmico

Porto Alegre  
setembro 2004

POSSER, Natália Dilda

Proporcionamento de Argamassas para Reboco de Recuperação /  
Natália Dilda Posser. – Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2004.

180 p.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul;  
Mestre em Engenharia. Orientador: Angela Borges Masuero.

Assunto I. umidade ascensional II. sais solúveis III. argamassa  
recuperação IV. Aditivos

CCAA2

**NATÁLIA DILDA POSSER**

**PROPORCIONAMENTO DE ARGAMASSAS PARA  
REBOCO DE RECUPERAÇÃO**

Porto Alegre, 03 de setembro de 2004

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

Prof. Dr. Américo Campos Filho  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

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

**Profa. Margarete Regina Freitas Gonçalves (UFPEL)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Sérgio Castello Branco Nappi (UFSC)**  
Dr. pela Universidade Federal de Santa Catarina

Com amor  
ao meu pai, Luiz Roberto  
à minha mãe, Marisa  
aos meus irmãos Renato, Laura e Zeca.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me proporcionado o dom da vida e por quem sempre encontrei apoio necessário nos momentos mais difíceis.

Ao CNPQ e à CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha total dedicação aos meus estudos, bem como à UFRGS e aos Professores e funcionários do Curso de Pós-Graduação em Construção Civil.

À Professora Angela Masuero, pelo grande apoio e orientação precisa no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Aldo Boggio e Denise Dal Molin, pela ajuda prestada durante os ensaios em laboratório.

Ao Professor José Luis Duarte Ribeiro pela orientação no planejamento do experimento e apresentação dos resultados.

Aos Professores Sérgio Nappi e Jörg Seele, pela amizade, auxílio e material didático fornecido que foram imprescindíveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Jäger, bem como aos colegas do grupo IQN da TU Dresden, em especial Dóris, Beate e David, pela amizade e ajuda durante minha estada naquela universidade.

Às empresas de argamassa alemãs, ao Instituto IGS e à Universidade RWTH-Aachen pelas informações e material didático fornecido.

Aos auxiliares de pesquisa, que colaboraram na execução dos ensaios desenvolvidos em laboratório.

À CIENTEC, pela assistência na execução dos ensaios realizados naquela instituição.

Às empresas fornecedoras dos materiais necessários para a realização da parte experimental deste trabalho, bem como ao LACER, pela realização de ensaios químicos.

A todos os meus colegas e amigos do NORIE, em especial à Cristiane, Aline, Daniel, Aguida, Geilma, Ana Paula, Alexandre, Elaine e Simone pela amizade, apoio, auxílio e companheirismo durante estes anos de convivência.

Aos meus familiares, em especial aos meus pais e irmãos, pelo carinho, amor, paciência e incentivo que deram ao longo da minha vida e que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado Lars, pelo amor, carinho e compreensão que, mesmo de longe, demonstrou em todos os momentos.

Finalmente agradeço a todos aqueles que, apesar de não serem aqui citados, me transmitiram o incentivo e a confiança indispensáveis para realização deste trabalho.

## RESUMO

POSSER, N.D. **Proporcionamento de argamassas de reboco de recuperação.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Dentre as diversas manifestações patológicas que são encontradas nas edificações em alvenaria, tem-se a umidade e os sais solúveis como os principais agentes de deterioração dos materiais de construção. No Brasil, os estudos sobre novos materiais e tecnologias construtivas referentes à recuperação de alvenarias que apresentem estas manifestações patológicas ainda são insuficientes. Isto resulta no uso de técnicas e produtos inadequados que podem acarretar maiores danos às edificações. Dentre as diversas técnicas e materiais utilizados para o saneamento das edificações, tem-se a aplicação de revestimentos de argamassas de recuperação como uma solução de fácil aplicação e custo reduzido. Estes revestimentos foram desenvolvidos originalmente na Alemanha e têm sido utilizados há mais de 20 anos na Europa apresentando resultados satisfatórios. Devido à sua elevada porosidade, estas argamassas especiais permitem a cristalização dos sais no interior dos seus poros, sem provocar danos ao revestimento e, por serem impermeáveis à água e permeáveis ao vapor, impedem a entrada da água da chuva permitindo a secagem eficiente do substrato. O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma argamassa de reboco de recuperação, utilizando materiais disponíveis no mercado nacional, para ser aplicada em alvenarias contaminadas por umidade e sais de maneira a prolongar a vida útil do revestimento. Como no Brasil não existem recomendações específicas para as propriedades que estas argamassas especiais devem apresentar, este estudo baseou-se nas prescrições do Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91. Assim, foram analisadas propriedades no estado fresco (índice de consistência, trabalhabilidade, teor de ar incorporado, massa específica e retenção de água) e endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água por capilaridade, altura de penetração de água, massa específica, absorção por imersão, porosidade, resistência aos sais e coeficiente de resistência à difusão de vapor) em 26 diferentes proporções de materiais em argamassas mistas, variando a relação cal/cimento e os teores de aditivo incorporador de ar, hidrofugante e retentor de água, mantendo fixa a relação aglomerante/agregado. Os resultados obtidos neste estudo indicam que uma argamassa 1:0,60: 5,60 (cimento Portland pozolânico: cal hidratada: agregado miúdo), sendo o agregado miúdo composto por 94% de areia quartzosa e 6% de agregado leve, e teores de aditivo incorporador de ar de 1,0% , teor de hidrofugante de 1,0 % e 0,8% de retentor de água, pode ser utilizada como reboco de recuperação para o saneamento de edificações contaminadas por umidade e sais solúveis.

Palavras-chave: umidade ascensional; sais solúveis; argamassa; recuperação; aditivos.

## ABSTRACT

POSSER, N.D. **Proportioning of recuperation plasters**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Several types of decay can be found in masonry constructions, being the humidity and the soluble salts as the main deterioration agents of materials construction. The studies related to new materials and constructive technologies for masonry reconstruction that presents those decays are still insufficient in Brazil. The consequences on the use of inadequate techniques and products can convey in reliable damages to the constructions. Among numerous techniques and materials used for restoration of constructions, the use of recuperation plasters as a coating material is a solution that presents easy application and reduced cost. These coatings were originally developed in Germany and they have been used since more than 20 years in Europe showing satisfying results. Due to its high porosity, these special plasters allow the crystallization of the salts inside of its pores, without provoking damages to the coating and, because of their impermeability to water and its permeability to vapour, they impede the rain water entrance allowing an efficient drying of the masonry. The objective of this study is to develop a recuperation plaster made with available materials in the national market to be applied in contaminated masonry by humidity and soluble salts to extend the coating service life. As in Brazil there are no specific recommendations for the properties that these special plasters must present, this study was based on the prescriptions of the Notebook of German Recommendations WTA 2-2-91. In this way, properties were analyzed in fresh condition (consistence, workability, amount of incorporated air, specific mass and water retention) and hardened condition (compression strength, flexural strength, immersion and capillary absorption, height of water penetration, specific mass, porosity, salts resistance and resistance to vapor diffusion) in 26 different material proportions of plasters, fixing the rate binder/aggregate and varying the lime/cement rate as the amount of air entraining, water repellent and water retaining admixtures. The results obtained in this study indicate that a plaster 1:0,60:5,60 (pozzuolanic Portland cement: hydrated lime: aggregates), being the aggregates composed by 94% of quartz sand and 6% of light aggregate, with 1,0% of air entraining agent, 1,0% of water repellent and 0,8% of water retaining admixture can be used to the recuperation of the constructions contaminated by humidity and soluble salts.

Word-key: humidity; soluble salts; plaster; recuperation; admixture.

## SUMÁRIO

|  |      |
|--|------|
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....                                      | p.10 |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....                                      | p.13 |
| <b>LISTA DE SIGLAS</b> .....                                       | p.18 |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | p.19 |
| 1.1 OBJETIVOS.....   | p.21 |
| 1.2 LIMITAÇÕES .....   | p.22 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....                                    | p.22 |
| <b>2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO POR UMIDADE E SAIS</b> .....       | p.24 |
| 2.1 UMIDADE .....  | p.25 |
| 2.1.1 Mecanismos de Transporte de Umidade nos Materiais .....      | p.26 |
| 2.1.2 Formas de Manifestações de Umidade.....                      | p.31 |
| 2.2 SAIS SOLÚVEIS.....   | p.32 |
| 2.3 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO E REPARO DAS ALVENARIAS .....           | p.38 |
| 2.3.1 Impermeabilização Horizontal.....                            | p.39 |
| 2.3.2 Dessalinização.....  | p.40 |
| <b>3 SISTEMAS DE REVESTIMENTO DE RECUPERAÇÃO</b> .....             | p.43 |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO (WTA) .....           | p.45 |
| 3.2 APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO.....                     | p.47 |
| 3.4 MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS DE<br>RECUPERAÇÃO ..... | p.50 |
| 3.4.1 Aglomerantes .....   | p.50 |
| 3.4.1.1 <i>Cal Hidratada</i> .....                                 | p.51 |
| 3.4.1.2 <i>Cimento Portland</i> .....                              | p.54 |
| 3.4.2 Agregado Miúdo .....   | p.56 |
| 3.4.3 Água de Amassamento .....                                    | p.61 |
| 3.4.4 Aditivos .....   | p.62 |
| 3.4.4.1 <i>Aditivos incorporadores de ar</i> .....                 | p.62 |
| 3.4.4.2 <i>Aditivos hidrofugantes</i> .....                        | p.66 |

|  |       |
|--|-------|
| 3.5 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO .....                                | p.68  |
| 3.5.1 Principais Propriedades da Argamassas no Estado Fresco .....                             | p.68  |
| 3.5.1.1 <i>Trabalhabilidade</i> .....  | p.69  |
| 3.5.1.2 <i>Consistência e plasticidade</i> .....   | p.69  |
| 3.5.1.3 <i>Massa específica aparente e teor de ar incorporado</i> .....                        | p.70  |
| 3.5.1.4 <i>Retenção de água</i> .....  | p.71  |
| 3.5.2 Principais Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido.....                         | p.72  |
| 3.5.2.1 <i>Massa específica, massa aparente e resistência mecânica.</i> .....                  | p.72  |
| 3.5.2.2 <i>Permeabilidade e porosidade</i> .....   | p.73  |
| <b>4 ESTUDO EXPERIMENTAL DE ARGAMASSAS PARA REBOCOS DE RECUPERAÇÃO</b> .....                   | p.76  |
| 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....   | p.76  |
| 4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO E PROJETO ESTATÍSTICO UTILIZADO .....                          | p.79  |
| 4.3 MÉTODOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS .....   | p.81  |
| 4.3.1 Confecção das Argamassas .....   | p.82  |
| 4.3.2 Ensaio com Argamassa no Estado Fresco.....   | p.83  |
| 4.3.3 Preparação e Armazenagem dos Corpos-de-prova.....  | p.86  |
| 4.3.4 Ensaio com Argamassa no Estado Endurecido .....  | p.88  |
| 4.3.4.1 <i>Massa específica, absorção de água por imersão e porosidade aparente</i> .....      | p.88  |
| 4.3.4.2 <i>Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e massa unitária</i> ..... | p.89  |
| 4.3.4.3 <i>Absorção capilar e profundidade de penetração de água</i> .....                     | p.91  |
| 4.3.4.4 <i>Resistência aos sais</i> .....  | p.93  |
| 4.3.4.5 <i>Coefficiente de resistência à difusão de vapor</i> .....                            | p.93  |
| <b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....   | p.95  |
| 5.1 ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .....  | p.95  |
| 5.1.1 Relação água/aglomerante.....  | p.96  |
| 5.1.2 Consistência e Trabalhabilidade .....  | p.98  |
| 5.1.3 Teor de Ar Incorporado .....   | p.101 |
| 5.1.4 Retenção de Água.....  | p.103 |
| 5.1.5 Massa Específica da Argamassa no Estado Fresco .....                                     | p.105 |
| 5.2 ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....  | p.107 |
| 5.2.1 Resistência à Compressão .....   | p.108 |

|   |              |
|---|--------------|
| 5.2.2 Resistência à Tração na Flexão.....                                   | p.111        |
| 5.2.3 Relação Resistência à Compressão/Resistência à Tração na Flexão.....  | p.115        |
| 5.2.4 Absorção de Água por Capilaridade .....                               | p.118        |
| 5.2.5 Altura de Penetração de Água por Capilaridade .....                   | p.121        |
| 5.2.6 Massa Específica Aparente.....  | p.123        |
| 5.2.7 Absorção de Água por Imersão .....                                    | p.125        |
| 5.2.8 Índice de Vazios (Porosidade Aparente) .....                          | p.130        |
| 5.2.9 Resistência aos Sais .....  | p.133        |
| 5.2.10 Resistência à Difusão de Vapor d'Água.....                           | p.135        |
| <b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>       | <b>p.139</b> |
| 6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | p.139        |
| 6.1.1 Consistência e Trabalhabilidade .....                                 | p.139        |
| 6.1.2 Teor de Ar Incorporado .....  | p.140        |
| 6.1.3 Retenção de Água.....   | p.140        |
| 6.1.4 Massa Específica no Estado Fresco .....                               | p.140        |
| 6.1.5 Resistência à Compressão .....  | p.140        |
| 6.1.6 Resistência à Tração por Flexão .....                                 | p.141        |
| 6.1.7 Relação entre as Resistências à Compressão e à Tração na Flexão ..... | p.141        |
| 6.1.8 Absorção de Água por Capilaridade .....                               | p.141        |
| 6.1.9 Altura de Penetração de Água por Capilaridade .....                   | p.142        |
| 6.1.10 Massa Específica Aparente.....                                       | p.142        |
| 6.1.11 Porosidade Aparente (Índice de Vazios) .....                         | p.142        |
| 6.1.12 Resistência aos Sais .....   | p.143        |
| 6.1.12 Resistência à Difusão de Vapor de Água.....                          | p.143        |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                  | p.144        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                      | <b>p.146</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>   | <b>p.154</b> |
| <b>APÊNDICE B .....</b>   | <b>p.168</b> |
| <b>APÊNDICE C .....</b>   | <b>p.170</b> |
| <b>APÊNDICE D .....</b>   | <b>p.177</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   |      |
|---|------|
| Figura 1: formas de armazenamento de água: adsorção (A-C), capilaridade (D) e supersaturação (E).....   | p.27 |
| Figura 2: formação do menisco decorrente do contato da água com a superfície de um sólido.....  | p.29 |
| Figura 3: altura de penetração de água em tubos de vidro de diferentes diâmetros .....  | p.30 |
| Figura 4: representação esquemática da umidade no interior da alvenaria causada por chuva, condensação interna, umidade ascensional e umidade presente no material..... | p.32 |
| Figura 5: eflorescência em alvenaria .....  | p.36 |
| Figura 6: criptoeflorescência em alvenaria .....  | p.37 |
| Figura 7: zonas de distribuição de sais solúveis na alvenaria.....  | p.38 |
| Figura 8: movimentação da umidade e dos sais em sistemas convencionais de revestimento em argamassa .....   | p.43 |
| Figura 9: movimentação da umidade e dos sais em revestimento de argamassa de recuperação .....  | p.44 |
| Figura 10: movimentação da umidade na alvenaria e cristalização dos sais solúveis nos poros da argamassa de recuperação .....   | p.44 |
| Figura 11: permeabilidade à água por capilaridade de materiais porosos (a) sem aditivo hidrofugante e (b) com aditivo hidrofugante .....                                | p.66 |
| Figura 12: mesa utilizada para os ensaios de consistência e trabalhabilidade.....   | P.83 |
| Figura 13: corpos-de-prova (a) durante o início da imersão e (b) durante a determinação da massa em balança hidrostática após imersão e fervura .....                   | p.88 |
| Figura 14: aparatos metálicos utilizados para os ensaios de (a) resistência à tração na flexão e (b) resistência à compressão, sendo as medidas em mm.....              | p.90 |
| Figura 15: ensaio de resistência à tração na flexão (a) antes e (b) após a ruptura do corpo-de-prova .....  | p.91 |
| Figura 16: corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão.....   | p.91 |
| Figura 17: corpos-de-prova durante o ensaio de absorção capilar de água .....   | p.92 |
| Figura 18: corpos-de-prova cilíndricos preparados para a medição da profundidade de penetração de água por capilaridade .....   | p.92 |
| Figura 19: ensaio de resistência aos sais em corpos-de-prova de argamassa .....   | p.93 |

|   |       |
|---|-------|
| Figura 20: ensaio para a determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor.....   | p.94  |
| Figura 21: relação água/aglomerante das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA.....  | p.97  |
| Figura 22: índice de consistência das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA.....  | p.100 |
| Figura 23: teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID .....   | p.103 |
| Figura 24: retenção de água das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de retentor.....  | p.104 |
| Figura 25: massa específica das argamassas no estado fresco em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA.....   | p.106 |
| Figura 26: resistência à compressão das argamassas no estado endurecido em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA (b) HID e (c) RET ..... | p.109 |
| Figura 27: resistência à tração na flexão das argamassas em função dos teores de (a) IA (b) HID e (c) RET para diferentes teores de cal/cim .....             | p.114 |
| Figura 28: relação $f_c/f_t$ das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) RET.....                                      | p.116 |
| Figura 29: absorção capilar das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) HID .....                                      | p.119 |
| Figura 30: absorção capilar das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim .....                                    | p.120 |
| Figura 31: altura de penetração de água por capilaridade das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de HID.....                            | p.122 |
| Figura 32: massa específica das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim .....                                    | p.125 |
| Figura 33: absorção de água por imersão das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA (b) HID e (c) RET .....                  | p.127 |
| Figura 34: absorção por imersão das argamassas em função dos teores de (a) IA (b) HID e (c) RET para diferentes teores de cal/cim.....                        | p.129 |
| Figura 35: índice de vazios das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) HID .....                                      | p.131 |
| Figura 36: índice de vazios das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim .....                                    | p.132 |
| Figura 37: resistência aos sais das argamassas em função da (a) relação cal/cim e (b) do teor de HID.....   | p.134 |

|   |       |
|---|-------|
| Figura 38: coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas em função do teor de (a) IA e (b) RET para diferentes relações cal/cim..... | p.137 |
| Figura 39: instrumento utilizado para a determinação do teor de ar incorporado .....  | p.156 |
| Figura 40: adensamento dos corpos-de-prova com o uso de mesa vibratória .....   | p.157 |
| Figura 41: armazenagem dos corpos-de-prova (a) cilíndricos e (b) prismáticos.....   | p.157 |
| Figura 42: corpos-de-prova de argamassa durante o ensaio de absorção de água por capilaridade .....   | p.158 |
| Figura 43: corpos-de-prova de argamassa durante o ensaio de resistência ao saís .....   | p.158 |
| Figura 44: influência dos aditivo incorporador de ar no índice de consistência das argamassas com diferentes teores de hidrofugante.....                    | p.159 |
| Figura 45: influência do aditivo incorporador de ar na trabalhabilidade em argamassas com diferentes teores de hidrofugante .....                           | p.160 |
| Figura 46: influência do aditivo hidrofugante na trabalhabilidade de argamassas com diferentes teores de incorporador de ar.....                            | p.160 |
| Figura 47: influência do aditivo incorporador de ar na relação água/aglomerante em argamassas com diferentes teores de hidrofugante.....                    | p.161 |
| Figura 48: influência do aditivo hidrofugante na relação água/aglomerante em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar.....                    | p.161 |
| Figura 49: influência do aditivo incorporador de ar no teor de ar incorporado em argamassas com diferentes teores de hidrofugante.....                      | p.162 |
| Figura 50: influência do aditivo hidrofugante no teor de ar incorporado em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar .....                     | p.163 |
| Figura 51: influência do aditivo incorporador de ar na massa específica de argamassas com diferentes teores de hidrofugante .....                           | p.164 |
| Figura 52: influência do aditivo incorporador de ar na massa específica aparente de argamassas com diferentes teores de hidrofugante.....                   | p.165 |
| Figura 53: influência do aditivo hidrofugante na massa específica aparente de argamassas com diferentes teores de incorporador de ar.....                   | p.165 |
| Figura 54: influência do aditivo hidrofugante na altura de penetração de água em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar.....                | p.166 |

## LISTA DE TABELAS

|  |      |
|--|------|
| Tabela 1: manifestações patológicas nos revestimentos, suas prováveis causas e reparos.....  | p.25 |
| Tabela 2: pressão de cristalização dos sais .....  | p.34 |
| Tabela 3: umidade relativa de equilíbrio de alguns sais de acordo com a temperatura.....   | p.34 |
| Tabela 4: aumento de volume dos sais solúveis devido à hidratação.....   | p.35 |
| Tabela 5: efeitos da higroscopicidade dos sais contaminantes no conteúdo de umidade dos materiais.....   | p.35 |
| Tabela 6: características do emboço de recuperação WTA 2-2-91.....   | p.45 |
| Tabela 7: características do reboco de recuperação WTA 2-2-91.....   | p.46 |
| Tabela 8: avaliação do teor de sais de acordo com a WTA E-2-6-99/D.....  | p.48 |
| Tabela 9: intervenção em relação ao grau de salinização.....   | p.49 |
| Tabela 10: influência das características da areia nas propriedades das argamassas .....   | p.59 |
| Tabela 11: alteração das propriedades das argamassas para assentamento e revestimento por aditivos incorporadores de ar .....                                  | p.64 |
| Tabela 12: análises químicas e físicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32.....  | p.77 |
| Tabela 13: análises químicas e físicas da cal hidratada CH III .....   | p.77 |
| Tabela 14: características dos agregados.....  | p.78 |
| Tabela 15: características do aditivo hidrofugante .....   | p.78 |
| Tabela 16: ensaios realizados para a escolha do aditivo incorporador de ar .....   | p.79 |
| Tabela 17: proporcionamento das argamassas definido pelo projeto estatístico.....  | p.80 |
| Tabela 18: ensaios utilizados para a determinação das propriedades das argamassas de recuperação .....   | p.82 |
| Tabela 19: comparação entre os métodos utilizados para a determinação da consistência .....  | p.84 |
| Tabela 20: dimensões e formas dos corpos-de-prova .....  | p.87 |
| Tabela 21: valores médios das propriedades das argamassas no estado fresco em função da relação cal/cim e dos teores de aditivos para a idade de 28 dias ..... | p.96 |
| Tabela 22: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação água/aglomerante em função da relação cal/cim e teor de IA.....     | p.98 |

|  |       |
|--|-------|
| Tabela 23: valores codificados utilizados para a análise de regressão múltipla.....  | p.99  |
| Tabela 24: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de consistência das argamassas em função da relação cal/cim e teor de IA.....                          | p.101 |
| Tabela 25: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função da relação cal/cim e teor de IA e HIDp.                   | 102   |
| Tabela 26: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cim.....          | p.103 |
| Tabela 27: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cim.....          | p.105 |
| Tabela 28: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para a massa específica das argamassas no estado fresco em função da relação cal/cim e do teor de IA.....        | p.107 |
| Tabela 29: valores médios das propriedades das argamassas no estado endurecido durante a Avaliação Final.....  | p.108 |
| Tabela 30: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à compressão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET.....       | p.110 |
| Tabela 31: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à compressão das argamassas em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim.....       | p.111 |
| Tabela 32: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à tração na flexão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET..... | p.113 |
| Tabela 33: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à tração na flexão das argamassas em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim..... | p.115 |
| Tabela 34: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação fc/ft das argamassas em função relação cal/cim e dos teores de IA e RET.....                          | p.117 |
| Tabela 35: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação fc/ft das argamassas em função dos teores de IA e RET e da relação cal/cim.....                       | p.117 |
| Tabela 36: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção capilar das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA e HIDp.                       | 119   |
| Tabela 37: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção capilar das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cimp.                       | 121   |
| Tabela 38: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da altura de penetração de água das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA                   | p.123 |

|  |       |
|--|-------|
| Tabela 39: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados massa específica das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID.....                                   | p.124 |
| Tabela 40: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da massa específica das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID e da relação cal/cimento .....                                     | p.125 |
| Tabela 41: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção por imersão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET .....  | p.128 |
| Tabela 42: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção por imersão em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim .....   | p.130 |
| Tabela 43: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID.....                                | p.132 |
| Tabela 44: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID para diferentes relações cal/cim.....                              | p.133 |
| Tabela 45: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência aos sais das argamassas em função da relação cal/cim e do teor de aditivo HID.....  | p.135 |
| Tabela 46: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do coeficiente de resistência à difusão de vapor em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e RET.....                  | p.136 |
| Tabela 47: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas em função dos teores de aditivo IA e RET para diferentes relações cal/cim..... | p.138 |
| Tabela 48: comparação entre as prescrições da WTA 2-2-91 e os resultados observados nos ensaios em argamassa fresca e endurecida .....   | p.144 |
| Tabela 49: composição granulométrica do agregado miúdo .....   | p.155 |
| Tabela 50: relação dos ensaios e métodos utilizados durante os ensaios preliminares.....   | p.155 |
| Tabela 51: dimensões e formas dos corpos-de-prova de argamassa .....   | p.156 |
| Tabela 52: propriedades das argamassas no estado fresco .....  | p.158 |
| Tabela 53: valores médios de consistência das argamassas .....   | p.159 |
| Tabela 54: análise de variância dos resultados da consistência das argamassas .....  | p.159 |
| Tabela 55: valores médios de trabalhabilidade das argamassas .....   | p.159 |
| Tabela 56: análise de variância dos resultados da trabalhabilidade das argamassas.....   | p.160 |

|  |       |
|--|-------|
| Tabela 57: valores médios da relação água/aglomerante das argamassas.....  | p.160 |
| Tabela 58: análise de variância dos resultados da relação água/aglomerante das argamassasp.  | 161   |
| Tabela 59: valores médios do teor de ar incorporado das argamassas.....  | p.162 |
| Tabela 60: análise de variância dos resultados do teor de ar incorporado das argamassas ...  | p.162 |
| Tabela 61: valores médios da massa específica das argamassas no estado fresco .....  | p.163 |
| Tabela 62: análise de variância dos resultados massa específica das argamassas no estado fresco.....                                     | p.163 |
| Tabela 63: propriedades das argamassas no estado endurecido .....  | p.164 |
| Tabela 64: valores médios da massa específica aparente das argamassas no estado endurecido.....  | p.164 |
| Tabela 65: análise de variância dos resultados massa específica aparente das argamassas no estado endurecido.....                        | 164   |
| Tabela 66: valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido.....                                  | p.165 |
| Tabela 67: análise de variância dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido .....            | p.166 |
| Tabela 68: valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido.....                                  | p.166 |
| Tabela 69: análise de variância dos resultados de altura de penetração de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido..... | p.166 |
| Tabela 70: comparação dos resultados obtidos com as propriedades prescritas pela WTA 2-2-91 .....  | p.167 |
| Tabela 71: resultados dos ensaios realizados durante a etapa preliminar.....   | p.169 |
| Tabela 72: resultados dos ensaios realizados em argamassa fresca .....   | p.171 |
| Tabela 73: resultados dos ensaios realizados em argamassa endurecida .....   | p.174 |
| Tabela 74: resultados da análise por regressão não linear da relação água/aglomerante .....  | p.178 |
| Tabela 75: resultados da análise por regressão múltipla do índice de consistência .....  | p.178 |
| Tabela 76: resultado da análise por regressão não linear do teor de ar incorporado .....   | p.178 |
| Tabela 77: resultados da análise por regressão múltipla da retenção de água das argamassasp.   | 178   |
| Tabela 78: resultados da análise por regressão não linear da massa específica das argamassas no estado fresco .....                      | p.178 |

|   |       |
|---|-------|
| Tabela 79: resultados da análise por regressão não linear da resistência à compressão das argamassas .....                        | p.179 |
| Tabela 80: resultados da análise por regressão não linear da resistência à tração na flexão das argamassas .....                  | p.179 |
| Tabela 81: resultados da análise por regressão não linear da relação entre as resistências à compressão e à tração na flexão..... | 179   |
| Tabela 82: resultados da análise por regressão não linear da absorção de água por capilaridade .....                              | p.179 |
| Tabela 83: resultados da análise por regressão múltipla da altura de penetração de água por capilaridade .....                    | p.179 |
| Tabela 84: resultados da análise por regressão não linear da massa específica seca das argamassas .....                           | p.180 |
| Tabela 85: resultados da análise por regressão não linear da absorção de água por imersão.  | 180   |
| Tabela 86: resultados da análise por regressão múltipla do índice de vazios (porosidade aparente) das argamassas .....            | p.180 |
| Tabela 87: resultados da análise por regressão múltipla da resistência das argamassas aos sais.....                               | p.180 |
| Tabela 88: resultados da análise por regressão não linear do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas .....   | p.180 |

## LISTA DE SIGLAS

A/agl: Relação água/aglomerantes, em massa

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABPC: Associação Brasileira dos Produtores de Cal

ASTM: American Society for Testing and Materials

BS: British Standard

Cal/cim: Relação cal hidratada/cimento, em massa

CIENTEC: Fundação de Ciência e Tecnologia

CSTB: Centre Scientifique et Technique du Batiment

DIN: Deutsches Institut für Normung

EN: Europäische Norm

HID: Hidrofugante

IA: Incorporador de Ar

ICOMOS: International Council on Monuments and Sites

IPHAN: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MSR: Metodologia de Superfície de Resposta

NBR: Norma Brasileira Registrada

PCSO: Projeto Composto de Segunda Ordem

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

$R^2$ : Coeficiente de correlação que expressa a porcentagem dos resultados que são explicados pelo modelo estatístico

RET: Retentor de Água

RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherches sur les Matériaux de les Construccions

WTA: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

## 1 INTRODUÇÃO

As edificações, principalmente as históricas, por estarem expostas ao ambiente durante um longo período de tempo, são influenciadas pelas condições ambientais. Assim, fatores físicos, químicos e biológicos interagem constantemente com os materiais de construção provocando danos que podem influenciar tanto na sua composição como nas propriedades estruturais destes componentes. A recuperação das edificações históricas apresenta vantagens econômicas, sociais e ambientais. Lersh (2003, p.15) apresenta alguns princípios que justificam a conservação do patrimônio histórico e cultural, como:

- a) de sustentabilidade, pelo reaproveitamento de materiais, estruturas e edificações;
- b) econômicos, pela não-demolição;
- c) técnicos, pelo conhecimento de processos construtivos e materiais de outros períodos, além do estudo sobre manifestações patológicas e a correção das mesmas;
- d) de valor arquitetônico, tanto formal como funcional;
- e) de memória e identidade urbanas, ou seja, a cidade como um organismo rico e consciente do valor do seu passado.

Ao se tratar da durabilidade das edificações em alvenaria, como é o caso da maioria dos prédios históricos em alvenaria, tem-se a umidade como principal agente de deterioração dos materiais, sendo que esta degradação é percebida principalmente nos componentes da alvenaria e no revestimento. Segundo estudo realizado por Lersh (2003, p.146) em diversas edificações do patrimônio cultural de Porto Alegre, os tipos mais frequentes de danos encontrados nos revestimentos de argamassa devem-se à presença de umidade.

Além da umidade, os materiais de construção podem apresentar sais solúveis no seu interior. Estes sais, devido a sua composição, encontram-se em constante processo de cristalização e dissolução. Este processo acaba exercendo pressões no interior dos materiais e causando a desagregação do mesmo com o passar do tempo. Além disso, por serem higroscópicos, os sais solúveis tendem a incorporar grande quantidade de água presente no ar, aumentando o teor de umidade do material e tornando o ambiente insalubre.

As questões relacionadas com a degradação e recuperação das edificações, principalmente as históricas, têm chamado pouca atenção de pesquisadores, apresentando deficiência, sobretudo no que se refere ao estudo dos materiais de construção (COLLEPARDI, 1990, p. 81). Deve-se ressaltar que a técnica ou material adotado deve ser compatível com o material original, além de proporcionar a solução ou minimização das manifestações patológicas presentes e ser economicamente viável.

No que se refere às argamassas de revestimento, sabe-se que antigamente as propriedades destes materiais eram modificadas com a adição de produtos orgânicos com o objetivo de melhorar algumas de suas características. Segundo Chandra e Aavik (1987, p.1), misturas contendo gema de ovo, goma arábica e sangue, entre outros, eram adicionadas a estes materiais como substâncias ligantes ou adesivas. Desta forma, torna-se difícil o restabelecimento das argamassas antigas com os materiais originais.

Neste trabalho, o termo restauração se refere à restituição de elementos utilizando materiais iguais aos originais, e o termo recuperação, ao uso de materiais modernos para realizar o saneamento das edificações.

No Brasil, os estudos sobre novos materiais e tecnologias construtivas referentes à recuperação ainda são escassos. Em função disto, tem-se empregado muitas vezes argamassas tradicionais, à base de cal, para a recuperação de alvenarias atacadas por umidade e sais. Esta prática pode causar deteriorações mais graves, além de representar um custo mais elevado devido a uma vida útil reduzida. Além disso, a utilização de revestimentos de argamassa comuns, à base de cimento, tem-se mostrado ineficaz, apresentando diversas manifestações patológicas devido à incompatibilidade química, física e mecânica entre os materiais.

Dentre as diversas técnicas e materiais utilizados para o saneamento das edificações contaminadas por umidade e salinidade, tem-se a aplicação de revestimentos de argamassas de recuperação. Estes revestimentos foram desenvolvidos na Alemanha e têm sido utilizados tanto em edificações históricas como em construções contemporâneas há mais de 20 anos na Europa, apresentando resultados satisfatórios (WEBER, 1996, p. 553).

Estas argamassas especiais, por apresentarem elevada porosidade, permitem a cristalização dos sais no interior dos seus poros, sem provocar danos ao revestimento. Segundo Arendt (1995, p.13), as argamassas de recuperação devem reter a água na forma líquida, assim como os sais solúveis, e permitir, devido à sua grande permeabilidade ao vapor, uma secagem eficiente do substrato, ou seja, devem ser estanques como as argamassas à base de cimento, e permeáveis ao vapor como as argamassas à base de cal. Além disso, estes

revestimentos evitam a entrada de água da chuva, por conter aditivos hidrofugante. Entretanto, as argamassas de recuperação não restringem a umidade ascensional nas alvenarias, nem eliminam os sais da edificação. A parede permanecerá úmida, e os sais continuam cristalizando-se, porém não mais no interior dos componentes da alvenaria, na interface substrato/revestimento ou na superfície do revestimento, e sim no interior da argamassa. Desta forma, o revestimento de argamassa de recuperação não é uma solução definitiva. Devem ser removidos e reaplicados após um período de 10 anos ou mais, dependendo da quantidade de sais presentes na alvenaria (WEBER, 1996, p. 564). Entretanto, em casos onde a contaminação por sais na alvenaria é muito elevada, a durabilidade do revestimento de recuperação pode ser inferior à 10 anos.

Em 1994, através de um Programa de Cooperação Brasil-Alemanha por incentivo de técnicos do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN/RS e SC, foram realizados estudos no Brasil com a utilização dos sistemas de revestimento de recuperação em edificações do patrimônio histórico. O objetivo deste programa foi manter um intercâmbio a fim de transferir a tecnologia desenvolvida na Alemanha e adaptá-la às condições da região Sul do Brasil. Em 1999, Bianchin realizou estudos com proporções de argamassas mistas normalmente utilizadas em revestimento no Brasil, e demonstrou que é possível desenvolver um produto utilizando insumos nacionais para ser utilizado no saneamento de edificações contaminadas por sais e umidade. Entretanto, os resultados obtidos em laboratório não satisfizeram todas as prescrições necessárias às argamassas de reboco de recuperação apresentadas pelo Caderno de Recuperação Alemão WTA 2-2-91. Desta forma, percebe-se que ainda são necessários estudos para o desenvolvimento de argamassas nacionais que apresentem as propriedades necessárias para serem classificadas como rebocos de recuperação WTA 2-2-91. Por este motivo, torna-se relevante o desenvolvimento desta pesquisa.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de uma argamassa de reboco de recuperação, utilizando materiais disponíveis no mercado nacional, para ser aplicada em alvenarias contaminadas por umidade e sais de maneira a prolongar a vida útil do revestimento.

Além do objetivo principal, este estudo tem como objetivos específicos:

- a) a análise das propriedades físicas das argamassas no estado fresco (consistência, trabalhabilidade, retenção de água, teor de ar incorporado) e

mecânicas no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão, porosidade, coeficiente de resistência à difusão de vapor de água, absorção capilar, profundidade de penetração de água e resistência aos sais);

- b) a verificação da influência da relação entre os aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) e do teor dos aditivos (incorporador de ar, hidrofugante e retentor de água) no comportamento físico e mecânico das argamassas;

## 1.2 LIMITAÇÕES

As limitações desta pesquisa se referem aos ensaios utilizados para a determinação das propriedades destas argamassas. Foram adotadas normas nacionais quando, por falta de equipamento ou material específico, as propriedades das argamassas de reboco de recuperação não puderam ser determinadas conforme as prescrições do Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está composto por seis capítulos, sendo que, no primeiro, estão apresentadas as justificativas que motivaram esta pesquisa, bem como os objetivos principais e específicos, as delimitações e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo, estão descritos os mecanismos responsáveis pela deterioração dos materiais de construção devido à presença de umidade e sais solúveis nas alvenarias, bem como alguns métodos utilizados para o saneamento destas edificações.

No terceiro capítulo, são apresentados os sistemas de recuperação WTA 2-2-91, sua aplicação, os principais materiais constituintes das argamassas de recuperação e a influência destes nas propriedades do material no estado fresco e endurecido. Além disso, são discutidas neste capítulo as principais características destas argamassas, apresentando suas definições e funções no revestimento bem como alguns métodos utilizados para avaliar estas propriedades.

O programa experimental é apresentado no quarto capítulo, onde está explanada a forma como o planejamento do experimento foi efetuado e a metodologia e materiais utilizados para a execução dos ensaios das argamassas.

No quinto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental.

O sexto capítulo contempla as considerações finais referentes ao estudo experimental e apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO POR UMIDADE E SAIS

Os revestimentos de argamassa são usados largamente para recobrirem as alvenarias da edificação. Eles estão sujeitos a todos os tipos de ações de agentes agressivos externos e inerentes à própria edificação. Os revestimentos devem apresentar características para resistirem a estas solicitações e serem duráveis. Entende-se por durabilidade a capacidade de manter em serviço um produto, componente, montagem ou construção durante um determinado período de tempo especificado (ASTM E-632, 1998, p. 298). No que se refere aos revestimentos, a durabilidade está subordinada aos materiais utilizados (tipo e proporção), à mão-de-obra empregada, ao substrato que os recebe e à manutenção, entre outros.

Manifestações patológicas podem ocorrer nos revestimentos devido a causas exteriores aos materiais ou às técnicas utilizadas. Assim sendo, ao realizar o levantamento das manifestações patológicas dos revestimentos em uma edificação, deve-se buscar a causa do dano. Na tabela 1, Cincotto (1988, p. 549) apresenta as manifestações patológicas mais comuns encontradas em revestimentos, bem como suas prováveis causas e reparos.

Sabe-se que a água desenvolve um papel importante nas manifestações patológicas geradas nos revestimentos das edificações. Isso se deve, segundo Nappi (2002, p. 36), a duas razões principais, quais sejam:

- a) a água em forma líquida está intimamente envolvida em todas as reações químicas que podem causar degradação;
- b) a água em forma líquida tem uma importante função ao levar um componente químico em direção ao outro, realizando um contato físico entre os dois elementos, sem o qual a reação química entre eles não poderia ocorrer.

Os sais solúveis, quando na presença de umidade, também são responsáveis pelo surgimento de diversas manifestações patológicas nos materiais de construção. Este fenômeno geralmente é atribuído à pressão de cristalização e de hidratação de um sal em particular ou da combinação destes.

Tabela 1: manifestações patológicas nos revestimentos, suas prováveis causas e reparos (CINCOTTO, 1988, p. 549)

| <b>Manifestação</b>                   | <b>Aspectos</b>   | <b>Causas prováveis</b>  | <b>Reparos</b>  |
|---------------------------------------|---|--|---|
| <b>Eflorescência</b>                  | -manchas de umidade<br>-pó branco acumulado na superfície         | - umidade constante<br>-sais solúveis (alvenaria e água de amassamento)<br>-cal não carbonatada.   | -eliminação da infiltração<br>-secagem do revestimento<br>-reparo do revestimento quando pulverulento |
| <b>Bolor</b>                          | -manchas esverdeadas ou escuras<br>-revestimento em desagregação  | -umidade constante<br>-área não exposta ao sol   | -eliminação da infiltração<br>-lavagem com hipoclorito<br>-reparo do revestimento quando pulverulento |
| <b>Vesículas</b>                      | -empolamento da pintura<br>-bolhas com umidade                    | -hidratação retardada da CaO (hidróxido de cálcio/cor branca)<br>-pirita ou mat. orgânica na areia (cor preta)<br>-concreções ferruginosas na areia<br>-aplicação prematura de tinta impermeável | -renovação da camada de reboco<br>-eliminação da infiltração  |
| <b>Descolamento com empolamento</b>   | -descolamento do emboço formando bolhas<br>-reboco com som cavo   | -infiltração de umidade<br>-hidratação retardada do MgO (hidróxido de magnésio)  | -renovação da pintura<br>-renovação do reboco   |
| <b>Descolamento em placas</b>         | -placa endurecida quebrando com dificuldade<br>-som cavo          | -placas freqüentes de mica na camada inferior<br>-argamassa muito rica, ou espessa<br>-superfície com substâncias hidrófugas<br>-falta de aderência da superfície                                | -renovação do revestimento<br>-eliminação da base hidrófuga<br>-aplicação do chapisco                 |
|                                       | -placa endurecida e desagregando-se<br>-som cavo                  | -argamassa magra<br>-ausência de chapisco  | -renovação do revestimento  |
| <b>Descolamento com pulverulência</b> | -descolamento da película arrastando o reboco<br>-som cavo        | -excesso de finos<br>-traço pobre<br>-traço muito rico em cal<br>-camada muito espessa de reboco   | -renovação do reboco  |
| <b>Fissuras horizontais</b>           | -ao longo da parede<br>-descolamento do revestimento com som cavo | -expansão da argamassa por hidratação retardada do MgO<br>-expansão da argamassa por reação cimento-sulfatos ou de argilo-minerais nos agregados   | -renovação do revestimento  |
| <b>Fissuras mapeadas</b>              | -forma variada e em toda a superfície                             | -retração da argamassa de base   | -renovação do revestimento e da pintura   |

## 2.1 UMIDADE

Os mecanismos de degradação dos revestimentos das edificações são diversos, sendo que muitos deles são decorrentes da interação do meio ambiente com os materiais de construção nos quais a água está sempre em primeiro plano.

A água, sob a forma de água do mar, rios, lagos, chuva e vapor, entre outros, é o fluido em maior quantidade na natureza. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 121), a água possui propriedades que a torna o principal agente de deterioração de materiais. Isto se deve ao fato da notável habilidade de dissolução de substâncias, da penetração em cavidades ou poros extremamente finos, decorrente de suas pequenas moléculas, e por ela possuir maior temperatura de evaporação dentre os líquidos comuns, permanecendo em um material no estado líquido, ao invés de evaporar e deixá-lo seco.

### 2.1.1 Mecanismos de Transporte de Umidade nos Materiais

O transporte de água na edificação é um fenômeno no qual a mesma, seja no estado líquido ou em forma de vapor, se movimenta no interior dos poros dos materiais e componentes da edificação e é influenciado pelo tipo, tamanho e distribuição dos poros, bem como das micro e macro-fissuras presentes no revestimento (NAPPI, 2002, p. 36). Para que a umidade possa penetrar nos materiais, é necessário que existam poros acessíveis às moléculas de água ou a existência de fissuras em sua superfície.

Todos os materiais porosos possuem um determinado teor de umidade, seja no estado líquido ou gasoso. A variação do teor de umidade gera tensões de expansão volumétrica, no caso do aumento deste teor, e de retração, quando esta umidade deixa o material por evaporação. Estes fenômenos, de expansão e retração, são chamados de movimentação higroscópica e resultam na fadiga do material.

O teor de umidade presente em alguma parte do material tende a distribuir-se por toda a massa do mesmo (POLISSENI, 1985, p. 12). No estado líquido, este transporte é condicionado pela capilaridade, gravidade e efeitos de gradientes de pressão. No estado de vapor, a transferência de umidade é comandada pela difusão e pelos movimentos convectivos (FREITAS, 1992, p. 11). Segundo este autor, os mecanismos fundamentais que permitem explicar a maioria das situações em que ocorre o movimento de água no interior dos materiais de construção de estrutura porosa são: absorção, condensação e capilaridade.

Straube (2002, p. 39) apresenta três diferentes formas de armazenamento de água nos materiais porosos, sendo elas a absorção (regiões A, B e C), capilaridade (região D) e supersaturação (região E) (figura 1).

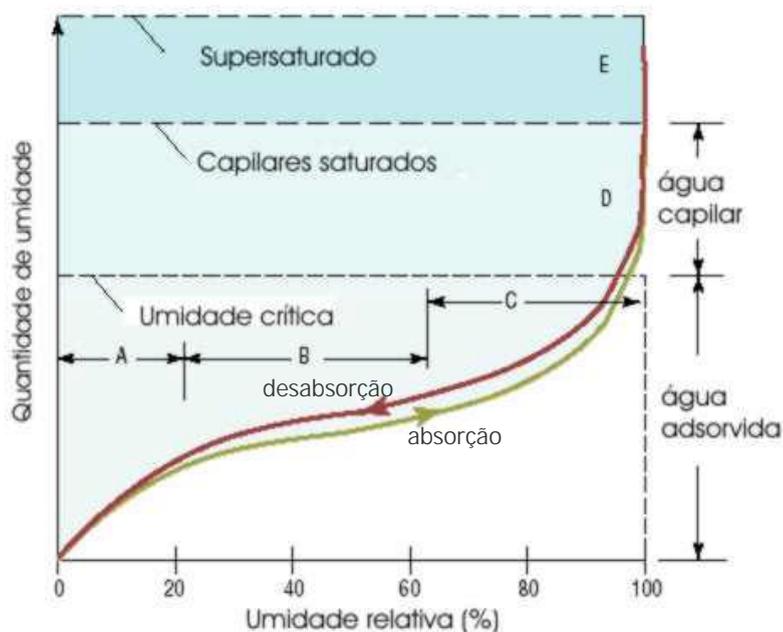


Figura 1: formas de armazenamento de água: adsorção (A-C), capilaridade (D) e supersaturação (E) (STRAUBE, 2002, p. 39)

A absorção ocorre quando a superfície em contato com a água na forma de vapor possui a tendência de capturar e manter as moléculas de água devido à natureza polar das mesmas (STRAUBE, 2002, p. 38). Durante a absorção, as moléculas de vapor de água são fixadas à parede do capilar na forma de camadas. Segundo Freitas (1992, p. 11), a absorção é atribuída às forças intermoleculares de Van Der Waals que atuam na interface sólido fluido, no interior dos poros. A propriedade de maior ou menor capacidade de absorção de água de um material é chamada de higroscopicidade.

De acordo com Straube (2002, p. 39), na região A da figura 1 ocorre absorção da primeira camada de moléculas de água na superfície do capilar quando a umidade relativa do ar estiver compreendida entre 0 e 20%. Na região B, entre 20% e 60% de UR, múltiplas camadas de moléculas de água são depositadas na superfície do capilar. À medida que a umidade relativa aumenta (região C), diversas camadas de moléculas continuam a ser absorvidas pela parede do capilar, ocorrendo a condensação no interior do material (condensação interna).

Segundo Coleman (2003, p. 1), a condensação ocorre quando se diminui a temperatura do ar até o ponto onde o mesmo não consegue manter a água no estado de vapor, chamada de temperatura de orvalho. Assim, quando ocorre condensação, gotículas de água formam-se na superfície da parede (condensações superficiais) ou no interior do material (condensação interna).

A condensação da água contida no ar depende da umidade relativa do ambiente. A quantidade máxima de vapor que o ar pode conter (limite de saturação) é diretamente proporcional à temperatura. Assim, quanto maior for a temperatura do ar, maior será a quantidade de vapor de água que ele pode conter. Quando o ar possuir uma quantidade máxima de vapor de água, a uma determinada temperatura, diz-se que ele está saturado e sua umidade relativa é igual a 100%. Se a quantidade de vapor de água for inferior à quantidade máxima, o ar não está saturado e assim, sua umidade relativa é inferior a 100%.

Para umidades relativas próximas a 100%, a curva higroscópica aumenta rapidamente, ocorrendo assim o transporte de água por capilaridade (região D). Nesta região, o material tende a absorver água por capilaridade até chegar ao limite de saturação (região E), onde todos os poros e capilares estão preenchidos com água. No estado supersaturado, apenas forças externas, como, por exemplo, pressão hidrostática ou gravidade, podem fazer com que maior quantidade de água penetre no material (STRAUBE, 2002, p. 39).

O transporte de água por capilaridade é consequência da força de sucção capilar exercida nos capilares de um material. Esta força é resultado da atração entre a água e os capilares do material, bem como à tensão superficial do líquido (CHAROLA, 2000, p. 328). Entende-se por tensão superficial como a tendência apresentada por um líquido de reduzir ao mínimo sua área superficial (RUSSEL, 1981, p. 295). A superfície da água, sob efeito de um desequilíbrio entre as interações moleculares, age como se fosse uma membrana submetida à tração (POLISSENI, 1985, p. 18). Devido à existência de forças intermoleculares fortes, a água possui uma tensão superficial relativamente alta.

Ao colocar-se um líquido em contato com um sólido, ocorre a formação do menisco. Segundo Polisseni (1985, p. 20), as moléculas da camada superficial, colocadas próximas ao sólido, ficam submetidas à ação de duas forças atrativas: a coesão (orientada para o interior da massa líquida) e a adesão (exercidas pelas moléculas do sólido). Quando a força de adesão é maior que a força de coesão, diz-se que o líquido molha o sólido, formando uma superfície côncava. Caso contrário, diz-se que o líquido não molha o sólido, e a superfície formada é convexa.

Gratwick (1971, p. 30) apresenta outra explicação para a formação do menisco. Segundo o autor, a curvatura dos líquidos (menisco) é formada a partir das reações intermoleculares que ocorrem entre as interfaces das superfícies dos corpos. Considerando-se a deposição de uma gota que molha um sólido, sobre a superfície horizontal deste, esta se estenderá em todas as direções até que a ação da gravidade e a atração horizontal das moléculas do sólido sobre o líquido sejam equilibradas pela tensão superficial do líquido. Assim, dependendo da massa e da tensão superficial do líquido, a gota se achatará mais ou menos. Entretanto, se

antes deste estado de equilíbrio o líquido encontrar uma superfície vertical, as moléculas continuarão avançando. Isto ocorre uma vez que esta superfície vertical se apresenta como uma extensão da superfície horizontal. Esta situação está apresentada na figura 2 (GRATWICK, 1971, p. 30), onde o líquido tende a formar o menisco.

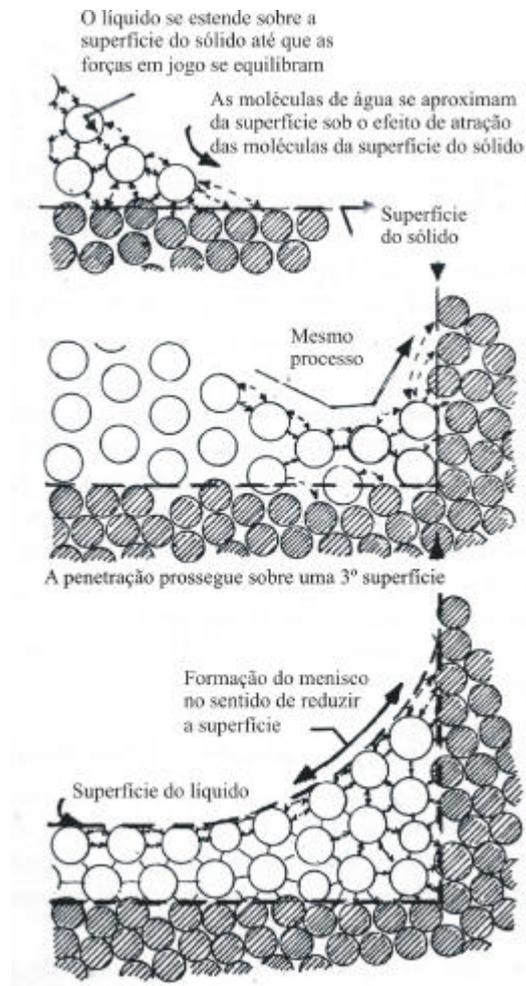


Figura 2: formação do menisco decorrente do contato da água com a superfície de um sólido (GRATWICK, 1971, p. 30)

Quando a água está em contato com a superfície dos materiais porosos, ela apresenta uma afinidade com a superfície interna dos capilares. Assim, a água é succionada devido a uma pressão capilar ( $P_c$ ) capaz de sustentar a massa de água em contraposição à força da gravidade (COPPOLA, 1996, p. 79). Segundo o autor, a ascensão capilar de água termina quando se estabelece um equilíbrio entre a pressão capilar ( $P_c$ ) e a pressão hidrostática ( $P_h$ ), como mostra a equação 1.

$$P_h = m \times g \times h = \frac{2 \times s \times \cos \theta}{r} = P_c \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

- m: massa volumétrica da água ( $1000\text{kg/m}^3$ );
- g: aceleração da gravidade ( $9,81\text{ m/s}^2$ );
- h: altura máxima da umidade ascensional (m);
- $\sigma$ : tensão superficial da água ( $72 \times 10^{-3}\text{N/m}$ );
- $\theta$ : ângulo de contato da água (cerca de  $0^\circ$ );
- r: raio do capilar (m).

De acordo com a equação 1, percebe-se que a pressão capilar é inversamente proporcional ao raio do capilar. Assim, quanto menor o diâmetro, maior será a altura alcançada pela água. Este comportamento pode ser observado na figura 3, que mostra o alcance da altura da água em tubos de vidro com diferentes diâmetros (STRAUBE, 2002, p. 34).



Figura 3: altura de penetração de água em tubos de vidro de diferentes diâmetros (STRAUBE, 2002, p.34)

A altura da absorção de água por capilaridade dos materiais de construção depende, além da porosidade do material e da quantidade de água em contato com a parede, da área de absorção e de evaporação da umidade. Segundo Seele (2004, p. 2), em paredes de alvenaria de tijolos, a altura média em que a umidade ascensional pode alcançar é de 80 cm, e a máxima é de 1,50m.

Na prática, a altura que a água alcança por absorção capilar nas alvenarias é determinada principalmente pela taxa de evaporação de água da superfície da parede (HERITAGE CONSERVATION, 1997, p. 2). A taxa de evaporação de umidade da superfície externa está relacionada com a natureza da face da alvenaria, com as condições climáticas e posicionamento em relação à insolação. No que se refere à superfície interna, a evaporação de água depende da ventilação e do condicionamento do ar, bem como da área de absorção da umidade.

À medida que ocorre a evaporação da umidade através das faces interna e externa da alvenaria, maior quantidade de água é absorvida por capilaridade a partir da base da edificação, pois o equilíbrio deve ser mantido entre a pressão capilar e a pressão hidrostática no interior dos capilares. Desta forma, ao invés de uma condição estática, geralmente há um

fluxo ascensional contínuo de umidade. Assim, a taxa de fluxo depende da quantidade de água no terreno, da evaporação e da estrutura interna dos poros da alvenaria.

### 2.1.2 Formas de Manifestações de Umidade

A umidade, de acordo com sua origem e forma de manifestação, classifica-se em (PEREZ, 1988, p. 572):

- a) umidade de obra: originada nos trabalhos de construção dos edifícios;
- b) umidade de infiltração: proveniente da água da chuva que penetra nas edificações através dos elementos constituintes de sua envoltória exterior;
- c) umidade por condensação: procedente do vapor de água que se condensa na superfície ou no interior dos elementos de construção;
- d) umidade acidental: devido aos vazamentos do sistema de distribuição e/ou coleta de água da edificação;
- e) umidade ascensional: devido à absorção de água existente no solo pela fundação.

Pode-se acrescentar à classificação da umidade apresentada por Perez (1988) o fato de que a umidade também pode ser originada pela presença de sais higroscópicos presentes nos materiais de construção. Estes sais adsorvem a umidade presente no meio ambiente, aumentando o teor de umidade presente nas alvenarias.

A figura 4 mostra esquematicamente a distribuição da umidade no interior dos materiais de construção.

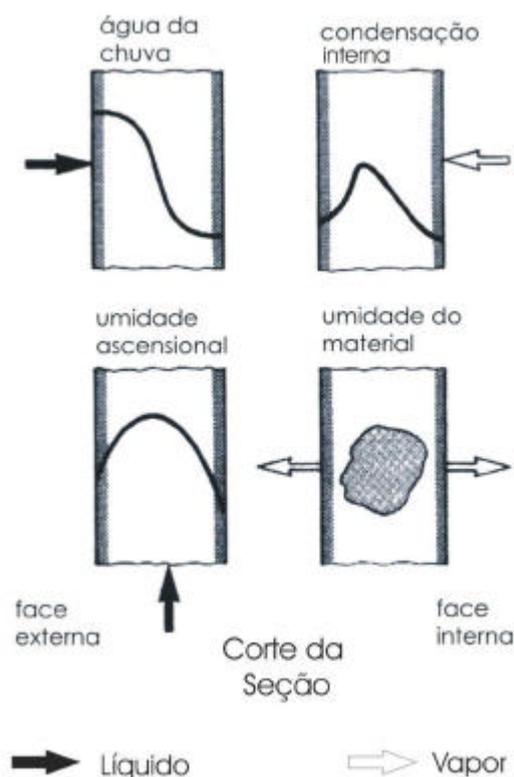


Figura 4: representação esquemática da umidade no interior da alvenaria causada por chuva, condensação interna, umidade ascensional e umidade presente no material (KÜNZEL, 1995, p. 4)

Segundo Coppola (1996, p. 79), a umidade nas edificações pode apresentar diversos inconvenientes, sendo que os mais importantes são a degradação do material pelo efeito da incompatibilidade química dos materiais constituintes da alvenaria quando em presença de água, bem como a diminuição do conforto térmico da edificação pela diminuição da resistência térmica do material. Além disso, a presença de água favorece a formação de microorganismos como bactérias, fungos e algas, tornando o ambiente insalubre. Ainda segundo o autor, pode ocorrer esfoliação e desagregação do revestimento de argamassa, sendo este fenômeno causado pelo efeito do transporte por capilaridade dos sais solúveis do terreno, ou do interior da alvenaria, para o exterior do paramento.

## 2.2 SAIS SOLÚVEIS

Os sais podem ser definidos como compostos provenientes dos ácidos, pela substituição total ou parcial dos seus hidrogênios ionizáveis por cátions, ou das bases, pela substituição total ou parcial dos grupos OH pelos ânions dos ácidos (NETTO, 1995, p. 216), resultando em substâncias iônicas compostas por íons positivos de uma base e íons negativos de um ácido (RUSSEL, 1981, p. 381). Eles podem ser classificados quanto à presença, ou ausência, de água em hidratados ou anidros (NETTO, 1995, p. 227). Os sais são chamados

hidratados quando possuem moléculas de água em sua estrutura cristalina (p.ex.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Quando estes não possuem água na sua estrutura cristalina, são chamados sais anidros (p. ex.  $\text{KCl}$ ). A hidratação dos sais ocorre devido à atração dos íons sobre as moléculas polarizadas de água. Há sais que se hidratam com o simples contato com a umidade do ar, como é o caso do  $\text{NaCl}$ . Os sais que fixam água por adsorção com grande facilidade são chamados de higroscópicos.

A solubilidade é a propriedade que as substâncias apresentam de se dissolverem em outras, sendo que, para a dissolução de sólidos em líquidos, há um limite estabelecido através do coeficiente de solubilidade (Cs). Este coeficiente indica a quantidade máxima de substância que, em determinadas condições de temperatura e pressão, pode dissolver-se numa quantidade fixa de solvente (NETTO, 1995, p. 10). As soluções podem ser classificadas em saturadas (quando atingem o Cs), não-saturadas (quando a quantidade de soluto não atinge o Cs) e supersaturada (quando a quantidade de soluto supera o Cs).

Quanto à solubilidade em água, os sais podem ser considerados solúveis ou insolúveis (NETTO, 1995, p.210). Os sais solúveis sofrem grande dissociação iônica em água, que consiste na separação dos íons que constituem o retículo cristalino dos sais, provocada pela ação de um solvente polar (água). Os sais considerados insolúveis são os que sofrem pequena dissociação iônica em água. Estes sais não causam danos aos materiais porosos.

Os processos que causam a deterioração dos materiais porosos pela presença de sais e umidade ocorrem devido à pressão causada pela cristalização e hidratação dos sais, bem como devido à tensão causada quando os cristais que estão confinados nos poros se expandem devido ao aumento da temperatura (HERITAGE CONSERVATION, 1997, p. 5).

A cristalização dos sais ocorre quando há evaporação da umidade presente no interior da alvenaria ou quando a umidade relativa do ambiente diminui, fazendo com que alguns sais dissolvam-se e cristalizem-se periodicamente de acordo com a oscilação da umidade do ar (ARNOLD;ZEHNDER, 1990, p. 31). A pressão, devido ao desenvolvimento dos cristais, é bastante elevada, podendo ocorrer a desagregação ou a separação em forma de lâminas da superfície do material, bem como a redução da resistência mecânica do material. A tabela 2 apresenta exemplos das pressões exercidas por diferentes tipos de sais.

Tabela 2: pressão de cristalização dos sais (adaptação de ARENDT; SEELE, 2001, p. 15)

| FÓRMULA QUÍMICA                        | PRESSÃO DE CRISTALIZAÇÃO (N/mm <sup>2</sup> ) |       |                       |       |
|--|---|-------|-----------------------|-------|
|  | C/C <sub>s</sub> = 2                          |       | C/C <sub>s</sub> = 10 |       |
|  | 0 °C  | 50 °C | 0 °C                  | 50 °C |
| CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O | 33,5  | 39,8  | 112,0                 | 132,5 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>        | 29,2  | 34,5  | 97,0                  | 115,0 |
| NaCl                                   | 55,4  | 65,4  | 184,5                 | 219,0 |

Observação:  
 C = quantidade de sal total na solução, em g; C<sub>s</sub> = quantidade de sal até atingir o ponto de saturação, em g;  
 C/C<sub>s</sub> = valor de supersaturação da solução.

Entretanto, a pressão de cristalização absoluta de cada sal, no caso real, é muito difícil de ser avaliada, se não impossível. Desta forma, apenas podem ser realizadas estimativas teóricas a cerca da pressão causada pelos sais no interior dos materiais porosos.

A dissolução ou cristalização dos sais é determinada em função da umidade relativa. Quando a umidade relativa do ar for superior à umidade relativa de equilíbrio da solução do sal, o soluto se manterá em solução ou o sal cristalizado irá se dissolver. Apenas quando a umidade relativa do ambiente se torna menor que a umidade relativa de equilíbrio da solução de sais, o sal pode se cristalizar. A tabela 3 abaixo apresenta a umidade relativa de equilíbrio de alguns sais de acordo com a temperatura (ARNOLD; ZEHNDER, 1990, p. 46).

Tabela 3: umidade relativa de equilíbrio de alguns sais de acordo com a temperatura (adaptação de ARNOLD; ZEHNDER, 1990, p. 46)

| SAL/TEMPERATURA (°C)                                 | UMIDADE RELATIVA (%) |      |      |      |
|--|----------------------|------|------|------|
|  | 0                    | 10   | 20   | 30   |
| CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O                 | 41,0                 | 33,7 | 30,8 | 22,4 |
| MgCl <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O                  | 33,7                 | 33,5 | 33,1 | 32,4 |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O | 59,0                 | 56,5 | 53,6 | 46,8 |
| NaCl   | 75,5                 | 75,7 | 75,5 | 75,1 |
| KNO <sub>3</sub>                                     | 96,3                 | 96,0 | 94,6 | 92,3 |
| K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                       | 98,8                 | 98,2 | 97,6 | 97,0 |

Segundo Mortensen<sup>5</sup> (1933, apud CHAROLA, 2000, p. 328) a cristalização dos sais de uma solução saturada devido à evaporação da água ocupa menos espaço que a solução original e, desta forma, nenhuma pressão de cristalização ocorre. O autor atribui o fenômeno de deterioração devido à pressão desenvolvida pelo aumento de volume quando os sais se hidratam.

<sup>5</sup> MORTENSEN, H. Die "Salzsprengung" und ihre Bedeutung für die Regionalklimatische Gliederung der Wüsten. Dr. A. Petermanns Mitteilungen. Gotha: Justus Perthes. 1933. 79:130–35.

A tabela 4 apresenta o aumento do volume de alguns sais devido à sua hidratação, de acordo com a temperatura.

Tabela 4: aumento de volume dos sais solúveis devido à hidratação (WILIMZIG, 2003, p. 16)

| Sal anidro   | Temperatura de mudança (°C) | Sal hidratado  | Aumento de volume (%) |
|--|-----------------------------|--|-----------------------|
| Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>                    | 32                          | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . 10H <sub>2</sub> O | 420                   |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> . H <sub>2</sub> O | 35                          | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> . 10H <sub>2</sub> O | 360                   |
| MgSO <sub>4</sub> . H <sub>2</sub> O               | 48                          | MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O                | 290                   |

Sabendo-se que os sais solúveis são higroscópicos, pode-se dizer que quanto maior for a sua quantidade no material, maior será o teor de umidade da parede. Devido à sua higroscopicidade, os sais solúveis podem dissolver-se, isto é, absorver tanto vapor de água até formar uma solução saturada. (CHAROLLA, 2000, p. 329).

Desta forma, o material pode absorver certo grau de umidade dependendo da sua natureza, porosidade e superfície interna. Além disso, os sais, por serem higroscópicos, podem absorver umidade, especialmente quando a umidade relativa aumenta a valores superiores a sua umidade relativa de equilíbrio. O efeito da higroscopicidade dos sais solúveis em um material pode ser observado na tabela 5 (COLEMAN, 2003, p. 1).

Tabela 5: efeitos da higroscopicidade dos sais contaminantes no conteúdo de umidade dos materiais (COLEMAN, 2003, p.1)

| MATERIAL                       | TEOR DE UMIDADE DO MATERIAL (%) |                       |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
|                                | NÃO CONTAMINADO<br>UR 80%       | CONTAMINADO<br>UR 80% |
| Argamassa a base de cal        | 1,5                             | 12,2                  |
| Revestimento à base de cimento | 2,0                             | 10,1                  |
| Tijolo                         | 0,4                             | 6,2                   |

Entretanto, determinar a contribuição particular dos diferentes processos, como a cristalização, a hidratação e a tensão devido aumento da temperatura, ao fenômeno da degradação dos materiais pelo efeito da salinidade é difícil. Dependendo do tipo de sal e, especialmente, do meio ambiente, estes processos podem interagir na deterioração do material em intensidades diferentes.

Os sais podem originar-se de várias fontes como solo, névoa marinha, tratamentos inapropriados, interação entre os materiais, atmosfera, microorganismos, água utilizada na fabricação dos materiais, entre outros. Alguns materiais podem possuir sais, como é o caso do cimento Portland, que usualmente contém em sua composição sulfatos alcalinos

(CHAROLLA, 2000, p. 328). Além disso, segundo o autor, podem ser encontrados sulfatos de sódio em tijolos que não foram queimados adequadamente. As edificações históricas, após centenas de anos, também podem acumular altas concentrações de sais, particularmente quando algumas seções da construção foram utilizadas como armazenagem de sais ou estábulos.

De acordo com o Heritage Conservation (1997, p.5), os sais que podem ser encontrados nas alvenarias são os cloretos de sódio (NaCl) e sulfatos de sódio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Entretanto, também se encontram sais formados por carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), cloretos (Cl), nitratos ( $\text{NO}_3^{-2}$ ) e sulfatos ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ). A quantidade de sais necessária para causar danos nas alvenarias dependerá do tipo de material. Entretanto, teores de sais na alvenaria superiores a 0,5%, em massa, são considerados preocupantes.

Os íons dos sais são transportados em soluções aquosas, e podem penetrar nos materiais e se movimentar através de suas cavidades e poros. Assim, os sais tendem a se concentrar e acumular quando a água (solvente) evapora. Segundo Arnold e Zehnder (1990, p.31), o sal presente no sistema se cristalizará na superfície, no interior ou na interface material/substrato, formando eflorescência ou criptoflorescência, dependendo do momento e do local em que a solução se torna supersaturada. A figura 5 mostra um exemplo de eflorescência.



Figura 5: eflorescência em alvenaria (FRÖSSEL, 2001, p. 292)

As eflorescências, segundo Souza (1997, p. 345), podem se apresentar como depósitos pulverulentos ou incrustações, com alterações na cor da superfície dos revestimentos, no tom esbranquiçado, acinzentado, esverdeado, amarelado ou preto. Quando estas eflorescências apresentam-se pulverulentas e na cor branca, elas modificam o aspecto estético das argamassas, mas não prejudicam sua durabilidade. Ainda segundo o autor, esta formação geralmente indica a presença de sulfatos de sódio e potássio, sulfatos de cálcio e magnésio, carbonatos de sódio ou de potássio. As manchas brancas de eflorescência, com

aspecto de escorrimento e que são aderentes e pouco solúveis em água decorrem da presença de carbonato de cálcio, e também não causam danos às argamassas.

Segundo estudo realizado por Quarcioni, Chotoli e Aleixo (2003, p. 595), através de ensaio para simular a formação de eflorescência em argamassas endurecidas, observou-se que este fenômeno ocorre devido às condições climáticas que favorecem a evaporação da umidade superficial, como a alta velocidade de evaporação de água do revestimento, promovendo o transporte da umidade do interior para o exterior com conseqüente carreamento dos sais. Desta forma, ambientes úmidos não favorecem a formação de eflorescências, por não haver secagem constante da superfície.

No caso da crisptoflorescência (figura 6), ocorre a desagregação e perda de resistência mecânica do material e/ou da interface substrato/revestimento. O local onde a precipitação dos sais ocorre depende do fornecimento de solução, bem como da evaporação da umidade. Esta constatação pôde ser verificada pelos estudos realizados por Arnold e Zehnder (1990, p. 49). Estes autores analisaram amostras cerâmicas contendo sais, e verificaram que a secagem deste material em ambientes com umidade relativa de 32% produz menor quantidade de eflorescência e, conseqüentemente, maior quantidade de crisptoflorescência, que as amostras secas em ambientes com umidade relativa de 69%. Assim, a umidade do ambiente também é responsável pela formação de crisptoflorescência e conseqüente degradação do material.



Figura 6: crisptoflorescência em alvenaria (FRÖSSEL, 2001, p. 292)

Dependendo da fonte de umidade e sais, diferentes configurações de danos podem ser observadas nas alvenarias. Segundo Lubelli, van Hees e Groot (2004, p. 120), sais marinhos propiciam a formação de duas diferentes zonas de desagregação que podem ser claramente distinguidas em diferentes alturas: zona da brisa marinha, afetada por empolamento do material na parte superior da alvenaria, e a zona de umidade ascensional, mostrando a formação de bolhas e desagregação do material na parte inferior.

Estudos realizados por Arnold e Zehnder (1990, p. 36) apresentam a distribuição dos sais ao longo da altura das alvenarias sujeitas à umidade ascensional. Neste estudo, são identificadas quatro diferentes zonas denominadas de A à D, sendo que a mais próxima ao solo é chamada de A; na qual os danos são inferiores à próxima zona B, que, em geral, é a mais degradada. Acima desta zona está a terceira zona C, caracterizada por apresentar-se mais escura que as demais e a qual delimita o alcance superior da umidade ascensional. A quarta zona D é a alvenaria sã. A figura 7 apresenta as diferentes zonas de distribuição dos sais nas alvenarias.

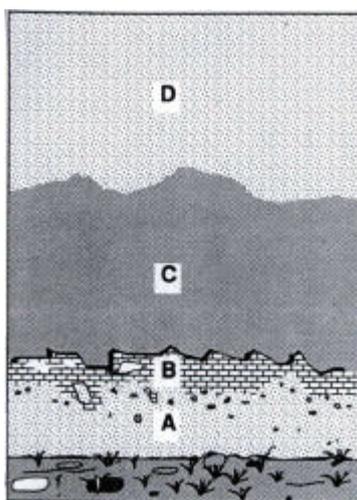


Figura 7: zonas de distribuição de sais solúveis na alvenaria  
(ARNOLD; ZEHNDER, 1990, p.36)

Na zona A os sais mais insolúveis como os carbonatos de cálcio e magnésio se cristalizam. Na zona B os sais de solubilidade fraca à moderada tais como os nitratos de potássio, os sulfatos de sódio, magnésio e cálcio e os carbonatos de sódio se precipitam causando as principais deteriorações, como desagregação e eflorescências. Na zona C estão presentes os sais altamente solúveis, como os nitratos e cloretos de sódio e os nitratos e cloretos de magnésio. Esta zona apresenta-se pouco deteriorada, porém mais úmida e suja, possuindo tonalidade mais escura quando comparada com a superfície do revestimento nas demais áreas. Estes sais altamente solúveis tendem a manter a alta umidade na parede, exceto sobre condições ambientais onde a umidade relativa do ar é relativamente baixa. Quando o processo de degradação é muito avançado, a zona A pode estar também totalmente deteriorada.

### 2.3 MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO E REPARO DAS ALVENARIAS

A recuperação de edificações degradadas por umidade e salinidade geralmente é problemática. Muitos são os métodos desenvolvidos para sanar este problema comum em

edificações históricas, onde não há impermeabilização da fundação. A seguir são apresentados alguns métodos comumente utilizados para a recuperação e o reparo das alvenarias degradadas por umidade ascensional e sais solúveis.

### 2.3.1 Impermeabilização Horizontal

A introdução de barreiras físicas ou substituição de elementos da alvenaria, bem como a injeção com produtos químicos na parte inferior da alvenaria, tem como objetivo evitar a ascensão de água por capilaridade. Estes procedimentos normalmente são realizados na face externa da edificação.

A introdução de barreiras físicas pode ser realizada após corte da alvenaria e inserção do material impermeável, ou apenas pela inserção de chapas de aço inoxidável sob ação de martelos pneumáticos. Quando se utiliza o método por inserção através de martelos pneumáticos, a alvenaria deve apresentar espessura de até 1 metro (RIETZSCHEL, 2003, p.69), sendo também necessário que a mesma apresente elementos regulares e juntas contínuas bem definidas. A limitação deste método, segundo Torres (1998, p. 46), se refere às vibrações produzidas pelos martelos pneumáticos, devendo apenas ser aplicado em construções recentes. A utilização deste método apresenta boa eficácia, entretanto esta solução, por produzir vibrações, pode provocar problemas de estabilidade em certas alvenarias, sendo seu uso inapropriada para edifícios históricos.

O método por injeção de produtos químicos permite o fechamento dos poros e capilares no interior da alvenaria, criando uma camada impermeável que evita a ascensão da umidade por capilaridade. Primeiramente faz-se necessária a execução de orifícios de 15 a 35 mm de diâmetro na alvenaria, a uma profundidade de  $\frac{2}{3}$  da espessura da parede, sendo estes espaçados horizontalmente em até 12 cm, por onde o produto químico será aplicado (RIETZSCHEL, 2003, p. 70). Esta barreira deve ser localizada cerca de 15 cm acima do nível do terreno (TORRES, 1998, p. 48). No caso de alvenarias muito espessas, e se houver acesso à face interna, deve-se executar a furação em ambas as faces, de forma desencontrada, sendo que cada orifício deve apresentar profundidade de  $\frac{1}{3}$  da espessura da parede.

A aplicação do produto químico pode ser realizada sob pressão ou por gravidade. O processo por gravidade ocorre devido ao escorrimento do produto hidrofugante pelos orifícios da alvenaria (TORRES, 1998, p.49). Quando se utiliza o método de injeção sob pressão, o produto é introduzido na alvenaria com a ajuda de um equipamento de pressão, que é conectado a vários tubos introduzidos nos orifícios existentes na parede. A injeção pode ser realizada sob baixa pressão (até 10 bar) ou alta pressão (de 10 a 100 bar)

(RIETZSCHEL, 2003, p. 71). Segundo Torres (1998, p. 50), a pressão utilizada geralmente é variável, mas esta não deve exceder 4 bar, para evitar a rompimento dos materiais constituintes da alvenaria.

Dentre os produtos químicos utilizados, tem-se os “tapa-poros” (silicatos, resinas epoxídicas e acrilaminas) e hidrófugos (siliconatos, silicones e organo-metálicos) (TORRES, 1998, p.50). A quantidade necessária do produto é de duas a quatro vezes o volume de cavidades capilares presentes, pois parte da substância é perdida ou se mistura com a água presente nos poros (RIETZSCHEL, 2003, p.71). Segundo Torres (1998, p.52), a eficácia do produto químico depende de uma boa penetração do mesmo no material e da continuidade da barreira formada. Além disso, segundo o autor, o tipo de alvenaria condiciona o produto químico a ser utilizado, bem como o método de aplicação mais adequado. Assim, a injeção de produtos químicos nas alvenarias produz bons resultados desde que a barreira seja aplicada de forma contínua em toda a espessura da parede.

A substituição de elementos da alvenaria é realizada através da troca de três fiadas de tijolos próximas á base. Estes devem ser removidos alternadamente a cada duas unidades, e após, revestidos com emulsão asfáltica e reassentados na alvenaria com o uso de argamassas com aditivo impermeabilizante. Através deste método simples obtêm-se bons resultados na impermeabilização horizontal das alvenarias. Entretanto, por ser realizado de maneira artesanal, ele apresenta alto custo de execução.

A realização da impermeabilização horizontal das alvenarias apenas impede a contaminação futura do material por sais solúveis através da umidade ascensional. Entretanto, os sais presentes na alvenaria continuarão agindo em função das demais fontes de umidade presentes no ambiente. Além disso, como a grande maioria dos edifícios históricos no Brasil foram construídos em alvenaria de pedras, sendo as paredes de grande espessura, prejudicando assim a eficácia dos métodos citados de impermeabilização horizontal.

### 2.3.2 Dessalinização

A dessalinização é realizada através da remoção dos sais solúveis a partir da superfície ou do interior da alvenaria, sendo que estes podem se encontrar na forma cristalizada ou em solução. Esta remoção pode ser feita com o emprego de compressas de celulose ou rebocos de cal, sistemas eletro-osmóticos, dessalinização química ou argamassas de recuperação.

A utilização de compressas de celulose ou rebocos de cal (ou de sacrifício) faz com que os sais solúveis sejam extraídos da alvenaria devido ao efeito osmótico. Em ambos os casos, o material aplicado deve ser mantido constantemente úmido. Como o uso de compressas de

celulose possui um custo elevado, elas são aplicadas somente em esculturas ou regiões de afrescos valiosos (ARENDR, 1995, p.11);

No que se refere aos sistemas eletro-osmóticos, estes favorecem a retirada de água, criando um potencial elétrico contrário ao potencial capilar (TORRES, 1998, p. 52). Estes sistemas são divididos em eletro-osmose (passiva, semi-passiva e ativa) e eletro-osmose forese. Segundo este autor, o fenômeno da eletro-osmose consiste em provocar a passagem de um líquido através de um material poroso saturado, submetendo-o a uma ligeira tensão elétrica. A água que contém sais (nitratos e sulfatos) se desloca do pólo positivo (terreno) para o pólo negativo (parede). O processo de eletro-osmose consiste em aplicar uma tensão entre a parede e o solo de modo a anular (sistema eletro-osmótico passivo) ou inverter a corrente elétrica (sistema eletro-osmótico semi-ativo ou ativo). Para tanto, encaixa-se em um orifício feito na alvenaria uma fita de cobre ligada a uma haste de zinco, alumínio ou magnésio, enterrada no solo (POLISSENI, 1993 apud RUARO; GREVEN; DAL MOLIN, 1997, p.609). Segundo o autor, a umidade que serve como condutor interno e, caso ela seja eliminada, a corrente elétrica cessará. Segundo Torres (1998, p. 54), quando o procedimento é realizado com sondas de materiais iguais, o procedimento é denominado passivo. Quando forem utilizados materiais diferentes, como é o caso do cobre para o ânodo e zinco para o cátodo, cria-se uma espécie de pilha elétrica, sendo este sistema denominado eletro-osmose semi-passivo. Ao introduzir uma corrente elétrica contínua neste sistema, tem-se a eletro-osmose ativa (POLISSENI, 1993 apud RUARO; GREVEN; DAL MOLIN, 1997, p.609). A eletro-osmose forese surgiu como complemento da eletro-osmose e apresenta a vantagem de introduzir produtos impermeabilizantes na alvenaria (TORRES, 1998, p. 55). Ambos os sistemas apresentam como desvantagem a possibilidade do rompimento acidental de um dos condutores, ou mesmo corrosão destes ao longo do tempo. Além disso, a eficácia produzida pelos sistemas eletro-osmóticos é inferior aos citados anteriormente e não são indicados quando a resistência da terra é elevada (TORRES, 1998, p. 59).

A dessalinização química utiliza reagentes químicos a base de chumbo ou bário ( $Pb_6SiF_6$  ou  $Ba(OH)_2$ ) que transformam os sais solúveis (cloretos e sulfatos) em insolúveis. Segundo Arendt (1995, p.9), estes reagentes químicos são aplicados em forma de “spray” ou pintura, sendo que a quantidade a ser aplicada depende do coeficiente de absorção da alvenaria. Como a aplicação destes produtos é realizada superficialmente, a transformação dos sais ocorre apenas nas camadas mais próximas da superfície. Este sistema é inadequado para o uso em recuperações de alvenarias pois, além de possuírem substâncias extremamente tóxicas, como o chumbo, estes reagentes químicos não transformam os nitratos em sais insolúveis.

As argamassas de recuperação possuem alta porosidade e funcionam como armazenamento dos sais, permitindo que os mesmos cristalizem-se no interior dos poros sem provocar danos no material. Além disso, elas evitam a entrada da água na alvenaria e permitem a saída de vapor. Entretanto, esta é uma solução temporária (ARENDR, 1995, p. 13), sendo que sua vida útil depende da capacidade de armazenamento de sais da argamassa, bem como do teor de sais presente na alvenaria. A utilização deste sistema é indicada principalmente quando não é possível eliminar a fonte de umidade ascensional nas alvenarias contaminadas por sais com o uso de outros métodos, como, por exemplo, da impermeabilização horizontal ou do sistema de eletro-osmose forese.

### 3 SISTEMAS DE REVESTIMENTO DE RECUPERAÇÃO

Os sistemas de revestimento de recuperação são utilizados na recuperação de alvenarias degradadas pela presença de umidade e sais solúveis. Conforme o Caderno de Recuperação Alemão WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995), este sistema é constituído por chapisco, emboço de recuperação e reboco de recuperação (*sanierputz*), ou apenas chapisco e reboco de recuperação. A escolha do uso ou não do emboço de recuperação é função do teor de sais presente na alvenaria ou da necessidade de regularização do revestimento. Entretanto, sugere-se o uso conjunto de emboço e reboco de recuperação, mesmo se o teor de sais presente na alvenaria for pequeno. Revestimentos que apresentam somente a camada de reboco de recuperação, devido à sua propriedade de baixa altura de sucção de água por capilaridade ( $< 5$  mm), não permitem um eficiente transporte dos sais solúveis presentes na alvenaria para a camada de reboco de recuperação, podendo ocasionar danos tanto na interface revestimento/alvenaria, como no interior da alvenaria.

Os revestimentos com argamassas convencionais e de recuperação apresentam comportamento diferente quando aplicados em alvenarias contaminadas com sais solúveis. Nas alvenarias revestidas por argamassas convencionais, à medida que ocorre a evaporação da umidade, os sais são transportados pela água para o revestimento (figura 8). Estes podem se cristalizar no interior da argamassa (criptoflorescência) causando desagregação do material, ou na superfície, sob a forma de eflorescência.

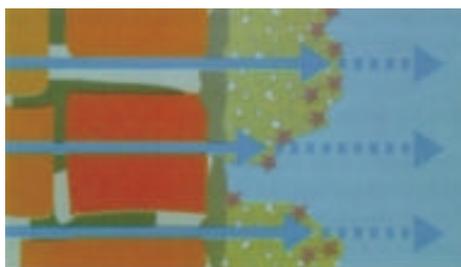


Figura 8: movimentação da umidade e dos sais em sistemas convencionais de revestimento em argamassa (FRÖSSEL, 2001, p.318)

Entretanto, quando ocorre a evaporação da água em alvenarias revestidas por argamassas de recuperação, os sais ficam retidos na camada de emboço ou reboco, cristalizando-se no interior dos poros (figura 9), e preservando o substrato e o revestimento.



Figura 9: movimentação da umidade e dos sais em revestimento de argamassa de recuperação (FRÖSSEL, 2001, p. 318)

Segundo Arendt (1995, p. 13), as argamassas de recuperação combinam as propriedades dos rebocos estanques à base de cimento Portland com os permeáveis à base de cal, procurando evitar os seus pontos negativos quando estas são utilizadas em paredes com umidade e salinidade. Estas argamassas possuem a propriedade de reter a água na forma líquida, bem como os sais, devido à sua elevada porosidade, e ao mesmo tempo permitir, por sua grande permeabilidade ao vapor, uma secagem eficiente. Assim, as argamassas de recuperação não restringem a umidade ascensional, tampouco eliminam os sais, sendo que a parede permanece úmida e os sais continuam cristalizando-se. Entretanto, esta cristalização não ocorrerá na superfície do revestimento, e sim no interior dos poros da argamassa de recuperação. Portanto, quando a umidade sai da parede em forma de vapor de água, os sais cristalizados ficam retidos de forma inerte dentro dos grandes poros da argamassa, sem prejuízo para o substrato ou revestimento, como é mostrado na figura 10.

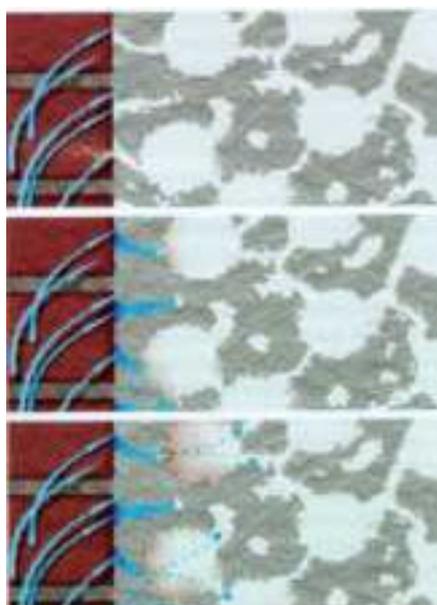


Figura 10: movimentação da umidade na alvenaria e cristalização dos sais solúveis nos poros da argamassa de recuperação (FRÖSSEL, 2001, p. 327)

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO (WTA 2-2-91)

O surgimento das argamassas de recuperação ocorreu no começo dos anos 70, na Alemanha. No decorrer de aproximadamente três décadas do seu aparecimento, estas argamassas especiais apresentaram diversos nomes. Em 1985, a Associação WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.), situada em Munique, Alemanha, fixou pela primeira vez de forma técnico-científica as solicitações dos Rebocos de Recuperação com a publicação do “Caderno de Recomendações WTA 1-85”(ARENDT, 1995, p. 21). Atualmente o “Caderno de Recomendações WTA 2-2-91” substitui o caderno “WTA 1-85” e pretende ser uma continuidade, levando em conta novos conhecimentos e descrevendo com precisão alguns critérios de solicitações e testes.

Várias são as indústrias na Alemanha que produzem as argamassas de recuperação WTA 2-2-91, sendo somente necessário o acréscimo de água para a preparação do produto. Podem ser aplicados em duas ou três camadas: chapisco e reboco ou chapisco, emboço e reboco, dependendo do teor e tipo de sais presentes na alvenaria.

O sistema de recuperação é integrado por chapisco, emboço de recuperação WTA e reboco de recuperação WTA (ARENDT, 1995, p. 23). O chapisco deve apresentar resistência suficiente aos sais e garantir a aderência entre o emboço, ou o reboco e o substrato. A sua aplicação deve ser feita sobre 50% da área do substrato de maneira a não criar uma barreira impermeável junto ao paramento da alvenaria. O emboço de recuperação WTA tem a função de uniformizar a superfície do substrato quando este apresentar diferenças acentuadas. Além disso, dependendo do grau de contaminação da alvenaria, esta camada funciona como uma zona onde ocorre o depósito e cristalização dos sais solúveis. As propriedades do emboço de recuperação WTA estão descritas na tabela 6.

Tabela 6: características do emboço de recuperação WTA 2-2-91(ARENDT, 1995, p. 24)

| CARACTERÍSTICAS                                      | UNIDADE           | PRESCRIÇÃO              | MÉTODO DE ENSAIO    |
|--|-------------------|-------------------------|---------------------|
| <b>Argamassa Fresca</b>                              |                   |                         |                     |
| Consistência   | cm                | $17 \pm 0,5$            | DIN 18555-P2 / 1982 |
| Ar incorporado                                       | V (%)             | > 20                    | DIN 18555-P2/ 1982  |
| <b>Argamassa Curada *</b>                            |                   |                         |                     |
| Coefficiente de Resist. à difusão de Vapor ( $\mu$ ) | ---               | < 18                    | DIN 52615 / 1987    |
| Resistência à compressão                             | N/mm <sup>2</sup> | ≥ Reboco de recuperação | DIN 18555-P3 / 1982 |
| Absorção capilar de água ( $W_{24}$ )                | kg/m <sup>2</sup> | ≥ 1,0                   | DIN 52617 / 1987    |
| Profundidade de penetração de água ( $h_{24}$ )      | mm                | > 5                     | DIN 52617 / 1987    |
| Porosidade   | V (%)             | > 45                    | WTA 2-2-91 / 1995   |

\* As condições de armazenamento dos corpos-de-prova são de acordo com a DIN 18555-p2 (7 dias:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR = 95%, e 21 dias:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR = 65%).

O reboco de recuperação WTA é a argamassa que tem por características alta porosidade e alta permeabilidade ao vapor d'água, mas que apresenta uma redução significativa no transporte por capilaridade, como indica a tabela 7.

Os rebocos de recuperação devem apresentar absorção capilar de água ( $W_{24}$ ) superior a  $0,3 \text{ kg/m}^3$ , mas o material não deve permitir penetração de água maior que 5 mm após 24 horas (DROLL; MEIER, 199\_ , p. 9). Desta forma, deve-se garantir que um baixo nível de transporte por capilaridade na argamassa seja possível, para que os sais possam cristalizar-se fora da alvenaria e também utilizar a capilaridade para acelerar o processo de secagem. Isto é contrabalançado pela necessidade de impedir que os sais alcancem a superfície da argamassa rapidamente, causando a desagregação do material.

Tabela 7: características do reboco de recuperação WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p. 25)

| CARACTERÍSTICAS  | UNIDADE          | PRESCRIÇÃO    | MÉTODO DE ENSAIO    |
|--|------------------|---------------|---------------------|
| <b>Argamassa Fresca</b>                                  |                  |               |                     |
| Consistência   | Cm               | $17 \pm 0,5$  | DIN 18555-P2 / 1982 |
| Densidade de massa                                       | $\text{kg/dm}^3$ | Não prescrito | DIN 18555-P2 / 1982 |
| Ar incorporado   | V (%)            | > 20          | DIN 18555-P2 / 1982 |
| Retenção de água   | %                | > 85          | DIN 18555-P7 / 1987 |
| Trabalhabilidade   | Cm               | < 3           | WTA 2-2-91 / 1995   |
| <b>Argamassa Curada **</b>                               |                  |               |                     |
| Densidade de massa                                       | $\text{kg/dm}^3$ | < 1,40        | DIN 18555-P3 / 1982 |
| Coefficiente de Resistência à difusão de Vapor ( $\mu$ ) | ---              | < 12          | DIN 52615 / 1987    |
| Resistência à tração por flexão                          | MPa              | Não prescrito | DIN 18555-P3/ 1982  |
| Resistência à compressão                                 | MPa              | 1,5 a 5       | DIN 18555-P3/ 1982  |
| Relação entre as resistências                            | ---              | < 3           | WTA 2-2-91 / 1995   |
| Absorção capilar de água ( $W_{24}$ )                    | $\text{kg/m}^2$  | $\geq 0,3$    | DIN 52617 / 1987    |
| Profundidade de penetração de água ( $h_{24}$ )          | mm               | < 5           | DIN 52617 / 1987    |
| Porosidade   | V (%)            | > 40          | WTA 2-2-91 / 1995   |
| Resistência aos sais                                     | dias             | > 10          | WTA 2-2-91 / 1995   |

\* Após 15 minutos de descanso, o índice de consistência não deverá ter redução maior de 3 cm.

\*\* As condições de armazenamento dos corpos-de-prova são de acordo com a DIN 18555-p2 (7 dias:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR = 95%, e 21 dias:  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  e UR = 65%).

Analisando as tabelas anteriores, verifica-se que as principais diferenças entre as propriedades das argamassas de emboço de recuperação WTA e reboco de recuperação WTA se referem à absorção capilar e à altura de penetração de água. O emboço de recuperação deve apresentar absorção de água por capilaridade superior a  $1,0 \text{ kg/m}^2$  e altura de penetração de água superior a 5 mm para que a umidade e sais presentes na alvenaria possam ser transportados para o interior desta camada. O reboco de recuperação deve apresentar absorção capilar mínima de  $0,3 \text{ kg/m}^2$ , sendo que a altura de penetração de água deve ser inferior a 5 mm.

A NBR 13749 (ABNT, 1996) indica espessura máxima de 30 mm para revestimentos externos em argamassa. Assim, no caso de revestimento constituído por duas camadas, emboço e reboco, a literatura nacional recomenda espessura máxima de 25 mm para a camada de emboço, e 5 mm para a camada de reboco (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998, p. 20). Como nos sistemas de recuperação o revestimento pode possuir até 40 mm de espessura total, dependendo do teor de sais presente na alvenaria, as camadas de reboco-base e reboco de recuperação podem apresentar valores superiores ao limite máximo aconselhado pelas recomendações nacionais. Quando o revestimento de recuperação possuir espessura de 40 mm, este deve ser aplicado em duas camadas de 20 mm. Neste estudo utilizar-se-á o termo emboço de recuperação quando este se referir à camada intermediária de emboço. O termo reboco de recuperação permanece, sendo este definido como a camada final de revestimento <sup>1</sup>.

Os sistemas de recuperação têm sido considerados como um revestimento que, quando corretamente aplicado, mesmo sem a erradicação dos fluxos de água ou sais, possui vida útil de 10 a 20 anos (ARENDDT, 1995, p. 13). Eles proporcionam uma superfície seca, sem sais e sem danos, bem como base para o uso de pinturas que permitam a difusão de vapor.

### 3.2 APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO

Quando da utilização de Sistemas de Recuperação WTA, devem ser atendidas as indicações e recomendações do fabricante. Além disso, a escolha do sistema e sua aplicação são funções do resultado das análises e dos ensaios preliminares realizados na edificação para avaliar os tipos e teores de sais presentes.

De acordo com Arendt (1995, p. 22), antes de serem decididas as medidas de manutenção corretiva, deverá ser feito um diagnóstico abrangente das condições da alvenaria, sendo necessários os seguintes exames:

- a) identificação da origem da umidade;
- b) identificação dos sais solúveis prejudiciais (sulfatos, cloreto, nitratos);

---

<sup>1</sup> Apesar da NBR 7200 (ABNT, 1998) definir que o revestimento de argamassa é constituído por chapisco e emboço (massa única) ou chapisco, emboço e reboco, sendo que chapisco é considerado como preparação do substrato, e da NBR 13749 (ABNT, 1996) especificar espessura máxima de 30 mm para revestimento externo, neste trabalho a argamassa para a dessalinização de alvenarias pode apresentar espessura final maior que 30 mm, sendo que a camada final é chamada de reboco de recuperação.

- c) condição das alvenarias a serem revestidas (alvenarias impregnadas por sais, pulverulência ao toque ou baixa resistência à abrasão prejudicam a aderência do revestimento).

Os resultados destes ensaios deverão ser analisados em conjunto para a proposição de uma recuperação. Segundo a WTA E-2-6-99/D (2000, p. 3), pode-se avaliar a contaminação da alvenaria por sais solúveis através da verificação da concentração de íons encontrado nas amostras do material, em porcentagem em relação à massa. Desta forma, pode-se verificar o seu grau de degradação baseado nos valores apresentados pela tabela 8.

Tabela 8: avaliação do teor de sais de acordo com a WTA E-2-6-99/D (2000, p. 3)

| Sais Solúveis | Teor, em % de massa |             |            |
|---------------|---------------------|-------------|------------|
|               | Nível baixo         | Nível médio | Nível alto |
| Avaliação     |                     |             |            |
| Cloretos      | < 0,2               | 0,2 – 0,5   | > 0,5      |
| Nitratos      | < 0,1               | 0,1 - 0,3   | > 0,3      |
| Sulfatos      | < 0,5               | 0,5 – 1,5   | > 1,5      |

Analisando-se a tabela anterior, verifica-se que os sais solúveis mais nocivos aos materiais de construção são os nitratos. Entretanto, segundo estudos realizados por Nappi (2002), tem-se os sulfatos como os sais mais agressivos.

Para a aplicação do sistema de recuperação, deve-se inicialmente retirar o revestimento degradado até a região determinada pelas prospecções ou, no mínimo, até 80 cm acima da região atingida, quando o revestimento antigo for à base de cal (ARENDETT, 1995, p. 23). Este procedimento é necessário pois as argamassas de recuperação, por serem menos permeáveis ao vapor de água que as argamassas à base de cal, reduzem a taxa de evaporação da umidade do substrato, aumentando assim a altura da umidade ascensional presente na alvenaria antiga. Desta forma evita-se que a umidade, juntamente com os sais, seja transportada até o limite entre o revestimento de recuperação e o revestimento antigo, ocasionado manifestações patológicas nesta interface.

Após a retirada da argamassa contaminada, deve-se aprofundar as juntas de assentamento da alvenaria em 2,0 cm com o objetivo de retirar a maior quantidade de sal presente na alvenaria. A limpeza da parede deve ser executada preferencialmente por meios mecânicos.

A ponte de aderência necessária entre o substrato e o sistema de recuperação é alcançada por meio da aplicação de uma camada não contínua de chapisco em uma área de aproximadamente 50% da alvenaria. O chapisco não deve ser aplicado de maneira contínua na superfície, pois pode impedir a passagem da solução de sais da alvenaria para o

revestimento de argamassa. Além disso, a espessura do chapisco não deve ser superior a 0,5 cm (ARENDDT, 1995, p. 32).

O Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p. 33) apresenta o tipo de intervenção, bem como a espessura indicada para cada camada do revestimento, dependendo do grau de salinização da alvenaria (tabela 9).

Tabela 9: intervenção em relação ao grau de salinização (ARENDDT, 1995, p. 33)

| Grau de Salinização <sup>(1)</sup> | Intervenção                | Espessura das camadas (cm) <sup>(3)</sup> |
|------------------------------------|----------------------------|---|
| Pequeno                            | 1. Chapisco <sup>(2)</sup> | ≤ 0,5                                     |
|                                    | 1. Reboco de Recuperação   | ≥ 2,0                                     |
| Médio até alto                     | 1. Chapisco <sup>(2)</sup> | ≤ 0,5                                     |
|                                    | 2. Emboço de Recuperação   | 1,0 – 2,0                                 |
|                                    | 3. Reboco de Recuperação   | 1,0 – 2,0                                 |
|                                    | 1. Chapisco <sup>(2)</sup> | ≤ 0,5                                     |
|                                    | 2. Emboço de Recuperação   | ≥ 1,0                                     |
|                                    | 3. Reboco de Recuperação   | ≥ 1,5                                     |

(1) Verificado anteriormente por ensaios e testes.  
(2) Chapisco não contínuo, a não ser por indicação do fabricante.  
(3) Espessura total das camadas, não podendo ultrapassar 4 cm.

As superfícies das camadas inferiores aos rebocos de recuperação devem ser tornadas ásperas por sulcos horizontais assim que estiverem suficientemente coesas, aumentando assim a aderência. O tempo de espera recomendado para a aplicação da camada seguinte é de 1 dia por mm de espessura da camada executada, especialmente para revestimentos com espessura total maior do que 2,0 cm (ARENDDT, 1995, p. 33). Esta recomendação pode ser devido à necessidade da argamassa de desenvolver a parte mais significativa da retração de secagem inicial da camada subjacente, evitando assim o aparecimento de fissuras.

A produção do reboco de recuperação, segundo Arendt (1995, p. 34), pode ser realizada tanto com misturador elétrico (argamassadeira) como manual, sendo que a aplicação pode ser feita manualmente. Além disso, quando a execução do revestimento for realizada em período de baixa umidade, muito vento e exposto ao sol, recomenda-se realizar cura úmida e proteção tipo sombreamento para evitar o surgimento de fissuras de retração.

Os acabamentos a serem aplicados sobre os rebocos de recuperação, como, por exemplo, as pinturas, não devem influir negativamente na permeabilidade ao vapor de água do sistema. Desta forma, devem ser utilizadas tintas minerais. Segundo Beichel (1997, p. 360), o material utilizado deve ser uma tinta mineral à base de silicatos. Além desta, podem ser utilizadas tintas à base de cal. Tintas poliméricas (à base de látex, acrílica ou PVA) formam

uma película sobre o revestimento, impedindo a difusão de vapor através do reboco de recuperação.

### 3.4 MATERIAIS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO

Ao considerar a argamassa como a dispersão de agregados em uma matriz de partículas finas (preferencialmente pasta de aglomerantes), o comportamento reológico desta mistura está intimamente ligado ao agregado (dimensão, forma e distribuição granulométrica), à pasta (características químicas, físicas, quantidades dos materiais constituintes e quantidade de água) e à interação pasta-agregado (RAGO; CINCOTTO, 1999, p. 3).

As argamassas mistas à base de cimento e cal podem apresentar inúmeras propriedades, que variam em função da relação cimento/cal utilizada na mistura. Argamassas à base de cimento Portland possuem alta resistência à compressão e baixa retenção de água. Desta forma, um revestimento com esta argamassa é mais resistente, porém possui baixa extensão de aderência e é mais vulnerável à fissuração e conseqüente penetração de água da chuva. Por outro lado, as argamassas à base de cal possuem baixa resistência à compressão e alta retenção de água. Assim, revestimentos com esta argamassa apresentam baixa resistência mecânica, mas grande oposição à fissuração. Entre estes dois extremos, várias combinações de cimento e cal produzem um equilíbrio entre as diversas propriedades, sendo que a alta resistência e o rápido endurecimento do cimento podem ser modificados pela excelente trabalhabilidade e retenção de água da cal.

A seguir são apresentados os materiais comumente utilizados na produção de argamassas de revestimento, bem como a influência dos mesmos, segundo suas características químicas, físicas e quantidade na mistura, nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

#### 3.4.1 Aglomerantes

Os materiais responsáveis pela coesão dos agregados das argamassas são os aglomerantes. Seu processo de endurecimento ocorre devido a reações químicas que dependem do ambiente onde se encontram.

Em função do seu endurecimento, os aglomerantes podem ser classificados em dois grandes grupos: aéreos e hidráulicos. Os aglomerantes são chamados aéreos quando as reações de hidratação ocorrem devido à presença de ar, como é o caso das cales e dos gessos, sendo

que seus produtos de hidratação não resistem à água. Os aglomerantes hidráulicos, como é o caso do cimento Portland, somente endurecem na presença de água, formando um material resistente à água. Desta forma, chama-se hidráulidade à propriedade que caracteriza os aglomerantes hidráulicos, isto é, de endurecer quando misturados com a água e de resistir satisfatoriamente, após o endurecimento, quando submetidos à ação dissolvente da mesma (PETRUCCI, 1980, p. 326).

#### 3.4.1.1 Cal Hidratada

A cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é um aglomerante aéreo, isto é, seus produtos de hidratação ocorrem devido a reações químicas na presença do ar, e não são resistentes à água. A NBR 7175 (ABNT, 2003) define a cal hidratada como um pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

O processo de fabricação da cal inicia com a calcinação da matéria-prima, carbonatos de cálcio e cálcio-magnesianos, em temperaturas de aproximadamente  $900^\circ\text{C}$ , resultando na formação dos óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e cálcio-magnésio ( $\text{CaO-MgO}$ ), denominados genericamente de cal virgem, cal aérea ou cal viva (GUIMARÃES, 2002, p.86). Em função do tipo de matéria-prima, segundo Morales e Benini (1997, p. 28), podem existir cales calcíticas (teor de óxido de cálcio superior a 90%), cales magnesianas (teor de óxido de cálcio entre 65% e 90%) e cales dolomíticas (teor de óxido de cálcio inferior a 65%).

A cal hidratada é produzida a partir da reação de hidratação da cal virgem, transformando os óxidos em hidróxidos. Assim, a cal hidratada é formada por uma mistura de hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e de magnésio  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , fração de óxidos não hidratados ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) e contaminantes. A hidratação dos óxidos de cálcio ocorre logo após o contato do mesmo com a água, sendo que os óxidos de magnésio hidratam após um período de aproximadamente 24 horas (NIQUES et al., 2003, p.318). Deste total, apenas os hidróxidos são os responsáveis pela capacidade aglomerante do material (JOHN, 2003, p.48).

O endurecimento das argamassas à base de cal ocorre devido à recristalização dos hidróxidos e de sua reação química com o anidrido carbônico do ar ( $\text{CO}_2$ ). De acordo com Guimarães (2002, p. 238), as partículas muito finas de hidróxidos se aglomeram, formando cristais que aumentam em número e tamanho à medida que a água se evapora. Ocorre então o entrelaçamento destes cristais, formando uma malha resistente que retém os agregados. Paralelamente, o hidróxido de cálcio se transforma em carbonato anidro, como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), em função do anidrido carbônico do ar incorporado na argamassa e do ar exterior.

O hidróxido de magnésio, muito lentamente, transforma-se em carbonato básico, como, por exemplo, a hidromagnesita ( $3\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e a nesquehonita ( $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), em função do anidrido carbônico do ar exterior. Seus hidróxidos, quando transformados em carbonatos básicos, possuem maior volume, provocando expansões e, conseqüentemente maior compactação e rigidez dos entrelaçamentos das interfaces dos componentes do sistema.

Segundo Morales e Benini (1997, p. 28), a qualidade das cales hidratadas é indicada pelo teor de hidróxidos presente, os quais, por sua vez, dependem da pureza e do grau de calcinação da matéria-prima, bem como do grau de hidratação da cal e do seu armazenamento.

O teor de insolúveis presente na cal indica se a matéria-prima utilizada contém uma quantidade elevada de silicatos, argilo-minerais ou de quartzo. A pureza da matéria-prima deve ser tal que, tanto a cal virgem (NBR 6453, ABNT, 1988) como a cal hidratada (NBR 7175, ABNT, 2003), tenha um teor mínimo de 88% de óxidos de cálcio e magnésio, na base de material isento de voláteis, sendo os 12% restantes impurezas do material.

Segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003), as cales hidratadas são classificadas em CH-I, CH-II e CH-III de acordo com suas características químicas e físicas.

O processo de calcinação da matéria-prima pode ser verificado ao analisar-se o teor de anidrido carbônico presente, através da análise química da cal. Segundo as Normas NBR 7175 (ABNT, 2003) e NBR 6453 (ABNT, 1988), a calcinação é considerada bem conduzida quando o teor de anidrido carbônico de amostras coletadas em fábrica for inferior a 5% e inferior a 7% quando coletadas em depósitos.

Uma das características físicas importantes da cal é a finura. Esta propriedade influencia na plasticidade, bem como na capacidade de retenção de água do material. Assim, quanto maior o teor de finos presente, referente à quantidade de material retido na peneira de malha 200 (0,075mm), maior será a plasticidade e a retenção de água da cal. A finura é determinada de acordo com a NBR 9289 (ABNT, 2000). O ensaio para a determinação da retenção de água nas argamassas é preconizado pela NBR 9290 (ABNT, 1996), com a utilização do funil de Buchner modificado, e pela NBR 13277 (ABNT, 1995), através da utilização de gaze e papéis-filtro.

Boynton<sup>2</sup>, citado por Guimarães (2002, p. 125), afirma que a capacidade de retenção varia com os diferentes tipos de cal e é mínima para as cales hidratadas dolomíticas. Segundo Morales e Benini (1997, pg. 29) e Agopyan<sup>3</sup> (1988, apud CARNEIRO, 1993, pg. 25), as cales magnesianas, com partículas pequenas e alongadas, quando completamente hidratadas, conferem maior plasticidade às argamassas. Além disso, de acordo com estudos realizados em argamassas de cimento com adições de vários tipos de cal, Sébaïbi, Dheilly e Quéneudec (2002, p. 695) concluíram que a retenção de água depende da morfologia dos poros e da natureza química da cal utilizada.

Quando se utiliza a cal hidratada em pó, a NBR 7200 (ABNT, 1998) recomenda que a mesma permaneça descansando por um período mínimo de 16 horas, na forma de pasta ou argamassa, e mantida permanentemente úmida para evitar o enrijecimento e a formação de grumos. A maturação das cales hidratadas é uma técnica tradicional que, além de melhorar as propriedades da argamassa no estado fresco, fornece um meio mais apropriado para a hidratação do cimento, quando comparado à mistura onde a cal é adicionada em pó. Ensaio realizados em pastas de cal hidratada no estado fresco por Rago e Cincotto (1999, p. 23) mostraram que a maturação da cal modificou apenas a viscosidade plástica (velocidade de deformação de um corpo) e o limite de escoamento (resistência ao escoamento) da cal cálcica, sendo para a cal dolomítica o efeito imperceptível.

As argamassas com cal apresentam ainda a propriedade de reconstituição autógena (GUIMARÃES, 2002, p. 265). De acordo com Dubaj (2000, p. 30), este fenômeno ocorre devido ao restabelecimento de minúsculas fissuras devido à recarbonatação da cal com os ciclos de umedecimento e secagem, aumentando assim a durabilidade do revestimento.

O uso de cal hidratada em argamassas aumenta a retenção de água do material, bem como melhora a plasticidade e a trabalhabilidade (CARASEK; CAMPAGNOLO, 1990, p. 337; RAGO; CINCOTTO, 1999, p. 8). Segundo Guimarães (2002, p. 238), a retenção de água de uma argamassa é melhorada com o aumento do teor de cal, pois esta, além de possuir grande área específica, apresenta em seus cristais grande capacidade adsorviva, retendo em sua volta uma película líquida de água firmemente aderida.

De acordo com estudos realizados por Mosquera, Benítez e Perry (2002, p. 3), o aumento do teor de cal em argamassas mistas aumenta a porosidade total do material, quando a relação aglomerante/agregado se mantém constante. Além disso, ainda segundo estes autores, a

---

<sup>2</sup> BOYNTON, R.S. Chemistry and technology of lime and limestone – Interscience Publishers John Wiley and Sons. New York. 1966.

<sup>3</sup> AGOPYAN, V. A importância da pureza dos agregados para argamassas e concretos. In: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO Escola Politécnica. *Engenharia Civil*: engenharia de construção civil. São Paulo, 1988. (Anais EPUSP, série A, v. 1, pt.5) p. 129-148).

difusão do vapor de água em argamassas mistas apresenta valores superiores quando comparada a argamassas à base de cimento, sendo que argamassas à base de cal proporcionaram resultados excepcionalmente altos.

Segundo ensaios realizados em argamassas mistas por Carasek e Campagnolo (1990, p. 341), o aumento do teor de cal no material resultou na redução da resistência mecânica. Neste estudo, observou-se que os resultados de resistência mecânica das argamassas com maior teor de cal (1:2:9) sofreram redução de aproximadamente 50% quando comparadas a argamassas com maior teor de cimento (1:1:6), tanto nos ensaios de resistência à compressão como à tração.

A resistência mecânica das argamassas à base de cal apresenta um grande aumento dos 28 aos 365 dias de cura, sendo este acréscimo maior em relação à compressão que à flexão. Segundo estudos realizados por Lanas e Alvarez (2003, p. 1874), uma argamassa à base de cal 1:1 (aglomerante:agregado) apresentou resistência à compressão 3,5 vezes maior aos 365 dias que aos 28 dias, bem como resistência à flexão duas vezes maior aos 365 que aos 28 dias.

Segundo estudos realizados por John (2003, p. 53), a adição de cal hidratada em argamassas de cimento Portland CP I reduz significativamente o módulo de elasticidade das argamassas, sem afetar na mesma proporção a sua resistência à tração, que em última análise, é a máxima resistência de aderência da argamassa. Desta forma, a adição de cal hidratada em argamassas de cimento tende a aumentar a vida útil dos revestimentos.

Ensaio realizado por Carasek e Campagnolo (1990, p. 345) em argamassas mistas concluíram que a retentividade de água do material é uma propriedade característica que exerce grande influência na resistência de aderência. Desta forma, pode-se afirmar que argamassas mais retentivas apresentam melhores resultados de aderência ao substrato.

A utilização de cal hidratada em argamassas de recuperação, tanto em emboço como reboco de recuperação, favorece a retenção de água, a trabalhabilidade e a plasticidade do material. Além disso, a cal permite elevar a difusão de vapor e a porosidade das argamassas, propriedades estas necessárias para o funcionamento do sistema de recuperação.

#### 3.4.1.2 Cimento Portland

Segundo a ASTM C 926 (1998), materiais cimentantes são os materiais que, quando misturado com água, com ou sem agregados, proporcionam as propriedades de plasticidade, coesão e aderência necessária para aplicação, além de formar uma massa rígida. O cimento Portland comum, de acordo com a NBR 5732 (ABNT, 1991), é um aglomerante hidráulico

obtido pela moagem de clínquer Portland (silicatos de cálcio com propriedades hidráulicas) ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

A produção do cimento Portland ocorre a partir do aquecimento de uma mistura de pedra calcária e argila, a temperaturas de aproximadamente 1450°C. Ocorre, então, a fusão parcial produzindo os nódulos de clínquer. Estes são misturados com uma pequena porcentagem de sulfato de cálcio e finamente moídos, resultando no cimento. O sulfato de cálcio controla o tempo de pega e influencia no desenvolvimento da resistência. A composição típica do clínquer é de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de outros componentes. Os quatro compostos principais do cimento Portland são: silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), beta-silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S), aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF)<sup>4</sup>. Estes compostos, quando em contato com a água, são os maiores responsáveis pelo endurecimento do cimento.

No Brasil, são vários os tipos de cimentos produzidos que podem ser utilizados como aglomerantes hidráulicos nas argamassas, como, por exemplo: Cimentos Portland Composto (CP II-E, CP II-F e CP II-Z), Cimento Portland de Alto-forno (CP III) e Cimento Portland Pozolânico (CP IV).

O cimento Portland utilizado neste estudo foi o Pozolânico CP IV-32. Este cimento composto é formado pela mistura íntima e uniforme de uma pozolana com o cimento Portland. Segundo Petrucci (1980, p. 341), as pozolanas são materiais, em geral naturais, moídos ao grau de finura dos cimentos e que não têm propriedades aglomerantes. Por outro lado, elas possuem a propriedade de fixar o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento Portland, desenvolvendo então suas propriedades hidráulicas.

A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada de reação pozolânica. A importância técnica dos cimentos pozolânicos deriva principalmente de três aspectos principais (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 219):

- a) lenta reação de hidratação, e portanto, a taxa de liberação de calor e o desenvolvimento da resistência são também lentos;
- b) a reação consome hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, contribuindo para a durabilidade da pasta de cimento aos sulfatos e em ambientes ácidos;

---

<sup>4</sup> Nomenclatura da química do cimento:

C<sub>3</sub>S – 3CaO.SiO<sub>2</sub>; C<sub>2</sub>S - 2CaO. SiO<sub>2</sub>; C<sub>3</sub>A – 3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; C<sub>4</sub>AF- 4CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

- c) os produtos da reação são bastante eficientes no preenchimento dos espaços capilares grandes, melhorando a resistência e a impermeabilidade do sistema.

Nas argamassas mistas, o principal responsável pela resistência mecânica é o cimento Portland. No entanto, o aumento do consumo de cimento em argamassas, além de proporcionar a redução da capacidade de deformação, aumenta a retração térmica e por secagem, podendo ocorrer o surgimento de fissuras com a conseqüente redução da durabilidade do revestimento. Por outro lado, baixos consumos de cimento podem reduzir a resistência à abrasão dos revestimentos, tornando-os pulverulentos.

Segundo Cincotto, Silva e Carasek (1995, p. 22), diferentes classes de resistência dos cimentos não influenciam significativamente sobre a trabalhabilidade das argamassas. Entretanto, segundo estes autores, maior trabalhabilidade e maior retenção de água podem ser obtidos em argamassas com cimentos que possuem maior finura. Quanto ao estado endurecido, de acordo com Bolorino e Cincotto (1997, p. 25), podem ocorrer retração por secagem e fissuração em argamassas mistas com cimento Portland CP V ARI RS, sendo este fenômeno justificado pela acelerada velocidade de hidratação e maior retração inicial. Segundo estudos realizados por Angelin et al. (2003, p. 150), o consumo de cimento Portland em argamassas mistas é diretamente relacionado com a retração das argamassas endurecidas. Entretanto, argamassas com maiores teores de cimento apresentaram resultados superiores de resistência de aderência.

O cimento presente nas argamassas de recuperação tem a função de aumentar a resistência à abrasão e a aderência do revestimento. Além disso, a utilização de cimentos Portland compostos, como o CP IV, contribui para a resistência a sulfatos e reduz a permeabilidade do sistema.

### 3.4.2 Agregado Miúdo

Segundo Selmo (1986, p. 40), os agregados miúdos das argamassas de revestimento devem ser compostos, em sua maioria, por grãos minerais duros, compactos, duráveis e limpos e não devem conter substâncias que, por sua natureza ou teor, possam afetar a durabilidade e o aspecto visual do revestimento.

A NBR 7200 (ABNT, 1998) recomenda ser favorável a forma arredondada do grão. Os grãos achatados ou longos em forma laminar dificultam a trabalhabilidade e prejudicam a capacidade de compactação da argamassa. Segundo esta norma, a dimensão nominal

máxima do agregado a ser adotada na aplicação de revestimento de argamassa em paredes externas, internas e forros, deve ser:

- a) para chapisco, 5 mm;
- b) para emboço, 3 mm;
- c) para reboco, 1 mm.

Segundo Lanas e Alvarez (2003, p. 1874), o tipo e o formato do agregado miúdo influenciam na resistência mecânica das argamassas, sendo que os agregados calcários angulosos apresentaram maiores resistências. Além disso, argamassas que utilizaram estes agregados proporcionaram maior quantidade de poros médios e grandes, o que permite maior carbonatação, evitando assim a retração durante os processos de secagem e cristalização.

No entanto, certos tipos de acabamentos requerem determinadas percentagens de areias com composições granulométricas diferentes e mesmo, em alguns casos, de agregado de maior granulometria.

Os agregados miúdos das argamassas desempenham, além da função tecnológica, função econômica, por serem materiais mais baratos que os aglomerantes, diminuindo assim o custo do material. Desta forma, torna-se economicamente interessante introduzir uma alta proporção de areia na mistura. Entretanto, essa proporção limite deve ser determinada em função das propriedades exigidas para a argamassa.

De acordo com Selmo (1986, p. 30), os agregados miúdos devem contribuir, na medida do possível, para otimizar as propriedades das argamassas, a durabilidade e a textura final dos revestimentos. As principais propriedades dos revestimentos influenciadas pelos agregados miúdos são: trabalhabilidade, retração por secagem e resistência à aderência. Por outro lado, as principais propriedades dos agregados miúdos que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas são: composição química e mineralógica, características geométricas dos grãos e composição granulométrica.

Quanto à composição química e mineralógica, os agregados miúdos devem se constituir, essencialmente, por grãos minerais inócuos, isto é, grãos não sujeitos a processo de alteração que possa provocar vesículas, manchas, perda de resistência ou aderência dos revestimentos (DUBAJ, 2000, p. 35). Além disso, segundo Agopyan (1986, p. 115), diversos materiais contidos nos agregados são nocivos às argamassas, pois podem interferir na hidratação do cimento ou na carbonatação da cal, reduzindo a aderência pasta/agregado,

ou ainda proporcionar reação química não desejável entre o aglomerante e o agregado. Desta forma, estes materiais deletérios devem ser removidos do agregado através de lavagem.

Tristão (1995, p. 19) apresenta as diversas normas e especificações da bibliografia nacional e estrangeira utilizadas para a determinação das principais características do agregado miúdo para argamassas de revestimento. A norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) especifica o método utilizado de ensaio para a determinação da composição granulométrica do agregado para concreto, sendo que o resultado é expresso em porcentagem retida e porcentagem retida acumulada em cada peneira. Além disso, determina-se também a dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado. A dimensão máxima característica determina a abertura nominal, em mm, da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa. Já o módulo de finura é calculado a partir da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100. Selmo (1986, p. 32) classifica as areias de acordo com o seu módulo de finura. As areias grossas apresentam módulo de finura superior a 3,00, sendo que valores intermediários entre 2,00 e 3,00 indicam granulometrias médias. Areias finas apresentam módulo de finura inferior a 2,00.

De acordo com Selmo (1986, p. 33), areias com maiores módulos de finura, que possuem maior fração de grãos graúdos, propiciam revestimentos com textura mais áspera. Deste modo, são indicadas areias grossas para chapisco, areias médias para emboço e finas para reboco, sendo que a mistura de areia média com areia fina pode resultar em granulometria própria para “massa única”.

Em relação aos diferentes tamanhos de grãos, os agregados miúdos podem apresentar três tipos de composições granulométricas: contínua, descontínua e uniforme. A granulometria contínua é aquela que contém todos os tamanhos de grãos, isto é, existe uma distribuição normal de tamanhos de grão. Uma granulometria descontínua, ou aberta, apresenta falta de certas frações granulométricas. Quando há predominância de grãos de mesmo tamanho, a granulometria pode ser classificada como uniforme. Agregados com esta granulometria são indicados para argamassas de recuperação, pois favorecem a formação de vazios na matriz, aumentando a porosidade do material. Entretanto, granulometrias uniformes de agregados aumentam a permeabilidade do material, sendo que esta propriedade em argamassas para reboco de recuperação deve ser reduzida a valores inferiores a 5 mm de altura de água.

A utilização de agregado de granulometria contínua, segundo diversos autores, proporciona o aumento da trabalhabilidade devido ao maior grau de empacotamento da mistura (com o conseqüente aumento na massa unitária), onde os grãos de menor diâmetro preenchem os

vazios entre os grãos de diâmetro imediatamente superior, proporcionando melhor deslizamento entre eles (MATTOS, 2001, p. 15).

Segundo Selmo (1986, p.34), as areias de granulometria contínua apresentam menor volume de vazios, reduzindo assim o volume de pasta na argamassa, e conseqüentemente a retração potencial da mistura. Da mesma forma Joisel (1980, p. 150) sugere que a areia possua uma granulometria que possibilite uma estrutura compacta e que tenha menor superfície específica, diminuindo assim o volume de pasta na argamassa.

De acordo com estudos realizados por Lanas e Alvarez (2003, p. 1873), em ensaios de resistência mecânica em argamassas, foi observado que a distribuição granulométrica dos agregados é o atributo mais importante em relação às demais características do mesmo.

A granulometria dos agregados miúdos, segundo Sabbatini (1986, p. 20), tem grande influência sobre as propriedades das argamassas, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10: influência das características da areia nas propriedades das argamassas (SABBATINI, 1986, p. 20)

| Propriedades           | Características da areia        |   |  |
|------------------------|---------------------------------|---|--|
|                        | Quanto menor o módulo de finura | Quanto mais descontínua for a granulometria | Quanto maior o teor de grãos angulosos |
| Trabalhabilidade       | Melhor                          | Pior  | Pior                                   |
| Retenção de água       | Melhor                          | Pior  | Melhor                                 |
| Resiliência            | Variável                        | Pior  | Pior                                   |
| Retração na secagem    | Aumenta                         | Aumenta                                     | Variável                               |
| Porosidade             | Aumenta                         | Aumenta                                     | Variável                               |
| Aderência              | Variável                        | Pior  | Melhor                                 |
| Resistências mecânicas | Variável                        | Pior  | Variável                               |
| Impermeabilidade       | Pior                            | Pior  | Variável                               |

No que se refere ao teor de agregado miúdo, estudos realizados por Mosquera, Benítez e Perry (2002, p. 5) indicam que a porosidade total das argamassas à base de cimento é maior com o aumento da relação agregado/aglomerante.

Além disso, o aumento do teor de agregado miúdo nas argamassas diminui a resistência de aderência, mas garante a durabilidade do revestimento pela redução da retração (CARASEK, 1996, p. 46). Cincotto, Silva e Carasek (1995, p. 38) atribuem ao agregado o maior responsável pela inibição da retração, e concordam que, ao contrário da retração, a aderência da argamassa é influenciada favoravelmente pela granulometria fina do agregado. Da mesma forma Murray<sup>5</sup>, citado por Selmo (1989, p. 83), afirma que a utilização de areia

<sup>5</sup> MURRAY, I.H. The adesion of cementitious render to a brick background. Garston, Building Research Establishment, Aug, 1983.

fina pode melhorar a resistência de aderência de uma argamassa quando aplicada em substratos de baixa absorção capilar de água.

A classificação dos agregados pode ser feita de acordo com a dimensão de suas partículas, massa específica ou sua origem. No que se refere ao tamanho das partículas, o termo agregado graúdo é utilizado para descrever partículas com diâmetro máximo superior a 4,8 mm (retidas na peneira nº. 4), e o termo agregado miúdo é usado para partículas com diâmetro máximo igual a 4,8 mm. Geralmente, a maioria dos agregados naturais, como a areia quartzosa, têm massa unitária entre 1520 e 1680 kg/m<sup>3</sup>. Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 245), os agregados que apresentam massa unitária menor do que 1120 kg/m<sup>3</sup> são considerados leves, sendo que a menor massa unitária se deve à microestrutura celular ou altamente porosa do material.

Os agregados leves podem ser divididos em dois grupos principais: naturais ou sintéticos. Os agregados leves naturais são produzidos a partir do beneficiamento de rochas ígneas vulcânicas, como a pumicita ou tufo. Os agregados leves sintéticos podem ser fabricados por tratamento térmico de diversos materiais, como, por exemplo, argilas, folhelhos, diatomita, perlita ou vermiculita (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 248).

Dentre os agregados leves, a vermiculita é o material comumente utilizado na fabricação de argamassas de recuperação na Alemanha. Este material possui uma estrutura lamelar semelhante à da mica. Quando aquecida a temperaturas entre 650°C a 1000°C, a vermiculita expande seu volume inicial em até 30 vezes por esfoliação das delgadas lâminas que a constituem. Deste modo, a massa específica aparente das vermiculitas expandidas é de apenas 60 a 130 kg/m<sup>3</sup>. A NBR 9230 (ABNT, 1986) informa as propriedades que a vermiculita expandida deve apresentar, sendo estas relativas à sua granulometria, aos valores máximos permitidos para a massa específica aparente e para a condutividade térmica do material, bem como a temperatura mínima de amolecimento admitida (refrataridade).

Em argamassas tradicionais, o uso de agregado leve é pequeno. Entretanto, o efeito da utilização destes agregados pode ser comprovado na execução de concretos leves (MEHTA, MONTEIRO, 1994, p. 386).

No que se refere às propriedades dos concretos no estado fresco, mantendo-se o mesmo abatimento, o uso de agregado leve melhora a trabalhabilidade do material (NEVILLE, 1997, p. 682).

Os agregados leves apresentam boa aderência na interface agregado/pasta hidratada de cimento. Isto ocorre devido à textura áspera da superfície do agregado, resultando em um

intertravamento mecânico entre os materiais, bem como à similaridade entre o módulo de elasticidade da pasta de cimento e do agregado leve, evitando assim o surgimento de tensões diferenciais entre os dois materiais pelas cargas aplicadas ou por variações térmicas ou higroscópicas. Soma-se a isso o fato de que a água absorvida pelo agregado leve durante a mistura se torna, com o tempo, disponível para a hidratação do cimento remanescente não hidratado. Como esta hidratação ocorre principalmente na interface agregado/pasta, a aderência entre o agregado e a matriz se torna mais forte (NEVILLE, 1997, p. 686).

Entretanto, segundo Lea (1970, p. 578), concretos com agregados leves podem apresentar maior retração por secagem e movimento de água que concretos normais, além de serem mais susceptíveis à ocorrência de fissuras de retração.

Os concretos leves são menos permeáveis devido à baixa relação água/cimento da pasta, à melhor qualidade da interface em torno do agregado e à compatibilidade dos módulos de elasticidade. Este fato resulta na redução da microfissuração da pasta devido a variações térmicas e torna o material mais resistente aos ataques agressivos do meio ambiente. Com relação a carbonatação, os vazios dos agregados leves facilitam a difusão do CO<sub>2</sub> (NEVILLE, 1997, p. 689).

Concretos com agregados leves possuem massa específica de aproximadamente dois terços da massa específica do concreto que possui na sua formulação agregados naturais (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 393). A resistência mecânica destes concretos é reduzida, bem como o módulo de elasticidade do material.

A utilização de agregados leves na produção de argamassas de recuperação favorece a porosidade, além de reduzir a permeabilidade a massa específica do material, propriedades necessárias a estes sistema de revestimento.

### 3.4.3 Água de Amassamento

A água tem duas funções principais nas argamassas. A primeira função é a de se combinar quimicamente com os aglomerantes presentes, possibilitando seu endurecimento e ganho de resistência. A segunda função refere-se à atribuição de trabalhabilidade à mistura. De acordo com a ASTM C270 (1998, p. 143), a água possui três funções: contribuir para a trabalhabilidade, hidratar o cimento e facilitar a carbonatação da cal.

Impurezas contidas na água de amassamento podem influenciar negativamente na resistência mecânica e durabilidade das argamassas. A água do mar ou salobra deve ser evitada por aumentar o risco de eflorescência. Além disso, não devem ser utilizadas águas

que contenham terra ou substâncias orgânicas em suspensão. Geralmente a água potável é considerada conveniente para amassamento das argamassas de revestimento.

A quantidade de água utilizada para proporcionar a trabalhabilidade adequada nas argamassas é maior do que a necessária para as reações de hidratação do cimento. Assim, uma parte é perdida por evaporação e outra parte por sucção do substrato, devido ao gradiente hidráulico formado, resultando em porosidade na argamassa.

Sabe-se que a superfície específica e a quantidade de areia empregada determinam a quantidade de água de amassamento necessária às argamassas. Segundo Carasek (1996, p. 51) a quantidade de água deve ser a máxima possível para proporcionar adequada trabalhabilidade, mantendo a coesão e a plasticidade da argamassa de assentamento, obtendo-se assim melhores resultados de aderência. Desta forma, a relação água/cimento, é um parâmetro apropriado para controlar as propriedades das argamassas de revestimento, tais como resistência de aderência à tração (SELMO, 1989, p. 131).

### 3.4.4 Aditivos

A Norma NBR EB 1763 (ABNT, 1992) define os aditivos como produtos adicionados em pequena quantidade em pastas, argamassas e concretos de cimento Portland, no momento da mistura, com a finalidade de modificar algumas de suas propriedades, tanto no estado fresco como endurecido.

Segundo Neville (1997, p. 251), os aditivos são produtos químicos que, exceto em casos especiais, são adicionados à mistura de concreto em teores não maiores que 5%, em relação à massa de cimento, durante a mistura, com finalidade de se obter modificações específicas, ou modificações das propriedades do concreto.

Os aditivos normalmente utilizados em argamassas de recuperação são os incorporadores de ar, retentores de água e os hidrofugantes. As características e os mecanismos de ação, bem como a aplicação destes aditivos, estão descritas a seguir.

#### 3.4.4.1 Aditivos incorporadores de ar

Aditivos incorporadores de ar são agentes tensoativos, isto é, constituídos por moléculas com cadeias longas que se orientam de modo a reduzir a tensão superficial da água. Desta forma, as bolhas de ar formadas durante a mistura ficam estabilizadas. Estas bolhas são cobertas com um envoltório de moléculas de incorporador de ar que se repelem entre si, impedindo a coalescência das mesmas e assegurando uma distribuição uniforme do ar

incorporado (NEVILLE, 1997, p. 540). Os tensoativos empregados como aditivos incorporadores de ar geralmente são constituídos de sais de resinas da madeira, materiais protéicos e ácidos graxos.

As bolhas de ar na pasta são geradas pela ação da mistura, sendo que o incorporador de ar apenas estabiliza as bolhas que são formadas. Desta forma, o aditivo não gera as bolhas de ar, mas garante que estes vazios se mantenham na pasta endurecida (RAMACHANDRAN, 1984, p. 275). Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 280), estes aditivos são indicados para concretos que contenham menos cimento e água, agregados de textura rugosa ou agregados leves.

Os aditivos incorporadores de ar são utilizados há décadas em concretos com o principal objetivo de resistir a ciclos de gelo e degelo. Nos últimos anos, estes aditivos vêm sendo utilizados também em argamassas industrializadas ou dosadas em obra, com o objetivo de proporcionar melhor trabalhabilidade e rendimento (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003, p. 163). A vantagem econômica do uso de incorporador de ar é a redução da massa específica do material, aumentando assim o rendimento do cimento e do agregado (NEVILLE, 1997, p. 554).

Monte, Uemoto e Selmo (2003, p. 163) realizaram um levantamento das normas nacionais e internacionais de aditivos incorporadores de ar, bem como das especificações técnicas dos fabricantes, e concluíram que, com exceção da norma Britânica BS 4887 (1986), não existem normas específicas para avaliação de aditivos incorporadores de ar em argamassas. Além disso, foi constatado que grande parte das informações mais importantes para a avaliação do desempenho do aditivo na aplicação, como o teor de sólidos, os efeitos secundários, o efeito da temperatura e superdosagem, não são fornecidas pelos fabricantes, impossibilitando a diferenciação entre os produtos existentes no mercado nacional.

Velocidades mais altas de mistura permitem maiores incorporações de ar no material que velocidades baixas (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 282). Da mesma forma, um período maior de tempo de mistura causa um pequeno acréscimo no conteúdo de ar, assim como a continuidade da mistura provoca a redução do ar incorporado. Estudos realizados com argamassas à base de cimento contendo diversos tipos de aditivo incorporador de ar disponíveis no mercado nacional, demonstraram que as propriedades de densidade de massa aparente e teor de ar incorporado do material no estado fresco apresentaram variações de acordo com o tempo de mistura (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003, p. 163). Isso é devido à instabilidade dos produtos, que, quando misturados durante diferentes intervalos de tempo, resultam em argamassas com diferentes propriedades, principalmente quanto à aderência e à resistência mecânica. Resultados obtidos em ensaios realizados por Casali et al. (2003, p. 280)

e Sousa e Bauer (2003, p. 331) também demonstraram que o tempo de mistura influencia fortemente no teor de ar das argamassas que contêm aditivo incorporador de ar.

De acordo com Neville (1997, p. 544), a quantidade real de ar que é incorporado nos concretos é influenciada por vários fatores, como finura do cimento, teor de álcalis, adição de cinza volante, proporção de material ultrafino, entre outros. Além disso, a incorporação de ar em cimentos contendo cinza volante tende a ser dificultada, pois o carvão presente nas cinzas volantes, resultante da combustão incompleta, pode absorver o aditivo, reduzindo assim sua eficácia (RAMACHANDRAN, 1984, p. 274). Sendo assim, tornam-se necessários maiores teores de aditivo incorporador de ar para obter o mesmo teor de ar incorporado quando são utilizados cimentos Portland compostos.

A tabela 11 apresenta as alterações que podem ocorrer nas propriedades das argamassas de assentamento e revestimento devido ao uso de aditivo incorporador de ar (IA) na mistura (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003, p. 168).

Tabela 11: alteração das propriedades das argamassas para assentamento e revestimento por aditivos incorporadores de ar (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003, p. 168)

| Propriedades indicadas |                               | Efeito do aditivo IAR           |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Estado Fresco          | Índice de consistência        | Aumenta para mesmo a/c          |
|                        | Densidade de massa aparente   | Diminui                         |
|                        | Teor de ar                    | Aumenta                         |
|                        | Retenção de água              | Aumenta (reduz a exsudação)     |
| Estado Endurecido      | Resistência mecânica          | Diminui para mesmo a/c          |
|                        | Resistência de aderência      | Diminui para mesmo a/c*         |
|                        | Absorção capilar              | Diminui                         |
|                        | Retração por secagem          | Igual ou aumenta                |
|                        | Densidade de massa específica | Diminui                         |
|                        | Módulo de elasticidade        | Diminui                         |
|                        | Durabilidade                  | Aumenta (ciclos de gelo/degelo) |

\*segundo Carasek (1997, p. 218)

A melhora da trabalhabilidade das argamassas com aditivo incorporador de ar é geralmente devida à ação de rolamento das bolhas de ar, que são extremamente numerosas e compressíveis (RAMACHANDRAN, 1984, p. 284). Estas bolhas de ar, mantidas esféricas pela tensão superficial, se comportam como agregado miúdo com atrito superficial muito baixo e grande elasticidade. Assim, mantendo-se a trabalhabilidade constante, a inclusão de ar incorporado pode ser acompanhada de uma redução na relação água/cimento (NEVILLE, 1997, p. 553). Além disso, a incorporação de ar é benéfica na exsudação, pois as bolhas de ar mantêm as partículas em suspensão, de modo que a sedimentação é reduzida e a água não é expelida.

Casali et al. (2003, p. 280), ao analisar a trabalhabilidade de argamassas com aditivos, medida pelo GTec Teste, verificou que esta propriedade é influenciada pelo teor de ar incorporado no material. Com o aumento deste teor, menor foi a leitura inicial de consistência, apresentando maior índice de plasticidade (mais deformável). No que se refere aos valores de retenção de água, este estudo não apresentou variação significativa nos resultados das argamassas.

Em pastas de cimento com aditivo incorporador de ar, o aumento na relação água/cimento permite o aumento na incorporação de ar e diminui a superfície específica das bolhas. Entretanto, os espaçamentos entre as bolhas mantêm-se relativamente constantes (RIXOM; MALIVAGANAM, 1986, p. 105).

No que se refere ao estado endurecido dos concretos, o uso de aditivo incorporador de ar reduz a massa unitária e a resistência à compressão, flexão e o módulo de elasticidade. Além disso, altos teores de aditivo incorporador de ar nas argamassas levam à redução da resistência superficial das argamassas (MONTE; UEMOTO; SELMO, 2003, p. 295).

John et al. (1994, p. 28), ao realizar ensaios comparativos entre argamassas de cimento aditivadas e argamassas mistas de cimento e cal, concluíram que a substituição de cal hidratada por aditivos, na maioria das vezes, diminui a resistência à aderência e à abrasão, bem como reduz o transporte de água, a retração hidráulica e o módulo de elasticidade. Entretanto, o autor afirma que os aditivos não podem ser encarados como substitutos da cal hidratada na confecção de argamassas de revestimento, pois produzem argamassas com comportamento diferente, que podem levar a resultados tecnicamente inadequados.

Segundo Neville (1997, p. 538), o diâmetro típico das bolhas de ar incorporado no concreto é de 50  $\mu\text{m}$ , quase esféricas. Desta forma, não são formados canais de escoamento de água, fazendo com que a permeabilidade do material não aumente com o aumento da porosidade. Da mesma forma Ramachandran (1984, p. 297) concorda que as propriedades de permeabilidade e de teor de absorção capilar são reduzidas quando adequadamente utilizados os aditivos incorporadores de ar. Isto se deve ao fato de que a uniformidade e a trabalhabilidade do ar incorporado no material resulta em um material mais homogêneo com menos canais capilares e descontinuidades, promovendo assim menor permeabilidade à água.

Estudos realizados por Wijffels e van Hees (2003, p. 4) comprovaram que o uso de incorporador de ar em argamassas à base de cimento causam a redução do coeficiente de absorção capilar de água. Este fenômeno, segundo os autores, pode ser explicado pelo fato de que as bolhas de ar formadas pelo uso de aditivo incorporador de ar causaram um aumento no diâmetro dos capilares, sendo que estes não conseguem absorver água a partir

de capilares de diâmetros menores, fazendo com que as bolhas atuem como bloqueadores do efeito da absorção capilar.

Entretanto, estudos realizados com argamassas mistas com aditivo incorporador de ar por Bianchin (1999, p. 117) e Monte, Uemoto e Selmo (2003, p. 295) não apresentaram reduções na quantidade de água absorvida por sucção capilar, chegando até a aumentá-las.

#### 3.4.4.2 Aditivos hidrofugantes

Os aditivos hidrofugantes são utilizados nas argamassas com o objetivo de evitar a entrada de água proveniente da chuva, reduzindo a absorção de água por capilaridade no revestimento. Estes aditivos incluem os sais de ácidos graxos (estearatos e oleatos), que reagem com os hidratos do cimento, bem como substâncias à base de emulsões de cera (RIXON; MAILVAGANAM, 1986, p. 518).

Segundo Ramachandran (1984, p. 518), o princípio de funcionamento dos hidrofugantes consiste na reação do aditivo com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) produzindo estearato de cálcio insolúvel que, ao revestir a superfície do poro, tornam o revestimento hidrófobo, como mostra a figura 11. Neville (1997, p. 270) atribui o efeito hidrófobo destes aditivos devido ao aumento do ângulo de contato entre a água e as paredes dos poros capilares, fazendo com que a mesma seja empurrada para fora dos poros.

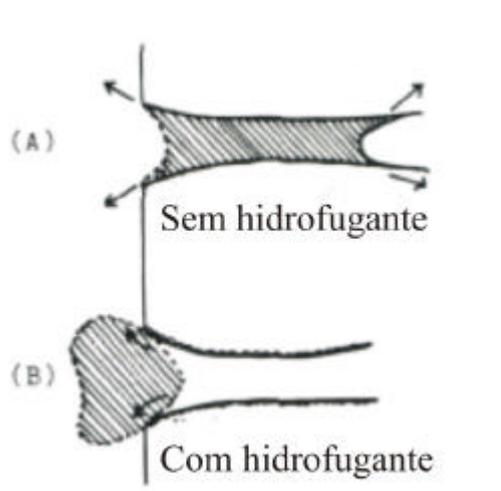


Figura 11: permeabilidade à água por capilaridade de materiais porosos (a) sem aditivo hidrofugante e (b) com aditivo hidrofugante (RAMACHANDRAN, 1984, p. 518)

Alguns aditivos hidrofugantes desenvolvem as propriedades de repelência à água muito rápido, contudo seus efeitos também diminuem rapidamente, como é o caso dos oleatos. Desta forma, a perda prematura desta propriedade faz com que os sais presentes nas

argamassas alcancem a superfície do revestimento rapidamente, produzindo danos no material. Por outro lado, alguns aditivos, como é o caso dos estearatos, apresentam baixas propriedades hidrofugantes em baixas idades (28 dias). Entretanto, estes aditivos são mais duráveis quando comparados com os oleatos (DROLL; MEIER, 199\_, p. 6).

A maioria dos aditivos hidrofugantes tende a incorporar certa quantidade de ar, melhorando assim a trabalhabilidade do material no estado fresco. No estado endurecido, a resistência à compressão pode ser reduzida devido à incorporação de ar. Além disso, a adição de finos na mistura provoca o aumento da relação água/cimento do material (RAMACHANDRAN, 1984, p. 523).

Wijffels e van Hees (2003, p. 4) estudaram o uso de aditivo hidrofugante em argamassas à base de cimento e verificaram que o coeficiente de absorção capilar de água não sofreu alteração com o uso deste aditivo em argamassas. Segundo os autores, este comportamento pode estar associado ao fato que, na idade de realização do ensaio, aos 28 dias, não ter ainda ocorrido o efeito hidrofugante do estearato devido à alta alcalinidade ainda presente nas argamassas.

#### 3.4.4.3 Aditivos retentores de água

Os aditivos retentores de água têm sido utilizados há aproximadamente 50 anos, como o objetivo de modificar as propriedades de argamassas, como é o caso dos éteres de celulose, como o hidroxietil celulose, e de alguns látices, como o EVA, que são utilizados na fabricação de argamassas colantes (SILVA; ROMAN, 2001, p. 322). Estes aditivos, à base de polímeros, são solúveis à água e não-iônicos e proporcionam maior retenção de água, prolongando o tempo de uso do material, melhorando a trabalhabilidade e resultando em uma argamassa mais fluida e homogênea, com maior consistência, permitindo assim a aplicação sem que haja escorregamento do material. Além disso, estes aditivos permitem alta adesividade a substratos porosos.

Em sistemas à base de cimento, a água permanece fisicamente ligada ao hidroxietil celulose devido à sua natureza hidrófila (absorção de água), resultando no aumento da viscosidade da fase aquosa (SILVA; ROMAN, 2001, p. 21). No que se refere ao cimento em hidratação, até o momento não há evidências de interação química entre este e os éteres de celulose. Segundo Wagner<sup>6</sup> (1973 apud SILVA; ROMAN, 2001, p. 21), provavelmente os polímeros permanecem na fração da água que não é consumida nas reações de hidratação e não fazem parte da estrutura hidratada do cimento.

---

<sup>6</sup> WAGNER, H.B. Polymer modification of portland cement systems. **Chemical Technology**, Feb, 1973, p. 105-108.

De acordo com Ramachandran (1984, p. 411), o uso de polímeros solúveis à água em argamassas à base de cimento apresentaram aumento na retenção de água, na adesão inicial e na absorção de água. No que se refere às propriedades mecânicas, as resistências à flexão e à compressão sofreram reduções. Em relação à penetração de água, esta reduz com o aumento do teor de aditivo à base de metil celulose. Isso se deve ao fato de que estes polímeros causam expansão do material devido à absorção de água e selam os poros capilares, reduzindo assim a permeabilidade.

Estudos realizados em argamassas por Hucko (2003, p. 11), resultaram na redução de fissuras no revestimento com aditivo retentor de água à base de éteres de celulose, quando aplicadas em locais com altas temperaturas.

Entretanto, estudos realizados por Brea (2003, p. 493) na avaliação da taxa de hidratação do cimento Portland CP II F 40 com adição de éteres de celulose mostraram atraso na hidratação do aglomerante. Isto se torna um efeito adverso para o desenvolvimento da resistência de aderência, pois permite maior perda de água do material para o substrato, reduzindo assim a quantidade de água disponível necessária para a hidratação apropriada do cimento. Desta forma, torna-se necessário observar a interação entre os éteres de celulose e o cimento Portland utilizado.

### 3.5 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO

As argamassas de reboco de recuperação devem apresentar algumas propriedades especiais, tanto no estado fresco quanto endurecido, de maneira a proporcionar um bom desempenho frente às solicitações que serão impostas à mesma durante e após a sua aplicação. Segundo Arendt (1995, p. 13), as propriedades principais das argamassas de recuperação são de reter a água em forma líquida, assim como também os sais, mas ao mesmo tempo permitir, por sua grande permeabilidade ao vapor de água, uma secagem eficiente. Desta forma, estes materiais devem ser estanques como as argamassas de cimento e permeáveis ao vapor de água como as argamassas de cal.

#### 3.5.1 Principais Propriedades das Argamassas no Estado Fresco

As principais propriedades que as argamassas de recuperação devem apresentar no estado fresco são: trabalhabilidade, consistência e plasticidade, massa específica aparente, teor de ar incorporado e retenção de água.

### 3.5.1.1 Trabalhabilidade

Segundo a ASTM C 270 (1997, p. 140), a trabalhabilidade é a característica mais importante da argamassa fresca, e se constitui da combinação de diversas propriedades, como plasticidade, consistência, coesão e adesão inicial. Esta propriedade é o resultado do efeito de rolamento das partículas de agregado envolvidas pela pasta de cimento.

Cincotto, Silva e Carasek (1995, p. 22) definem a trabalhabilidade como a facilidade de manuseio por parte do operário que a prepara e aplica, sendo esta dependente do julgamento subjetivo do operário.

A trabalhabilidade das argamassas de recuperação na Alemanha é determinada a partir do índice de consistência, fazendo-se duas medidas, uma logo após a preparação da argamassa e a outra após 15 minutos da primeira medida. De acordo com a WTA 2-2-91 (ARENDRT, 1995, p. 28), uma argamassa possui trabalhabilidade adequada se a diferença entre as duas determinações for inferior a 3 cm.

### 3.5.1.2 Consistência e plasticidade

A propriedade pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas é chamada de consistência. A DIN 18 555 parte 2 (1982) define consistência como a medida de deformação da argamassa fresca quando esta é sujeita a certos tipos de esforços. A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo esta influenciada pelas relações água/aglomerante, aglomerante/areia, pela composição granulométrica da areia e qualidade do aglomerante (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 20).

A plasticidade de um sistema é a expressão da possibilidade de uma pequena força externa causar o deslocamento de partículas em relação às outras, sem saírem de suas esferas de atração (GUIMARÃES, 2002, p.263). No caso das argamassas, a plasticidade é definida como a característica que as tornam deslizantes e de fácil espalhamento, sem separação da água ou segregação do material sólido da mistura. Segundo Cincotto, Silva e Carasek (1995, p.23), a plasticidade é a propriedade pela qual a argamassa tende a reter a deformação, após a redução do esforço de deformação. Esta propriedade é influenciada pelo teor de ar, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade de mistura das argamassas.

A NBR 13276 (ABNT, 1995) preconiza o método de ensaio para a determinação da trabalhabilidade das argamassas através do uso da mesa de consistência. Sousa e Bauer (2003, p. 263) colocam que esta propriedade também pode ser avaliada através do ensaio *Vane Test*, que determina a tensão de cisalhamento das argamassas. Segundo estes autores, a avaliação isolada destes ensaios é insuficiente para caracterizar a trabalhabilidade das

argamassas de revestimento. Desta forma, os autores afirmam que esta propriedade pode ser melhor avaliada quando relaciona-se os parâmetros índice de consistência (mesa de consistência) e tensão de cisalhamento (*Vane Test*).

### 3.5.1.3 Massa específica aparente e teor de ar incorporado

A massa específica se refere à relação entre a massa da argamassa e o seu volume e pode ser absoluta ou relativa (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998, p. 2). Para a determinação da massa específica absoluta, os vazios existentes no volume de argamassa não são considerados. Entretanto, na massa específica relativa, também conhecida como unitária, consideram-se os vazios.

A massa específica aparente das argamassas, segundo a NBR 13278 (ABNT, 1995) e a DIN 18 555 parte 2 (1982), é determinada pelo quociente entre a massa e o volume ocupado pelo material quando este é introduzido, ou introduzido e compactado, em um recipiente mensurável de uma dada capacidade de maneira particular. Esta propriedade é determinada através do preenchimento, de forma padronizada, de um recipiente cilíndrico rígido, de volume e massa conhecidos, com argamassa. Após adensamento e nivelamento da superfície da argamassa, bem como limpeza externa do recipiente, é determinada a massa do conjunto. A massa específica aparente da argamassa é expressa através da equação 2 (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 70):

$$g = \frac{Mma - Mm}{Vm} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

ã: massa específica da argamassa, em g/dm<sup>3</sup>;

Mma: massa do molde da argamassa, em g;

Mm: massa do molde vazio, em g;

Vm: volume do molde, em dm<sup>3</sup>.

Os procedimentos de ensaio utilizados para a determinação da massa específica aparente, tanto da norma NBR 13278 (ABNT, 1995) como da DIN 18 555 parte 2 (1982), são semelhantes, sendo que as variações existentes apenas se referem ao volume do recipiente e ao método de adensamento utilizado.

Os vazios presentes nas argamassas são decorrentes do ar aprisionado ou incorporado, ou ainda de espaços deixados após evaporação do excesso de água. Além disso, o volume de vazios das argamassas depende da distribuição granulométrica das partículas mais finas presentes na mistura (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 27).

Segundo a DIN 18 555 parte 2 (1982), o teor de ar incorporado é o volume de ar presente na argamassa no estado fresco. À medida que cresce o teor de ar, a massa específica relativa da argamassa diminui (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998, p. 2). Segundo estes autores, uma argamassa com maior teor de ar incorporado e menor massa específica apresenta melhor trabalhabilidade.

O teor de ar incorporado pode ser obtido pelo método gravimétrico ou pressiométrico. O primeiro relaciona a massa específica da argamassa fresca contendo ar com a massa específica teórica da argamassa fresca sem ar. Este método é apresentado pelas normas BS 4551 (1980) e a NBR 13278 (ABNT, 1995).

O método pressiométrico (manométrico) baseia-se na lei de Boyle para a determinação do teor de ar e é calculada através relação da pressão e do volume, em uma dada temperatura. Neste procedimento, utiliza-se um medidor constituído por uma campânula de medida e um sistema de vedação (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 7). As normas DIN 18 555, parte 2 (1982) e ASTM C 780 (1998) prescrevem este método para argamassas.

#### 3.5.1.4 Retenção de água

Segundo Cincotto, Silva e Carasek (1995, p. 24), a retenção de água das argamassas é a capacidade que o material tem, no estado fresco, de manter sua consistência e trabalhabilidade quando sujeito a solicitações que provocam perda de água, como evaporação, sucção ou absorção pelo substrato. A ASTM C 270 (1998, p. 141) define esta propriedade como a medida de habilidade da argamassa sob sucção de reter a água da mistura, sendo que a mesma é melhorada através do aumento do teor de cal ou ar incorporado, da adição de areia fina com composição granulométrica admissível ou do uso de aditivos retentores de água.

Diversas normas podem ser utilizadas para a determinação desta propriedade, como a norma brasileira NBR 13277 (ABNT, 1995), a alemã DIN 18555 parte 7 (1987) e a britânica BS 4551 (1980). Estes ensaios consistem na medição da massa de água retida pela argamassa, após sucção realizada através do uso de discos de papel, empilhados e pressionados durante um determinado período de tempo. A gramatura e o número de discos de papel necessários para este ensaio variam de acordo com a norma utilizada. A retenção de água das

argamassas também pode ser determinada através da utilização do funil de Buchner modificado, conforme especificações da NBR 9287 (ABNT, 1986).

Esta propriedade determina as condições de manuseio, como o tempo disponível para aplicação, regularização e desempenamento da argamassa. Além disso, a retenção de água é a propriedade que influi diretamente nas características das argamassas tanto no estado fresco como endurecido. Ela é responsável pelo grau de hidratação do cimento e pela carbonatação da cal que são responsáveis pelo processo de endurecimento das argamassas.

### 3.5.2 Principais Propriedades das Argamassas no Estado Endurecido

As propriedades das argamassas de recuperação que serão discutidas a seguir referem-se ao estado endurecido do material, sendo estas a massa específica, massa aparente, resistência mecânica, permeabilidade ao vapor e à água e porosidade.

#### 3.5.2.1 Massa específica, massa aparente e resistência mecânica.

A determinação da massa específica de corpos-de-prova de argamassa pode ser determinada pelo princípio do deslocamento de água, medido através de balança hidrostática. Tanto a massa específica saturada como a massa específica seca das argamassas pode ser determinada pela NBR 9778 (ABNT, 1987), sendo que este princípio se baseia na determinação da diferença de massa.

A massa aparente das argamassas no estado endurecido é a relação entre a massa e o volume da amostra do material. Esta propriedade é um indicativo da compactidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto (NAKAKURA, 2003, p. 29). Os procedimentos que podem ser utilizados para a determinação desta propriedade são especificados pela NBR 13280 (ABNT, 1995).

A resistência mecânica das argamassas se refere à capacidade das mesmas de resistirem às tensões de tração, compressão ou cisalhamento às quais o revestimento pode estar sujeito. O módulo de deformação das argamassas, condiciona o comportamento do revestimento quando sujeito a solicitações devido a cargas estáticas ou dinâmicas decorrentes do tipo de uso da edificação, ou de solicitações devidas a movimentações higroscópicas ou térmicas tanto do revestimento como na base. Quando estas propriedades não são suficientes, ocorre o surgimento de fissuras e a desagregação do material, comprometendo a durabilidade do revestimento (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 30).

A resistência à compressão das argamassas pode ser determinada através da NBR 13279 (ABNT, 1995), em corpos-de-prova cilíndricos, ou pela DIN 18555, parte 3 (1982), em corpos-de-prova prismáticos. A norma NBR 7222 (ABNT, 1994) apresenta o ensaio de resistência à tração por compressão diametral em corpos-de-prova cilíndricos. A norma alemã DIN 18555, parte 3 (1982) apresenta o método para a determinação da resistência à tração por flexão, com carga centrada, em corpos-de-prova prismáticos.

Os ensaios em corpos-de-prova prismáticos de (4x4x16) cm tendem a apresentar melhor relação com a argamassa aplicada devido à espessura da amostra, que é próxima da espessura do revestimento. Nakakura (2003, p. 79) apresenta como vantagem da utilização de corpos-de-prova prismáticos o fato de se obter dois resultados em um único ensaio, resistência à tração na flexão e resistência à compressão, pois ao realizar a ruptura à tração por flexão na seção transversal central do corpo-de-prova prismático, obtém-se duas amostras que posteriormente serão ensaiadas à compressão.

A relação entre a resistência à compressão e à tração diminui com o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas. Isto se deve ao fato de que a influência negativa da presença de ar é maior na resistência à compressão que na resistência à tração (NEVILLE, 1997, p. 316). Segundo a WTA 2-2-91 (ARENDRT, 1995, p. 25), a relação entre as resistências à compressão e à tração por flexão deve ser inferior a 3 unidades.

### 3.5.2.2 Permeabilidade e porosidade

A permeabilidade é a propriedade que caracteriza a passagem de água através da argamassa endurecida por meio de infiltração sob pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 38).

O termo permeabilidade, segundo Ramachandran (1984, p. 297), se refere à resistência que um material poroso tem ao fluxo de um líquido que satura seus poros. A granulometria do agregado, bem como a natureza e o teor de aglomerante são fatores que influenciam a permeabilidade das argamassas, sendo que esta propriedade é diretamente proporcional à relação água/aglomerante e inversamente proporcional à resistência da pasta aglomerante (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995, p. 38).

A absorção de água por capilaridade é definida como a quantidade total de água absorvida por um material poroso, por  $m^2$ , durante um determinado período. A determinação desta propriedade pode ser realizada por ensaios prescritos pelas normas NBR 9779 (ABNT, 1995) e DIN 52617 (1987). Em estudo realizado por Wijffels e van Hees (2003, p. 5) foi avaliado o efeito de substratos absorventes e não absorventes sobre a absorção capilar de

água em argamassas de recuperação. Estes ensaios demonstraram que uma quantidade de água é inicialmente absorvida da argamassa pelo substrato, diminuindo assim a porosidade e a absorção de água por capilaridade da amostra. Desta forma, os ensaios normalizados ou as recomendações que prescrevem a preparação das amostras em moldes impermeáveis não consideram este efeito no material a ser ensaiado, havendo, portanto, a necessidade de reconsiderações relativas aos métodos de ensaio.

Em edificações antigas, o mecanismo de absorção de água mais comum é a absorção de água por capilaridade. Assim, em locais onde o lençol freático é alto, frequentemente as edificações apresentam umidade ascensional.

A determinação da permeabilidade das argamassas por meio de infiltração sob pressão pode ser realizada de acordo com as prescrições da RILEM MR-10 (1982). Este ensaio consiste em forçar a penetração de água, sob pressão, através de um corpo-de-prova de argamassa e controlar a velocidade de percolação da água.

Argamassas com porosidade elevada, onde há interligação entre os poros, haverá contribuição para o deslocamento de fluidos, de modo a aumentar a permeabilidade do material. Entretanto, se os capilares forem descontínuos, a permeabilidade será baixa, mesmo em materiais com alta porosidade (NAKAKURA, 2003, p. 29).

A difusão de vapor de água é uma propriedade muito importante para as argamassas de recuperação, pois o fluxo de umidade através das paredes de edificações antigas deve ser intenso. Se este fluxo é impedido por alguma barreira, o vapor de água irá se condensar no interior do material e provocar danos. O processo de difusão dos materiais é determinado pelo coeficiente de resistência à difusão do material. Este parâmetro é uma constante que expressa o fator onde o fluxo de vapor de água em um material poroso é impedido quando comparado com uma camada imóvel de ar de mesma espessura (AL-SAAD; ABEL-HALIM, 2001, p. 929). A norma DIN 52615 (1987) prescreve o ensaio para a determinação da permeabilidade ao vapor de água de materiais de construção e de materiais isolantes pelo método seco ou úmido, dependendo do sentido fluxo de umidade no material.

A absorção de água por imersão total é basicamente governada pela porosidade da argamassa (AL-SAAD; ABEL-HALIM, 2001, p. 929). A NBR 9778 (ABNT, 1987) apresenta o ensaio para a determinação do índice de vazios das argamassas, sendo este a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total, em percentagem.

A porosidade, segundo Neville (1997, p. 285), é definida como o volume total dos poros maiores que os poros de gel, dada em porcentagem em relação ao volume total da pasta de

cimento hidratado. Esta propriedade influencia a resistência da pasta, sendo que para uma mesma porosidade, poros menores resultam em resistências maiores da pasta.

Dentre as propriedades que as argamassas para reboco de recuperação devem apresentar, tem-se o teor de ar incorporado e a porosidade aparente como as principais responsáveis para garantir poros em quantidade e volume suficientes no interior do material para que o processo de cristalização/ dissolução dos sais não cause degradação do revestimento. No que se refere ao transporte de umidade e sais, tem-se a permeabilidade como principal propriedade do material. As argamassas para reboco de recuperação devem apresentar alta absorção de água por capilaridade (alta permeabilidade), alta resistência aos sais (baixa permeabilidade) e pequena altura de penetração de água (baixa permeabilidade).

## 4 ESTUDO EXPERIMENTAL DE ARGAMASSAS PARA REBOCOS DE RECUPERAÇÃO

Com base na análise dos resultados obtidos nos ensaios preliminares (apêndice A), bem como em visitas a indústrias alemãs produtoras de argamassa de recuperação e em estudos realizados tanto no Brasil (NAPPI, 2002; DIAS,CUNHA e FERRARI, 2000) como na Alemanha (FRÖSSEL, 2001, p. 316), escolheram-se as seguintes variáveis controladas a serem analisadas:

- a) proporções de materiais, em massa, variando entre 1:0,1:3,85 e 1:1,1:7,35, sendo que a relação aglomerante/agregado foi fixada em 1:3,5; este intervalo abrange as proporções indicadas por Frössel (2001, p. 316) e utilizadas pelas indústrias alemãs;
- b) teores de aditivo incorporador de ar entre 0,3 e 1,0% , em massa, em relação à massa do cimento, sendo que este intervalo compreende o teor utilizado pelas indústrias alemãs de argamassas de reboco de recuperação;
- c) teores de aditivo hidrofugante entre 0,4 e 1,2%, em massa, em relação à massa do cimento, abrangendo assim os teores utilizados nas indústrias alemãs de argamassas de reboco de recuperação;
- d) teores de aditivo retentor de água entre 0,4 e 1,2%, em massa, em relação à massa do cimento, compreendendo assim os teores utilizados pelas indústrias alemãs de argamassas de reboco de recuperação.

### 4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O cimento Portland adotado foi o CP IV-32, pozolânico, proveniente da região da grande Porto Alegre, cuja massa específica é igual a  $2,69 \text{ kg/dm}^3$  (NBR NM 23, ABNT, 2001) e massa unitária igual a  $0,76 \text{ kg/dm}^3$  (NBR 7251, ABNT, 1986). As análises químicas, físicas e mecânicas estão apresentadas na tabela 12.

Utilizou-se cal hidratada tipo III, dolomítica, proveniente do estado do Paraná. Os valores da massa específica (NBR NM 23, ABNT, 2001) e massa unitária (NBR 7251, ABNT,

1986) são de 2,29 kg/dm<sup>3</sup> e 0,65 kg/dm<sup>3</sup>, respectivamente. As análises químicas e físicas deste material estão apresentadas na tabela 13.

Tabela 12: análises químicas e físicas do cimento Portland pozolânico CP IV-32

| <b>Análise química</b>           | <b>Abreviação</b>              | <b>(%) em massa</b> |
|----------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Sílica                           | SiO <sub>2</sub>               | 36,51               |
| Óxido de cálcio                  | CaO                            | 34,07               |
| Alumina                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,80               |
| Óxido de magnésio                | MgO                            | 4,91                |
| Óxido de ferro                   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,42                |
| Trióxido de enxofre              | SO <sub>3</sub>                | 2,54                |
| Resíduo insolúvel                | RI                             | 40,33               |
| Perda ao fogo                    | PF                             | 3,57                |
| <b>Análise física</b>            | <b>unidade</b>                 |                     |
| peneira # 200 (0,075mm)          | %                              | 0,14                |
| peneira # 325 (0,045mm)          | %                              | 1,11                |
| Área específica – Blaine         | m <sup>2</sup> /kg             | 575,20              |
| Tempo de início de pega          | min                            | 166,95              |
| <b>Análise mecânica</b>          | <b>unidade</b>                 |                     |
| Resistência à compressão 3 dias  | MPa                            | 18,20               |
| Resistência à compressão 7 dias  | MPa                            | 22,54               |
| Resistência à compressão 28 dias | MPa                            | 34,67               |

Dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 13: análises químicas e físicas da cal hidratada CH III

| <b>Análise química</b>           | <b>Abreviação</b> | <b>(%) em massa</b> |
|----------------------------------|-------------------|---------------------|
| Perda ao fogo*                   | PF                | 27,40               |
| Resíduo insolúvel*               | RI                | 4,90                |
| Oxido de cálcio**                | CaO               | 36,00               |
| Óxido de magnésio**              | MgO               | 61,70               |
| Óxidos totais**                  | CaO + MgO         | 97,70               |
| Sílica**                         | SiO <sub>2</sub>  | 1,75                |
| Anidrido carbônico*              | CO <sub>2</sub>   | 6,60                |
| Total de óxidos não hidratados** |                   | 2,30                |
| <b>Análise física</b>            |                   |                     |
| Peneira # 30*                    | 0,600 mm          | 0                   |
| Peneira # 200*                   | 0,075 mm          | 13,10               |

\*Resultados fornecidos pelo fabricante

\*\*Ensaio realizado no LACER/ UFRGS.

O agregado miúdo foi composto por 94% de areia quartzosa e 6% de agregado leve, em massa, baseado em estudos realizados por Nappi (2002, p. 73). A areia quartzosa é proveniente da região de Porto Alegre e suas características estão descritas na tabela 14.

O agregado leve utilizado foi a vermiculita expandida, conhecida comercialmente como “tipo fina”, por apresentar composição granulométrica similar à da areia quartzosa. Este agregado leve formado através da expansão de mica, provém do estado do Rio Grande do Sul e suas características estão apresentadas na tabela 14.

O aditivo hidrofugante utilizado foi o estearato de zinco extraleve, proveniente do mercado nacional. A escolha deste aditivo baseou-se nos estudos realizados por Bianchin (1999). Sua fórmula química é  $Zn(C_{18}H_{35}O_2)_2$ . A tabela 15 apresenta as características deste aditivo.

Tabela 14: características dos agregados

| Método de Ensaio       | Peneira – abertura das malhas (mm)     | Areia quartzosa              | Vermiculita |
|------------------------|--|------------------------------|-------------|
|                        |  | Porcentagem retida acumulada |             |
| NBR NM248 (ABNT, 2003) | 4,8                                    | 0                            | 0           |
|                        | 2,4                                    | 0                            | 16          |
|                        | 1,2                                    | 25                           | 78          |
|                        | 0,6                                    | 50                           | 93          |
|                        | 0,3                                    | 75                           | 97          |
|                        | 0,15                                   | 100                          | 100         |
|                        | Dimensão máx. caract. (mm)             | 2,4                          | 4,8         |
| Módulo de finura       | 2,50                                   | 3,82                         |             |
| NBR 7251 (ABNT, 1982)  | Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )   | 1,57                         | 0,13        |
| NBR 9776 (ABNT, 1987)  | Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,62                         | 0,36        |

Tabela 15: características do aditivo hidrofugante

| Característica   | Resultado                   |
|--|-----------------------------|
| Cinzas   | de 12 à 15%                 |
| Retenção # 400 Mesh  | <1,0%                       |
| Ponto de fusão   | 120 –130 °C                 |
| Umidade  | <1,0%                       |
| Massa unitária   | 0,1 – 0,4 g/cm <sup>3</sup> |
| Aspecto: pó branco, não inflamável, não perecível, não tóxico. |                             |

Dados fornecidos pelo fabricante.

Com o objetivo de selecionar um aditivo incorporador de ar que apresentasse maior constância do teor de ar incorporado ao longo do tempo, optou-se por realizar ensaios com três diferentes produtos comerciais (A,B e C) encontrados no mercado nacional. Este estudo foi baseado no método apresentado por Bianchin (1999, p. 65). Para cada produto foi preparada uma argamassa na proporção 1:2:9 (cimento:cal:areia), em volume, com adição de 0,75% de aditivo incorporador de ar e 1,5% de aditivo hidrofugante, em relação à massa de cimento. A consistência (NBR 13276, ABNT, 2002), a densidade de massa (NBR 13278, ABNT, 1995) e o teor de ar incorporado (NBR 13278, ABNT, 1995) das argamassas foram determinados imediatamente após a mistura (T0), bem como após períodos de repouso de 15 minutos (T15) e 30 minutos (T30). De acordo com os resultados (tabela 16), percebe-se que o aditivo A manteve o teor de ar incorporado praticamente constante nos primeiros 15 minutos, sendo que este apresentou redução de até 12% nos últimos 15 minutos. O aditivo B manteve constante o teor de ar incorporado durante os 30 minutos de ensaio. Em relação ao aditivo C, este apresentou redução de aproximadamente 23% no teor de ar incorporado após os primeiros 15 minutos, mantendo-se constante nos últimos 15 minutos. Desta forma, optou-se pela seleção do aditivo B. O aditivo selecionado é à base de resina vegetal saponificada, sem cloretos, e possui massa específica de 1,02 kg/dm<sup>3</sup> à 25°C.

Tabela 16: ensaios realizados para a escolha do aditivo incorporador de ar

| Aditivo | Consistência (cm) |      |      | Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      | Teor de ar incorporado (%) |     |     |
|---------|-------------------|------|------|---------------------------------------|------|------|----------------------------|-----|-----|
|         | T0                | T15  | T30  | T0                                    | T15  | T30  | T0                         | T15 | T30 |
| A       | 24,0              | 25,3 | 26,0 | 1,64                                  | 1,62 | 1,70 | 24                         | 25  | 22  |
| B       | 25,0              | 25,2 | 24,8 | 1,57                                  | 1,60 | 1,59 | 27                         | 26  | 27  |
| C       | 21,0              | 22,0 | 22,0 | 1,88                                  | 1,94 | 1,92 | 13                         | 10  | 11  |

Além dos aditivos incorporador de ar e hidrofugante, foi utilizado também um aditivo retentor de água à base de polímeros solúveis à água derivados de éteres de celulose. Este aditivo é indicado para ser utilizado em argamassas que serão aplicadas em substratos extremamente absorventes, pois possui a propriedade de alta retenção de água, bem como incorpora ar na argamassa, melhorando sua trabalhabilidade. Segundo especificações fornecidas pelo fabricante, este aditivo possui viscosidade típica (Bookfield RVT, 20 rpm, 2% em água) de 39.000 mPa.s, e se apresenta na forma de pó fino e granulometria fina.

## 4.2 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO E PROJETO ESTATÍSTICO UTILIZADO

O planejamento estatístico de experimentos permite a definição de uma seqüência de ensaios de maneira econômica e eficiente. Além disso, este procedimento facilita a realização de uma avaliação que assegura o respaldo científico e maximiza as informações obtidas.

As propriedades medidas neste estudo foram analisadas de acordo com a variação dos níveis dos fatores controláveis, tais como a relação entre os aglomerantes (cal hidratada e cimento) e três aditivos. Devido ao grande número de fatores, optou-se por planejar estes experimentos através da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). Este método envolve técnicas orientadas à análise de experimentos planejados de modo a gerar informações suficientes para a modelagem de respostas de interesses através de superfícies n-dimensionais (RIBEIRO; TEN CATEN, 2001, p. 111).

Dentro da MSR foi utilizado um projeto para o ajuste das superfícies de resposta dos fatores controláveis para modelos quadráticos chamado de Projeto Composto de Segunda Ordem (PCSO). Este projeto exige um número pequeno de ensaios, além de detectar possíveis mudanças de concavidade no desenvolvimento das regressões.

O PCSO é composto pela soma do experimento  $2^K$ , uma estrela e dois pontos centrais, sendo K o número de graus de liberdade, ou níveis de cada fator estudado. Neste estudo foram avaliados três níveis para cada fator. Os pontos da parte fatorial do experimento ( $2^K$ )

permitem a estimativa de termos lineares e interações, sendo que os pontos da estrela são utilizados para avaliar os efeitos quadráticos puros e os pontos centrais permitem uma avaliação mais precisa da variância experimental. Desta forma, a parte fatorial deste projeto compreende 26 diferentes combinações, conforme mostra a tabela 17.

Tabela 17: proporcionamento das argamassas definido pelo projeto estatístico

| Código nº | Proporção de materiais (em massa) |               |                | Teor de aditivo (%)* |              |                  | Localização dos pontos |
|-----------|-----------------------------------|---------------|----------------|----------------------|--------------|------------------|------------------------|
|           | Cimento                           | Cal hidratada | Agregado miúdo | Incorporador de ar   | Hidrofugante | Retentor de água |                        |
| 1         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,43                 | 0,53         | 0,53             | CUBO                   |
| 2         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,43                 | 0,53         | 1,07             |                        |
| 3         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,43                 | 1,07         | 0,53             |                        |
| 4         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,43                 | 1,07         | 1,07             |                        |
| 5         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,85                 | 0,53         | 0,53             |                        |
| 6         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,85                 | 0,53         | 1,07             |                        |
| 7         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,85                 | 1,07         | 0,53             |                        |
| 8         | 1,00                              | 0,27          | 4,43           | 0,85                 | 1,07         | 1,07             |                        |
| 9         | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,43                 | 0,53         | 0,53             |                        |
| 10        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,43                 | 0,53         | 1,07             |                        |
| 11        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,43                 | 1,07         | 0,53             |                        |
| 12        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,43                 | 1,07         | 1,07             |                        |
| 13        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,85                 | 0,53         | 0,53             |                        |
| 14        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,85                 | 0,53         | 1,07             |                        |
| 15        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,85                 | 1,07         | 0,53             |                        |
| 16        | 1,00                              | 0,93          | 6,77           | 0,85                 | 1,07         | 1,07             |                        |
| 17        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 0,80         | 0,80             | CENTRAL                |
| 18        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 0,80         | 0,80             |                        |
| 19        | 1,00                              | 0,10          | 3,85           | 0,64                 | 0,80         | 0,80             | ESTRELA                |
| 20        | 1,00                              | 1,10          | 7,35           | 0,64                 | 0,80         | 0,80             |                        |
| 21        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,32                 | 0,80         | 0,80             |                        |
| 22        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,95                 | 0,80         | 0,80             |                        |
| 23        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 0,40         | 0,80             |                        |
| 24        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 1,20         | 0,80             |                        |
| 25        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 0,80         | 0,40             |                        |
| 26        | 1,00                              | 0,60          | 5,60           | 0,64                 | 0,80         | 1,20             |                        |

\* em relação à massa de cimento.

Com o objetivo de diminuir a influência das variáveis de ruído como temperatura ambiente, umidade, operador, entre outros, foi definido pelo projeto estatístico que seriam necessárias três repetições de cada proporção de material. A confecção das argamassas foi dividida em três blocos distintos, sendo que cada bloco forneceu uma variável de resposta para cada experimento. Além disso, a seqüência da execução dos ensaios foi aleatorizada e dividida em duas etapas, para serem realizadas em dois dias distintos, em cada bloco. Desta forma, foram necessários seis dias para a realização dos ensaios em argamassa fresca e seis dias para a moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios em argamassa endurecida.

Quatro variáveis de resposta foram estudadas para as argamassas no estado fresco: trabalhabilidade, teor de ar incorporado, retenção de água e massa específica. No estado endurecido foram analisadas dez propriedades: massa específica, absorção total de água, porosidade aparente, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção capilar de água, profundidade de penetração de água, resistência aos sais e coeficiente de resistência à difusão de vapor. Se o projeto fosse realizado de forma completa, analisando-se três níveis de cada um dos quatro fatores, seriam necessários 1.215 corpos-de-prova para fornecer três determinações para cada variável de resposta. Adotando-se a técnica do PCSO, este número foi reduzido para 390 amostras.

Após a realização dos experimentos, foi utilizado o método de modelagem baseado na Regressão Múltipla, com o objetivo de gerar modelos para as variáveis de resposta. Esta regressão estima uma equação matemática, ou modelo, que dado o valor de X (variável independente), prevê o valor de Y (variável dependente). Além disso, é dado o valor de  $R^2$ , coeficiente de determinação para o modelo, que indica quanto próximo o modelo encontrado se ajusta aos dados obtidos. Este valor varia entre 0,0 e 1,0, sendo que valores próximo de 1,0 indicam que foram consideradas quase a totalidade das variabilidades especificadas no modelo.

#### 4.3 MÉTODOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Foram utilizados métodos baseados em normas nacionais e alemãs vigentes, bem como alguns procedimentos não normalizados propostos para o estudo de argamassas de recuperação, que estão apresentados na tabela 18. Apesar do Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995), prescrever apenas normas alemãs para determinar as propriedades das argamassas de recuperação, foi necessário valer-se de ensaios baseados em normas nacionais devido à ausência de materiais e/ou equipamentos específicos.

Tabela 18: ensaios utilizados para a determinação das propriedades das argamassas de recuperação

| Propriedade  | Método utilizado          |
|--|---------------------------|
| <b>Estado Fresco</b>   |                           |
| Consistência   | DIN 18555 – P2 (1982)     |
| Trabalhabilidade   | WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995) |
| Retenção de água   | NBR 13277 (ABNT,1995)     |
| Teor de ar incorporado e Massa específica  | NBR 13278 (ABNT,1995)     |
| <b>Estado Endurecido</b>   |                           |
| Massa específica, Absorção total de água e Porosidade aparente (índice de vazios)                | NBR 9778 (ABNT,1987)      |
| Massa unitária, Resistência à Compressão ( $f_c$ ) e Resistência à tração na flexão ( $f_{tc}$ ) | DIN 18555 P3 (1982)       |
| Absorção capilar de água   | DIN 52617 (1987)          |
| Profundidade de penetração de água   |                           |
| Resistência aos sais   | WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995) |
| Coefficiente de resistência à difusão de vapor   | DIN 52615 (1987)          |

#### 4.3.1 Confecção das Argamassas

As argamassas foram produzidas em argamassadeira com capacidade nominal de 5 dm<sup>3</sup>, de acordo com a DIN EN196 parte 1 (1989). A metodologia utilizada baseia-se nas prescrições apresentadas pelo Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995), sendo que algumas alterações foram adotadas com o objetivo de permitir uma melhor homogeneização do material. Os procedimentos adotados, bem como suas alterações, estão abaixo descritos:

- a) colocação de parte da água, da pasta de cal e do aditivo incorporador de ar, previamente dissolvido em água;
- b) mistura em velocidade baixa por 15 segundos, adicionando-se os materiais secos previamente misturados;
- c) mistura em velocidade baixa por 60 segundos; o tempo de mistura prescrito é de 30 segundos;
- d) repouso da argamassa por 90 segundos, sendo prescrito o período de 120 segundos;
- e) nova mistura em velocidade baixa por 15 segundos.

Esse método mostrou-se mais eficiente na mistura das argamassas, pois permitiu a melhor dispersão dos aditivos e homogeneização do material, devido ao aumento do período de mistura. Assim como durante os ensaios preliminares, a pasta de cal foi composta por 50%

de água e 50% de cal em pó, e permaneceu em repouso, em recipiente vedado, por um período de 3 a 4 dias. Durante este período, a pasta de cal foi homogeneizada diariamente.

#### 4.3.2 Ensaios com Argamassa no Estado Fresco

O ensaio para a determinação do índice de consistência e a trabalhabilidade das argamassas foi realizado de acordo com a norma alemã DIN 18555, parte 2, capítulo 3 (1982). Este ensaio foi realizado logo após a preparação da argamassa. O molde tronco-cônico e o tampo da mesa de consistência foram previamente umedecidos. O preenchimento do molde, centralizado sobre o tampo da mesa de consistência, foi realizado em duas camadas sendo que cada uma adensada através de 10 golpes com o uso de soquete. O excesso de argamassa foi removido bem como eliminada qualquer partícula de material que se encontrava em volta do molde. Após 30 segundos, o molde foi lentamente retirado verticalmente e aplicados 15 golpes em 15 segundos no tampo da mesa de consistência. Imediatamente após o último golpe foi medido o espalhamento da argamassa em duas direções ortogonais entre si (figura 12).



Figura 12: mesa utilizada para os ensaios de consistência e trabalhabilidade.

As argamassas com índice de consistência inferior a 17,5 cm, conforme prescrição da WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995), apresentaram-se muito secas. Sabe-se que na Alemanha, devido ao alto custo de mão-de-obra, a aplicação das argamassas de revestimento normalmente é realizada mecanicamente (argamassa projetada). No entanto, como no Brasil o processo de execução dos revestimentos em argamassa geralmente é realizado de forma manual, o uso de argamassas muito secas pode dificultar a resistência de aderência, pois, segundo Oliveira (2001, p. 70), a energia de projeção do operário é inferior à do equipamento. Desta forma, foram adotados para este estudo valores de consistência entre 17,5 e 19,5 cm.

Em seu estudo, Bianchin (1999, p. 71) determinou o índice de consistência das argamassas de acordo com a análise do pedreiro. Esta propriedade foi ensaiada em conformidade com a NBR 13276 (ABNT, 2002) e variou entre 23,0 e 25,0 cm. O método para a determinação do índice de consistência padrão ( $25,5\pm 1$ ) cm das argamassas segundo a NBR 13276 (ABNT, 2002) difere do método prescrito pela WTA 2-2-91, principalmente no que se refere ao número de golpes aplicados na mesa de compactação (30 golpes em 30 segundos). Desta forma, realizou-se um estudo comparativo entre os índices de consistência obtidos de acordo com os procedimentos de ensaio prescritos pelo Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.5) e pela NBR 13276 (ABNT, 2002). O objetivo deste estudo foi verificar a diferença dos índices de consistência obtidos pelas distintas normas. Nestes ensaios, foram utilizadas as argamassas nº 18, 19 e 20 (conforme tabela 17), sendo que os resultados, apresentados na tabela 19, se referem à média de duas determinações. Comparando-se os valores obtidos, pode-se perceber que houve um acréscimo de aproximadamente 24% no índice de consistência quando a argamassa foi ensaiada segundo a NBR 13276 (ABNT, 2002), em comparação com o valor obtido segundo o método prescrito pela WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.5). Isto se deve ao maior número de golpes aplicados na mesa de consistência durante o ensaio prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2002).

Tabela 19: comparação entre os métodos utilizados para a determinação da consistência

| Método utilizado       | Consistência (cm) |       |       |
|------------------------|-------------------|-------|-------|
|                        | Nº 18             | Nº 19 | Nº 20 |
| WTA 2-2-91 (1995, p.5) | 17,8              | 17,7  | 17,8  |
| NBR 13276 (ABNT, 1995) | 21,7              | 21,7  | 21,8  |

Considerando válida a comparação entre os métodos WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p. 5) e NBR 13276 (ABNT, 2002) descrita anteriormente, estima-se o índice de consistência das argamassas estudadas por Bianchin de acordo com o método WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995 p.5). Assim, pode-se avaliar que as argamassas ensaiadas segundo este método apresentam redução de aproximadamente 18% no índice de consistência quando comparadas com os valores obtidos com a utilização da norma nacional. Desta forma, se a determinação do índice de consistência das argamassas estudadas por Bianchin fosse realizada em conformidade com o método WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p. 5), os valores obtidos seriam de aproximadamente ( $19,6\pm 0,8$ ) cm.

Esta analogia demonstra que o índice de consistência ( $18,5\pm 1$ ) cm adotado nesta pesquisa está próximo aos valores considerados satisfatórios ( $19,6\pm 0,8$ ) cm do ponto de vista de aplicabilidade. Portanto, optou-se por utilizar limites de índice de consistência ligeiramente

superiores aos preconizados pela WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p. 5), com o objetivo de facilitar o manuseio e a aplicação do material pelo profissional, bem como valores inferiores aos utilizados por Bianchin (1999, p.71), pois estes podem influenciar negativamente os resultados dos demais ensaios devido a maior quantidade de água a ser utilizada nas argamassas.

O ensaio de trabalhabilidade foi realizado de acordo com a WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p.5), medindo-se o índice de consistência da argamassa após 15 minutos de repouso do material no molde tronco cônico. De acordo com a WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p. 25), o valor encontrado neste ensaio deve apresentar redução máxima de 3 cm do índice de consistência.

O ensaio de retenção de água preconizado para argamassas de recuperação WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995) é baseado na norma alemã DIN 18555, parte 7 (1987). Devido à não existência no mercado nacional de material específico exigido para esta determinação, como o papel filtro modelo nº 2727 e o não-tecido modelo nº 0980, ambos fornecidos pela empresa alemã Shleicher + Schüll GmbH, optou-se por realizar o ensaio de acordo com a NBR 13277 (ABNT, 1995). Assim como na norma alemã, o ensaio consiste em determinar a massa de água absorvida da argamassa por uma camada de papéis-filtro com 85 g/cm<sup>2</sup>, separada por gaze de tecido de algodão, tipo cirúrgica, de trama aberta.

A retenção de água é expressa em percentagem (%) e determinada através das equações 3 e 4.

$$R = \left[ 1 - \frac{(Mf - Mse)}{AF \times (Mma - Mm)} \right] \times 100 \quad (\text{equação 3})$$

$$AF = \frac{Mw}{M + Mw} \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

R: retenção de água (%);

AF: fator água/argamassa fresca;

Mw: massa total de água acrescentada à mistura, em g;

M: soma das massas dos componentes anidridos da argamassa, em g;

Mf: massa do conjunto de discos molhados, em g;

Mse: massa do conjunto de discos secos, em g;

Mma: massa do molde com argamassa, em g;

Mm: massa do molde vazio, em g.

A massa específica e o teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco foram determinados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987). Segundo a WTA 2-2-91 (ARENDRT, 1995), estas propriedades devem ser medidas em conformidade com as prescrições da norma alemã DIN 18555, parte 2, capítulos 4.3.2.2 e 5 (1982), respectivamente. Devido à falta do equipamento indicado pela norma (câmara de pressão com capacidade de 1 dm<sup>3</sup>), optou-se por realizar este teste de acordo com o ensaio normalizado brasileiro.

As fórmulas utilizadas para o cálculo da massa específica e teor de ar incorporado estão abaixo descritas (equações 5, 6 e 7).

$$A = \frac{M_c - M_v}{V_r} \quad (\text{equação 5})$$

$$AI = 100 \times \left( 1 - \frac{A}{B} \right) \quad (\text{equação 6})$$

$$B = \frac{\sum M_i}{\sum \tilde{a}_i} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

AI: teor de ar incorporado (%);

A: massa específica;

B: massa específica teórica, sem vazios;

Mc: massa do recipiente com argamassa, em g;

Mv: massa do recipiente vazio, em g;

Vr: volume do recipiente, em m<sup>3</sup>;

Mi: massa de cada componente da argamassa, inclusive da água;

ãi: massa específica de cada componente da argamassa, segundo a NBR 6474 (ABNT, 1984).

#### 4.3.3 Preparação e Armazenagem dos Corpos-de-prova

Para a realização dos ensaios em argamassa no estado endurecido foi necessária a moldagem de corpos-de-prova prismáticos (40 x 40 x 160) mm e cilíndricos (Ø 100mm;

altura de 20 mm). Devido às fôrmas utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, algumas amostras apresentaram alturas superiores a 20 mm.

O procedimento utilizado para a moldagem dos corpos-de-prova prismáticos chama-se método de choque e foi baseado na norma alemã DIN 18555, parte 3, capítulo 3.2.3 (1982), como preconiza o Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p. 6). O método iniciou-se com o preenchimento com argamassa até a metade da altura do molde prismático. Para o adensamento do material, o molde foi elevado alternadamente a uma altura de aproximadamente três centímetros, em cada lado, e o mesmo deixando cair livremente por dez vezes sobre um substrato rígido. Então, o molde foi preenchido até o topo e repetido o adensamento da mesma maneira. A argamassa em excesso foi removida com o uso de uma espátula metálica em movimentos curtos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície.

Para a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, procedeu-se o preenchimento do molde em duas camadas, sendo que cada uma foi adensada com quinze golpes com o uso de um soquete. Após, foram aplicados mais três golpes ao longo do molde cilíndrico. O excesso de argamassa foi removido com o auxílio de uma espátula metálica em curtos movimentos de vai-e-vem.

Na tabela 20 estão descritas as dimensões e formas dos corpos-de-prova utilizados para cada experimento.

Tabela 20: dimensões e formas dos corpos-de-prova

| <b>Ensaio</b>                                  | <b>Forma</b> | <b>Dimensões (mm)</b> |
|--|--------------|-----------------------|
| Absorção de água por imersão                   | Prismático   | 40x40x160             |
| Porosidade aparente (índice de vazios)         |              |                       |
| Massa específica                               | Prismático   | 40x40x160             |
| Resistência à compressão ( $f_c$ )             |              |                       |
| Resistência à tração na flexão ( $f_{tc}$ )    |              |                       |
| Absorção capilar de água                       | Cilíndricos  | 100x20                |
| Profundidade de penetração de água             |              |                       |
| Resistência aos sais                           | Cilíndricos  | 100x20                |
| Coefficiente de resistência à difusão de vapor | Cilíndricos  | 100x20                |

A desfôrma das amostras foi realizada no quarto dia após a moldagem. Os corpos-de-prova foram armazenados durante 7 dias em ambiente controlado com 20°C e 95% de UR, e em seguida permaneceram por 21 dias em ambiente 20°C e 65% de UR. Os ensaios com argamassa no estado endurecido foram realizados aos 28 dias.

### 4.3.4 Ensaio com Argamassa no Estado Endurecido

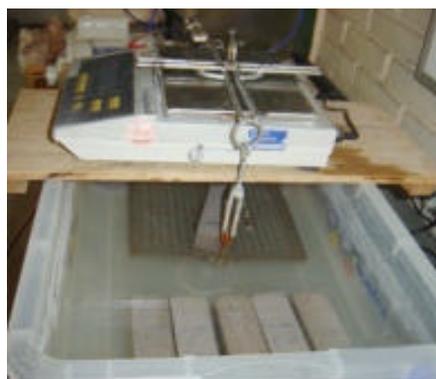
#### 4.3.4.1 Massa específica, absorção de água por imersão e porosidade aparente

O ensaio para a determinação da porosidade aparente das argamassas de recuperação, de acordo com a WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.6), deve ser realizado com o uso de um equipamento chamado “*Exsikkator*”. Devido à ausência deste aparato, fez-se uso da norma brasileira NBR 9778 (ABNT, 1987), que, além de determinar a porosidade aparente (índice de vazios) de argamassas, fornece também a massa específica e absorção de água por imersão e fervura do material.

O ensaio consiste em determinar a massa do material seco em estufa na temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 72 horas, ou até atingir constância de massa e resfriado em temperatura ambiente. Após, o mesmo foi imerso em água durante 72 horas, sendo que nas primeiras 4 horas a amostra foi mantida com apenas 1/3 de seu volume imerso (figura 13(a)). Nas 4 horas subsequentes, 2/3 da amostra foi mantida imersa sendo esta, então, completamente imersa durante as 64 horas restantes. A massa dos corpos-de-prova foi determinada durante 24h, 48h e 72h de imersão, com a superfície da amostra seca. Após ser completada a etapa de saturação, as amostras foram colocadas em um recipiente com água que, progressivamente, foi levado à fervura e permaneceu em ebulição durante um período de 5 horas. Então, os corpos-de-prova, depois de frios, foram pesados em balança comum e hidrostática (figura 13(b)).



(a)



(b)

Figura 13: corpos-de-prova (a) durante o início da imersão e (b) durante a determinação da massa em balança hidrostática após imersão e fervura

A massa específica, a absorção de água por imersão e a porosidade aparente (índice de vazios) foram determinadas através das equações 8, 9 e 10, respectivamente.

$$A = \frac{M_{sa} - M_{se}}{M_{se}} \times 100 \quad (\text{equação 8})$$

$$\tilde{a}_{se} = \frac{M_{se}}{M_{sa} - M_{se}} \quad (\text{equação 9})$$

$$Pap = \frac{M_{sa} - M_{se}}{M_{sa} - M_i} \times 100 \quad (\text{equação 10})$$

Onde:

A: absorção de água por imersão, em %;

$\tilde{a}_{se}$ : massa específica, em g/cm<sup>3</sup>;

Pap: porosidade aparente, em %;

Mse: massa do corpo de prova seco em estufa, em g;

Mi: massa do corpo-de-prova saturado e imerso em água, em g;

Msa: massa do corpo-de-prova saturado após fervura, em g.

Foram realizadas três determinações para cada proporção de materiais estudados após o período de 28 dias de cura.

#### 4.3.4.2 Resistência à tração na flexão, resistência à compressão e massa unitária

Estes ensaios foram determinados de acordo com a norma alemã DIN 18555 parte 3 (1982), conforme preconiza o Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995).

Para a determinação das resistências mecânicas, foi utilizada uma prensa hidráulica específica para ensaios com corpos-de-prova de argamassa, marca EMIC, modelo DL 20000 MF, capacidade 20 toneladas. A velocidade de carga utilizada para o ensaio de resistência à compressão foi de 0,25 MPa/s (NBR 7215, ABNT, 1996), e para o ensaio de resistência à tração na flexão, de 0,05 MPa/s (NBR 7222, ABNT, 1994). Para os ensaios de resistência à tração na flexão e compressão, foi necessário o uso de aparatos metálicos que permitissem a execução dos ensaios, conforme mostram as figuras 14(a) e 14(b), respectivamente.

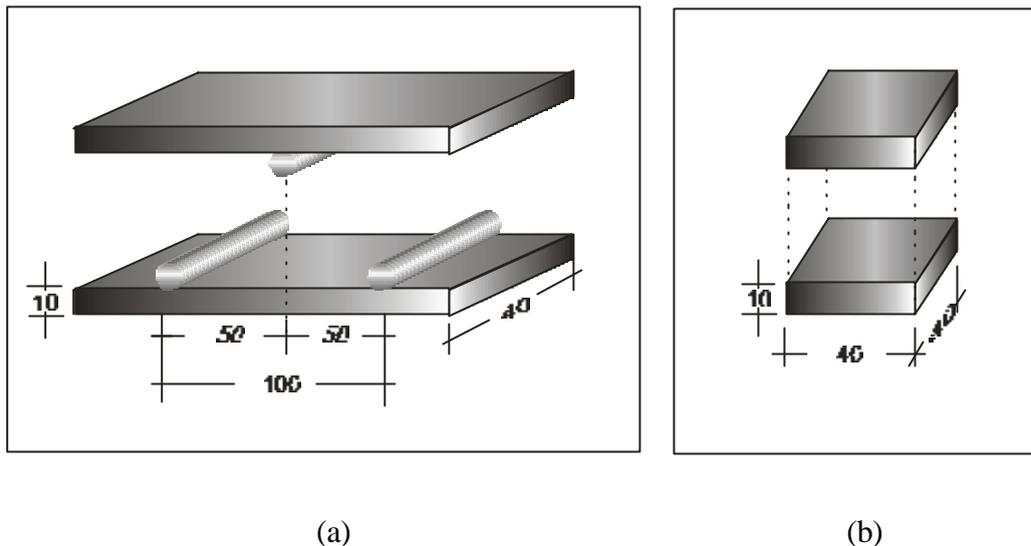


Figura 14: aparatos metálicos utilizados para os ensaios de (a) resistência à tração na flexão e (b) resistência à compressão, sendo as medidas em mm

As equações utilizadas para o cálculo das resistências mecânicas estão abaixo descritas (equações 11 e 12).

$$R_f = \frac{(1,5 \times F_f \times l)}{b^3} \quad (\text{equação 11})$$

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

Rf: resistência à tração na flexão, em MPa;

Ff: carga necessária para a ruptura à tração na flexão, em N;

l: distância entre os apoios (100 mm);

b: seção transversal do prisma, em mm;

Rc: resistência à compressão, em MPa;

Fc: carga necessária para a ruptura à compressão, em N.

A resistência à tração na flexão (figura 15(a) e 15(b)) foi determinada pela média aritmética de três valores, e a resistência à compressão (figura 16) foi determinada a partir das partes restantes dos corpos-de-prova anteriormente ensaiados à tração na flexão, resultando na média aritmética de seis valores individuais.

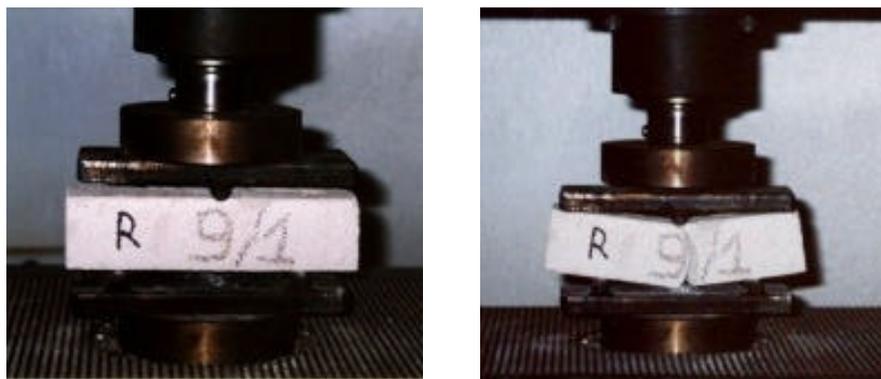


Figura 15: ensaio de resistência à tração na flexão (a) antes e (b) após a ruptura do corpo-de-prova.

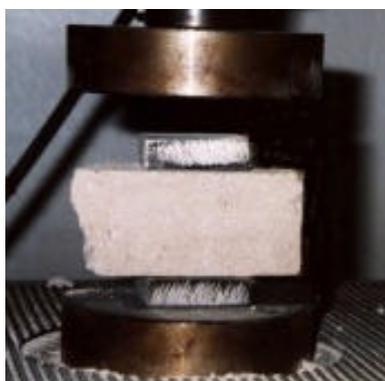


Figura 16: corpo-de-prova durante o ensaio de resistência à compressão

A determinação da massa unitária da argamassa foi realizada antes dos ensaios de resistência mecânica, após a armazenagem dos corpos-de-prova ao ar aos 28 dias. A massa unitária foi calculada pela equação 13.

$$D = \frac{m}{v} \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

D: Massa específica, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

m: massa da amostra, em kg;

v: volume da amostra, em  $\text{dm}^3$ .

#### 4.3.4.3 Absorção capilar e profundidade de penetração de água

A determinação destas propriedades foi realizada de acordo com as prescrições da WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.6), através da norma alemã DIN 52617 (1987), em corpos-de-

prova cilíndricos. A altura de penetração de água é medida após a realização deste ensaio, com o uso de paquímetro, através da ruptura da amostra em seu eixo central.

Os corpos-de-prova, após 28 dias de cura, foram secos em estufa à temperatura de 85°C até sua constância de massa. Após resfriamento, os mesmos foram impermeabilizados lateralmente com resina epóxi e novamente mantidos na estufa por mais 24h, sendo então determinada a sua massa. As amostras foram colocadas em contato com uma lâmina de água de aproximadamente 5 mm de altura, e medida a sua massa após 24 h (figura 17) em contato com a lâmina de água. O ensaio foi realizado em ambiente 20°C e 65% de UR. A absorção de água é calculada pela massa de água absorvida pelo material dividida pela área da seção transversal do corpo-de-prova em contato com a lâmina de água.



Figura 17: corpos-de-prova durante o ensaio de absorção capilar de água

A figura 18 apresenta os corpos-de-prova rompidos em seu eixo central, onde foi realizada a medida da altura de penetração de água por capilaridade.



Figura 18: corpos-de-prova cilíndricos preparados para a medição da profundidade de penetração de água por capilaridade

#### 4.3.4.4 Resistência aos sais

O teste que verifica a resistência aos sais dos rebocos de recuperação foi realizado de acordo com o Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.30) em corpos-de-prova cilíndricos. Inicialmente, as laterais dos corpos-de-prova foram impermeabilizadas com o uso de resina epóxi, e colocados sobre placas filtrantes sobrepostas em um recipiente raso em contato com a solução salina, como mostra a figura 19. Como não foi possível utilizar as placas filtrantes indicadas pela DIN 18555, parte 7 (1987), optou-se pelo emprego de três camadas de papel-filtro com  $85 \text{ g/cm}^2$ . Para a preparação de 1 litro de solução salina foram necessários 35 gramas de NaCl, 5 gramas de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e 15 gramas de  $\text{NaNO}_3$ . Este ensaio foi realizado em câmara a  $20^\circ\text{C}$  e 65% de UR.



Figura 19: ensaio de resistência aos sais em corpos-de-prova de argamassa

#### 4.3.4.5 Coeficiente de resistência à difusão de vapor

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma alemã DIN 52615 (1987), conforme prescrições da WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p. 6), em corpos-de-prova cilíndricos, e caracteriza os processos de difusão e permeabilidade ao vapor de água das argamassas. Materiais de elevada permeabilidade são atribuídos como baixa resistência à difusão de vapor, ao passo que o material que permite transmissão de vapor de água apenas em baixos valores é caracterizado por ter um alto coeficiente de resistência à difusão de vapor. Este coeficiente é uma constante de um material que expressa o fator pelo qual o fluxo de umidade é impedido por um material poroso quando comparado a uma camada imóvel de ar de mesma espessura (AL-SAAD; ABDEL-HALIN, 2001, p. 931).

As amostras de argamassa foram apoiadas na borda de um frasco de vidro contendo em seu interior um material dessecante (sílica gel), e então vedadas com o uso de material à base de poliuretano (figura 20). O uso de sílica-gel garantiu que a umidade relativa do ar no interior do recipiente fosse mantida entre 0 e 3%.

Foi então determinada a massa inicial deste conjunto e mantido em câmara climatizada com temperatura variando entre 21 e 23 °C e umidade relativa do ar entre 47 e 53%. Após um período de 24 horas, o conjunto foi novamente pesado para determinar a taxa de fluxo de vapor de água através do corpo-de-prova. Isto ocorre devido à diferença de umidade entre o interior do frasco (0 a 3%) e o ar externo (47 a 53%). Verifica-se então o aumento de massa do conjunto frasco e corpo-de-prova devido à condensação de parcela de vapor de água no interior da argamassa.



Figura 20: ensaio para a determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor

O coeficiente de resistência à difusão de vapor foi calculado com o uso das equações 14 e 15 (BIANCHIN, 1999, p. 83).

$$\hat{i} = \frac{24}{\text{WDD} \times S} \quad (\text{equação 14})$$

$$\text{WDD} = \frac{24}{t_2 - t_1} \times \frac{m_2 - m_1}{A} \quad (\text{equação 15})$$

Onde:

- $\hat{i}$ : coeficiente de resistência à difusão de vapor;
- $m_2 - m_1$ : diferença de massa entre duas pesagens, em g;
- $t_2 - t_1$ : diferença entre dois tempos, em horas;
- WDD: taxa de fluxo de umidade, em  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;
- A: área da seção do corpo-de-prova, de  $\text{m}^2$ ;
- S: espessura do corpo-de-prova, em m.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos no Estudo Preliminar, optou-se por avaliar o comportamento das argamassas mistas (cimento:cal:areia), com diferentes relações cal/cimento (cal/cim) e teores de aditivo incorporador de ar (IA), hidrofugante (HID) e retentor de água (RET), conforme tabela 17. A especificação dos materiais e aditivos utilizados encontra-se descrita no capítulo 4.1. Os valores médios dos ensaios realizados, bem como a avaliação destes, estão apresentados nos capítulos que seguem.

As variáveis dependentes e independentes foram analisadas estatisticamente, verificando-se a influência da relação cal/cimento e dos teores dos aditivos incorporador de ar, hidrofugante e retentor de água, bem como a interação entre estes fatores. Esta análise foi realizada através da Regressão Múltipla ou da Regressão Não Linear, dependendo do modelo matemático que melhor apresentou o comportamento das propriedades estudadas em função dos resultados obtidos a partir do projeto fracionado dos experimentos. Para a realização da modelagem dos dados foi utilizado o programa computacional *Statistica for Windows* versão 5.1. O nível de confiança utilizado foi de 95%, sendo este o valor normalmente utilizado para a análise estatística de dados na Engenharia Civil.

### 5.1 ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Os valores médios obtidos nos ensaios das propriedades das argamassas no estado fresco estão apresentados na tabela 21. Os resultados de todos os corpos-de-prova estão apresentados no apêndice C.

Tabela 21: valores médios das propriedades das argamassas no estado fresco em função da relação cal/cim e dos teores de aditivos para a idade de 28 dias

| Código* | Relação água/cim | Relação água/agl | Índ. de Consist. (cm) | Trabalhabilidade (cm) | Teor de ar incorp. (%) | Retenção de água (%) | Massa espec. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 1       | 1,36             | 1,07             | 18,77                 | 1,13                  | 41                     | 99                   | 1,47                               |
| 2       | 1,41             | 1,11             | 19,21                 | 1,62                  | 43                     | 100                  | 1,45                               |
| 3       | 1,39             | 1,10             | 19,50                 | 1,03                  | 43                     | 99                   | 1,43                               |
| 4       | 1,36             | 1,07             | 18,43                 | 1,94                  | 39                     | 100                  | 1,50                               |
| 5       | 1,37             | 1,08             | 19,45                 | 1,56                  | 45                     | 98                   | 1,38                               |
| 6       | 1,41             | 1,11             | 18,87                 | 1,21                  | 43                     | 100                  | 1,44                               |
| 7       | 1,36             | 1,07             | 19,50                 | 1,84                  | 42                     | 99                   | 1,44                               |
| 8       | 1,41             | 1,11             | 19,44                 | 1,16                  | 45                     | 99                   | 1,37                               |
| 9       | 2,23             | 1,15             | 19,48                 | 2,60                  | 45                     | 97                   | 1,36                               |
| 10      | 2,26             | 1,17             | 19,41                 | 1,83                  | 45                     | 99                   | 1,41                               |
| 11      | 2,23             | 1,15             | 19,25                 | 1,89                  | 45                     | 97                   | 1,36                               |
| 12      | 2,26             | 1,17             | 19,50                 | 0,83                  | 45                     | 100                  | 1,40                               |
| 13      | 2,20             | 1,14             | 18,70                 | 1,50                  | 45                     | 96                   | 1,39                               |
| 14      | 2,19             | 1,13             | 17,59                 | 1,28                  | 46                     | 100                  | 1,34                               |
| 15      | 2,20             | 1,14             | 17,54                 | 1,48                  | 45                     | 97                   | 1,36                               |
| 16      | 2,17             | 1,12             | 17,52                 | 1,40                  | 45                     | 100                  | 1,35                               |
| 17      | 1,69             | 1,06             | 17,52                 | 1,53                  | 39                     | 100                  | 1,50                               |
| 18      | 1,69             | 1,06             | 17,50                 | 1,28                  | 40                     | 100                  | 1,46                               |
| 19      | 1,13             | 1,03             | 17,50                 | 0,55                  | 37                     | 100                  | 1,52                               |
| 20      | 2,43             | 1,16             | 17,60                 | 0,85                  | 47                     | 98                   | 1,32                               |
| 21      | 1,80             | 1,12             | 17,50                 | 0,82                  | 40                     | 99                   | 1,46                               |
| 22      | 1,72             | 1,08             | 17,53                 | 1,01                  | 42                     | 100                  | 1,43                               |
| 23      | 1,75             | 1,09             | 17,51                 | 1,71                  | 43                     | 100                  | 1,41                               |
| 24      | 1,76             | 1,10             | 17,53                 | 1,68                  | 42                     | 100                  | 1,44                               |
| 25      | 1,74             | 1,09             | 17,52                 | 0,78                  | 42                     | 96                   | 1,44                               |
| 26      | 1,73             | 1,08             | 17,51                 | 0,43                  | 40                     | 100                  | 1,49                               |

\* a identificação de cada código está apresentada na Tabela 17

### 5.1.1 Relação água/aglomerante

A relação água/aglomerante pode ser expressa pelo modelo matemático exponencial apresentado na equação 16. Através da análise de regressão não linear, verificou-se a influência da relação cal/cimento (cal/cim) e do aditivo incorporador de ar (IA) na relação água/aglomerante das argamassas estudadas. Os demais aditivos não apresentaram significância na relação água/aglomerante das argamassas. Os dados obtidos a partir desta análise estão apresentados no apêndice D.

$$a / agl = 0,10 + e^{(0,076 \times CC^{2,885} - 0,036 \times IA)} \quad (\text{equação 16})$$

$$R^2 = 0,6503$$

Onde:

a/agl: relação água/aglomerante;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %.

O coeficiente de determinação encontrado através da análise por regressão não linear dos resultados observados apresentou-se relativamente baixo (65,03%). Este fato pode ser devido à pequena variação entre os resultados mínimos (1,06) e máximos (1,17) da relação água/aglomerante das argamassas estudadas.

As figuras 21(a) e 21(b) apresentam o comportamento encontrado para a relação água/aglomerante, em função da relação cal/cim e teor de IA. Analisando-se a figura 21(a), pode-se observar que a relação água/aglomerante aumenta com o aumento da relação cal/cim. Este aumento é da ordem de 9%, independentemente do teor de IA utilizado.

A figura 21(b) apresenta o comportamento da relação água/aglomerante em função do teor de incorporador de ar, para argamassas com diferentes relações cal/cim. Neste caso, pode-se perceber que, com o aumento do teor de IA nas argamassas, a relação água/aglomerante tende a reduzir cerca de 2%, conforme mostra a tabela 22. Este comportamento é devido ao efeito plastificante das bolhas de ar incorporado nas argamassas que, segundo Neville (1997, p. 553), podem ocasionar a redução da relação água/cimento. Reduções maiores não foram observadas, pois o teor de IA utilizado foi calculado em relação à massa de cimento, e, argamassas com relação cal/cim maior possuem, conseqüentemente, menor quantidade de IA.

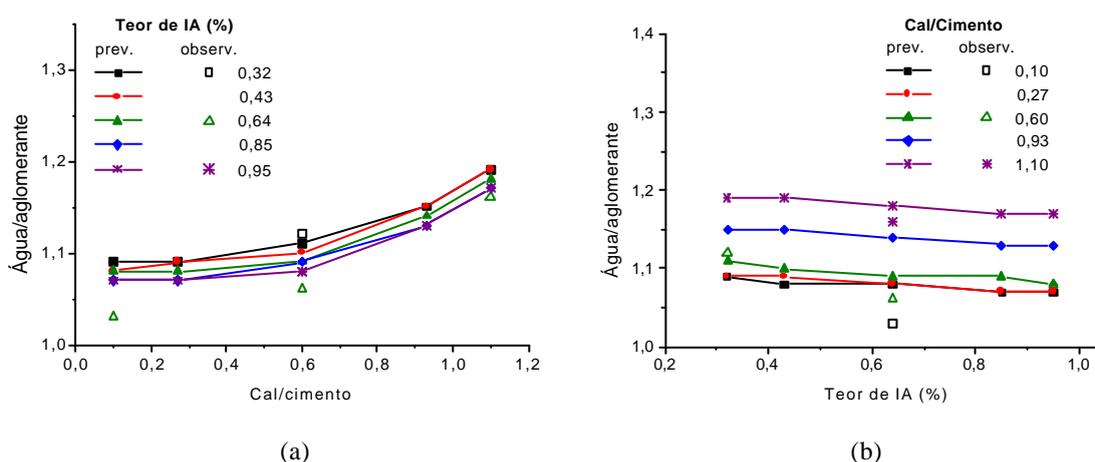


Figura 21: relação água/aglomerante das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA

Comportamento semelhante foi verificado em argamassas estudadas por Calhau e Tristão (1999, p. 228), onde a relação água/cimento tendeu a aumentar com o acréscimo do teor de cal. Além disso, neste mesmo estudo, houve a redução da relação água/cimento com o aumento do teor de aditivo incorporador de ar no material, para mesmos índices de

consistência. Da mesma forma, Bianchin (1999, p. 87) encontrou reduções na relação água/aglomerante com o aumento do teor de incorporador de ar.

A tabela 22 apresenta os valores previstos calculados pelo modelo exponencial, bem como os valores observados para a relação água/aglomerante das argamassas estudadas. Nesta tabela são apresentados os valores referentes à relação cal/cim e teor de IA.

Tabela 22: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação água/aglomerante em função da relação cal/cim e teor de IA

| CAL/CI | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|--------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|        | IA (%)    |      |      |      |      | IA (%)     |      |      |      |      |
| M      | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10   | 1,09      | 1,08 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | --         | --   | 1,03 | --   | --   |
| 0,27   | 1,09      | 1,09 | 1,08 | 1,07 | 1,07 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60   | 1,11      | 1,10 | 1,09 | 1,09 | 1,08 | 1,12       | --   | 1,06 | --   | 1,08 |
| 0,93   | 1,15      | 1,15 | 1,14 | 1,13 | 1,13 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10   | 1,19      | 1,19 | 1,18 | 1,17 | 1,17 | --         | --   | 1,16 | --   | --   |
| IA (%) | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|        | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32   | 1,09      | 1,09 | 1,11 | 1,15 | 1,19 | --         | --   | 1,12 | --   | --   |
| 0,43   | 1,08      | 1,09 | 1,10 | 1,15 | 1,19 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64   | 1,08      | 1,08 | 1,09 | 1,14 | 1,18 | 1,03       | --   | 1,06 | --   | 1,16 |
| 0,85   | 1,07      | 1,07 | 1,09 | 1,13 | 1,17 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95   | 1,07      | 1,07 | 1,08 | 1,13 | 1,17 | --         | --   | 1,08 | --   | --   |

### 5.1.2 Consistência e Trabalhabilidade

O modelo matemático que expressa o comportamento da consistência é a equação polinomial descrita na equação 17. A análise por regressão múltipla apresenta influência significativa da relação cal/cim e dos aditivos, bem como interação entre a relação cal/cim e o aditivo incorporador de ar. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos a partir desta análise.

$$Cons = 16,8194 + 0,3559 \times CC^2 + 0,3441 \times IA^2 + 0,3456 \times HID^2 + 0,3445 \times RET^2 - 0,4314 \times CC \times IA \quad (\text{equação 17})$$

$$R^2 = 0,6455$$

Onde:

Cons: índice de consistência, em cm;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %;

RET – teor de retentor de água, em %.

Os valores foram codificados de acordo com a tabela 23.

Tabela 23: valores codificados utilizados para a análise de regressão múltipla

| <b>Código</b> | <b>CAL/CIM</b> | <b>IA</b> | <b>HID</b> | <b>RET</b> |
|---------------|----------------|-----------|------------|------------|
| -1,5          | 0,10           | 0,32      | 0,40       | 0,40       |
| -1            | 0,27           | 0,43      | 0,53       | 0,53       |
| 0             | 0,60           | 0,64      | 0,80       | 0,80       |
| 1             | 0,93           | 0,85      | 1,07       | 1,07       |
| 1,5           | 1,10           | 0,95      | 1,20       | 1,20       |

A análise por regressão múltipla dos valores observados resultou em um coeficiente de determinação relativamente baixo (64,55%). Este fato pode ser devido à pequena variação no índice de consistência das argamassas estudadas.

As figuras 22(a) e 22(b) apresentam o comportamento do índice de consistência das argamassas em função da relação cal/cim e do aditivo IA, respectivamente. De acordo com a figura 22(a), pode-se observar que as argamassas com baixos teores de incorporador de ar (<0,64%) apresentam aumento da consistência com o aumento da relação cal/cim. Comportamento inverso pode ser observado em argamassas com alto teor de incorporador de ar (>0,85%), onde o índice de consistência diminui com o aumento da relação cal/cim. Assim, pode-se verificar que, na medida em que o teor de cal, e conseqüentemente a relação cal/cim aumentam, em argamassas com baixo teor de IA, o índice de consistência tende a aumentar, demonstrando ser a cal a principal responsável por esta propriedade. Quando o teor de IA aumenta nas argamassas, este faz com que as mesmas apresentem maior coesão, diminuindo o índice de consistência. Em estudos realizados por Monte, Uemoto e Selmo (2003, p. 290) verificou-se que o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas propiciou uma perda de consistência. Entretanto, segundo os autores, o aumento do índice de consistência não indica um aumento da trabalhabilidade, já que, segundo a avaliação do pedreiro, as argamassas com diferentes índices de consistência apresentavam a mesma trabalhabilidade.

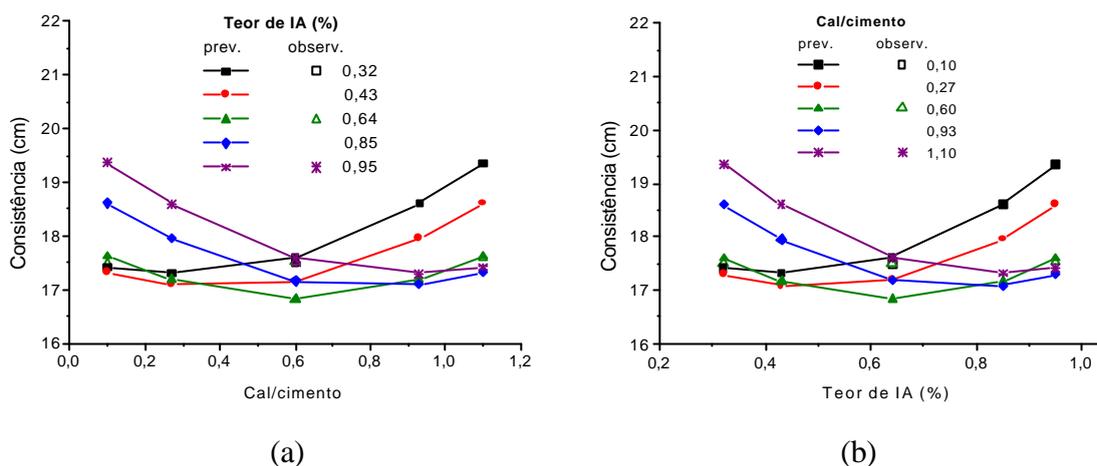


Figura 22: índice de consistência das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA

Comportamento similar é visualizado na figura 22(b), onde a consistência varia com o aumento do teor de ar incorporado em argamassas com diversas relações cal/cim. Argamassas com baixa relação cal/cim tendem a aumentar o índice de consistência com o aumento do teor de incorporador de ar. Analisando os resultados obtidos por Bianchin (1999, p. 132), verificou-se que, nas argamassas com maior teor de cimento (1:1:6), o índice de consistência é diretamente proporcional ao teor de incorporador de ar, até teores de 0,75% deste aditivo. Entretanto, em argamassas com maior relação cal/cim, o índice de consistência tende a diminuir com o aumento do teor de incorporador de ar.

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que o índice de consistência das argamassas com relação cal/cim de até 0,60 é diretamente proporcional ao teor de incorporador de ar. Entretanto, quando a relação cal/cim for superior a 0,60, este comportamento se inverte, sendo que o índice de consistência é reduzido com o aumento do teor de incorporador de ar. Observa-se que maiores índices de consistência foram encontrados em argamassas com menor relação cal/cim e alto teor de incorporador de ar, bem como em argamassas com maior relação cal/cim e baixo teor de incorporador de ar.

Os valores previstos pelo modelo matemático exponencial, bem como os valores médios observados nos ensaios, estão apresentados na tabela 24.

Tabela 24: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de consistência das argamassas em função da relação cal/cim e teor de IA

| CAL/CIM | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |       |       |       |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|-------|-------|
|         | IA (%)    |       |       |       |       | IA (%)     |      |       |       |       |
|         | 0,32      | 0,43  | 0,64  | 0,85  | 0,95  | 0,32       | 0,43 | 0,64  | 0,85  | 0,95  |
| 0,10    | 17,42     | 17,32 | 17,62 | 18,61 | 19,36 | --         | --   | 17,50 | --    | --    |
| 0,27    | 17,30     | 17,09 | 17,18 | 17,95 | 18,60 | --         | --   | --    | --    | --    |
| 0,60    | 17,59     | 17,16 | 16,82 | 17,16 | 17,59 | 17,50      | --   | 17,51 | --    | 17,53 |
| 0,93    | 18,60     | 17,95 | 17,18 | 17,09 | 17,30 | --         | --   | --    | --    | --    |
| 1,10    | 19,36     | 18,61 | 17,62 | 17,32 | 17,42 | --         | --   | 17,60 | --    | --    |
| IA (%)  | CAL/CIM   |       |       |       |       | CAL/CIM    |      |       |       |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93  | 1,10  |
|         | 0,32      | 17,42 | 17,30 | 17,59 | 18,60 | 19,36      | --   | --    | 17,50 | --    |
| 0,43    | 17,32     | 17,09 | 17,16 | 17,95 | 18,61 | --         | --   | --    | --    | --    |
| 0,64    | 17,62     | 17,18 | 16,82 | 17,18 | 17,62 | 17,50      | --   | 17,51 | --    | 17,60 |
| 0,85    | 18,61     | 17,95 | 17,16 | 17,09 | 17,32 | --         | --   | --    | --    | --    |
| 0,95    | 19,36     | 18,60 | 17,59 | 17,30 | 17,42 | --         | --   | 17,53 | --    | --    |

Do ponto de vista da trabalhabilidade, os resultados não sofreram influência significativa da relação cal/cim ou dos aditivos utilizados, conforme a análise de regressão. De acordo com a WTA, a trabalhabilidade é a medida da redução da consistência após um período de repouso de 15 minutos, sendo que esta deve ser inferior que 3,0 cm para as argamassas de recuperação. Desta forma, todas as argamassas estudadas são trabalháveis, pois apresentam reduções menores que o valor máximo prescrito pelo caderno de recomendações WTA 2-2-91.

### 5.1.3 Teor de Ar Incorporado

O teor de ar incorporado pode ser expresso pelo modelo matemático exponencial apresentado na equação 18. Após a análise dos resultados através da regressão não linear, verificou-se que a relação cal/cimento, bem como os aditivos incorporador de ar e hidrofugante são significativos. Não houve interação entre as variáveis independentes. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos a partir desta análise.

$$TAR = 36 + e^{(0,6 \times CC^{3,291} + 0,709 \times IA + 1,1 \times HID^{-0,25})} \quad (\text{equação 18})$$

$$R^2 = 0,5270$$

Onde:

TAR: teor de ar incorporado, em %;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %.

O coeficiente de determinação obtido através de regressão não linear dos resultados observados para o teor de ar incorporado das argamassas estudadas é baixo (52,70%). Este fato pode ser devido à pequena variação entre o teor mínimo (39%) e teor máximo (47%) de ar incorporado obtidos nos ensaios em argamassas.

A tabela 25 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático para o teor de ar incorporado das argamassas, bem como os valores médios observados durante os ensaios. Observa-se que, ao aumentar a quantidade de cal, o teor de ar incorporado tende a aumentar, independentemente do teor de aditivo utilizado. Argamassas com altos teores de incorporador de ar e baixos teores de hidrofugante apresentam maiores teores de ar incorporado.

Tabela 25: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função da relação cal/cim e teor de IA e HID

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      | IA (%)     |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 40        | 40   | 41   | 42   | 42   | --         | --   | 37   | --   | --   |
| 0,27    | 40        | 40   | 41   | 42   | 42   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 40        | 41   | 42   | 43   | 43   | 40         | --   | 38   | --   | 42   |
| 0,93    | 42        | 43   | 44   | 45   | 46   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 45        | 46   | 47   | 49   | 50   | --         | --   | 47   | --   | --   |
| CAL/CIM | HID (%)   |      |      |      |      | HID (%)    |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 42        | 42   | 41   | 41   | 41   | --         | --   | 37   | --   | --   |
| 0,27    | 42        | 42   | 41   | 41   | 41   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 43        | 42   | 42   | 41   | 41   | 43         | --   | 39   | --   | 42   |
| 0,93    | 46        | 45   | 44   | 43   | 43   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 50        | 49   | 47   | 47   | 46   | --         | --   | 47   | --   | --   |

As figuras 23(a) e 23(b) apresentam a variação do teor de ar nas argamassas em função do teor de incorporador de ar e de hidrofugante, respectivamente. Na figura 23(a) observa-se que o teor de ar incorporado aumenta com o aumento do aditivo incorporador de ar, como era esperado;, sendo que as argamassas com maior relação cal/cim apresentam aumentos de até 11%. No que se refere ao hidrofugante (figura 23(b)), as argamassas tendem a diminuir o teor de ar incorporado com o aumento do teor de hidrofugante em valores de até 8%, como é o caso das argamassas com relação cal/cimento de 1,10.

O Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 prescreve teor de ar incorporado superior a 25% para argamassas para reboco de recuperação. Segundo esta prescrição, todas as argamassas estudadas apresentaram valores superiores ao preconizado.

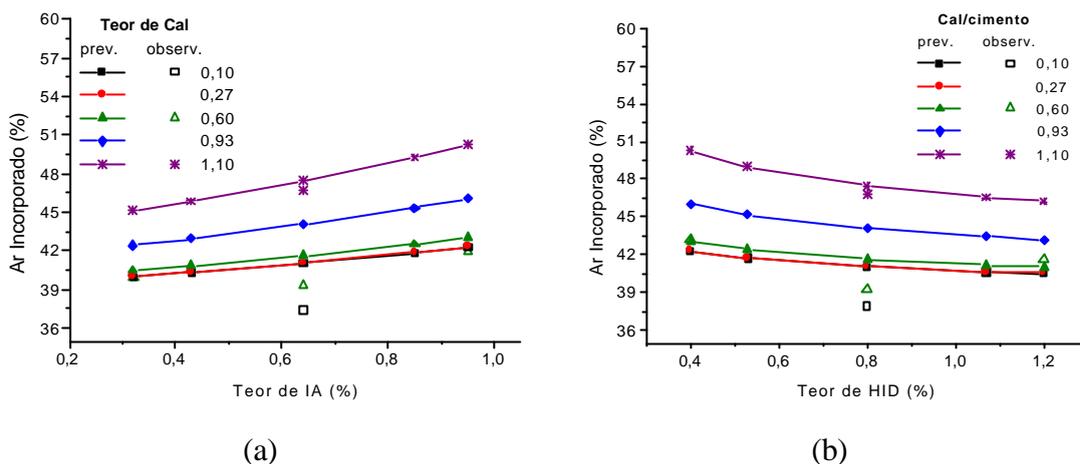


Figura 23: teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID

A tabela 26 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático bem como os valores médios observados durante os ensaios de teor de ar incorporado das argamassas.

Tabela 26: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cim

| IA (%)  | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32    | 40        | 40   | 40   | 42   | 45   | --         | --   | 40   | --   | --   |
| 0,43    | 40        | 40   | 41   | 43   | 46   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64    | 41        | 41   | 42   | 44   | 47   | 37         | --   | 39   | --   | 47   |
| 0,85    | 42        | 42   | 43   | 45   | 49   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95    | 42        | 42   | 43   | 46   | 50   | --         | --   | 42   | --   | --   |
| HID (%) | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40    | 42        | 42   | 43   | 46   | 50   | --         | --   | 43   | --   | --   |
| 0,53    | 42        | 42   | 42   | 45   | 49   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80    | 41        | 41   | 42   | 44   | 47   | 38         | --   | 39   | --   | 47   |
| 1,07    | 41        | 41   | 41   | 43   | 47   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20    | 41        | 41   | 41   | 43   | 46   | --         | --   | 42   | --   | --   |

### 5.1.4 Retenção de Água

A retenção de água das argamassas estudadas pode ser expressa pelo modelo matemático polinomial apresentado na equação 19. Segundo a análise de regressão múltipla os resultados desta propriedade não sofreram influência significativa do aditivo incorporador de ar e do hidrofugante. Houve significância da relação cal/cim e do retentor de água, bem como a interação entre os mesmos. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos a partir desta análise.

$$RA = 99,608 - 0,431 \times CC + 0,710 \times RET - 0,126 \times CC^2 - 0,341 \times RET^2 + 0,358 \times CC \times RET \quad (\text{equação 19})$$

$$R^2 = 0,9476$$

Onde:

RA: retenção de água, em %;

CC: relação cal/cimento, em massa;

RET: teor de retentor de água, em %.

Os valores foram codificados de acordo com a tabela 23.

A figura 24(a) apresenta o comportamento da retenção de água das argamassas em função da relação cal/cimento. Argamassas com baixos teores de RET tendem a diminuir a retenção de água em até 2,9% com o aumento da relação cal/cim. Isto se deve ao fato de que o teor de RET foi calculado em relação à massa de cimento, pois à medida que a relação cal/cim aumenta, a quantidade de cimento diminui, e conseqüentemente o teor de retentor. No entanto, as argamassas com altos teores deste aditivo mantêm a retenção de água praticamente constante com o aumento da relação cal/cim.

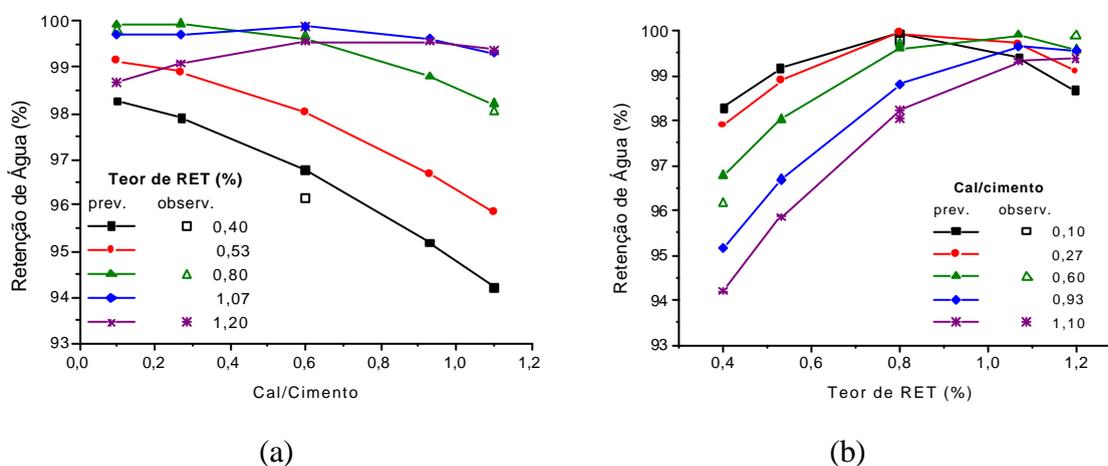


Figura 24: retenção de água das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de retentor

Na figura 24(b), as argamassas com alta relação cal/cim apresentaram aumento de retenção de água (3,9%) com o aumento do teor de aditivo retentor. Argamassas com altos teores de aditivo retentor, acima de 1,07%, apresentam alta retenção de água, e tendem a manter esta propriedade constante independente da relação cal/cim. Observa-se também que, para argamassas com teor de retentor de água de 0,4%, à medida que a relação cal/cim reduz, a retenção de água das argamassas aumenta. Este comportamento é inverso ao esperado, pois se sabe que a cal é o principal responsável pela retenção de água das argamassas. Entretanto,

como não foram realizados ensaios em argamassas sem aditivos, este comportamento pode ter sofrido influência dos aditivos IA, HID e RET. A recomendação para a relação cal/cim e o teor de aditivo retentor é de aproximadamente 0,27 e 1,07%, respectivamente, para a obtenção de maiores valores de retenção de água em argamassas.

O critério preconizado pela WTA 2-2-91 para argamassas de recuperação é de que a retenção de água deve ser superior a 85%, sendo que todas as argamassas estudadas apresentaram valores de retenção de água superiores ao recomendado.

A tabela 27 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático bem como os valores médios observados de retenção de água das argamassas, em função da relação cal/cim e do teor de aditivo retentor de água.

Tabela 27: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para o teor de ar incorporado das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cim

| CAL/CI<br>M | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|-------------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|             | RET (%)   |      |      |      |      | RET (%)    |      |      |      |      |
|             | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10        | 98        | 99   | 100  | 100  | 99   | --         | --   | 100  | --   | --   |
| 0,27        | 98        | 99   | 100  | 100  | 99   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60        | 97        | 98   | 100  | 100  | 100  | 96         | --   | 100  | --   | 100  |
| 0,93        | 95        | 97   | 99   | 100  | 100  | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,10        | 94        | 96   | 98   | 99   | 99   | --         | --   | 98   | --   | --   |
| RET (%)     | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|             | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40        | 98        | 98   | 97   | 95   | 94   | --         | --   | 96   | --   | --   |
| 0,53        | 99        | 99   | 98   | 97   | 96   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80        | 100       | 100  | 100  | 99   | 98   | 100        | --   | 100  | --   | 98   |
| 1,07        | 99        | 100  | 100  | 100  | 99   | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20        | 99        | 99   | 100  | 100  | 99   | --         | --   | 100  | --   | --   |

### 5.1.5 Massa Específica da Argamassa no Estado Fresco

O comportamento da massa específica da argamassa no estado fresco, em função do aditivo e relação cal/cim é expressa pela equação 20. O aditivo incorporador de ar e a relação cal/cim influenciaram significativamente na massa específica das argamassas, conforme análise de regressão não linear. O apêndice D apresenta os dados obtidos a partir desta análise.

$$MEF = -0,440 + e^{(-0,059 \times CC^{3,818} + 0,630 \times IA^{-0,036})} \quad (\text{equação 20})$$

$$R^2 = 0,6142$$

Onde:

MEF: massa específica da argamassa no estado fresco, em  $\text{kg}/\text{dm}^3$ ;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %.

Entretanto, os aditivos hidrofugante e retentor de água não influenciaram significativamente esta propriedade. Além disso, não houve significância da interação entre as variáveis, não ocorrendo, assim, interferência de uma variável sobre a outra.

O coeficiente de determinação obtido através de regressão não linear dos resultados observados para a massa específica das argamassas no estado fresco é relativamente baixo (61,42%). Este fato pode ser devido à pequena variação entre os resultados mínimos ( $1,32 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ) e máximos ( $1,52 \text{ kg}/\text{dm}^3$ ) obtidos nos ensaios com as argamassas estudadas.

A figura 25(a) apresenta o comportamento da massa específica com o aumento da relação cal/cim em argamassas com diversos teores de IA. Com o aumento do teor de cal, a massa específica diminui independentemente dos aditivos utilizados. O comportamento da massa específica em função do teor de IA está apresentado na figura 25(b). Como era esperado, com o aumento do teor de IA, a massa específica diminui, independentemente da relação cal/cim.

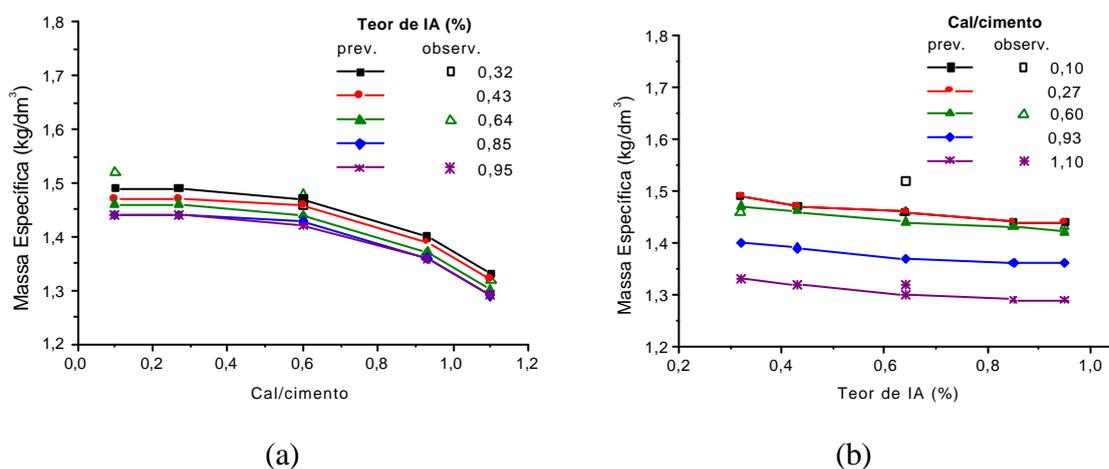


Figura 25: massa específica das argamassas no estado fresco em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de IA

Observando-se os gráficos 25 (a) e 25 (b), percebe-se que o teor de cal tem maior influência na redução da massa específica das argamassas no estado fresco que o teor de IA.

Os valores previstos pelo modelo matemático bem como os valores médios observados da massa específica das argamassas no estado fresco, em função da relação cal/cim e do teor de aditivo IA, estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados para a massa específica das argamassas no estado fresco em função da relação cal/cim e do teor de IA

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      | IA (%)     |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 1,49      | 1,47 | 1,46 | 1,44 | 1,44 | --         | --   | 1,52 | --   | --   |
| 0,27    | 1,49      | 1,47 | 1,46 | 1,44 | 1,44 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,47      | 1,46 | 1,44 | 1,43 | 1,42 | 1,46       | --   | 1,48 | --   | 1,43 |
| 0,93    | 1,40      | 1,39 | 1,37 | 1,36 | 1,36 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,33      | 1,32 | 1,30 | 1,29 | 1,29 | --         | --   | 1,32 | --   | --   |
| IA (%)  | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
|         | 0,32      | 1,49 | 1,49 | 1,47 | 1,40 | 1,33       | --   | --   | 1,46 | --   |
| 0,43    | 1,47      | 1,47 | 1,46 | 1,39 | 1,32 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64    | 1,46      | 1,46 | 1,44 | 1,37 | 1,30 | 1,52       | --   | 1,46 | --   | 1,32 |
| 0,85    | 1,44      | 1,44 | 1,43 | 1,36 | 1,29 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95    | 1,44      | 1,44 | 1,42 | 1,36 | 1,29 | --         | --   | 1,43 | --   | --   |

## 5.2 ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os valores médios obtidos nos ensaios das propriedades das argamassas no estado endurecido estão apresentados na tabela 29. Os resultados de todos os corpos-de-prova ensaiados estão apresentados no apêndice C.

Tabela 29: valores médios das propriedades das argamassas no estado endurecido durante a Avaliação Final

| Cód.* | fc (MPa) | ft (MPa) | fc/ft | A. Cap. (kg/m <sup>2</sup> ) | Alt. P. Agua (mm) | M.Esp. Ap. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Abs. Im. (%) | Poros (%) | R.Sais (dias) | Res. Dif. Vap. |
|-------|----------|----------|-------|------------------------------|-------------------|----------------------------------|--------------|-----------|---------------|----------------|
| 1     | 2,47     | 1,25     | 1,97  | 5,18                         | 22                | 1,60                             | 24           | 52        | 1             | 10,77          |
| 2     | 2,52     | 1,33     | 1,89  | 4,87                         | 22                | 1,55                             | 26           | 54        | 1             | 12,52          |
| 3     | 2,03     | 1,25     | 1,62  | 3,80                         | 11                | 1,61                             | 23           | 53        | 6             | 13,06          |
| 4     | 3,20     | 1,87     | 1,71  | 3,76                         | 13                | 1,63                             | 22           | 51        | 6             | 15,58          |
| 5     | 1,60     | 1,10     | 1,45  | 5,13                         | 23                | 1,56                             | 25           | 54        | 1             | 8,73           |
| 6     | 2,07     | 1,20     | 1,72  | 4,77                         | 23                | 1,55                             | 25           | 56        | 2             | 13,28          |
| 7     | 2,34     | 1,37     | 1,71  | 3,38                         | 7                 | 1,66                             | 20           | 54        | 6             | 15,60          |
| 8     | 1,85     | 1,33     | 1,39  | 4,10                         | 12                | 1,56                             | 25           | 56        | 2             | 13,42          |
| 9     | 0,73     | 0,49     | 1,47  | 6,85                         | 22                | 1,39                             | 32           | 53        | 1             | 7,98           |
| 10    | 0,91     | 0,61     | 1,48  | 6,95                         | 24                | 1,38                             | 33           | 55        | 1             | 11,86          |
| 11    | 0,97     | 0,56     | 1,74  | 5,78                         | 23                | 1,50                             | 27           | 52        | 1             | 11,93          |
| 12    | 0,99     | 0,56     | 1,75  | 6,02                         | 22                | 1,48                             | 29           | 54        | 1             | 12,09          |
| 13    | 0,79     | 0,47     | 1,68  | 6,27                         | 23                | 1,47                             | 29           | 58        | 1             | 11,47          |
| 14    | 1,02     | 0,83     | 1,23  | 6,10                         | 22                | 1,40                             | 31           | 55        | 1             | 8,32           |
| 15    | 0,65     | 0,58     | 1,12  | 5,82                         | 23                | 1,50                             | 27           | 55        | 1             | 8,20           |
| 16    | 1,05     | 0,75     | 1,41  | 5,43                         | 22                | 1,53                             | 26           | 55        | 1             | 8,29           |
| 17    | 1,93     | 1,16     | 1,67  | 6,17                         | 23                | 1,59                             | 24           | 52        | 1             | 9,56           |
| 18    | 1,84     | 1,23     | 1,50  | 5,72                         | 23                | 1,59                             | 24           | 52        | 1             | 10,13          |
| 19    | 4,20     | 2,22     | 1,89  | 3,32                         | 10                | 1,67                             | 20           | 49        | 6             | 12,95          |
| 20    | 0,54     | 0,68     | 0,79  | 6,46                         | 22                | 1,46                             | 31           | 53        | 1             | 8,85           |
| 21    | 1,50     | 0,62     | 2,43  | 6,01                         | 23                | 1,53                             | 27           | 52        | 1             | 11,19          |
| 22    | 1,50     | 1,02     | 1,47  | 5,66                         | 23                | 1,57                             | 25           | 54        | 1             | 9,99           |
| 23    | 1,46     | 1,14     | 1,29  | 6,15                         | 22                | 1,52                             | 26           | 53        | 1             | 9,56           |
| 24    | 1,58     | 0,96     | 1,64  | 5,37                         | 23                | 1,57                             | 24           | 53        | 1             | 10,16          |
| 25    | 1,31     | 0,60     | 2,20  | 6,02                         | 23                | 1,57                             | 23           | 53        | 1             | 9,83           |
| 26    | 1,83     | 1,14     | 1,61  | 5,99                         | 22                | 1,59                             | 24           | 46        | 1             | 12,84          |

\* a identificação de cada código está apresentada na tabela 17.

### 5.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão das argamassas pode ser expressa pelo modelo matemático apresentado na equação 21. A análise por regressão não linear apresentou significância da relação cal/cimento, bem como dos aditivos incorporador de ar, hidrofugante e retentor de água na resistência à compressão das argamassas. Além disso, houve interação entre a relação cal/cimento e o incorporador de ar. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos a partir desta análise.

$$F_c = 1 + e^{(-4,23 \times CC - 0,84 \times IA^{5,242} + 0,6 \times HID + 1,2 \times RET^{0,33})} \quad (\text{equação 21})$$

$$R^2 = 0,8575$$

Onde:

Fc: Resistência à compressão, em MPa;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %;

RET: teor de retentor de água, em %.

As figuras 26(a), 26(b) e 26(c) apresentam o comportamento da resistência à compressão em função da relação cal/cim. Com o aumento do teor de cal, as argamassas apresentam redução da resistência à compressão, independentemente dos teores de aditivo utilizados. Isto pode ser explicado pela redução do teor de cimento, à medida que a relação cal/cim aumenta, pois este é o principal fator que rege a resistência mecânica do material. Esta redução é de aproximadamente 77%, quando a relação cal/cim aumenta de 0,10 para 1,10.

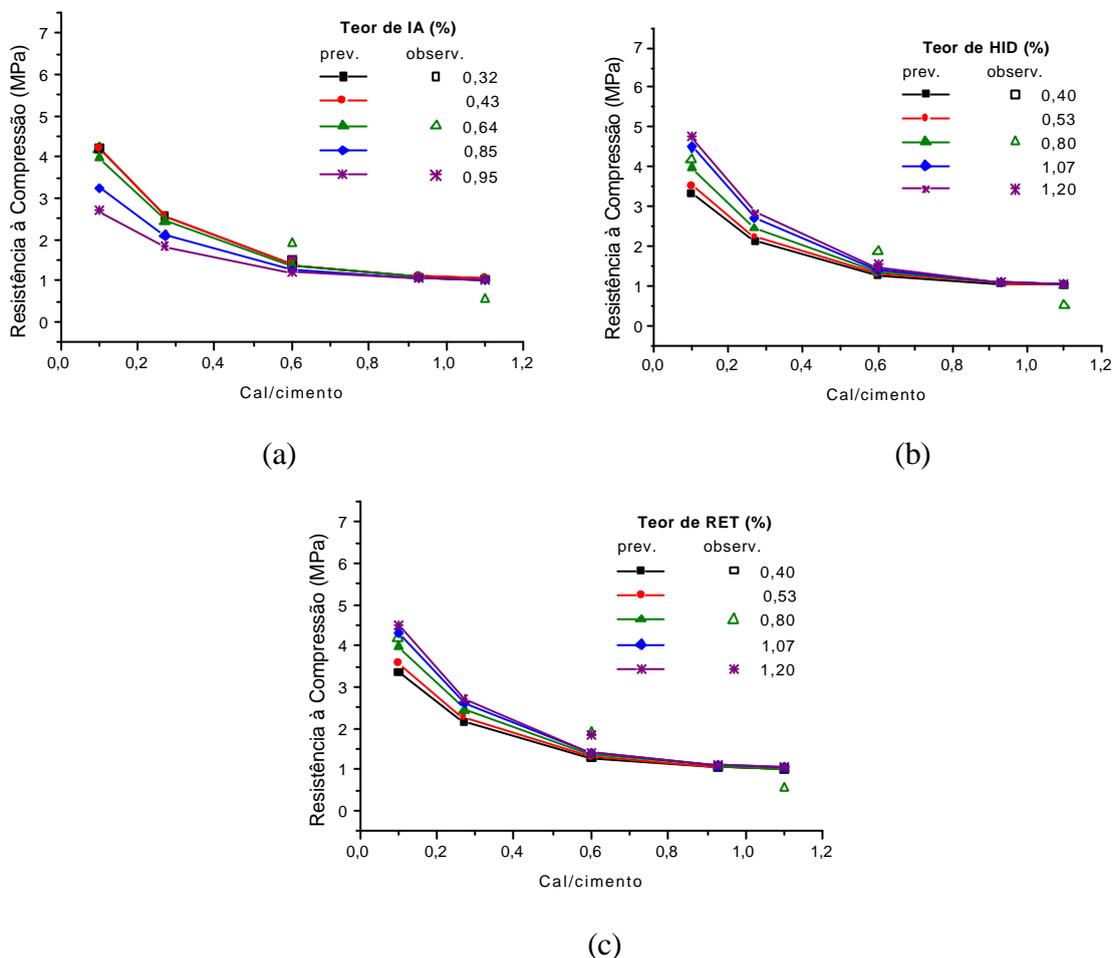


Figura 26: resistência à compressão das argamassas no estado endurecido em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA (b) HID e (c) RET

Estes resultados corroboram com os dados obtidos por Bianchin (1999, p.99), onde se observou que as argamassas com maior quantidade de cimento apresentaram maiores valores de resistência à compressão. Além disso, pôde-se verificar que argamassas com maiores teores de incorporador de ar apresentaram menores resistências à compressão, ocorrendo o inverso com o aumento do teor de aditivo hidrofugante, independentemente do traço utilizado.

Pode-se perceber que há uma relação entre o teor de ar incorporado, a relação cal/cim, a porosidade aparente e a resistência à compressão. À medida que se aumenta quantidade de incorporador de ar e a relação cal/cimento nas argamassas, o teor de ar incorporado e a porosidade aparente aumentam, e a resistência à compressão, por outro lado, diminui.

Os valores previstos pelo modelo matemático bem como os valores médios observados da resistência à compressão das argamassas, em função da relação cal/cim e dos teores de aditivo IA, HID e RET estão apresentados na tabela 30.

Tabela 30: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à compressão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 4,22      | 4,20 | 3,98 | 3,26 | 2,70 | --         | --   | 4,20 | --   | --   |
| 0,27    | 2,57      | 2,56 | 2,45 | 2,10 | 1,83 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,39      | 1,39 | 1,36 | 1,27 | 1,20 | 1,50       | --   | 1,89 | --   | 1,50 |
| 0,93    | 1,10      | 1,10 | 1,09 | 1,07 | 1,05 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,05      | 1,05 | 1,04 | 1,03 | 1,02 | --         | --   | 0,54 | --   | --   |
| CAL/CIM | HID (%)   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 3,34      | 3,53 | 3,98 | 4,50 | 4,78 | --         | --   | 4,20 | --   | --   |
| 0,27    | 2,14      | 2,23 | 2,45 | 2,71 | 2,84 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,28      | 1,31 | 1,36 | 1,42 | 1,46 | 1,46       | --   | 1,89 | --   | 1,58 |
| 0,93    | 1,07      | 1,08 | 1,09 | 1,10 | 1,11 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,03      | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,06 | --         | --   | 0,54 | --   | --   |
| CAL/CIM | RET (%)   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 3,37      | 3,58 | 3,98 | 4,33 | 4,49 | --         | --   | 4,20 | --   | --   |
| 0,27    | 2,15      | 2,26 | 2,45 | 2,62 | 2,70 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,29      | 1,31 | 1,36 | 1,40 | 1,42 | 1,31       | --   | 1,89 | --   | 1,83 |
| 0,93    | 1,07      | 1,08 | 1,09 | 1,10 | 1,10 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,03      | 1,04 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | --         | --   | 0,54 | --   | --   |

A tabela 31 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da resistência à compressão das argamassas, em função dos teores de aditivo IA, HID e RET e da relação cal/cim.

Segundo a tabela 31, as argamassas com baixa relação cal/cim apresentam aumento na resistência à compressão até o teor médio de incorporador de ar, sendo que a partir deste, esta resistência tende a reduzir. À medida que a relação cal/cim aumenta, as argamassas tendem a manter constante a resistência. Em relação ao aditivo hidrofugante, pode ser observado na tabela 31 que as argamassas apresentam resistências máximas com teores máximos de HID e baixa relação cal/cim. Com o aumento do aditivo retentor, a resistência à

compressão do material aumenta, sendo este acréscimo de até 30% para argamassas com relação cal/cim de 0,10. Este comportamento é devido à maior retenção de água no material, proporcionada pelo uso deste aditivo, favorecendo assim as reações de hidratação do cimento.

Tabela 31: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à compressão das argamassas em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim

| Valores Previstos |         | Valores Observados |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|---------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| IA (%)            | CAL/CIM |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                   | 0,10    | 0,27               | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10 | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32              | 4,22    | 2,57               | 1,39 | 1,10 | 1,05 | --   | --   | 1,50 | --   | --   |
| 0,43              | 4,20    | 2,56               | 1,39 | 1,10 | 1,05 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 0,64              | 3,98    | 2,45               | 1,36 | 1,09 | 1,04 | 4,20 | --   | 1,89 | --   | 0,54 |
| 0,85              | 3,26    | 2,10               | 1,27 | 1,07 | 1,03 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 0,95              | 2,70    | 1,83               | 1,20 | 1,05 | 1,02 | --   | --   | 1,50 | --   | --   |
| HID (%)           | CAL/CIM |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                   | 0,10    | 0,27               | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10 | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40              | 3,34    | 2,14               | 1,28 | 1,07 | 1,03 | --   | --   | 1,46 | --   | --   |
| 0,53              | 3,53    | 2,23               | 1,31 | 1,08 | 1,04 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 0,80              | 3,98    | 2,45               | 1,36 | 1,09 | 1,04 | 4,20 | --   | 1,89 | --   | 0,54 |
| 1,07              | 4,50    | 2,71               | 1,42 | 1,10 | 1,05 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 1,20              | 4,78    | 2,84               | 1,46 | 1,11 | 1,06 | --   | --   | 1,58 | --   | --   |
| RET (%)           | CAL/CIM |                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
|                   | 0,10    | 0,27               | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10 | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40              | 3,37    | 2,15               | 1,29 | 1,07 | 1,03 | --   | --   | 1,31 | --   | --   |
| 0,53              | 3,58    | 2,26               | 1,31 | 1,08 | 1,04 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 0,80              | 3,98    | 2,45               | 1,36 | 1,09 | 1,04 | 4,20 | --   | 1,89 | --   | 0,54 |
| 1,07              | 4,33    | 2,62               | 1,40 | 1,10 | 1,05 | --   | --   | --   | --   | --   |
| 1,20              | 4,49    | 2,70               | 1,42 | 1,10 | 1,05 | --   | --   | 1,83 | --   | --   |

De acordo com a WTA 2-2-91, argamassas de recuperação devem apresentar resistência à compressão entre 1,5 e 5,0 MPa. Somente as argamassas com relação cal/cim superior a 0,93 não atenderam a esta prescrição, pois apresentaram resistências à compressão inferior a 1,5 MPa.

### 5.2.2 Resistência à Tração na Flexão

O modelo matemático que expressa o comportamento da resistência à tração na flexão das argamassas em função das variáveis independentes está descrito na equação 22. A análise por regressão não linear da resistência à tração apresentou significância na da relação cal/cimento e dos aditivos utilizados, além da interação entre a relação cal/cimento e o aditivo incorporador de ar. Os dados obtidos pela análise estão apresentados no apêndice D.

$$Ft = 0,16 + e^{(-3 \times CC^{0,65} - 0,78 \times IA^{4,97} + 0,2 \times HID + 1,279 \times RET^{0,286} + 1,68 \times CC \times IA)} \quad (\text{equação 22})$$

$$R^2 = 0,8866$$

Onde:

Ft: Resistência à tração na flexão, em MPa;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %;

RET: teor de retentor de água, em %.

A tabela 32 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da resistência à tração à flexão das argamassas, em função da relação cal/cim, para os teores de aditivo IA, HID e RET.

Observa-se na tabela 32 que, com o aumento da relação cal/cim, a resistência à tração diminui, independentemente do teor ou tipo de aditivo utilizado. Isto ocorre devido à redução do teor de cimento das argamassas, que é o principal responsável pela resistência mecânica do material. As argamassas com relação cal/cim de 1,10 apresentam resistências à tração praticamente constantes, independente do teor de IA utilizado. Isto se deve ao fato de que os teores dos aditivos foram calculados em relação à massa de cimento, pois à medida que a relação cal/cim aumenta, a quantidade de cimento diminui e conseqüentemente o teor de incorporador de ar.

De acordo com os valores previstos pelo modelo, observa-se que maiores resistências à tração ocorrem em argamassas com alto teor de HID e baixa relação cal/cim. Em relação ao aditivo RET, maiores resistências à tração ocorrem em argamassas com altos teores deste aditivo. A redução da resistência à tração em função do aumento da relação cal/cim, independente do teor de aditivo HID ou RET utilizado, é de aproximadamente 70%.

O comportamento da resistência à tração em argamassas com diferentes teores de cal em função do aumento do teor de incorporador de ar é apresentado na figura 27(a). Observa-se que as argamassas apresentam comportamentos de resistência à tração diferente em função da relação cal/cim. Relações baixas de cal/cim tendem a apresentar maiores reduções da resistência à tração com o aumento do teor de IA. Entretanto, à medida que a relação cal/cim aumenta, a resistência à tração tende a aumentar também. Isto pode ser devido ao fato de que o teor de aditivo de refere à massa de cimento na mistura, e esta é inversamente proporcional à relação cal/cim.

Tabela 32: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à tração na flexão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 2,26      | 2,27 | 2,20 | 1,78 | 1,44 | --         | --   | 2,22 | --   | --   |
| 0,27    | 1,41      | 1,46 | 1,49 | 1,28 | 1,07 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 0,78      | 0,85 | 0,95 | 0,91 | 0,80 | 0,62       | --   | 1,20 | --   | 1,02 |
| 0,97    | 0,53      | 0,59 | 0,72 | 0,75 | 0,70 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 0,45      | 0,51 | 0,64 | 0,70 | 0,67 | --         | --   | 0,68 | --   | --   |
| CAL/CIM | HID (%)   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 2,04      | 2,09 | 2,20 | 2,31 | 2,37 | --         | --   | 2,22 | --   | --   |
| 0,27    | 1,39      | 1,42 | 1,49 | 1,56 | 1,60 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 0,89      | 0,91 | 0,95 | 1,00 | 1,02 | 1,14       | --   | 1,20 | --   | 0,96 |
| 0,93    | 0,67      | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,76 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 0,60      | 0,61 | 0,64 | 0,67 | 0,68 | --         | --   | 0,68 | --   | --   |
| CAL/CIM | RET (%)   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 1,80      | 1,94 | 2,20 | 2,42 | 2,52 | --         | --   | 2,22 | --   | --   |
| 0,27    | 1,23      | 1,32 | 1,49 | 1,64 | 1,70 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 0,80      | 0,85 | 0,95 | 1,04 | 1,08 | 0,60       | --   | 1,20 | --   | 1,14 |
| 0,93    | 0,61      | 0,65 | 0,72 | 0,78 | 0,80 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 0,55      | 0,58 | 0,64 | 0,69 | 0,72 | --         | --   | 0,68 | --   | --   |

Ao avaliar-se o efeito do hidrofugante nas argamassas com diferentes relações cal/cim, conforme mostra a figura 27(b), percebe-se que para argamassas com baixa relação cal/cim, o aumento do teor de HID para 1,20% faz com que a resistência à tração aumente em até 16%. Estudos realizados por Bianchin (1999, p. 102) mostraram que há acréscimo da resistência à tração de aproximadamente 30% com o aumento de aditivo hidrofugante em argamassas mistas, para teores de HID de até 2,5%.

A figura 27(c) apresenta o comportamento da resistência à tração com o aumento do teor de retentor de água em argamassas com diferentes relações cal/cim. A resistência à tração tende a aumentar cerca de 40% para argamassa com relação cal/cim de 0,10. Em argamassas com alta relação cal/cim, este aumento é menor. O aumento da resistência à tração das argamassas em função do HID deve-se ao fato de que este aditivo permite que o material retenha maior quantidade de água, facilitando assim as reações de hidratação do cimento, aumentando assim a resistência mecânica do material.

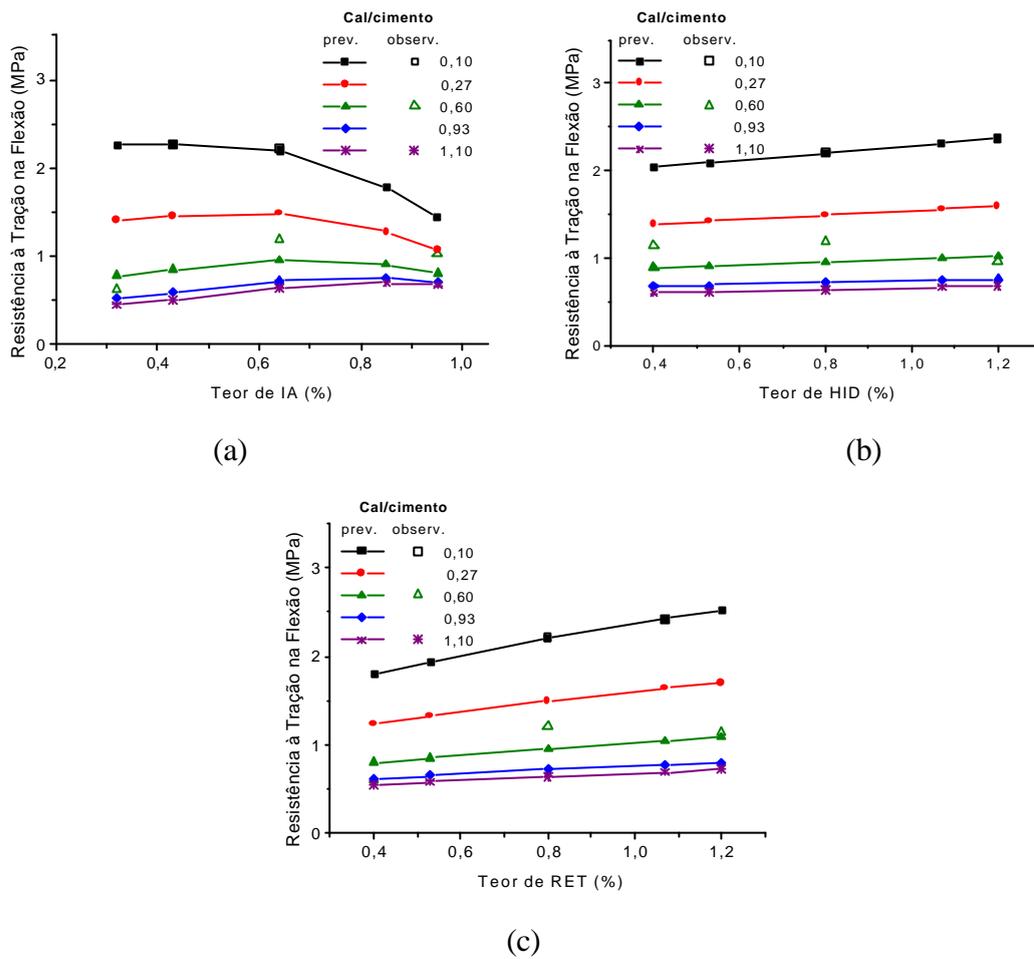


Figura 27: resistência à tração na flexão das argamassas em função dos teores de (a) IA (b) HID e (c) RET para diferentes teores de cal/cim

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da resistência à tração à flexão das argamassas, em função dos teores de aditivo IA, HID e RET e da relação cal/cim estão apresentados na tabela 33.

Tabela 33: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência à tração na flexão das argamassas em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim

| IA (%)      | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|-------------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|             | CAL/CIM   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|             | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| <b>0,32</b> | 2,26      | 1,41 | 0,78 | 0,53 | 0,45 | --         | --   | 0,62 | --   | --   |
| <b>0,43</b> | 2,27      | 1,46 | 0,85 | 0,59 | 0,51 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>0,64</b> | 2,20      | 1,49 | 0,95 | 0,72 | 0,64 | 2,22       | --   | 1,20 | --   | 0,68 |
| <b>0,85</b> | 1,78      | 1,28 | 0,91 | 0,75 | 0,70 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>0,95</b> | 1,44      | 1,07 | 0,80 | 0,70 | 0,67 | --         | --   | 1,02 | --   | --   |
| HID (%)     | CAL/CIM   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|             | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| <b>0,40</b> | 2,04      | 1,39 | 0,89 | 0,67 | 0,60 | --         | --   | 1,14 | --   | --   |
| <b>0,53</b> | 2,09      | 1,42 | 0,91 | 0,69 | 0,61 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>0,80</b> | 2,20      | 1,49 | 0,95 | 0,72 | 0,64 | 2,22       | --   | 1,20 | --   | 0,68 |
| <b>1,07</b> | 2,31      | 1,56 | 1,00 | 0,75 | 0,67 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>1,20</b> | 2,37      | 1,60 | 1,02 | 0,76 | 0,68 | --         | --   | 0,96 | --   | --   |
| RET (%)     | CAL/CIM   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|             | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| <b>0,40</b> | 1,80      | 1,23 | 0,80 | 0,61 | 0,55 | --         | --   | 0,60 | --   | --   |
| <b>0,53</b> | 1,94      | 1,32 | 0,85 | 0,65 | 0,58 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>0,80</b> | 2,20      | 1,49 | 0,95 | 0,72 | 0,64 | 2,22       | --   | 1,20 | --   | 0,68 |
| <b>1,07</b> | 2,42      | 1,64 | 1,04 | 0,78 | 0,69 | --         | --   | --   | --   | --   |
| <b>1,20</b> | 2,52      | 1,70 | 1,08 | 0,80 | 0,72 | --         | --   | 1,14 | --   | --   |

### 5.2.3 Relação Resistência à Compressão/Resistência à Tração na Flexão

O modelo matemático que expressa a relação entre as resistências à compressão e à tração na flexão está descrito na equação 23. A análise por regressão não linear dos resultados mostrou a significância da relação cal/cimento e dos aditivos incorporador de ar e retentor de água na relação  $f_c/f_t$ , bem como da interação entre os dois primeiros. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos através desta análise.

$$f_c / f_t = 0,75 + e^{(0,65 \times CC^{0,3} + 0,001 \times IA^{-5,37} - 0,3 \times RET^{0,51} - 1,34 \times CC \times IA)} \quad (\text{equação 23})$$

$$R^2 = 0,5189$$

Onde:

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

RET: teor de retentor de água, em %.

O coeficiente de determinação obtido através de regressão não linear dos resultados observados da relação entre as resistências à compressão e à tração das argamassas foi baixo (51,89%). Este fato pode ser devido ao alto coeficiente de variação de alguns resultados

observados (apêndice C). Assim, sugere-se que ensaios em argamassa endurecida sejam realizados com um maior número de corpos-de-prova que os recomendados pela norma.

As figuras 28(a) e 28(b) apresentam o modelo do comportamento da relação  $f_c/f_t$  das argamassas em função da relação cal/cim para argamassas com diferentes teores de IA e RET, respectivamente. Observando-se a figura 28(a), verifica-se que há uma redução na relação  $f_c/f_t$  com o aumento da relação cal/cim, sendo este comportamento mais acentuado para argamassas com teor de IA maior, sendo esta redução de 33%. Segundo Neville (1997, p. 316), a redução da relação  $f_c/f_t$  diminui com o aumento do teor de ar incorporado nas argamassas, pois a influência negativa da presença de ar é maior na resistência à compressão que na resistência à tração. Comportamento semelhante é observado na figura 28(b), onde a relação  $f_c/f_t$  também apresenta redução com o aumento da relação cal/cim, sendo esta de aproximadamente 24%, independentemente do teor de RET utilizado. Segundo estudos realizados por John (2003, p. 57), a adição de cal hidratada em argamassas de cimento Portland CP I reduziu significativamente o módulo de elasticidade das argamassas, sem afetar na mesma proporção a sua resistência à tração, resultando na redução da relação entre as resistências à compressão e à tração do material.

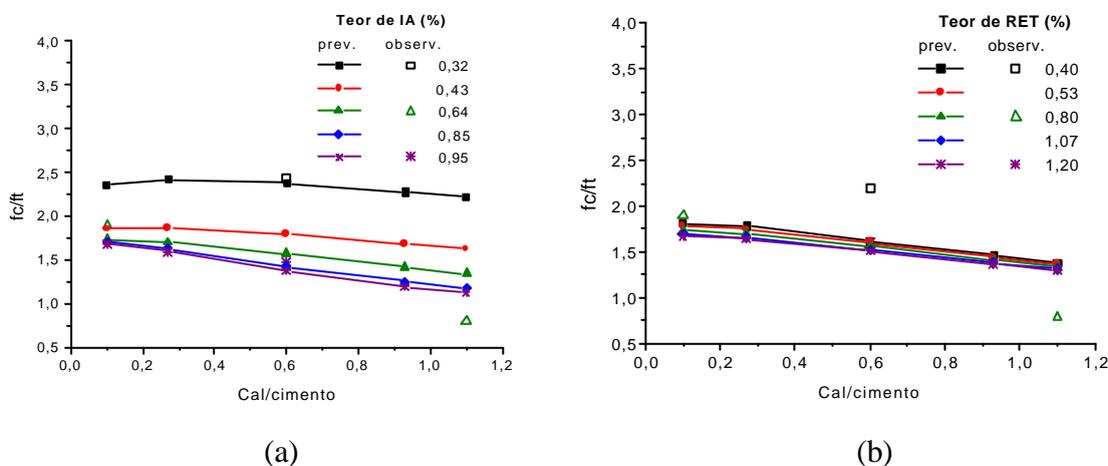


Figura 28: relação  $f_c/f_t$  das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) RET

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da relação  $f_c/f_t$ , em função da relação cal/cim e dos teores de aditivo IA e RET estão apresentados na tabela 34.

A tabela 35 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da relação  $f_c/f_t$ , em função dos teores de aditivo IA e RET e da relação cal/cim.

Observa-se na tabela 35 que, com o aumento do teor do aditivo incorporador de ar, a relação entre as resistências diminui independentemente da relação cal/cim da argamassa, sendo que maiores reduções são observadas em argamassas com maior relação cal/cim. Esta redução na relação  $f_c/f_t$  ocorre devido ao fato de que a resistência à compressão tende a sofrer maiores reduções devido ao volume de vazios presente nas argamassas quando comparada com a resistência à tração.

Tabela 34: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação  $f_c/f_t$  das argamassas em função relação cal/cim e dos teores de IA e RET

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      | RET (%)    |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 2,35      | 1,85 | 1,73 | 1,70 | 1,68 | --         | --   | 1,89 | --   | --   |
| 0,27    | 2,41      | 1,86 | 1,70 | 1,62 | 1,59 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 2,37      | 1,79 | 1,56 | 1,42 | 1,37 | 2,43       | --   | 1,57 | --   | 1,47 |
| 0,93    | 2,27      | 1,68 | 1,41 | 1,25 | 1,19 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 2,21      | 1,62 | 1,34 | 1,18 | 1,12 | --         | --   | 0,79 | --   | --   |
| CAL/CIM | RET (%)   |      |      |      |      | RET (%)    |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 1,81      | 1,78 | 1,73 | 1,69 | 1,67 | --         | --   | 1,89 | --   | --   |
| 0,27    | 1,78      | 1,75 | 1,70 | 1,66 | 1,64 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,62      | 1,60 | 1,56 | 1,52 | 1,51 | 2,20       | --   | 1,57 | --   | 1,61 |
| 0,93    | 1,46      | 1,44 | 1,41 | 1,38 | 1,37 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,38      | 1,37 | 1,34 | 1,31 | 1,30 | --         | --   | 0,79 | --   | --   |

Tabela 35: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da relação  $f_c/f_t$  das argamassas em função dos teores de IA e RET e da relação cal/cim

| IA (%)  | Previstos   |      |      |      |      | Observados  |      |      |      |      |
|---------|-------------|------|------|------|------|-------------|------|------|------|------|
|         | CAL/CIMENTO |      |      |      |      | CAL/CIMENTO |      |      |      |      |
|         | 0,10        | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10        | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32    | 2,35        | 2,41 | 2,37 | 2,27 | 2,21 | --          | --   | 2,43 | --   | --   |
| 0,43    | 1,85        | 1,86 | 1,79 | 1,68 | 1,62 | --          | --   | --   | --   | --   |
| 0,64    | 1,73        | 1,70 | 1,56 | 1,41 | 1,34 | 2,22        | --   | 1,57 | --   | 0,68 |
| 0,85    | 1,70        | 1,62 | 1,42 | 1,25 | 1,18 | --          | --   | --   | --   | --   |
| 0,95    | 1,68        | 1,59 | 1,37 | 1,19 | 1,12 | --          | --   | 1,47 | --   | --   |
| RET (%) | CAL/CIMENTO |      |      |      |      | CAL/CIMENTO |      |      |      |      |
|         | 0,10        | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10        | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40    | 1,81        | 1,78 | 1,62 | 1,46 | 1,38 | --          | --   | 2,20 | --   | --   |
| 0,53    | 1,78        | 1,75 | 1,60 | 1,44 | 1,37 | --          | --   | --   | --   | --   |
| 0,80    | 1,73        | 1,70 | 1,56 | 1,41 | 1,34 | 1,89        | --   | 1,57 | --   | 0,79 |
| 1,07    | 1,69        | 1,66 | 1,52 | 1,38 | 1,31 | --          | --   | --   | --   | --   |
| 1,20    | 1,67        | 1,64 | 1,51 | 1,37 | 1,30 | --          | --   | 1,61 | --   | --   |

Em relação ao aditivo retentor de água, verifica-se na tabela 35 que a relação  $f_c/f_t$  diminui cerca de 6% com o aumento deste aditivo. Isto se deve ao fato de que o aumento médio da

resistência à tração na flexão (35%) foi maior que o aumento médio da resistência à compressão (10%), em função do aumento do teor do aditivo RET.

De acordo com o caderno de recomendações WTA, a relação entre as resistências à compressão e à tração na flexão não deve exceder 3 unidades. Desta forma, todas as argamassas estudadas, independentemente da relação cal/cim ou do teor de aditivo utilizado, atendem a esta prescrição para argamassas de recuperação.

#### 5.2.4 Absorção de Água por Capilaridade

O tratamento estatístico dos resultados, através da regressão não linear, apresentou um modelo matemático que expressa o comportamento da absorção capilar em função da relação cal/cimento e dos aditivos utilizados (equação 24). Os dados obtidos através desta análise estão apresentados no apêndice D.

$$AC = 1,950 + e^{(2 \times CC^{0,31} - 0,410 \times HID - 0,285 \times CC \times IA)} \quad (\text{equação 24})$$

$$R^2 = 0,866$$

Onde:

AC: Absorção capilar, em  $\text{kg/m}^2$ ;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %.

O aditivo retentor não apresentou influência significativa na absorção capilar das argamassas. Entretanto, segundo a análise dos resultados, houve a influência da relação cal/cim e dos aditivos IA e HID, bem como da interação entre os dois primeiros fatores.

As figuras 29(a) e 29(b) apresentam o comportamento da absorção capilar em função do aumento da relação cal/cim em argamassas com diferentes teores de IA e HID, respectivamente. Em ambas situações percebe-se que com o aumento da relação cal/cim, ocorre o aumento da absorção capilar das argamassas. Este aumento é aproximadamente 71% tanto para as argamassas com diferentes teores de IA como de HID.

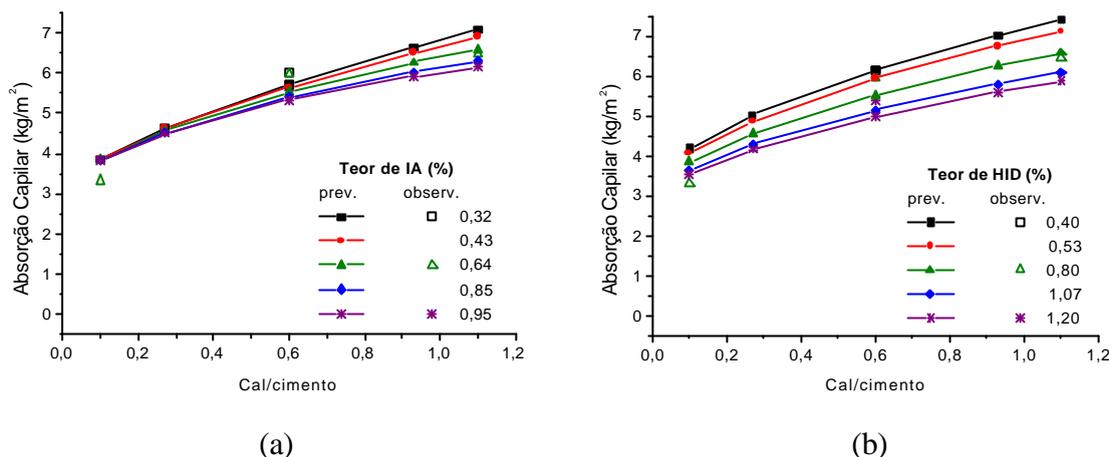


Figura 29: absorção capilar das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) HID

Observa-se que há uma relação entre a absorção capilar, a resistência à compressão, a porosidade aparente e a relação cal/cim. À medida que esta relação aumenta nas argamassas, a absorção por capilaridade e a porosidade aumentam e, por outro lado, a resistência à compressão diminui.

A tabela 36 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da absorção capilar das argamassas, em função da relação cal/cim e dos aditivos IA e HID.

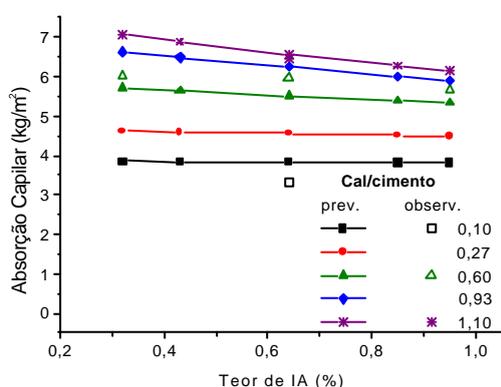
Tabela 36: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção capilar das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA e HID

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      | HID (%)    |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 3,86      | 3,85 | 3,84 | 3,83 | 3,82 | --         | --   | 3,32 | --   | --   |
| 0,27    | 4,62      | 4,60 | 4,56 | 4,51 | 4,49 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 5,71      | 5,64 | 5,51 | 5,39 | 5,33 | 6,01       | --   | 5,95 | --   | 5,66 |
| 0,93    | 6,63      | 6,49 | 6,25 | 6,01 | 5,91 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 7,06      | 6,89 | 6,57 | 6,28 | 6,14 | --         | --   | 6,46 | --   | --   |
| CAL/CIM | HID (%)   |      |      |      |      | HID (%)    |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 4,18      | 4,06 | 3,84 | 3,64 | 3,55 | --         | --   | 3,32 | --   | --   |
| 0,27    | 5,02      | 4,86 | 4,56 | 4,28 | 4,16 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 6,15      | 5,93 | 5,51 | 5,14 | 4,97 | 6,15       | --   | 5,95 | --   | 5,37 |
| 0,93    | 7,01      | 6,75 | 6,25 | 5,80 | 5,60 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 7,40      | 7,11 | 6,57 | 6,09 | 5,87 | --         | --   | 6,46 | --   | --   |

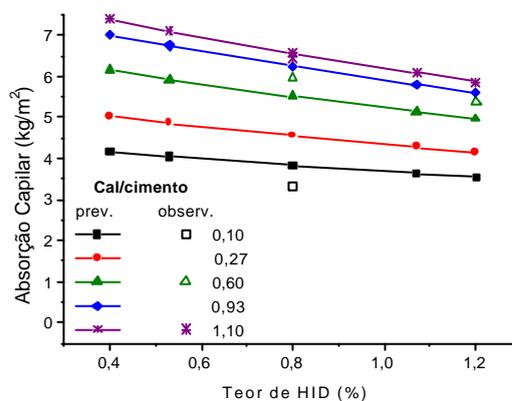
A redução da absorção capilar nas argamassas devido ao uso de aditivos IA e HID pode ser observada nas figuras 30(a) e 30(b), respectivamente. De acordo com a figura 30(a), percebe-se que o efeito do incorporador é praticamente nulo em argamassas com baixa relação cal/cim. Com o aumento desta relação nas argamassas, o efeito do teor de IA na

redução da capilaridade é mais acentuado, chegando a 13% em argamassas com relação cal/cim de 1,10. Uma hipótese a ser considerada é o fato de que o efeito do aditivo incorporador de ar é menor em argamassas com altos teores de cimento (baixa relação cal/cim), pois este, por conter pozolanas, faz com seja necessário um maior teor deste aditivo para produzir o mesmo volume de pequenas bolhas no material (NEVILLE, 1997, p. 544). A redução da absorção por capilaridade das argamassas em função do aumento do teor de IA, se deve ao fato de que este aditivo é responsável pela formação de pequenas bolhas de ar que “quebram” a capilaridade. Desta forma, percebe-se que a menor absorção por capilaridade ocorre altos teores deste aditivo.

A figura 30(b) apresenta o comportamento das argamassas com diversas relações cal/cim em função do aditivo HID. A redução da capilaridade, devido ao aumento do teor de hidrofugante, ocorre independentemente do teor de cal utilizado, sendo que esta redução é de aproximadamente 19%. Isto se deve ao fato de que este aditivo, por reter maior quantidade de água no material, favorece as reações de hidratação do cimento, diminuindo assim a permeabilidade do material.



(a)



(b)

Figura 30: absorção capilar das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados de absorção capilar das argamassas em função do teor dos aditivos IA e HID e da relação cal/cim estão apresentados na tabela 37.

O Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 prescreve que as argamassas de recuperação devem apresentar valores mínimos de absorção capilar de  $0,30 \text{ kg/m}^2$ . Assim sendo, todas as argamassas estudadas estão de acordo com esta recomendação. Esta prescrição é necessária para que os sais solubilizados no interior da alvenaria possam ser transportados para o revestimento de argamassa.

Tabela 37: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção capilar das argamassas em função dos teores de IA e HID e da relação cal/cim

|         | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
| IA (%)  | CAL/CIM   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32    | 3,86      | 4,62 | 5,71 | 6,63 | 7,06 | --         | --   | 6,01 | --   | --   |
| 0,43    | 3,85      | 4,60 | 5,64 | 6,49 | 6,89 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64    | 3,84      | 4,56 | 5,51 | 6,25 | 6,57 | 3,32       | --   | 5,95 | --   | 6,46 |
| 0,85    | 3,83      | 4,51 | 5,39 | 6,01 | 6,28 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95    | 3,82      | 4,49 | 5,33 | 5,91 | 6,14 | --         | --   | 5,66 | --   | --   |
| HID (%) | CAL/CIM   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40    | 4,18      | 5,02 | 6,15 | 7,01 | 7,40 | --         | --   | 6,15 | --   | --   |
| 0,53    | 4,06      | 4,86 | 5,93 | 6,75 | 7,11 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80    | 3,84      | 4,56 | 5,51 | 6,25 | 6,57 | 3,32       | --   | 5,95 | --   | 6,46 |
| 1,07    | 3,64      | 4,28 | 5,14 | 5,80 | 6,09 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20    | 3,55      | 4,16 | 4,97 | 5,60 | 5,87 | --         | --   | 5,37 | --   | --   |

### 5.2.5 Altura de Penetração de Água por Capilaridade

Ao realizar o tratamento estatístico por regressão múltipla, obteve-se o modelo matemático que apresenta a altura de penetração de água em função da relação cal/cim e dos aditivos utilizados. Esta equação está abaixo descrita (equação 25), sendo que os dados obtidos através desta análise estão apresentados no apêndice D.

$$H = 22,636 + 0,583 \times CC - 0,423 \times HID - 0,389 \times CC^2 + 0,468 \times CC \times HID \quad (\text{equação 25})$$

$$R^2 = 0,8889$$

Onde:

H: altura de penetração de água, em mm;

CC: relação cal/cim, em massa;

HID: teor de hidrofugante, em %.

Os valores foram codificados de acordo com a tabela 23. Verifica-se que houve significância apenas da relação cal/cim e do aditivo HID, bem como da interação entre eles.

A figura 31(a) apresenta o comportamento da altura de penetração de água em função da relação cal/cim, para argamassas com diferentes teores de aditivo hidrofugante. Verifica-se que a altura de penetração de água em argamassas com baixos teores de HID apresenta pequeno aumento com o aumento da relação cal/cimento até 0,6, sendo que a partir deste valor, a altura de penetração de água tende a reduzir. Entretanto, à medida que o teor de HID aumenta, a altura de penetração de água tende a aumentar com o acréscimo de cal na

argamassa, chegando a 20% em argamassas com 1,20% de HID quando a relação cal/cim varia de 0,10 a 1,10. Desta forma, alturas de penetração de água maiores são encontradas em argamassas com altos teores de cal, sendo que a cal é responsável pela maior permeabilidade destes materiais.

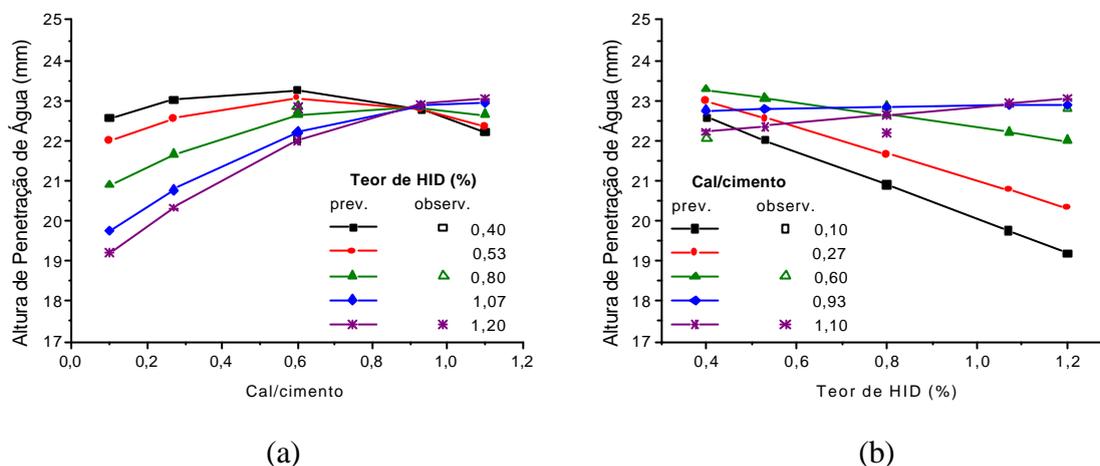


Figura 31: altura de penetração de água por capilaridade das argamassas em função (a) da relação cal/cim e (b) do teor de HID

O efeito do teor de HID na altura de penetração de água pode ser observado na figura 31(b). Argamassas com baixo teor de HID, independentemente da relação cal/cim, apresentam alturas de penetração de água aproximadas. Entretanto, com o aumento do teor deste aditivo, o comportamento das argamassas varia, dependendo da relação cal/cim presente no material. Argamassas com baixa relação cal/cim apresentam redução na altura de penetração de água com o aumento do HID, chegando este a 15% em argamassas com relação cal/cim de 0,10. Desta forma, percebe-se que o efeito do aditivo hidrofugante é maior em argamassas com menores relações cal/cim, pois a quantidade deste aditivo é maior.

Segundo Ramachandran (1984, p. 518), a redução da altura de penetração de água nas argamassas pode ser explicada pelo fato de que os hidrofugantes, ao reagirem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) produzem estearatos de cálcio insolúvel. Estes estearatos possuem a propriedade de revestir a superfície do poro, tornando o material hidrofóbico. Neville (1997, p. 270) atribui o efeito hidrófobo destes aditivos devido ao aumento do ângulo de contato entre a água e as paredes dos poros capilares, fazendo com que a mesma seja empurrada para fora dos poros.

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da altura de penetração de água por capilaridade das argamassas em função da relação cal/cim e do aditivo IA estão apresentados na tabela 38.

Tabela 38: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da altura de penetração de água das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA

| CAL/CIM | Previstos   |       |       |       |       | Observados |      |       |      |       |
|---------|-------------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|
|         | HID (%)     |       |       |       |       | HID (%)    |      |       |      |       |
|         | 0,40        | 0,53  | 0,80  | 1,07  | 1,20  | 0,40       | 0,53 | 0,80  | 1,07 | 1,20  |
| 0,10    | 22,57       | 22,01 | 20,89 | 19,76 | 19,20 | --         | --   | 10,03 | --   | --    |
| 0,27    | 23,00       | 22,56 | 21,66 | 20,77 | 20,33 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 23,27       | 23,06 | 22,64 | 22,21 | 22,00 | 22,04      | --   | 22,85 | --   | 22,81 |
| 0,97    | 22,76       | 22,78 | 22,83 | 22,88 | 22,90 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 22,22       | 22,36 | 22,64 | 22,92 | 23,06 | --         | --   | 22,21 | --   | --    |
| HID (%) | CAL/CIMENTO |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10        | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,40    | 22,57       | 23,00 | 23,27 | 22,76 | 22,22 | --         | --   | 22,04 | --   | --    |
| 0,53    | 22,01       | 22,56 | 23,06 | 22,78 | 22,36 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,80    | 20,89       | 21,66 | 22,64 | 22,83 | 22,64 | 10,03      | --   | 22,85 | --   | 22,21 |
| 1,07    | 19,76       | 20,77 | 22,21 | 22,88 | 22,92 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,20    | 19,20       | 20,33 | 22,00 | 22,90 | 23,06 | --         | --   | 22,81 | --   | --    |

Analisando os resultados encontrados, observa-se que nenhuma das argamassas estudadas apresentou altura de penetração inferior a 5 mm, não atendendo as recomendações da WTA 2-2-91.

### 5.2.6 Massa Específica Aparente

Ao fazer-se o tratamento estatístico através da regressão não linear, obteve-se o modelo matemático que expressa o comportamento da massa específica aparente das argamassas em função dos aditivos e da relação cal/cim, conforme a equação 26. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos através desta análise.

$$Me = 0,60 + e^{(-0,36 \times CC^{1,42} - 0,127 \times IA + 0,118 \times HID + 0,285 \times CC \times IA)} \quad (\text{equação 26})$$

$$R^2 = 0,8044$$

Onde:

Me: massa específica aparente das argamassas endurecidas, em kg/dm<sup>3</sup>;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %.

Segundo a equação acima, verifica-se que não houve significância do aditivo retentor de água na massa específica seca das argamassas.

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da massa específica das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID estão apresentados na tabela 39.

Tabela 39: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados massa específica das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID

| CAL/CIM | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | IA (%)    |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,32      | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10    | 1,65      | 1,64 | 1,62 | 1,60 | 1,59 | --         | --   | 1,67 | --   | --   |
| 0,27    | 1,62      | 1,62 | 1,61 | 1,60 | 1,59 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,54      | 1,54 | 1,55 | 1,56 | 1,56 | 1,53       | --   | 1,59 | --   | 1,57 |
| 0,93    | 1,43      | 1,44 | 1,47 | 1,49 | 1,50 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,37      | 1,39 | 1,42 | 1,45 | 1,47 | --         | --   | 1,46 | --   | --   |
| CAL/CIM | HID (%)   |      |      |      |      |            |      |      |      |      |
|         | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10    | 1,57      | 1,59 | 1,62 | 1,65 | 1,67 | --         | --   | 1,67 | --   | --   |
| 0,27    | 1,56      | 1,57 | 1,61 | 1,64 | 1,65 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60    | 1,51      | 1,52 | 1,55 | 1,58 | 1,59 | 1,52       | --   | 1,59 | --   | 1,57 |
| 0,93    | 1,43      | 1,44 | 1,47 | 1,50 | 1,51 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10    | 1,38      | 1,39 | 1,42 | 1,45 | 1,46 | --         | --   | 1,46 | --   | --   |

De acordo com os valores apresentados na tabela 39, verifica-se que com o aumento da relação cal/cim, a massa específica diminui, sendo esta redução de aproximadamente 12% para argamassas com diferentes teores de IA e HID. Comportamento similar pode ser verificado no estudo realizado por Bianchin (1999, p. 135), que avaliou a massa específica de argamassas 1:1:6 e 1:2:9. Entretanto, nesta pesquisa, esta redução foi de apenas 2% para argamassas com maior quantidade de cal (1:2:9).

As figuras 32(a) e 32(b) apresentam o comportamento da massa específica das argamassas com diferentes relações cal/cim em função dos aditivos IA e HID, respectivamente. Percebe-se que com o aumento do teor de IA, em argamassas com menor relação cal/cim, a massa específica reduz cerca de 4%. Entretanto, à medida que a relação cal/cim aumenta, ocorre o inverso, sendo que a massa específica aumenta em até 7% com o aumento do teor de IA. Da mesma forma, em estudo realizado por Calhau e Tristão (1999, p. 225) em argamassas 1:2:9, verificou-se a redução de aproximadamente 10% na massa específica ao adicionar 0,5% de aditivo incorporador de ar no material. Em relação do HID, percebe-se que a massa específica é diretamente proporcional a este aditivo, independentemente da relação cal/cim das argamassas. Este aumento é de cerca de 6%, e se deve ao efeito retentor de água do aditivo, que favorece as reações de hidratação do cimento e da carbonatação da cal, aumentando assim a densidade do material. Em argamassas estudadas por Bianchin (1999,

p. 112), verificou-se um comportamento similar, onde a massa específica do material aumentou cerca de 7% ao aumentar a quantidade de aditivo hidrofugante de 0 para 3%.

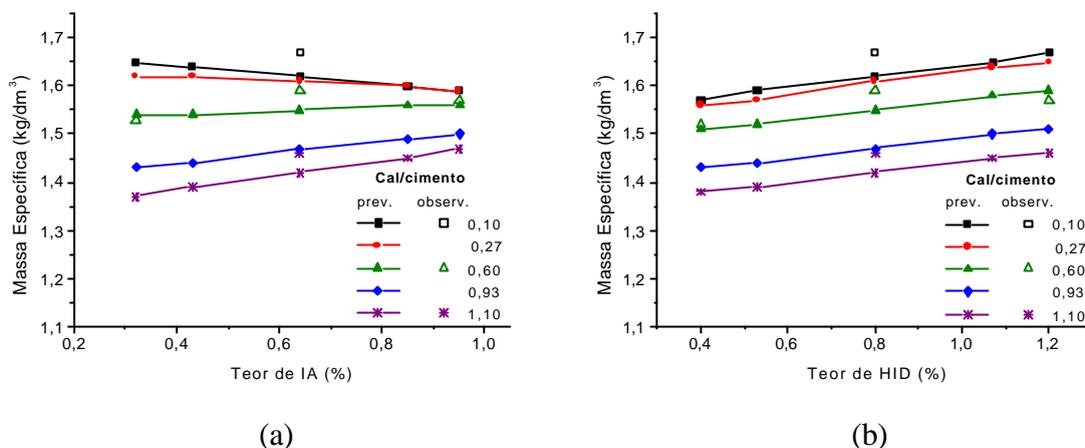


Figura 32: massa específica das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim

A tabela 40 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da massa específica das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID e da relação cal/cim.

Tabela 40: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da massa específica das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID e da relação cal/cim

| IA (%)  | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|---------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|         | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32    | 1,65      | 1,62 | 1,54 | 1,43 | 1,37 | --         | --   | 1,53 | --   | --   |
| 0,43    | 1,64      | 1,62 | 1,54 | 1,44 | 1,39 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64    | 1,62      | 1,61 | 1,55 | 1,47 | 1,42 | 1,67       | --   | 1,59 | --   | 1,46 |
| 0,85    | 1,60      | 1,60 | 1,56 | 1,49 | 1,45 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95    | 1,59      | 1,59 | 1,56 | 1,50 | 1,47 | --         | --   | 1,57 | --   | --   |
| HID (%) | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|         | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|         | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40    | 1,57      | 1,56 | 1,51 | 1,43 | 1,38 | --         | --   | 1,52 | --   | --   |
| 0,53    | 1,59      | 1,57 | 1,52 | 1,44 | 1,39 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80    | 1,62      | 1,61 | 1,55 | 1,47 | 1,42 | 1,67       | --   | 1,59 | --   | 1,46 |
| 1,07    | 1,65      | 1,64 | 1,58 | 1,50 | 1,45 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20    | 1,67      | 1,65 | 1,59 | 1,51 | 1,46 | --         | --   | 1,57 | --   | --   |

### 5.2.7 Absorção de Água por Imersão

Fazendo-se a análise por regressão não linear, foi obtido um modelo matemático que expressa o comportamento da absorção de água por imersão das argamassas em função da relação cal/cimento e dos aditivos utilizados. Este modelo é apresentado na equação 27. No apêndice D estão apresentados os dados obtidos através desta análise.

$$I = 21,60 + \exp^{(2,95 \times CC^{0,677} - 0,490 \times IA - 1,069 \times IA + 0,381 \times RET)} \quad (\text{equação 27})$$

$$R^2 = 0,8776$$

Onde:

I: absorção de água por imersão, em %;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %;

RET: teor de retentor de água, em %.

Através do modelo, verifica-se que há significância da relação cal/cim e dos aditivos IA, HID e RET na absorção por imersão. Entretanto, não há interação entre as variáveis analisadas.

As figuras 33(a), 33(b) e 33(c) apresentam o comportamento da absorção por imersão das argamassas em função da relação cal/cimento para diferentes teores de IA, HID e RET, respectivamente. Percebe-se que à medida que a quantidade de cal aumenta, independentemente do teor de aditivo utilizado, a absorção por imersão aumenta, sendo esta de aproximadamente 40%. Ensaio realizado por Bianchin (1999, p. 110), apresentaram resultados semelhantes, uma vez que argamassas 1:2:9 (cimento:cal:areia) apresentaram maior absorção de água por imersão que as argamassas 1:1:6.

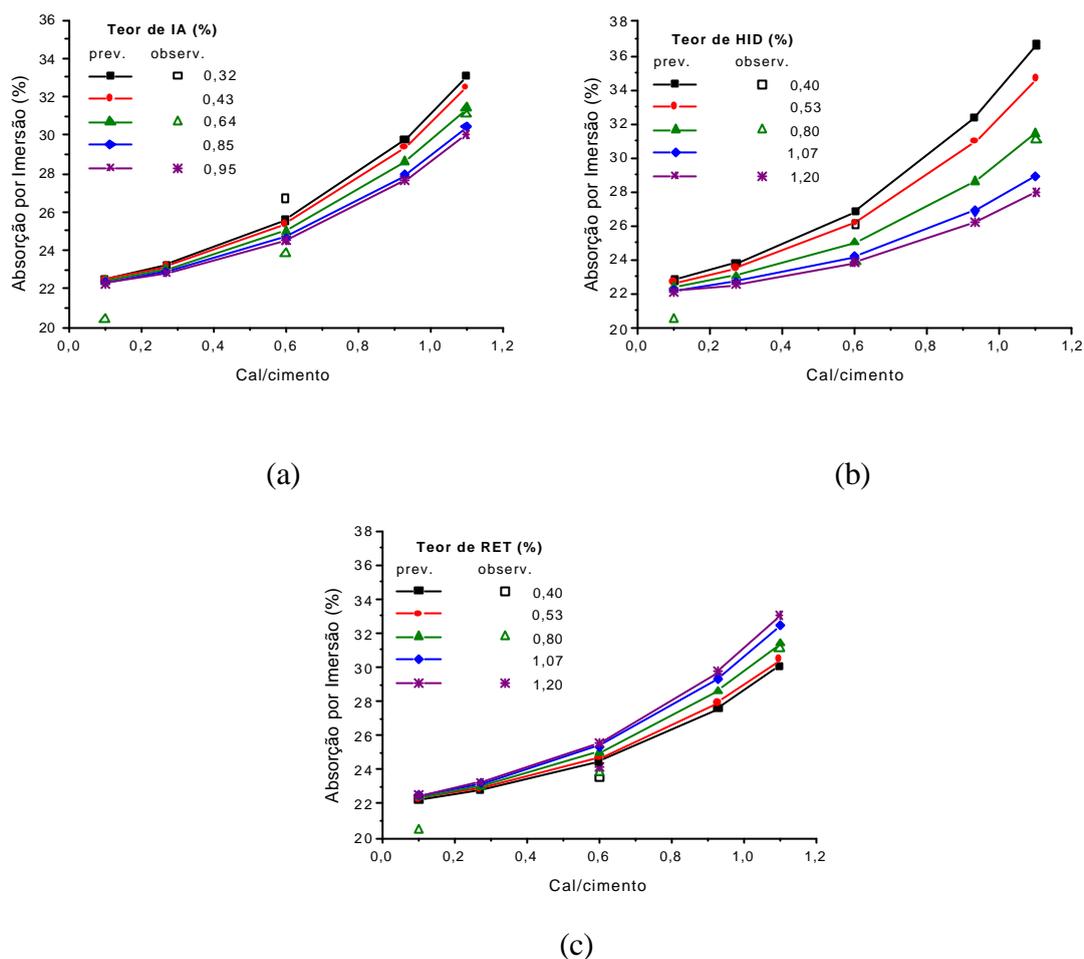


Figura 33: absorção de água por imersão das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA (b) HID e (c) RET

A tabela 41 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da absorção de água por imersão das argamassas, em função da relação cal/cim, para os teores de aditivo IA, HID e RET.

Tabela 41: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção por imersão das argamassas em função da relação cal/cim e dos teores de IA, HID e RET

| CAL/CIM | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |       |      |       |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|
|         | IA (%)    |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,32      | 0,43  | 0,64  | 0,85  | 0,95  | 0,32       | 0,43 | 0,64  | 0,85 | 0,95  |
| 0,10    | 22,52     | 22,47 | 22,38 | 22,31 | 22,27 | --         | --   | 20,44 | --   | --    |
| 0,27    | 23,26     | 23,18 | 23,02 | 22,88 | 22,82 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 25,58     | 25,37 | 25,00 | 24,67 | 24,52 | 26,72      | --   | 23,84 | --   | 24,53 |
| 0,93    | 29,78     | 29,35 | 28,59 | 27,91 | 27,61 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 33,07     | 32,47 | 31,40 | 30,45 | 30,02 | --         | --   | 31,05 | --   | --    |
| CAL/CIM | HID (%)   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,40      | 0,53  | 0,80  | 1,07  | 1,20  | 0,40       | 0,53 | 0,80  | 1,07 | 1,20  |
| 0,10    | 22,80     | 22,65 | 22,38 | 22,19 | 22,11 | --         | --   | 20,44 | --   | --    |
| 0,27    | 23,78     | 23,50 | 23,02 | 22,67 | 22,53 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 26,81     | 26,14 | 25,00 | 24,15 | 23,82 | 26,08      | --   | 23,84 | --   | 23,81 |
| 0,93    | 32,32     | 30,93 | 28,59 | 26,84 | 26,16 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 36,63     | 34,68 | 31,40 | 28,95 | 27,99 | --         | --   | 31,05 | --   | --    |
| CAL/CIM | RET (%)   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,40      | 0,53  | 0,80  | 1,07  | 1,20  | 0,40       | 0,53 | 0,80  | 1,07 | 1,20  |
| 0,10    | 22,27     | 22,31 | 22,38 | 22,47 | 22,51 | --         | --   | 20,44 | --   | --    |
| 0,27    | 22,82     | 22,88 | 23,02 | 23,18 | 23,26 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 24,52     | 24,67 | 25,00 | 25,37 | 25,56 | 23,49      | --   | 23,84 | --   | 24,12 |
| 0,93    | 27,60     | 27,91 | 28,59 | 29,35 | 29,74 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 30,02     | 30,45 | 31,40 | 32,47 | 33,02 | --         | --   | 31,05 | --   | --    |

Ao observar o comportamento das argamassas em função do aditivo incorporador de ar, com mostrado na figura 34(a), as mesmas apresentam redução da absorção por imersão com o aumento deste aditivo à medida que a relação cal/cim aumenta. Comportamento semelhante pode ser observado na figura 34(b). Com o aumento do teor de hidrofugante nas argamassas, a absorção por imersão tende a diminuir à medida que a relação cal/cim aumenta. O mesmo fenômeno foi observado no estudo realizado por Bianchin (1999, p. 109). Na figura 35(c) ocorre o inverso, pois à medida que se aumenta o teor de RET, a absorção por imersão tende a crescer, sendo que maiores absorções de água são observadas em argamassas com maior relação cal/cim.

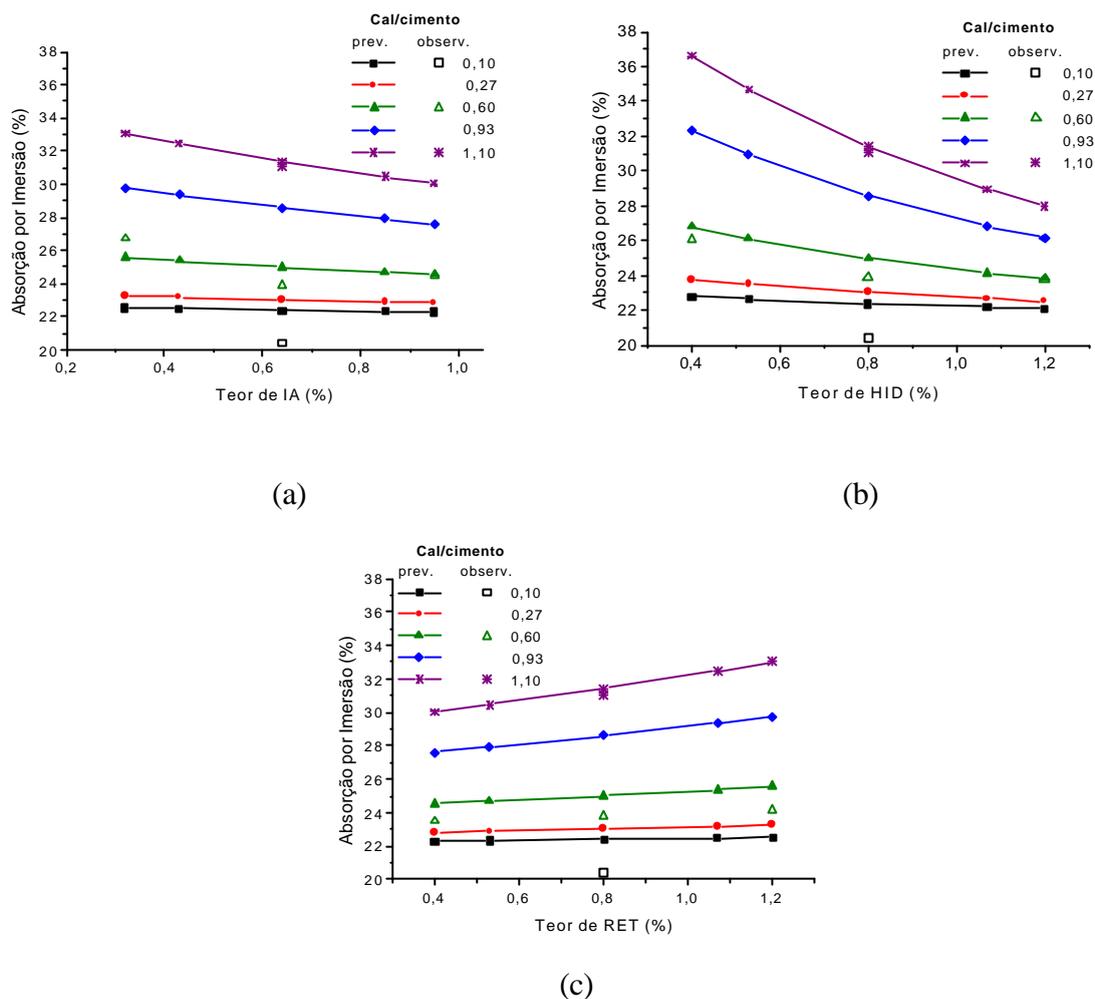


Figura 34: absorção por imersão das argamassas em função dos teores de (a) IA (b) HID e (c) RET para diferentes teores de cal/cim

Verifica-se que há uma relação inversamente proporcional entre o teor de ar incorporado e a absorção por imersão e absorção capilar. À medida que o teor de ar incorporado aumenta nas argamassas, tanto a absorção por imersão, como a absorção capilar diminui.

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da absorção de água por imersão, em função dos teores de aditivo IA, HID e RET e da relação cal/cim, estão apresentados na tabela 42.

Tabela 42: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da absorção por imersão em função dos teores de IA, HID e RET e da relação cal/cim

| IA (%)  | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |       |      |       |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|
|         | CAL/CIM   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,32    | 22,52     | 23,26 | 25,58 | 29,78 | 33,07 | --         | --   | 26,72 | --   | --    |
| 0,43    | 22,47     | 23,18 | 25,37 | 29,35 | 32,47 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,64    | 22,38     | 23,02 | 25,00 | 28,59 | 31,40 | 20,44      | --   | 23,84 | --   | 31,05 |
| 0,85    | 22,31     | 22,88 | 24,67 | 27,91 | 30,45 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,95    | 22,27     | 22,82 | 24,52 | 27,61 | 30,02 | --         | --   | 24,53 | --   | --    |
| HID (%) | CAL/CIM   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,40    | 22,80     | 23,78 | 26,81 | 32,32 | 36,63 | --         | --   | 26,08 | --   | --    |
| 0,53    | 22,65     | 23,50 | 26,14 | 30,93 | 34,68 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,80    | 22,38     | 23,02 | 25,00 | 28,59 | 31,40 | 20,44      | --   | 23,84 | --   | 31,05 |
| 1,07    | 22,19     | 22,67 | 24,15 | 26,84 | 28,95 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,20    | 22,11     | 22,53 | 23,82 | 26,16 | 27,99 | --         | --   | 23,81 | --   | --    |
| RET (%) | CAL/CIM   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,40    | 22,27     | 22,82 | 24,52 | 27,60 | 30,02 | --         | --   | 23,49 | --   | --    |
| 0,53    | 22,31     | 22,88 | 24,67 | 27,91 | 30,45 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,80    | 22,38     | 23,02 | 25,00 | 28,59 | 31,40 | 20,44      | --   | 23,84 | --   | 31,05 |
| 1,07    | 22,47     | 23,18 | 25,37 | 29,35 | 32,47 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,20    | 22,51     | 23,26 | 25,56 | 29,74 | 33,02 | --         | --   | 24,12 | --   | --    |

### 5.2.8 Índice de Vazios (Porosidade Aparente)

Através da regressão múltipla, obteve-se um modelo matemático que apresenta o comportamento do índice de vazios em função da relação cal/cim e dos aditivos. Este modelo é expresso pela equação polinomial abaixo descrita (equação 28). Os dados obtidos através desta análise estão apresentados no apêndice D.

$$IV = 50,944 + 0,309 \times CC + 0,433 \times IA + 0,386 \times IA^2 + 0,388 \times HID^2 \quad (\text{equação 28})$$

$$R^2 = 0,5780$$

Onde:

IV: Índice de vazios, em %.

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %.

Os valores foram codificados de acordo com a tabela 23.

A análise dos valores observados do índice de vazios das argamassas através da regressão não linear apresentou coeficiente de determinação relativamente baixo (57,80%). Este fato pode ser devido à pequena variação entre os resultados mínimos (46%) e máximos (58%) obtidos nos ensaios com as argamassas no estado endurecido.

As figuras 35(a) e 35(b) apresentam o comportamento do índice de vazios em função da relação cal/cim em argamassas com diferentes teores de IA e HID, respectivamente. Pode-se verificar que o índice de vazios não é influenciado pela interação entre os aditivos incorporador de ar e hidrofugante, ou entre o relação cal/cimento das argamassas. Além disso, como era esperado, o índice de vazios tende a aumentar com o acréscimo da relação cal/cim e de incorporador de ar. Este aumento é de aproximadamente 1,8% quando a relação cal/cimento passa de 0,10 para 1,10, independentemente do teor de aditivo utilizado. O mesmo foi observado em estudo realizado por Bianchin (1999), onde as argamassas com maior relação cal/cim apresentaram maiores valores de índice de vazios que as argamassas com maiores teores de cimento.

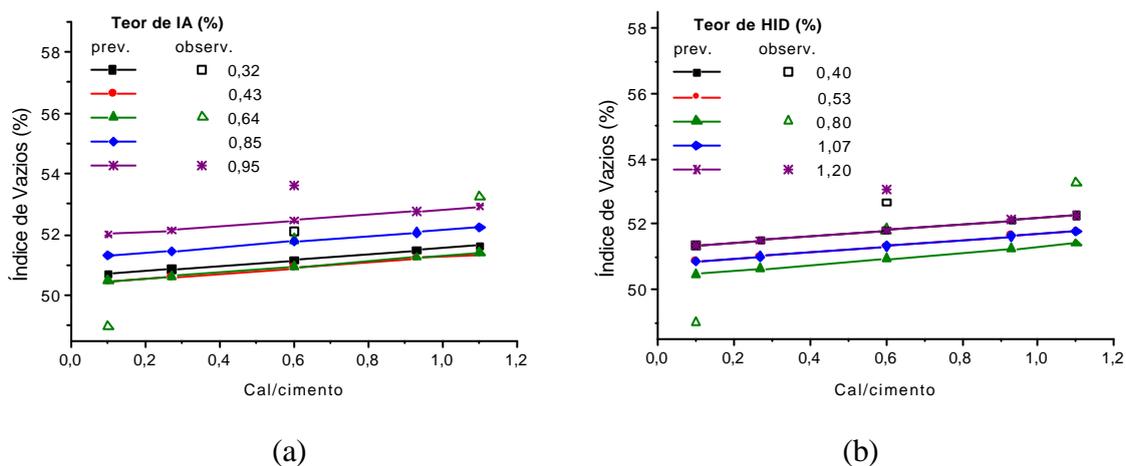


Figura 35: índice de vazios das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de (a) IA e (b) HID

Os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID estão apresentados na tabela 43.

A figura 36(a) apresenta o comportamento do índice de vazios em argamassas com diferentes relações cal/cim em função do IA. Como era esperado, o índice de vazios aumenta com o uso de incorporador de ar. Entretanto, este aumento ocorre a partir de 0,64% de incorporador de ar. Conforme apresentado na figura 36(b), o índice de vazios tende a reduzir com o aumento de HID até teores médios. Entretanto, a partir destes valores, o índice de vazios tende a aumentar.

Tabela 43: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e HID

| CAL/CIM | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |       |      |       |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|
|         | IA (%)    |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,32      | 0,43  | 0,64  | 0,85  | 0,95  | 0,32       | 0,43 | 0,64  | 0,85 | 0,95  |
| 0,10    | 50,70     | 50,43 | 50,48 | 51,30 | 52,00 | --         | --   | 49,00 | --   | --    |
| 0,27    | 50,85     | 50,59 | 50,63 | 51,45 | 52,15 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 51,16     | 50,90 | 50,94 | 51,76 | 52,46 | 52,09      | --   | 51,83 | --   | 53,62 |
| 0,93    | 51,47     | 51,21 | 51,25 | 52,07 | 52,77 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 51,63     | 51,36 | 51,41 | 52,23 | 52,93 | --         | --   | 53,26 | --   | --    |
| CAL/CIM | HID (%)   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,40      | 0,53  | 0,80  | 1,07  | 1,20  | 0,40       | 0,53 | 0,80  | 1,07 | 1,20  |
|         | 0,10      | 51,35 | 50,87 | 50,48 | 50,87 | 51,35      | --   | --    | 49   | --    |
| 0,27    | 51,51     | 51,02 | 50,63 | 51,02 | 51,51 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,60    | 51,82     | 51,33 | 50,94 | 51,33 | 51,82 | 52,67      | --   | 51,83 | --   | 53,07 |
| 0,93    | 52,13     | 51,64 | 51,25 | 51,64 | 52,13 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,10    | 52,28     | 51,79 | 51,41 | 51,79 | 52,28 | --         | --   | 53,26 | --   | --    |

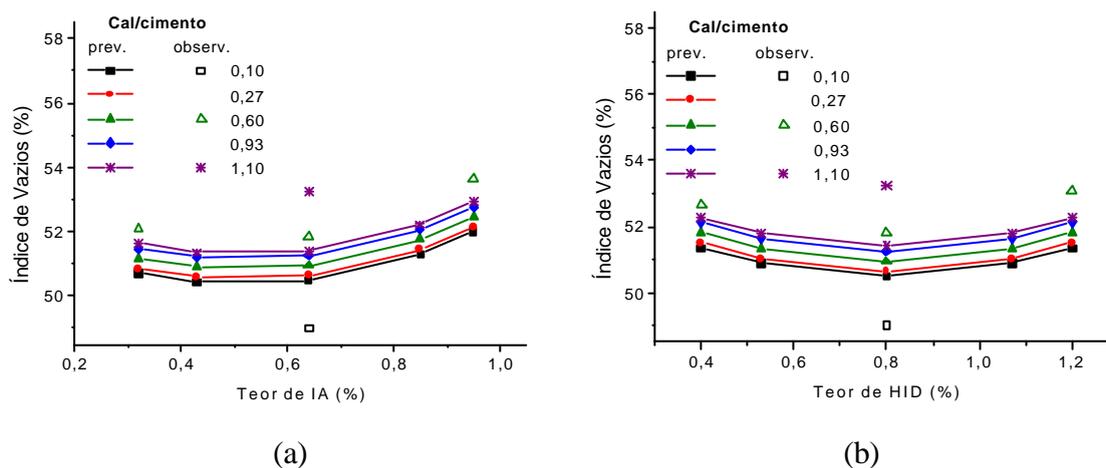


Figura 36: índice de vazios das argamassas em função dos teores de (a) IA e (b) HID para diferentes relações cal/cim

A tabela 44 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID para diferentes relações cal/cim.

Estes resultados levam a concluir que os teores ideais de IA e HID para maiores índices de vazios são de 0,95% e 1,20%, respectivamente.

O caderno de recomendações WTA 2-2-91 prescreve valores superiores a 40% para a porosidade para as argamassas de recuperação. Porém, como não foi possível realizar o ensaio conforme recomendações da referida norma, pode-se fazer analogia com os resultados obtidos e concluir que todas as argamassas estudadas apresentam valores de índice de vazios (porosidade aparente) superiores ao recomendado.

Tabela 44: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do índice de vazios das argamassas em função dos teores de aditivo IA e HID para diferentes relações cal/cim

|         | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |       |      |       |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|-------|------|-------|
| IA (%)  | CAL/CIM   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,32    | 50,70     | 50,85 | 51,16 | 51,47 | 51,63 | --         | --   | 52,09 | --   | --    |
| 0,43    | 50,43     | 50,59 | 50,90 | 51,21 | 51,36 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,64    | 50,48     | 50,63 | 50,94 | 51,25 | 51,41 | 49,00      | --   | 51,83 | --   | 53,26 |
| 0,85    | 51,30     | 51,45 | 51,76 | 52,07 | 52,23 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,95    | 52,00     | 52,15 | 52,46 | 52,77 | 52,93 | --         | --   | 53,62 | --   | --    |
| HID (%) | CAL/CIM   |       |       |       |       |            |      |       |      |       |
|         | 0,10      | 0,27  | 0,60  | 0,93  | 1,10  | 0,10       | 0,27 | 0,60  | 0,93 | 1,10  |
| 0,40    | 51,35     | 51,51 | 51,82 | 52,13 | 52,28 | --         | --   | 52,67 | --   | --    |
| 0,53    | 50,87     | 51,02 | 51,33 | 51,64 | 51,79 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 0,80    | 50,48     | 50,63 | 50,94 | 51,25 | 51,41 | 49,00      | --   | 51,83 | --   | 53,26 |
| 1,07    | 50,87     | 51,02 | 51,33 | 51,64 | 51,79 | --         | --   | --    | --   | --    |
| 1,20    | 51,35     | 51,51 | 51,82 | 52,13 | 52,28 | --         | --   | 53,07 | --   | --    |

### 5.2.9 Resistência aos Sais

Fazendo-se a análise por regressão múltipla, obteve-se um modelo matemático que expressa o comportamento da resistência aos sais das argamassas em função da relação cal/cim e dos aditivos utilizados. A equação polinomial abaixo apresenta este modelo (equação 29). No apêndice D estão apresentados os dados obtidos através desta análise.

$$RS = 0,9759 - 0,6033 \times CC + 0,3661 \times HID + 0,3880 \times CC^2 - 0,4144 \times CC \times HID \quad (\text{equação 29})$$

$$R^2 = 0,8203\%$$

Onde:

RS: Resistência aos sais, em dias;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

HID: teor de hidrofugante, em %.

Os valores foram codificados de acordo com a tabela 23.

Os aditivos IA e RET não apresentaram influência significativa sobre a resistência aos sais. Entretanto, houve significância da relação cal/cim e HID, bem como da interação entre eles.

A figura 37(a) apresenta o comportamento da resistência aos sais em função da relação cal/cim, para diferentes teores de HID. Com o aumento do teor de cal, a resistência aos sais reduz, sendo que para argamassas com altos teores de hidrofugante, esta redução é maior. Entretanto, a partir de da relação cal/cim de 0,93, as argamassas com baixo teor de HID

tendem a aumentar a resistência aos sais. Desta forma, a relação cal/cim que permite maior resistência aos sais são as argamassas com menor relação cal/cim. O mesmo comportamento foi observado em estudo realizado por Bianchin (1999, p. 104), onde as argamassas com menor quantidade de cal apresentaram maiores resistências aos sais.

Observando-se a figura 37(b), verifica-se que a resistência aos sais tende a aumentar em função do aumento do teor de hidrofugante, em argamassas com relação cal/cim entre 0,10 e 0,60. A partir destes teores, o aumento do teor de hidrofugante tende a manter constante ou até reduzir a resistência aos sais. Isto se deve ao fato de que o HID reage com o hidróxido de cálcio presente nos produtos de hidratação do cimento, formando estearato de cálcio insolúvel que, ao revestir a superfície do poro, torna o revestimento hidrofóbico (RIXOM; MAILVAGANAM, 1986, p. 518). Além disso, como a quantidade de aditivo é diretamente proporcional ao teor de cimento, menores relações cal/cim possuem maiores quantidades de aditivo, favorecendo a ação do mesmo.

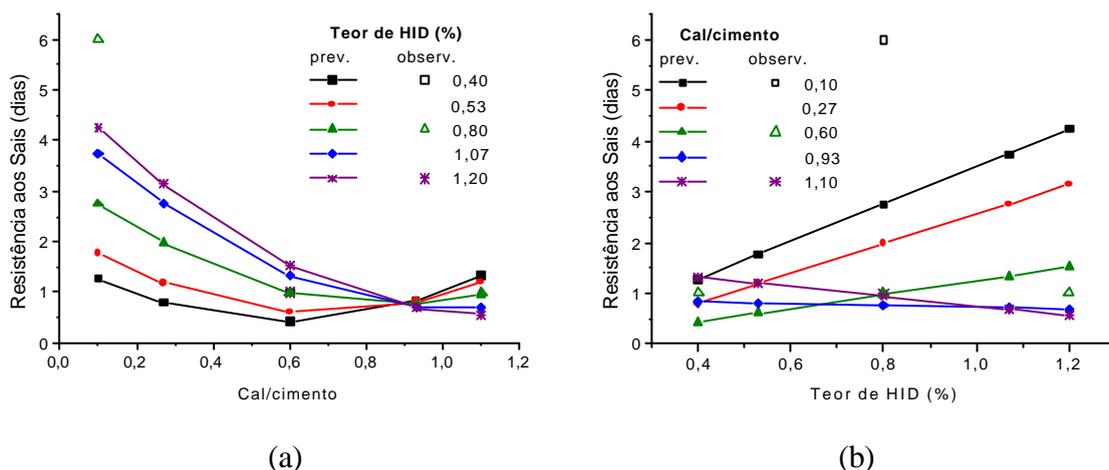


Figura 37: resistência aos sais das argamassas em função da (a) relação cal/cim e (b) do teor de HID

A tabela 45 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados da resistência aos sais das argamassas em função da relação cal/cim e do teor de aditivo HID.

A resistência aos sais das argamassas de recuperação, segundo a WTA 2-2-91, deve ser de no mínimo 10 dias. Desta maneira, nenhuma das argamassas estudadas apresentou resistências iguais ou superiores à especificada pelo caderno de recomendações WTA 2-2-91.

Tabela 45: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados da resistência aos sais das argamassas em função da relação cal/cim e do teor de aditivo HID

| CAL/CI<br>M | Previstos |      |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|-------------|-----------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|             | HID (%)   |      |      |      |      | HID (%)    |      |      |      |      |
|             | 0,40      | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10        | 1,27      | 1,77 | 2,75 | 3,74 | 4,24 | --         | --   | 6    | --   | --   |
| 0,27        | 0,80      | 1,19 | 1,97 | 2,75 | 3,14 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60        | 0,43      | 0,61 | 0,98 | 1,34 | 1,53 | 1          | --   | 1    | --   | 1    |
| 0,93        | 0,83      | 0,81 | 0,76 | 0,71 | 0,69 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10        | 1,33      | 1,20 | 0,94 | 0,69 | 0,56 | --         | --   | 1    | --   | --   |
| HID (%)     | CAL/CIM   |      |      |      |      | CAL/CIM    |      |      |      |      |
|             | 0,10      | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40        | 1,27      | 0,80 | 0,43 | 0,83 | 1,33 | --         | --   | 1    | --   | --   |
| 0,53        | 1,77      | 1,19 | 0,61 | 0,81 | 1,20 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80        | 2,75      | 1,97 | 0,98 | 0,76 | 0,94 | 6          | --   | 1    | --   | 1    |
| 1,07        | 3,74      | 2,75 | 1,34 | 0,71 | 0,69 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20        | 4,24      | 3,14 | 1,53 | 0,69 | 0,56 | --         | --   | 1    | --   | --   |

### 5.2.10 Resistência à Difusão de Vapor d'Água

Através da análise por regressão não linear da média dos resultados obteve-se o modelo matemático que apresenta o comportamento do coeficiente de resistência à difusão de vapor em função da relação cal/cim e dos aditivos. Este modelo é expresso pela equação exponencial abaixo descrita (equação 30). Os dados obtidos através desta análise estão apresentados no apêndice D.

$$m = 5,5 + \exp^{(-2,262 \times CC + 1,434 \times IA + 1,598 \times RET)} \quad (\text{equação 30})$$

$$R^2 = 0,5147$$

Onde:

$\dot{i}$ : coeficiente de resistência à difusão de vapor;

CC: relação cal/cimento, em massa;

IA: teor de incorporador de ar, em %;

RET: teor de retentor de água, em %.

A análise dos valores observados através da regressão não linear dos resultados observados para a resistência à difusão de vapor das argamassas apresentou coeficiente de determinação relativamente baixo (51,47%). Este fato pode ser devido ao alto coeficiente de variação dos resultados observados neste ensaio, conforme apresentado no apêndice C. Desta forma, sugere-se que este ensaio seja executado com um número maior de corpos-de-prova que os três indicados pela norma.

De acordo com o modelo de regressão encontrado, verifica-se que a relação cal/cimento, bem como os aditivos IA e RET, são significantes para a determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas. Entretanto, o aditivo HID, bem como a interação entre as variáveis estudadas não são significantes para esta propriedade.

Na tabela 46 são apresentados os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados do coeficiente de resistência ao vapor das argamassas em função da relação cal/cim para diferentes teores de IA e RET.

Tabela 46: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do coeficiente de resistência à difusão de vapor em função da relação cal/cim para diferentes teores de aditivo IA e RET

| CAL/CI<br>M | Previstos |       |       |       |       | Observados |      |      |      |      |
|-------------|-----------|-------|-------|-------|-------|------------|------|------|------|------|
|             | IA (%)    |       |       |       |       |            |      |      |      |      |
|             | 0,32      | 0,43  | 0,64  | 0,85  | 0,95  | 0,32       | 0,43 | 0,64 | 0,85 | 0,95 |
| 0,10        | 10,03     | 10,81 | 12,67 | 15,19 | 16,68 | --         | --   | 7,36 | --   | --   |
| 0,27        | 8,58      | 9,11  | 10,38 | 12,1  | 13,11 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60        | 6,96      | 7,21  | 7,81  | 8,63  | 9,11  | 6,27       | --   | 6,88 | --   | 6,09 |
| 0,93        | 6,19      | 6,31  | 6,60  | 6,98  | 7,21  | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10        | 5,97      | 6,05  | 6,25  | 6,51  | 6,66  | --         | --   | 6,83 | --   | --   |
| CAL/CI<br>M | RET (%)   |       |       |       |       |            |      |      |      |      |
|             | 0,40      | 0,53  | 0,80  | 1,07  | 1,20  | 0,40       | 0,53 | 0,80 | 1,07 | 1,20 |
| 0,10        | 9,28      | 10,16 | 12,67 | 16,54 | 19,09 | --         | --   | 7,36 | --   | --   |
| 0,27        | 8,08      | 8,67  | 10,38 | 13,01 | 14,75 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,60        | 6,72      | 7,00  | 7,81  | 9,06  | 9,88  | 6,59       | --   | 6,88 | --   | 7,87 |
| 0,93        | 6,08      | 6,21  | 6,60  | 7,19  | 7,58  | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,10        | 5,89      | 5,99  | 6,25  | 6,65  | 6,92  | --         | --   | 6,83 | --   | --   |

De acordo com a tabela 46, verifica-se que, com o aumento da relação cal/cim, ocorre a redução do coeficiente de resistência à difusão de vapor, independentemente do teor de aditivo utilizado. Esta redução é de aproximadamente 49% com o aumento da relação cal/cimento de 0,10 para 1,10.

Segundo Lawrence (apud NEVILLE, 1997, p. 493), a difusão de vapor dos concretos é linearmente proporcional à permeabilidade do material. Argamassas com maiores coeficientes de resistência à difusão de vapor apresentam menor permeabilidade. Assim, os fatores que influenciam a permeabilidade das argamassas, segundo Cincotto, Silva e Carasek (1995, p. 38), são a granulometria dos agregados, a natureza e o teor do aglomerante. Além disso, segundo estes autores, a permeabilidade é diretamente proporcional à relação água/aglomerante(s) e inversamente proporcional à resistência do material, sendo que a mesma diminui com o aumento do teor de cimento. Estas constatações

corroboram com os resultados encontrados neste estudo, bem como nos capítulos 5.1.1 e 5.2.1 referentes à relação água/aglomerante e à resistência à compressão, respectivamente.

Verifica-se na figura 38(a) que, com o aumento do teor de IA, o coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas aumenta. Isto se deve ao fato de que a presença de ar incorporado reduz a exsudação do material no estado fresco, evitando assim que a água seja expelida e reduzindo a permeabilidade do material (NEVILLE, 1997, p. 554). Da mesma forma, Rixom e Mailvaganam (1986, p. 128) verificaram que a permeabilidade à água sob pressão dos concretos é reduzida pelo uso de aditivos IA.

O mesmo comportamento pode ser observado em relação ao aditivo RET (figura 38(b)), onde as argamassas apresentam maior resistência à difusão de vapor à medida que o teor deste aditivo aumenta. Isto se deve ao fato de que o aditivo RET tende a aumentar de volume devido à sua absorção de água, reduzindo assim as cavidades capilares do sistema, bem como a permeabilidade do material (RAMACHANDRAM, 1984, p. 413). Além disso, o aditivo RET assegura maior hidratação dos grãos de cimento devido ao efeito da retenção de água que o polímero provoca no sistema (SILVA; ROMAN, 2001, p. 37). Deste modo, a argamassa apresenta menor permeabilidade com o aumento do teor de RET.

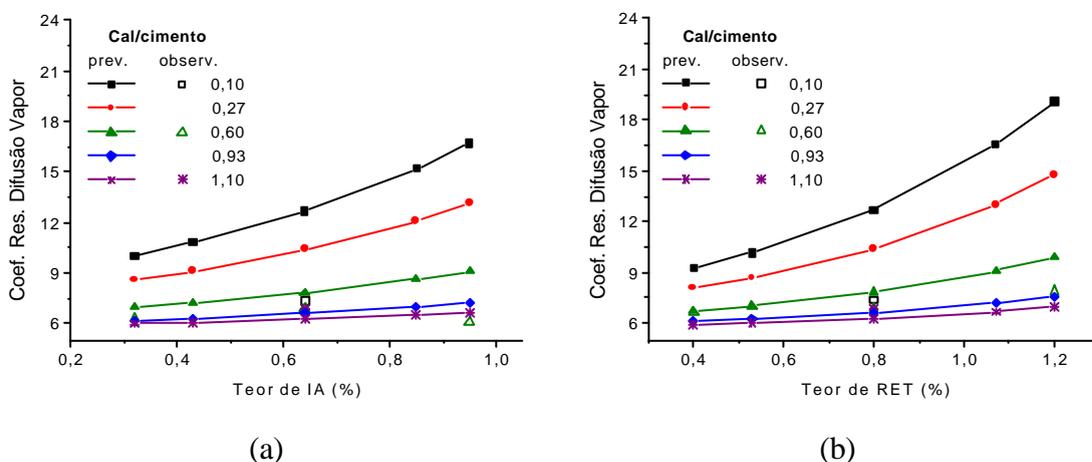


Figura 38: coeficiente de resistência à difusão de vapor de água das argamassas em função do teor de (a) IA e (b) RET para diferentes relações cal/cim

Nas figuras 38(a) e 38(b) verifica-se que maiores aumentos do coeficiente de resistência à difusão de vapor são observados em argamassas com menores relações cal/cim. Isto se justifica pelo fato de que o teor de aditivo foi calculado em função da massa de cimento, sendo que, à medida que a relação cal/cim aumenta, a massa do cimento no material diminui, reduzindo assim a quantidade de aditivo utilizada.

A tabela 47 apresenta os valores previstos pelo modelo matemático, bem como os valores médios observados durante os ensaios do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas.

De acordo com a WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995), o coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas de reboco de recuperação deve ser de no máximo 12 unidades. Segundo os resultados obtidos, verifica-se que as argamassas com teores de IA e RET de até 0,64% e 0,80%, com relação cal/cim acima de 0,10, apresentaram valores admissíveis para esta propriedade. Para relações cal/cim superiores a 0,27, independentemente do teor de aditivo utilizado, o coeficiente de resistência à difusão de vapor permanece inferior ao vapor preconizado pela norma, sendo este aceitável para argamassas de reboco de recuperação WTA.

Tabela 47: valores previstos pelo modelo matemático e valores médios observados do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas em função dos teores de aditivo IA e RET para diferentes relações cal/cim

| IA<br>(%)  | Previstos |       |      |      |      | Observados |      |      |      |      |
|------------|-----------|-------|------|------|------|------------|------|------|------|------|
|            | CAL/CIM   |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|            | 0,10      | 0,27  | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,32       | 10,03     | 8,58  | 6,96 | 6,19 | 5,97 | --         | --   | 6,27 | --   | --   |
| 0,43       | 10,81     | 9,11  | 7,21 | 6,31 | 6,05 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,64       | 12,67     | 10,38 | 7,81 | 6,60 | 6,25 | 7,36       | --   | 6,88 | --   | 6,83 |
| 0,85       | 15,19     | 12,10 | 8,63 | 6,98 | 6,51 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,95       | 16,68     | 13,11 | 9,11 | 7,21 | 6,66 | --         | --   | 6,09 | --   | --   |
| RET<br>(%) | CAL/CIM   |       |      |      |      |            |      |      |      |      |
|            | 0,10      | 0,27  | 0,60 | 0,93 | 1,10 | 0,10       | 0,27 | 0,60 | 0,93 | 1,10 |
| 0,40       | 9,28      | 8,08  | 6,72 | 6,08 | 5,89 | --         | --   | 6,59 | --   | --   |
| 0,53       | 10,16     | 8,67  | 7,00 | 6,21 | 5,99 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 0,80       | 12,67     | 10,38 | 7,81 | 6,6  | 6,25 | 7,36       | --   | 6,88 | --   | 6,83 |
| 1,07       | 16,54     | 13,01 | 9,06 | 7,19 | 6,65 | --         | --   | --   | --   | --   |
| 1,20       | 19,09     | 14,75 | 9,88 | 7,58 | 6,92 | --         | --   | 7,87 | --   | --   |

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A utilização de argamassas de revestimento tradicionais, à base de cal ou cimento, em alvenarias contaminadas por umidade e sais solúveis tem apresentado diversas manifestações patológicas. Desta forma, este trabalho buscou estudar o comportamento de diversos traços de argamassas, tanto no estado fresco como endurecido, para ser utilizada como reboco de recuperação WTA 2-2-91, com o objetivo de prolongar a vida útil do revestimento e da alvenaria contaminada.

Neste capítulo estão apresentadas as considerações finais do estudo experimental, bem como algumas sugestões para futuros trabalhos em relação ao estudo e à aplicação de argamassas de recuperação.

### **6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As considerações finais a serem apresentadas estão restritas aos materiais empregados nas argamassas mistas de cimento e cal, assim como aos teores de aditivo IA, HID e RET utilizados neste estudo.

#### **6.1.1 Consistência e Trabalhabilidade**

O índice de consistência das argamassas estudadas variou significativamente com a relação cal/cimento (cal/cim) e com os teores de aditivo utilizados. Com o aumento da relação cal/cim, o índice de consistência tende a aumentar quando o teor de incorporador de ar (IA) é baixo (0,32%), e a diminuir quando o teor de IA é alto (0,95%).

A trabalhabilidade (redução do índice de consistência) das argamassas variou entre 0,43 e 2,60 cm. De acordo com a análise estatística não houve influência significativa da relação cal/cim ou dos teores de aditivo utilizados. Em relação a WTA 2-2-91, todas as argamassas são consideradas trabalháveis, pois apresentaram reduções do índice de consistência inferior ao valor máximo prescrito de 3,0 cm.

### 6.1.2 Teor de Ar Incorporado

De acordo com a análise estatística, a relação cal/cim e os aditivos IA e HID influenciaram significativamente no teor de ar incorporado das argamassas. Esta propriedade é diretamente proporcional à relação cal/cim e ao teor de IA e inversamente proporcional ao teor de HID. No que se refere ao Caderno de Recomendações WTA 2-2-91, as argamassas para reboco de recuperação devem apresentar teor de ar incorporado superior a 25%. Segundo esta prescrição, todas as argamassas estudadas apresentaram valores superiores ao preconizado.

### 6.1.3 Retenção de Água

A retenção de água das argamassas estudadas sofreu influência significativa da relação cal/cim e do aditivo retentor de água, sendo que os resultados observados variaram entre 96% e 100%. Esta propriedade foi medida segundo prescrições da NBR 13277 (ABNT, 1995) e, fazendo-se a comparação entre os resultados obtidos por esta norma e os preconizados pelo Caderno Alemão de Recomendações WTA 2-2-91, considera-se que todas as argamassas apresentaram retenção de água aceitável, pois os valores obtidos nos ensaios são superiores ao valor mínimo recomendado pela WTA, que é de 85%.

### 6.1.4 Massa Específica no Estado Fresco

A análise estatística dos resultados apresentou significância da relação cal/cim e do teor de incorporador de ar, sendo que estes fatores são inversamente proporcionais à massa específica das argamassas no estado fresco. A WTA 2-2-91 não apresenta prescrição para esta propriedade.

### 6.1.5 Resistência à Compressão

A resistência à compressão das argamassas estudadas variou entre 0,54 e 4,20 MPa, sendo que a relação cal/cim e os teores de aditivos mostraram influência significativa nesta propriedade. A resistência à compressão é inversamente proporcional à relação cal/cim e ao IA e diretamente proporcional ao teor de HID e RET. Quando a relação cal/cim aumenta de 0,10 para 1,10, ocorre redução de aproximadamente 77% da resistência à compressão das argamassas. Além disso, com o aumento do teor de aditivo RET ocorre um aumento na resistência à compressão do material, sendo este de até 30% para argamassas com relação cal/cim de 0,10.

Considerando as prescrições da WTA 2-2-91, somente as argamassas com relação cal/cim superior a 0,93 não atenderam a esta prescrição, pois apresentaram resistências à compressão inferiores a 1,5 MPa.

### 6.1.6 Resistência à Tração por Flexão

De acordo com a análise estatística, a relação cal/cim e os aditivos IA, HID e RET apresentaram influência significativa na resistência à tração por flexão das argamassas. Os resultados obtidos variaram entre 0,47 e 2,22 MPa, sendo que esta propriedade é inversamente proporcional à relação cal/cim e ao teor de IA e diretamente proporcional aos teores de HID e RET. Argamassas com relação cal/cim de 1,10 apresentam redução de aproximadamente 71% na resistência à tração na flexão em relação às argamassas com relação cal/cim de 0,10. A WTA 2-2-91 não apresenta prescrição para esta propriedade.

### 6.1.7 Relação entre as Resistências à Compressão e à Tração na Flexão

A análise estatística dos resultados apresentou significância da relação cal/cim e dos aditivos IA e RET na relação  $f_c/f_t$ , bem como da interação entre os dois primeiros. Estes resultados variaram entre 1,12 e 2,43. Houve redução de aproximadamente 28% na relação  $f_c/f_t$  com o aumento da relação cal/cim de 0,10 para 1,10. De acordo com o Caderno de Recomendações WTA 2-2-91, a relação  $f_c/f_t$  não deve exceder 3 unidades em argamassas para reboco de recuperação. Desta forma, todas as argamassas estudadas atenderam a esta prescrição.

### 6.1.8 Absorção de Água por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade das argamassas estudadas, segundo a análise estatística, apresentou significância da relação cal/cim e dos aditivos IA e HID. Esta propriedade aumenta em aproximadamente 71% com o aumento da relação cal/cim de 0,10 a 1,10. O aumento do teor de incorporador de ar de 0,32% para 0,95% tende a diminuir a absorção de água em cerca de 13% em argamassas com alta relação cal/cim. Reduções de aproximadamente 19% são observadas com aumento do teor de hidrofugante de 0,4% para 1,2%.

O Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 prescreve que as argamassas para reboco de recuperação devem apresentar valores mínimos de absorção capilar de  $0,30 \text{ kg/m}^2$ , com o objetivo de transportar os sais solubilizados presentes no interior da alvenaria para o interior

do revestimento de argamassa. As argamassas estudadas apresentaram valores entre 3,32 e 6,95 kg/m<sup>2</sup>, sendo estes extremamente superiores ao mínimo prescrito pela WTA 2-2-91.

### 6.1.9 Altura de Penetração de Água por Capilaridade

A altura de penetração de água por capilaridade das argamassas estudadas apresentou significância da relação cal/cim e do teor de HID utilizado. À medida que o teor de HID aumenta, a altura de penetração de água tende a aumentar com o acréscimo de cal na argamassa, chegando a 20% em argamassas com 1,2% de HID quando a relação cal/cim varia de 0,10 a 1,10. Argamassas com baixa relação cal/cim (0,10) apresentaram redução de até 15% na altura de penetração de água com o aumento do teor de HID de 0,4 a 1,2%.

A WTA 2-2-91 prescreve altura máxima de penetração de água de 5 mm. Entretanto, os menores valores observados neste ensaio foram de 7 mm, em argamassa com relação cal/cim de 0,27, 0,85% de IA, 1,07% de HID e 0,53 de RET. Desta forma, nenhuma das argamassas estudadas atende à prescrição.

### 6.1.10 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente das argamassas variou significativamente com a relação cal/cim e com os teores de aditivo IA e HID. Com o aumento da relação cal/cim, as argamassas apresentaram reduções de aproximadamente 12% nesta propriedade. Em relação ao incorporador de ar, a massa específica aparente das argamassas com menor relação cal/cim reduz cerca de 4% com o aumento deste aditivo. Entretanto, à medida que a relação cal/cim aumenta ocorre o inverso, sendo que a massa específica aumenta em até 7% com o aumento do teor de IA. Além disso, percebe-se que, ao aumentar o teor de HID, a massa específica aparente das argamassas aumenta cerca de 6%. Os valores observados nos ensaios variam entre 1,38 e 1,67 kg/dm<sup>3</sup>. A WTA 2-2-91 recomenda valores inferiores a 1,40 kg/dm<sup>3</sup>, e assim, somente as argamassas com relação cal/cim de 0,93, 0,43% de IA e 0,53% de HID apresentaram valores inferiores ao recomendado. Esta prescrição tem como objetivo garantir o índice de vazios nas argamassas.

### 6.1.11 Porosidade Aparente (Índice de Vazios)

A porosidade aparente das argamassas estudadas variou significativamente com a relação cal/cim e com os aditivos IA e HID. Com o aumento da relação cal/cim de 0,10 para 1,10, as argamassas apresentam aumento de aproximadamente 1,8% na porosidade aparente. Em

relação aos aditivos IA e HID, a porosidade aparente das argamassas tende a aumentar a partir dos teores médios destes aditivos.

A WTA 2-2-91 prescreve valores superiores a 40% para a porosidade aparente de argamassas para reboco de recuperação. Os resultados obtidos nos ensaios variaram entre 46 e 58%. Porém, como não foi possível realizar o ensaio conforme recomendações da referida norma devido à falta de equipamento, pode-se fazer analogia com os resultados obtidos e concluir que todas as argamassas estudadas apresentam valores de índice de vazios (porosidade aparente) superiores ao recomendado.

### 6.1.12 Resistência aos Sais

A resistência aos sais das argamassas variou significativamente com a relação cal/cim e com os teores de HID. Com o aumento da relação cal/cim, a resistência aos sais das argamassas é reduzida. Esta redução ocorre até relações cal/cim de 0,8. A partir deste valor, a resistência aos sais aumenta. A resistência aos sais tende a aumentar em função do aumento do teor de HID em argamassas com relação cal/cim entre 0,10 e 0,60. A partir destes valores, com o aumento do teor de hidrofugante as argamassas tendem a apresentar resistência constante aos sais. Entretanto, quando a relação cal/cim é de 1,10, as argamassas apresentam redução da resistência aos sais com o aumento do teor de HID.

Nenhuma das argamassas estudadas apresentou resistência aos sais conforme prescrição da WTA 2-2-91, que deve ser superior a 10 dias. Este fato pode ser justificado pelo tipo de aditivo hidrofugante utilizado.

### 6.1.13 Resistência à Difusão de Vapor de Água

De acordo com a análise estatística dos resultados, a relação cal/cim e os aditivos IA e RET mostrou significância no coeficiente de resistência à difusão de vapor de água nas argamassas. Esta propriedade tende a reduzir cerca de 49% com o aumento da relação cal/cim de 0,10 para 1,10. Entretanto, no que se refere aos aditivos IA e HID, ocorre o inverso, onde as argamassas apresentaram aumento no coeficiente de resistência à difusão de vapor com o aumento do teor destes aditivos, principalmente em argamassas com relação cal/cim maiores.

Na tabela 48 estão apresentadas as prescrições da WTA 2-2-91 para as diversas propriedades das argamassa para reboco de recuperação, assim como os resultados obtidos no estudo experimental.

Tabela 48: comparação entre as prescrições da WTA 2-2-91 e os resultados observados nos ensaios em argamassa fresca e endurecida

| Propriedade                            | WTA 2-2-91               | Resultados                     | Verificação |
|--|--------------------------|--------------------------------|-------------|
| Consistência*                          | 17,0 ± 0,5 cm            | 17,5 - 19,50 cm                |             |
| Trabalhabilidade                       | < 3,0 cm                 | 0,43 - 2,60 cm                 |             |
| Retenção de água                       | > 85 %                   | 96 - 100 %                     |             |
| Teor de ar incorporado                 | > 25%                    | 37 - 47 %                      |             |
| Resist. à Compressão (fc)              | 1,5 a 5,0 MPa            | 0,54 - 4,20 MPa                |             |
| Relação f <sub>c</sub> /f <sub>t</sub> | < 3,0                    | 1,12 - 2,43                    |             |
| Absorção capilar de água               | > 0,3 kg/m <sup>2</sup>  | 3,32 - 6,95 kg/m <sup>2</sup>  |             |
| Altura de pen. de água                 | < 5 mm                   | > 7 mm                         | X           |
| Massa esp. aparente                    | < 1,4 kg/dm <sup>3</sup> | 1,38 - 1,67 kg/dm <sup>3</sup> |             |
| Porosidade aparente                    | > 40%                    | 46 - 58 %                      |             |
| Resistência aos sais                   | > 10 dias                | 1 - 6 dias                     | X           |
| Coef. de resist. dif. de vapor         | < 12                     | 7,98 - 15,60                   |             |

✓ as argamassas atendem às prescrições da WTA 2-2-91;

X nenhuma argamassa estudada atende às prescrições da WTA 2-2-91.

Conforme a tabela acima, sugere-se a proporção de materiais de 1:0,60: 5,60 (cimento Portland pozolânico, cal hidratada, agregado miúdo), teor de incorporador de ar de 1,0%, teor de hidrofugante de 1,0% e retentor de água de 0,8%, em relação à massa de cimento, para argamassas de reboco de recuperação. Esta sugestão é válida somente para produção de argamassas com os mesmos materiais utilizados neste estudo. Conforme apresentado no capítulo 4.1, utilizou-se neste estudo 94% de areia quartzosa e 6% de agregado leve para a composição do agregado miúdo. Assim, sugere-se a utilização de uma porcentagem maior de agregado leve, cerca de 8%, para que a densidade de massa (massa específica aparente) seja menor que 1,40 kg/dm<sup>3</sup>, conforme prescrito pela WTA 2-2-91.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como complemento deste trabalho e para o melhor entendimento do comportamento das argamassas de reboco de recuperação, sugerem-se os seguintes estudos:

- utilização de agregado miúdo calcário na composição do material inerte, a fim de aumentar o teor de ar e a porosidade das argamassas de reboco recuperação;
- utilização de poliestireno expandido como agregado miúdo leve na composição do material inerte;
- análise da influência da composição granulométrica e da cura nas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido;

- d) substituição do estearato por outro aditivo hidrofugante, com o objetivo de verificar a influência deste no comportamento da altura de penetração de água por capilaridade e na resistência aos sais nas argamassas;
- e) avaliação do desempenho das argamassas de recuperação após aplicação em alvenarias contaminadas por umidade e sais solúveis;
- f) determinação do teor de sais presentes na alvenaria antes e depois da aplicação de argamassa de reboco de recuperação, com o objetivo de verificar se há migração dos sais solúveis do substrato para o revestimento;
- g) verificação da relação entre a distribuição e o tamanho dos poros das argamassas de reboco de recuperação com os danos no material devido às pressões causadas pela presença de sais solúveis;
- h) estudo do comportamento das argamassas de recuperação em função do tipo de pinturas a ser utilizada;
- i) avaliação da compatibilidade entre o revestimento antigo, que é mantido na alvenaria, e o novo material que foi aplicado, com o objetivo de verificar o surgimento de manifestações patológicas nesta interface;
- j) avaliação do comportamento das argamassas de reboco de recuperação em alvenarias contaminadas por umidade ascensional e névoa marinha em câmara climatizada, simulando condições ambientais nacionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOPYAN, V. A importância da pureza dos agregados para argamassas e concretos. In: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. **Anais...**São Paulo: EPUSP, 1986, p.115-119.
- AL-SAAD, Z.; ABDEL-HALIM, M.A.H. Laboratory evaluation of various types of mortars for the conservation of Qasr al-Bint monument, Petra-Jordan. **Engineering Structures**, v. 23, p. 926-933, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 150-97: standard specification for portland cement In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, Pa, 1998. v.04.01, p. 134-138.
- \_\_\_\_\_. ASTM C 270 – 97: standard specification for mortar unit masonry. In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, Pa, 1998. v.04.05, p. 137-147.
- \_\_\_\_\_. ASTM E 632-82: standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials. In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, Pa, 1998. p. 298-303.
- \_\_\_\_\_. ASTM C 780-96: standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, Pa, 1998. v.04.01, p. 441-456.
- \_\_\_\_\_. ASTM C 926 – 98: standard Specification for application of portland cement-based plaster. In: **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia, Pa, 1991. p. 1-9.
- ANGELIM, R.R; ANGELIM, S.C.M; CARASEK, H. Influência da distribuição granulométrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 2003, p. 141 - 150.
- ARENDDT, C.; SEELE, J. **Feuchte und Salze in Gebäuden**. Deutschland. Deutschland: Alexander Koch GmbH, 2001, 166 p.
- ARENDDT, C. **A utilização de Reboco de Recuperação e Medidas de Combate aos Sais - Métodos de tratamento de Alvenarias Deterioradas**. Tradução: Hélio Adão Greven. In: SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE OBRAS HISTÓRICAS DE ENGENHARIA E ARQUITETURA: AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO, ANÁLISE, DIAGNÓSTICO E TERAPIA, UFRGS, Porto Alegre, abril, 1995.
- ARNOLD, A. ZEHNDER, K. Salt weathering on monuments. In.: ADVANCED WORKSHOP “ANALYTICAL METHODOLOGIS FOR THE INVESTIGATION OF DEMAGED STONES”, 1990, Pavia, Italy. **Anais...** Pavia, 1990, p. 31-57.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: cimento Portland comum. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6453**: cal virgem para construção. Rio de Janeiro, 1988.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7175**: cal hidratada para argamassas - requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7200**: execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ **NBR 7215**: cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_ **NBR 7222**: argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_ **NBR 7251**: agregado em estado solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_ **NBR 9230**: vermiculita expandida . Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_ **NBR 9287**: argamassa de assentamento para alvenaria de bloco de concreto – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1986.

\_\_\_\_\_ **NBR 9289**: cal hidratada para argamassas- determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_ **NBR 9290**: cal hidratada para argamassas- determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_ **NBR 9778**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_ **NBR 9779**: argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

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

\_\_\_\_\_ **NBR 13277**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13 280**: argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13530**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - classificação. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13749**: revestimentos de paredes e tetos de argamassa inorgânica – especificações. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_ **NBR EB 1763**: aditivos para concreto de cimento portland. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 23**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BAUER, R.J.F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997, p.321-331.

BEICHEL, A. Restauração de alvenaria úmida com salinidade. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997, p. 357 – 362.

BIANCHIN, A.C. **Influência do proporcionamento dos materiais constituintes no desempenho de argamassas para reboco de recuperação de alvenarias contaminadas por umidade e sais**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BIANCHIN, A.C.; BRETANHA, A.M.; DAL MOLIN, D.C.C.; RUARO, P. Verificação do grau de resistência de alvenarias submetidas a ação de sais e posterior dessalinização. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 1998, p. 13-20.

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

BREA, F. Resistência de aderência e tempo em aberto de argamassas colantes com adição de éteres de celulose. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p.483 - 493.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 4551**: methods of testing mortars, screeds and plasters. London,1980.

\_\_\_\_\_ **BS 4887** – Part 1: mortar plasticizers: mortar admixtures, specification for air-entraining (plastering) admixtures. London, 1986.

CALHAU, E.L.; TRISTÃO, F.A. Influência do teor de ar incorporado nas propriedades das argamassas mistas de revestimento. III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1999, Vitória. **Anais...** Vitória, 1999, p.219-230.

CARASEK, H.C. **Aderência de argamassas á base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo de ligação**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo.

CARASEK, H.C.; CAMPAGNOLO, J.L. Aderência de argamassa de assentamento para alvenaria estrutural. In: 10º ENCONTRO NACIONAL CONSTRUÇÃO, 1990, Gramado, RS. **Anais...** Gramado, 1990, p. 331-347.

CARNEIRO, A. M.P.C. **Revestimento externo em argamassa de cimento, cal e areia – Sistemática das empresas de construção civil de Porto Alegre**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CASALI, J.M.; WEIDMANN, D.F.; ANSELMO JR, A.; PRUDÊNCIO JR, L.R. Efeito da incorporação de ar nas propriedades de uma argamassa industrializada para assentamento de blocos de concreto para alvenaria estrutural. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 273-297.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT. **Certification CSTB dès enduits mommocouches d'imperméabilisation – Modalités d'essais**. Livraison 341, cahier 2669-4, juillet-août 1993, Paris.

CHANDRA, S.; AAVIK, J. Influence of proteins on some properties of portland cement mortar. **The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v.9, n.2, p. 91-94, 1987.

CHAROLA, A.E. Salts in the deterioration of porous materials: an overview. **Journal of the American Institute for Conservation – JAIC**, v. 39, n 3, article 2, p. 327 – 343, 2000.

CHAROLA, A.E. **Teoría y práctica de la conservación: soluciones de compromiso**. 6p. <Disponível em: [http://www.wmf.org/html/PDF/Charola\\_Api.pdf](http://www.wmf.org/html/PDF/Charola_Api.pdf) >. Acesso em 22.02.2004.

CINCOTTO, M.A. Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações. In: \_\_\_\_\_. **Tecnologia das Edificações**. São Paulo: Pini/IPT, 1988. p. 549-554.

CINCOTTO, M.A.; SILVA, M.A.C.; CARASÉK, H. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo : **boletim 68 IPT**, 1995, 120p.

COLEMAN, G.R. **Condensation – The Basics**. <Disponível em: <http://www.buildingpreservation.com/Condensation%20the%20basics.htm>>. Acesso em 22.07.2003.

COLLEPARDI, M. Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings. **Materials and Structures**. 1990, 23. p. 81-102.

COPPOLA, L. Umidità nelle costruzioni: diagnosi e rimedi. Prefabbricati & Industrializzazione edilizia. **Presenza Técnica**, Aprile, 1996, p. 79-86.

DEUTSCH INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 18555 Part 2**: testing of mortars containing mineral binders – freshly mixed mortars containing aggregates of dense structure (heavy aggregates): determination of consistence, bulk density and air content. September, 1982, 4p.

\_\_\_\_\_. **DIN 18555 Part 3** : testing of mortars containing mineral binders – hardened mortars: determination of flexural strength, compressive strength and bulk density. September, 1982.

\_\_\_\_\_. **DIN 18555 Part 7**: testing of mortars containing mineral binders: determination of water retentivity of freshly mixed mortars by the filter plate method. November, 1987.

\_\_\_\_\_. **DIN 52615 Blatt 1**: bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Juni, 1987.

\_\_\_\_\_. **DIN 52617**: bestimmung der Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Mai, 1987.

\_\_\_\_\_. **DIN 4226 Teil 3**: zuschlag für Beton prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge. April, 1983.

\_\_\_\_\_. **DIN EN 196 Teil 1**: prüfverfahren für Zement; bestimmung der Festigkeit. 1989.

DROLL, K.; MEIER, H.G. **Cross-sectional water-repellent treatment of repair mortars- Experiences from long-term behavior**. Germany, 199\_ , 11p.

DIAS, C.R.R; CUNHA, R.O.; FERRARI, A.S. A utilização de rebocos de recuperação na restauração da Capela de São Francisco. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, No. 1, Novembro, 2000, p.57-66.

- DUBAJ, E. **Estudo comparativo entre traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- FREITAS, V.P. **Transferência de umidade em paredes de edifícios – análise do fenômeno de interface**. 1992. Tese (Doutorado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.
- FRÖSSEL, F. **Wenn das Haus nasse Füße hat Mauerwerkstroekenlegung und Kellersanierung**. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2001.
- GRATWICK, R.T. **La humedad en la construcción, sus causas y remedios**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1971.
- GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2002.
- HERITAGE CONSERVATION: 3<sup>o</sup> Rising damp and salt attack. **Department of Environment and Natural Resources**. ISSN 1035-5138. City of Adelaide, May, 1997, 25p.
- HUCKO, S. Hot climate render additive. In V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 3-11.
- JOHN, V.M. Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas. In.: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 47-62.
- JOHN, V.; CINCOTTO, M.A.; GUIMARÃES, J.E.P.; RAGO, F. Cal x Aditivos. **Téchne**, São Paulo: Pini, n 11, p.25-28., julho/agosto, 1994.
- JOISEL, A. **Les Fissures du Ciment: Causes et remedies**. Paris: Reatériaux de Constructions “Ciments & Bétons”, 1980, 174p.
- KÜNZEL, H.M. **Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components**. Fraunhofer IRB Verlag Suttgart (ISBN 3-8167-4103-7). Holzkirchen, Germany, 1995, 60p.
- LANAS, J.; ALVAREZ, J.I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. **Cement and Concrete Research**, n 33, p. 1867-1876, 2003.
- LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. London: Edward Arnold Ltd, 3rd Edition, 1970.
- LERSCH, I.M. **Contribuição para a identificação dos principais fatores e mecanismos de degradação em edificações do patrimônio cultural de Porto Alegre**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 181p.
- LUBELLI, B.; VAN HESS, R.P.J; GROOT, C.J.W.P. The role of sea salts in the occurrence of different damage mechanisms and decay patterns on brick masonry. **Construction and Building Materials**, n 18, p. 119-124, 2004.
- MACIEL, L.L.; BARROS, M.M.S.; SABBATINI;F.H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo, 1998, 36p.<Disponível em : <http://pcc436.pcc.usp.br/Textostécnicos/Revestimentos%20verticais/Apostila%20Revestimento%20Maciel%20Barros%20Sabbatini.pdf>>. Acesso em 06.07.2004.

MATTOS, L. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 144p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 574p.

MONTE, R.; UEMOTO, K.L.; SELMO, S.M.S. Efeitos dos aditivos incorporadores de ar nas propriedades de argamassas e revestimentos. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p.285 - 297.

MONTE, R.; UEMOTO, K.L.; SELMO, S.M.S. Qualificação de aditivos incorporadores de ar para argamassas de assentamento e revestimento. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p.163 - 176.

MORALES, G.; BENINI, W.C.M. Caracterização das diferentes marcas de cals comercializadas na região da grande Londrina. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997.

MOSQUERA, M.J.; BENÍTEZ, D.; PERRY, S.H. Pore structure in mortars applied on restoration – effect on properties relevant to decay of granite buildings. **Cement and Concrete Research**, n 2133, p. 1-6, 2002.

NAKAKURA, E.H. **Análise e classificação das argamassas industrializadas segundo a NBR 13281 e a MERUC**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 136p.

NAPPI, S.C.B. **Uma solução alternativa para prorrogação da vida útil dos rebocos com salinidade em edifícios históricos**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

NETTO, C. G. **Química: da teoria à realidade**. São Paulo: Scipione, 1995.

NEVILLE, A.M.N. **Propriedades do Concreto**. 2º edição. São Paulo: Pini, 1997.

NIQUES, G.; GLEIZE, P.; SILVA, D.A.; ROMAN, H.R. Efeito do tempo de maturação na evolução da hidratação dos óxidos de uma cal dolomítica. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003.

OLIVEIRA, H.P. **Uma introdução para o emprego racional das argamassas nos edifícios**. Universidade da Bahia. Salvador, agosto, 1959, 53p.

OLIVEIRA, F.L. **Reabilitação de paredes de alvenaria pela aplicação de revestimentos resistentes de argamassa armada**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PEREZ, A.R. Umidade nas edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas (1º parte). . In: \_\_\_\_\_. **Tecnologia das Edificações**. São Paulo: Pini/IPT, 1988. p. 571-574.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1980. 435p.

- POLISSENI, A. E. **Método de campo para avaliar a capacidade impermeabilizante do revestimento de parede**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 140p.
- QUARCIONI, V.A.; CHOTOLI, F.F.; ALEIXO, D.M. Ensaio acelerado para simular a formação de eflorescência em argamassas endurecidas. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 595-604.
- RAGO, F.; CINCOTTO, M.A. **Influência do tipo de cal hidratada na reologia de pastas**. São Paulo, EPUSP, 1999, 24p (Boletim Técnico BT/PCC/233).
- RAMACHANDRAN, V. S. Concrete Admixtures Handbook. **Properties, Science and Technology**. New Jersey: Noyes Publication, 1984, 626p.
- RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. **RILEM Recommendations MR-10: Testing methods of mortars and renderings**, Paris, France, RILEM, 1982.
- RIBEIRO, J.L.D.; TEN CATEN, C. **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2001. 128p.
- RIETZSCHEL, L. **Historic Masonry – Methodologies of Investigation, Estimation, Repair and Strengthening**. Dresden University of Technology, School of Architecture, Chair of Structural Design, Germany. 2003, 195p.
- RIXOM, M.R.; MALIVAGANAM, N.P. **Chemical admixtures for concrete**. Second edition. London: E. & F.N. Spon Ltda, 1986. 306p.
- RUARO, P; GREVEN, H.; DAL MOLIN, D. Avaliação Sistema Eletro-Osmótico – SEOA na dessalinização de edificações históricas. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, 1997. p. 607-614.
- RUSSEL, J.B. **Química Geral**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1981. 897p.
- SABBATINI, F.H. Agregados miúdos para argamassas de assentamento. In: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1986. p. 17-25.
- SÉBAÏBI, Y.; DHEILLY, R.M.; QUÉNEUDEC, M. Study of the water-retention capacity of a lime-sand mortar: Influence of the physicochemical characteristics of the lime. **Cement and Concrete Research**, n 33, p. 689-696, 2003.
- SEELE, J. Umidade e salinidade nas edificações históricas. **Palestra**. (anotações). ULBRA, Canoas, RS, abril, 2004.
- SELMO, S.M.S. Agregados miúdos para argamassas de revestimento. In: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1986. p. 27-42.
- SELMO, S.M.S. **Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SILVA, D.A.; ROMAN, H.R. Caracterização microestrutural de pastas de cimento aditivadas com polímeros HEC e EVA. In.: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília, 2001, p. 15-41.

SILVA, D.A.; ROMAN, H.R. Pastas de cimento modificadas com polímeros HEC e EVA: estudo da distribuição e tamanho de poros. In.: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília, 2001, p. 321-331.

SOUSA, J.G.G.; BAUER, E. Contribuição ao estudo da trabalhabilidade das argamassas mistas. V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2003, p. 261-297.

SOUZA, G.F. Eflorescências nas argamassas e revestimento. II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997, p. 344 – 356.

STRAUBE, J. **Moisture, materials and buildings**. HPAC Engineering, April, 2002.p.37-46.<Disponível em :[www.hpac.com/microsites/egb/pdfs/straube\\_0402.pdf](http://www.hpac.com/microsites/egb/pdfs/straube_0402.pdf)>. Acesso em 20.05.2004.

STRAUBE, J. **Moisture Physics and Building Science**. University of Waterloo. Presentation, 2002. <Disponível em: [www.civil.uwaterloo.ca/beg/Downloads/Tufts-Dynamics-2002.PDF](http://www.civil.uwaterloo.ca/beg/Downloads/Tufts-Dynamics-2002.PDF)>. Acesso em 20.05.2004.

TERRA, R.C. **Levantamento de Manifestações Patológicas em Revestimentos de Fachadas das Edificações da Cidade de Pelotas**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TORRES, M.I.M. **Humidade ascensional em paredes**.1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Coimbra, Portugal, 146p.

TRISTÃO, F. **Influência da composição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento das edificações**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 172p.

VAN HESS, R. P. J.; GROOT, C.; PEL, L. **Compatibility of plasters and renders with salt loaded substrates in historic buildings**. <Disponível em: [www.heritage.xtd.pl/pdf/full\\_hees.pdf](http://www.heritage.xtd.pl/pdf/full_hees.pdf)>. Acesso em 13.05.2003.

WEBER,H. 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz – ein Erfahrungsbericht. In: **Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2**, Jahrgang, Heft 6, 1996, p. 551-565.

WIJFFELS, T.J.; VAN HEES, R.P.J. The influence of the loss of water of the fresh mortar to the substrate on the hygric characteristic of so-called restoration renderings. TNO **Building and Construction Research**, Netherlands. 2003, 6p.

WILIMZIG, M. Danos Causados por Sais e Microorganismos nas edificações. In: **PALESTRAS SOBRE RECUPERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRIAS - IAB/MARGS**, Porto Alegre, 2004. 20p.

WTA E-2-6-99/D. **Ergänzungen zum Merkblatt 2-2-91/D Sanierputzsysteme**. Zürich : WTA Publications, 2000, 6p.

**APÊNDICE A – ENSAIOS PRELIMINARES**

## ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares referem-se ao estudo de argamassas cuja proporção de materiais e aditivos foi baseada em pesquisa realizada por Bianchin (1999, p. 116). A proporção de materiais utilizada foi de 1:2:9 (cimento:cal hidratada:agregado miúdo seco) em volume, com adição de três teores de aditivo incorporador de ar e três teores de aditivo hidrofugante. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção (Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen) em Dresden, na Alemanha, permitindo assim a execução dos ensaios de acordo com as recomendações prescritas pelo Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91. Esta etapa teve como objetivo correlacionar os resultados obtidos com os valores apresentados por Bianchin (1999), bem como avaliar o comportamento destas argamassas em função dos teores de aditivo utilizados.

As variáveis controladas analisadas foram:

- a) teor de incorporador de ar de 0%, 0,43% e 1,3%, em relação à massa de cimento, pois compreende o teor ótimo global de 1% recomendado por Bianchin (1999, p.116);
- b) teor de hidrofugante: 0%, 0,8% e 2,4%, em relação à massa de cimento, pois o teor ótimo global de hidrofugante de 2% indicado por Bianchin (1999, p.116) está inserido neste intervalo.

### 1. MATERIAIS UTILIZADOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES

Os aglomerantes (cimento e cal hidratada), bem como os aditivos incorporador de ar e hidrofugante foram os mesmos utilizados no estudo experimental, e suas propriedades estão descritas no capítulo 4.1.

O agregado miúdo quartzoso (areia) é proveniente do Estado da Saxônia, Alemanha. Os valores da massa específica (DIN 4226 T-3, 1983) e massa unitária (DIN 4226 T-3, 1983) são de 2,60 kg/dm<sup>3</sup> e 1,54 kg/dm<sup>3</sup> respectivamente; a composição granulométrica foi determinada de acordo com a norma alemã DIN 4226 T.3 (1983), e seus valores estão apresentados na tabela 49.

Tabela 49: composição granulométrica do agregado miúdo

| Abertura da peneira (mm)                              | % Retida individual | % Retida acumulada |
|---|---------------------|--------------------|
| 2,0   | 0                   | 0                  |
| 1,0   | 14                  | 14                 |
| 0,5   | 22                  | 36                 |
| 0,25  | 49                  | 85                 |
| 0,125   | 14                  | 99                 |
| < 0,125   | 1                   | 100                |
| Dimensão Máx. Característica (NBR NM 248, ABNT, 2003) |                     | 1,0 mm             |
| Módulo de Finura (NBR NM 248, ABNT, 2003)             |                     | 3,34               |

Obs: não foi possível determinar a distribuição granulométrica conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), por não ter disponíveis as peneiras no laboratório na Alemanha.

### 2. MÉTODOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES

Ensaio realizados durante esta avaliação basearam-se nas prescrições do Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91. Foram realizadas duas determinações para cada um dos ensaios descritos na tabela 50. Todos os ensaios realizados com argamassa no estado endurecido foram feitos aos 28 dias de idade.

Tabela 50: relação dos ensaios e métodos utilizados durante os ensaios preliminares

| Propriedade                        | Método utilizado      |
|------------------------------------|-----------------------|
| <b>Estado Fresco</b>               |                       |
| Consistência                       | DIN 18555 – P2 (1982) |
| Trabalhabilidade                   | WTA 2-2-91 (1995)     |
| Teor de ar incorporado             | DIN 18555-P2 (1982)   |
| Massa específica                   |                       |
| <b>Estado Endurecido</b>           |                       |
| Massa específica                   | DIN 18555-P3 (1982)   |
| Absorção capilar de água           | DIN 52617 (1987)      |
| Profundidade de penetração de água |                       |
| Resistência aos sais               | WTA 2-2-91 (1995)     |

A confecção das argamassas foi realizada conforme apresenta o capítulo 4.3.1. Entretanto, a metodologia empregada para o preparo das argamassas foi baseada na WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.5), conforme descrição abaixo:

- a) colocação de parte da água, pasta de cal e cimento na argamassadeira;
- b) mistura em velocidade baixa por 15 segundos;
- c) adição da areia seca, aditivo hidrofugante e resto da água com o aditivo incorporador de ar e novamente mistura em velocidade baixa por 30 segundos;
- d) repouso da argamassa por 120 segundos e após nova mistura durante 15 segundos em velocidade baixa;
- e) após a confecção da argamassa, procedeu-se à execução dos ensaios no estado fresco e a moldagem dos corpos-de-prova.

Os ensaios de consistência e trabalhabilidade foram realizados conforme descrição no capítulo 4.3.2.

A massa específica no estado fresco foi determinada de acordo com a DIN 18555, parte 2, capítulo 3 (1982), sendo que o preenchimento e adensamento do material foram realizados utilizando o procedimento de choque. Inicialmente o recipiente foi preenchido com argamassa até a metade de sua altura. Para o adensamento do material, o recipiente foi levantado alternadamente a uma altura de aproximadamente 3 cm em ambos os lados, e deixado cair livremente, durante 10 vezes, sobre um substrato rígido. Posteriormente, este recipiente foi preenchido até o topo e repetido o adensamento da mesma maneira. O excesso de argamassa foi retirado com o auxílio de uma espátula metálica e verificada a massa do recipiente com argamassa. Conhecendo-se o volume e a massa inicial do recipiente, calculou-se a massa específica da amostra.

Após este ensaio, iniciou-se o procedimento para a determinação do teor de ar incorporado. Esta propriedade foi determinada de acordo com a DIN 18555, parte 2, capítulo 5 (1982). Este método consiste em posicionar a campânula de medida (aparato superior do instrumento de teste) sobre o recipiente com argamassa utilizado para o ensaio de massa específica, e vedar o conjunto. Em seguida, uma determinada quantidade de água é introduzida no equipamento, e, após, aplicada uma pressão de ar pré-estabelecida sobre a água por meio de uma pequena bomba.

De acordo com Cincotto, Silva e Carasek (1995, p.71), a determinação do teor de ar incorporado consiste na redução do volume de ar da amostra de argamassa, pela observação da quantidade de água que penetra sob a pressão aplicada, sendo que essa quantidade é calibrada em termos de porcentagem de vazios de ar na amostra de argamassa. Assim, o equipamento fornece diretamente o volume de ar contido na amostra (figura 39). Este método é conhecido como pressiométrico (manométrico).



Figura 39: instrumento utilizado para a determinação do teor de ar incorporado

Para os ensaios das argamassas no estado endurecido foram moldados corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos. A tabela 51 apresenta as dimensões dos corpos-de-prova confeccionados para cada ensaio.

Tabela 51: dimensões e formas dos corpos-de-prova de argamassa

| Ensaio                             | Forma       | Dimensões (mm) |
|------------------------------------|-------------|----------------|
| Massa unitária                     | Prismáticos | 40x40x160      |
| Absorção capilar de água           | Cilíndricos | 100x20         |
| Profundidade de penetração de água |             |                |
| Resistência aos sais               |             |                |

Os corpos-de-prova prismáticos foram moldados de acordo com o método da mesa vibratória, segundo a DIN 18555, parte 3, capítulo 3.2.4.1 (1982). Este equipamento produz vibrações uniaxiais e verticais, sendo que o número de vibrações por minuto é de 3.000 (50 Hz). Após a fôrma ser firmemente presa à mesa vibratória esta

foi ligada. O molde foi preenchido em duas camadas de argamassa durante um período de 45 segundos. O preenchimento da primeira camada foi realizado durante os primeiros 15 segundos; após uma pausa de 15 segundos no preenchimento do mesmo, a segunda camada foi introduzida durante os 15 segundos subseqüentes. O molde permaneceu por mais 75 segundos na mesa vibratória para o completo adensamento da argamassa (figura 40). A seguir, a fôrma foi retirada da mesa vibratória e o excesso de argamassa foi removido com uma espátula metálica.



Figura 40: adensamento dos corpos-de-prova com o uso de mesa vibratória

A moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos foi realizada de acordo com o procedimento de choque descrito pela DIN 18555, parte 2 (1982), detalhado na página anterior.

O armazenamento dos corpos-de-prova foi realizado conforme apresentado no capítulo 4.3.3 (figuras 41(a) e 41(b)). A desfôrma foi realizada no quarto dia após a moldagem.



(a)



(b)

Figura 41: armazenagem dos corpos-de-prova (a) cilíndricos e (b) prismáticos

Para os testes com argamassa endurecida, foram moldados 2 corpos-de-prova prismáticos e 2 corpos-de-prova cilíndricos para cada ensaio, totalizando 72 amostras. Os ensaios com argamassa no estado endurecido foram realizados aos 28 dias.

A determinação da massa unitária das argamassas no estado endurecido foi realizada de acordo com a DIN 18555, parte 3, capítulo 6.2 (1982), em corpos-de-prova prismáticos.

O ensaio de absorção capilar de água foi realizado de acordo com a DIN 52617 (1987). Para este ensaio, os corpos-de-prova foram previamente impermeabilizados lateralmente com parafina, com o objetivo de evitar a absorção capilar de água pela face lateral da amostra. A realização deste ensaio está descrita no capítulo 4.3.4.3. A figura 42 mostra os corpos-de-prova durante o ensaio de absorção de água por capilaridade.

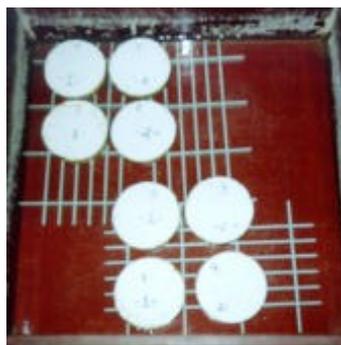


Figura 42: corpos-de-prova de argamassa durante o ensaio de absorção de água por capilaridade

Após a determinação da absorção de água por capilaridade, as amostras foram rompidas em seu eixo central, onde foi feita a medida da profundidade de penetração de água (ARENDR, 1995, p. 29). Verificou-se a altura, em mm, de água absorvida por capilaridade.

O teste que verifica a resistência aos sais dos rebocos de recuperação foi realizado de acordo com o Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p.30) em corpos-de-prova cilíndricos (figura 43), e está descrito no capítulo 4.3.4.4.



Figura 43: corpos-de-prova de argamassa durante o ensaio de resistência ao sais

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS DURANTE OS ENSAIOS PRELIMINARES

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente, verificando-se a influência dos teores de aditivo incorporador de ar e hidrofugante, bem como a interação entre estes fatores, através da análise de variância (ANOVA) utilizando o programa computacional Statistica for Windows versão 5.1. O nível de confiança utilizado foi de 95%, sendo este valor é normalmente adotado para a análise estatística de dados na Engenharia Civil.

#### 3.1 Propriedade das argamassas no estado fresco

Os valores médios obtidos nos ensaios das argamassas no estado fresco estão apresentados na tabela 52. Os resultados de todos os corpos-de-prova estão apresentados no apêndice B.

Tabela 52: propriedades das argamassas no estado fresco

| Teor de Incorp. de Ar (%) | Teor de Hidrof.(%) | Relação água/agl. | Índice de Consist (cm) | Trabalhab. (cm) | Teor de ar inc. (%) | Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|--------------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------------------|--|
| 0                         | 0                  | 1,33              | 17,90                  | 2,20            | 5,40                | 2,03                                   |
|                           | 0,80               | 1,37              | 17,50                  | 2,45            | 4,65                | 2,03                                   |
|                           | 2,40               | 1,37              | 17,50                  | 2,90            | 5,20                | 2,03                                   |
| 0,43                      | 0                  | 1,18              | 17,95                  | 1,55            | 16,80               | 1,70                                   |
|                           | 0,80               | 1,18              | 18,35                  | 1,35            | 18,00               | 1,75                                   |
|                           | 2,40               | 1,18              | 17,90                  | 0,80            | 15,95               | 1,75                                   |
| 1,30                      | 0                  | 1,19              | 19,00                  | 0,10            | 25,00               | 1,63                                   |
|                           | 0,80               | 1,16              | 19,30                  | 1,55            | 22,00               | 1,62                                   |
|                           | 2,40               | 1,18              | 19,05                  | 0,35            | 29,00               | 1,59                                   |

A consistência das argamassas estudadas durante esta etapa variaram entre 17,5 e 19,5 cm, estando dentro da faixa especificada, conforme mostrado na tabela 53. Os resultados obtidos para consistência sofreram influência apenas do aditivo incorporador de ar. A tabela 54 apresenta os resultados da análise de variância e a

figura 44 apresenta o comportamento do índice de consistência das argamassas em função do aditivo incorporador de ar.

Tabela 53: valores médios de consistência das argamassas

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Ind. de Consist (cm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Ind. de Consist (cm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Ind. de Consist (cm) |
|------------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------|----------------------|
| 0                      | 0                | 17,90                | 0,43                   | 0                | 17,95                | 1,30                   | 0                | 19,00                |
|                        | 0,80             | 17,50                |                        | 0,80             | 18,35                |                        | 0,80             | 19,30                |
|                        | 2,40             | 17,50                |                        | 2,40             | 17,90                |                        | 2,40             | 19,05                |

Tabela 54: análise de variância dos resultados da consistência das argamassas

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 3,490556       | 24,63922               | 4,26              | S             | 0,000224 |
| HID       | 2                  | 0,082222       | 0,58039                | 4,26              | NS            | 0,579320 |
| Interação | 4                  | 0,098889       | 0,69804                | 3,63              | NS            | 0,612280 |
| Erro      | 9                  | 0,141667       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de F

HID – Hidrofugante

F<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

NS- Não significativo

S- Significativo

De acordo com a figura 44 percebe-se que o índice de consistência das argamassas aumenta com o aumento do teor de aditivo incorporador de ar, independente do teor de hidrofugante utilizado. Estes resultados são contrários aos obtidos por Calhau e Tristão (1999, p. 224) e Bianchin (1999, p. 84), onde o uso de aditivo incorporador de ar em argamassas mistas 1:2:9 não apresentava variação significativa do índice de consistência. Segundo Ramachandran (1984, p. 284), o uso de aditivo incorporador de ar promove a melhora da trabalhabilidade das argamassas devido à ação de rolamento das bolhas de ar que são extremamente numerosas e compressíveis.

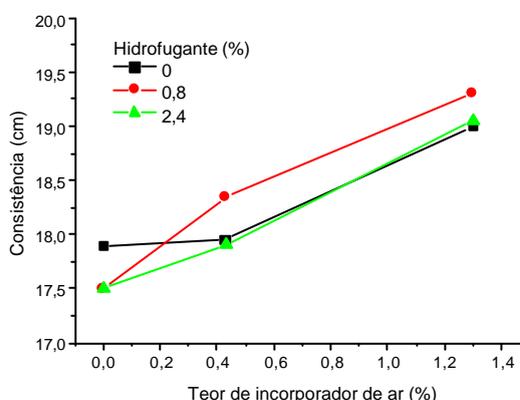


Figura 44: influência dos aditivo incorporador de ar no índice de consistência das argamassas com diferentes teores de hidrofugante

Os valores médios obtidos durante o ensaio de trabalhabilidade das argamassas estão apresentados na tabela 55. Esta propriedade é influenciada significativamente pelo aditivo incorporador de ar e pelo hidrofugante, bem como pela interação entre eles. A tabela 56 apresenta os resultados da análise de variância, e as figuras 45 e 46 mostram o comportamento da trabalhabilidade das argamassas em função dos aditivos incorporador de ar e hidrofugante, respectivamente.

Tabela 55: valores médios de trabalhabilidade das argamassas

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Trab. (cm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Trab. (cm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Trab. (cm) |
|------------------------|------------------|------------|------------------------|------------------|------------|------------------------|------------------|------------|
| 0                      | 0                | 2,20       | 0,43                   | 0                | 1,55       | 1,30                   | 0                | 0,10       |
|                        | 0,80             | 2,45       |                        | 0,80             | 1,35       |                        | 0,80             | 1,55       |
|                        | 2,40             | 2,90       |                        | 2,40             | 0,80       |                        | 2,40             | 0,35       |

Tabela 56: análise de variância dos resultados da trabalhabilidade das argamassas

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 1,261667       | 14,46497               | 4,26              | S             | 0,001544 |
| HID       | 2                  | 1,755000       | 20,12102               | 4,26              | S             | 0,000477 |
| Interação | 4                  | 0,456667       | 5,23567                | 3,63              | S             | 0,018559 |
| Erro      | 9                  | 0,087222       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar

HID – Hidrofugante

NS- Não significativo

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de FF<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S- Significativo

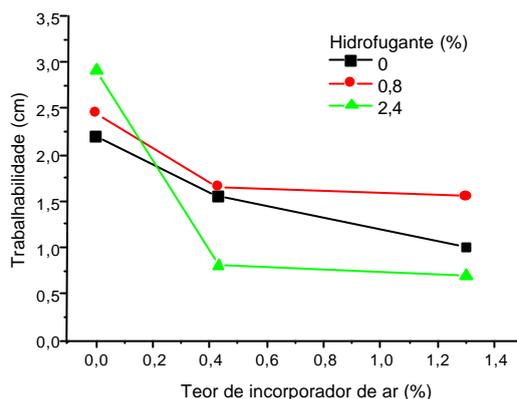


Figura 45: influência do aditivo incorporador de ar na trabalhabilidade em argamassas com diferentes teores de hidrofugante

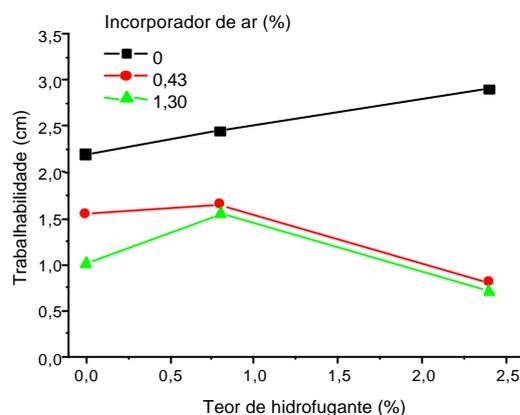


Figura 46: influência do aditivo hidrofugante na trabalhabilidade de argamassas com diferentes teores de incorporador de ar

De acordo com a figura 46, pode-se perceber que o uso do aditivo incorporador tende a reduzir a trabalhabilidade das argamassas, ou seja, a variação do índice de consistência tende a diminuir. Isto pode ser devido à redução da água de exsudação e ao aumento da retenção de água, conforme estudos realizados por Calhau e Tristão (1999, p. 223). No que se refere ao hidrofugante, este aditivo proporciona aumento da trabalhabilidade em argamassas sem incorporador de ar. Entretanto, em argamassas com este aditivo, altos teores de hidrofugante tendem a reduzir a trabalhabilidade. Desta forma, são indicados teores de incorporador de ar e hidrofugante 1,3% e 2,4%, respectivamente.

Tabela 57: valores médios da relação água/aglomerante das argamassas

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Rel. água/agl. | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Rel. água/agl. | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Rel. água/agl. |
|------------------------|------------------|----------------|------------------------|------------------|----------------|------------------------|------------------|----------------|
| 0                      | 0                | 1,33           | 0,43                   | 0                | 1,18           | 1,30                   | 0                | 1,19           |
|                        | 0,80             | 1,37           |                        | 0,80             | 1,18           |                        | 0,80             | 1,16           |
|                        | 2,40             | 1,37           |                        | 2,40             | 1,18           |                        | 2,40             | 1,18           |

A relação água/aglomerante das argamassas variou entre 1,16 e 1,37 (tabela 57). Através da análise de variância, verificou-se a influência significativa dos aditivos incorporador de ar e hidrofugante, bem como da interação entre eles na relação água/aglomerante, como mostra a tabela 58.

Tabela 58: análise de variância dos resultados da relação água/aglomerante das argamassas

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 0,063646       | 4547,139               | 4,26              | S             | 0,000000 |
| HID       | 2                  | 0,000182       | 13,020                 | 4,26              | S             | 0,002206 |
| Interação | 4                  | 0,000510       | 36,424                 | 3,63              | S             | 0,000014 |
| Erro      | 9                  | 0,000014       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de F

HID – Hidrofugante

F<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

NS- Não significativo

S- Significativo

De acordo com a figura 47, nota-se que as argamassas com teor de incorporador de ar de 0,43% e 1,30% apresentam redução significativa na relação água/aglomerante de aproximadamente 13% quando comparada à argamassa de referência (0%). Segundo Neville (1997, p. 553), mantendo-se fixa a trabalhabilidade da argamassa, a inclusão de ar incorporado pode ser acompanhada de uma redução na relação água/cimento.

As argamassas sem incorporador de ar apresentam aumento de aproximadamente 3% na relação água/aglomerante quando o teor de hidrofugante aumenta para 0,8% (figura 48). A partir deste teor, a relação água/aglomerante mantém-se praticamente constante. Em argamassas com teor de incorporador de ar igual a 0,43% a relação água/aglomerante mantém-se constante com o aumento do aditivo hidrofugante. Entretanto, argamassas com teor de incorporador de ar igual a 1,3%, a relação água/aglomerante reduz aproximadamente 3% quando o teor de hidrofugante aumenta de 0% a 0,8%, e torna a aumentar quando o teor de hidrofugante aumenta para 2,4%.

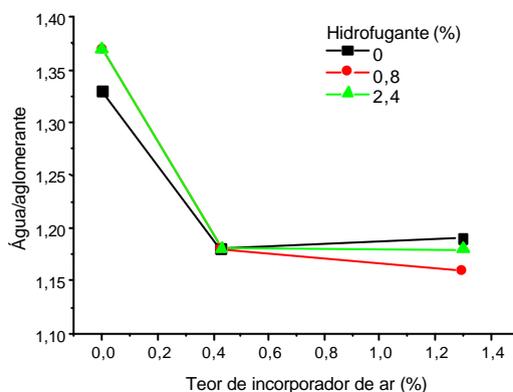


Figura 47: influência do aditivo incorporador de ar na relação água/aglomerante em argamassas com diferentes teores de hidrofugante

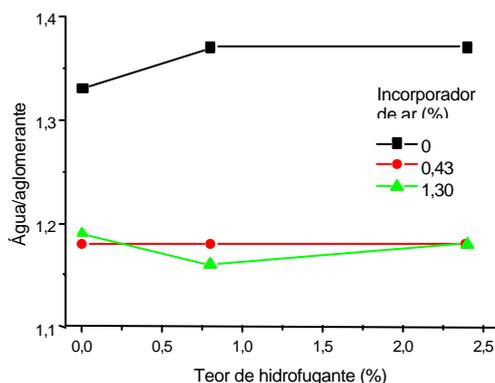


Figura 48: influência do aditivo hidrofugante na relação água/aglomerante em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar

Os valores médios obtidos no ensaio de teor de ar incorporado das argamassas estão apresentados na tabela 59. De acordo com a análise de variância do teor de ar incorporado, verificou-se significância dos aditivos incorporador de ar e hidrofugante, bem como a interação entre eles para nas argamassas estudadas. A tabela 60 apresenta os resultados desta análise e as figuras 49 e 50 apresentam o comportamento do teor de ar incorporado das argamassas em função dos aditivos utilizados.

Tabela 59: valores médios do teor de ar incorporado das argamassas

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Teor de ar inc. (%) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Teor de ar inc. (%) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Teor de ar inc. (%) |
|------------------------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| 0                      | 0                | 5,40                | 0,43                   | 0                | 16,80               | 1,30                   | 0                | 25,00               |
|                        | 0,80             | 4,65                |                        | 0,80             | 18,00               |                        | 0,80             | 22,00               |
|                        | 2,40             | 5,20                |                        | 2,40             | 15,95               |                        | 2,40             | 29,00               |

Tabela 60: análise de variância dos resultados do teor de ar incorporado das argamassas

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 620,9305       | 885,6379               | 4,26              | S             | 0,000000 |
| HID       | 2                  | 5,0506         | 7,2036                 | 4,26              | S             | 0,013552 |
| Interação | 4                  | 11,0197        | 15,7175                | 3,63              | S             | 0,000430 |
| Erro      | 9                  | 0,701111       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar

HID – Hidrofugante

NS- Não significativo

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de F

F<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S- Significativo

De acordo com a figura 49, pode-se perceber que o uso de incorporador de ar aumenta consideravelmente o teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco em aproximadamente 80%, independentemente do teor de hidrofugante utilizado. O mesmo comportamento foi encontrado por Bianchin (1999, p. 93). Além disso, teor de aditivo hidrofugante de 2,4% permite valores superiores de ar incorporado.

A figura 50 apresenta o comportamento do teor de ar incorporado em função do teor de hidrofugante em argamassas com diversos teores de incorporador de ar. Percebe-se que em argamassas com teor máximo de incorporador de ar, o teor de ar incorporado diminui cerca de 12% quando se adiciona 0,8% de hidrofugante, e aumenta aproximadamente 22% o com o aumento do teor de hidrofugante para 2,4%. Assim, argamassas que possuem teores máximos de incorporador de ar e hidrofugante apresentaram teores maiores de ar incorporado.

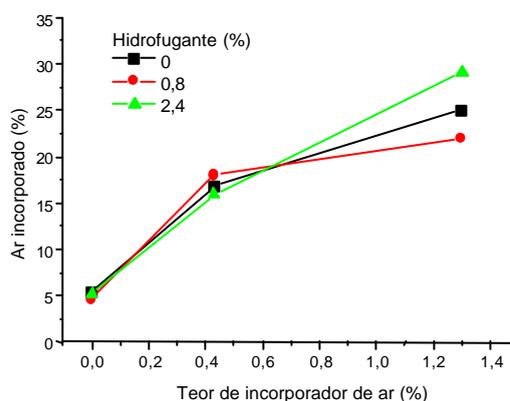


Figura 49: influência do aditivo incorporador de ar no teor de ar incorporado em argamassas com diferentes teores de hidrofugante

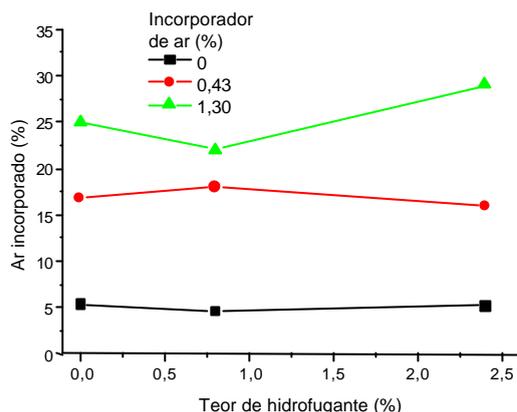


Figura 50: influência do aditivo hidrofugante no teor de ar incorporado em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar

De acordo com o Caderno de Recomendações WTA 2-2-91 (ARENDR, 1995, p. 25), as argamassas para reboco de recuperação devem apresentar teor de ar incorporado superior a 20%. Portanto, as argamassas que apresentaram esta propriedade foram as misturas com teor de incorporador de ar e hidrofugante de 1,3% e 2,4%, respectivamente.

Na tabela 661 estão apresentados os valores médios obtidos nos ensaios de massa específica das argamassas no estado fresco. Ao realizar a análise de variância destes resultados, apenas o aditivo incorporador de ar mostrou-se significativo (tabela 62). Desta forma, não há influência do aditivo hidrofugante, nem mesmo da interação entre eles, em relação à massa específica das argamassas.

Tabela 61: valores médios da massa específica das argamassas no estado fresco

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------|
| 0                      | 0                | 2,03                             | 0,43                   | 0                | 1,70                             | 1,30                   | 0                | 1,63                             |
|                        | 0,80             | 2,03                             |                        | 0,80             | 1,75                             |                        | 0,80             | 1,62                             |
|                        | 2,40             | 2,03                             |                        | 2,40             | 1,75                             |                        | 2,40             | 1,59                             |

Tabela 62: análise de variância dos resultados massa específica das argamassas no estado fresco

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 0,276022       | 89,52072               | 4,26              | S             | 0,000001 |
| HID       | 2                  | 0,000289       | 0,09369                | 4,26              | NS            | 0,911438 |
| Interação | 4                  | 0,000981       | 0,31802                | 3,63              | NS            | 0,859002 |
| Erro      | 9                  | 0,003083       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar

HID – Hidrofugante

NS- Não significativo

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de F

F<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

S- Significativo

Pode-se observar na figura 51 que, à medida que o teor de incorporador de ar aumenta, a massa específica das argamassas no estado fresco diminui significativamente, conforme esperado. Para o aumento do teor de incorporador de ar de 0% a 1,3%, a massa específica diminui em aproximadamente 21%. Estudos realizados por Bianchin (1999, p. 96) em argamassas mistas apresentaram comportamento similar. Isto se deve ao maior volume de vazios proporcionado pelo uso de aditivo incorporador de ar em argamassas. Não há prescrição referente a esta propriedade no Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91.

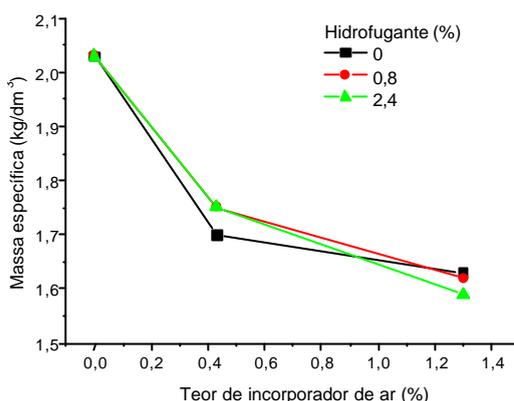


Figura 51: influência do aditivo incorporador de ar na massa específica de argamassas com diferentes teores de hidrofugante

Os valores médios obtidos nos ensaios das argamassas 1:2:9 (cimento:cal:areia seca), em volume, no estado endurecido estão apresentados na tabela 63. Os resultados de todos os corpos-de-prova estão apresentados no apêndice B.

Tabela 63: propriedades das argamassas no estado endurecido

| Teor de Incorporador de Ar (%) | Teor de Hidrofugante (%) | Massa específica aparente (kg/dm <sup>3</sup> ) | Absorção capilar (kg/m <sup>2</sup> ) | Altura de penetração de água (mm) | Resistência aos Sais (dias) |
|--------------------------------|--------------------------|---|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 0                              | 0                        | 1,83  | 5,02                                  | 21,83                             | 0                           |
|                                | 0,80                     | 1,87  | 5,27                                  | 21,36                             | 0                           |
|                                | 2,40                     | 1,85  | 4,78                                  | 22,28                             | 0                           |
| 0,43                           | 0                        | 1,57  | 4,30                                  | 21,14                             | 0                           |
|                                | 0,80                     | 1,59  | 4,55                                  | 21,16                             | 0                           |
|                                | 2,40                     | 1,61  | 4,67                                  | 22,14                             | 0                           |
| 1,30                           | 0                        | 1,49  | 4,50                                  | 22,43                             | 0                           |
|                                | 0,80                     | 1,49  | 4,64                                  | 20,78                             | 0                           |
|                                | 2,40                     | 1,42  | 4,04                                  | 22,97                             | 0                           |

### 3.2 Propriedade das argamassas no estado endurecido

Os valores médios obtidos no ensaio da massa específica aparente das argamassas no estado endurecido estão apresentados na tabela 64. Ao realizar a análise de variância destes resultados, verificou-se que os aditivos incorporador de ar e hidrofugante, bem como a interação entre os mesmos, foram significantes para esta propriedade, como mostra a tabela 65.

Tabela 64: valores médios da massa específica aparente das argamassas no estado endurecido

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. ap. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. ap. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Massa esp. ap. (kg/dm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------------------|
| 0                      | 0                | 1,83                                 | 0,43                   | 0                | 1,57                                 | 1,30                   | 0                | 1,49                                 |
|                        | 0,80             | 1,87                                 |                        | 0,80             | 1,59                                 |                        | 0,80             | 1,49                                 |
|                        | 2,40             | 1,85                                 |                        | 2,40             | 1,61                                 |                        | 2,40             | 1,42                                 |

Tabela 65: análise de variância dos resultados massa específica aparente das argamassas no estado endurecido

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 0,232949       | 7356,214               | 4,26              | S             | 0,000000 |
| HID       | 2                  | 0,001161       | 36,657                 | 4,26              | S             | 0,000047 |
| Interação | 4                  | 0,002184       | 68,972                 | 3,63              | S             | 0,000001 |

IA – Incorporador de ar  
HID – Hidrofugante  
NS- Não significativo

F<sub>calculado</sub>- Valor calculado de F  
F<sub>0,05</sub>- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%  
S- Significativo

De acordo com a figura 52, verifica-se que a massa específica aparente das argamassas diminuiu aproximadamente 22% com o aumento do teor de incorporador de ar de 0% para 1,3%, independentemente do teor de hidrofugante utilizado. Esta redução deve-se à estabilização das bolhas de ar que foram formadas durante a mistura da argamassa pela ação do aditivo incorporador de ar (NEVILLE, 1997, p. 540). Redução similar foi encontrada em relação à massa específica das argamassas no estado fresco.

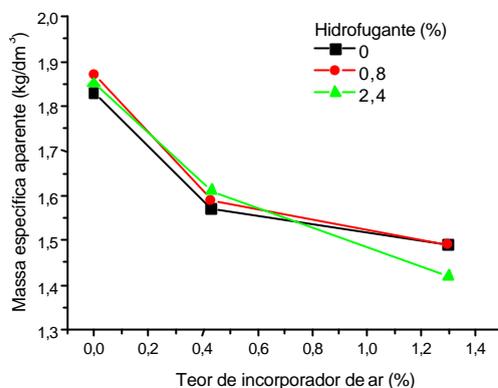


Figura 52: influência do aditivo incorporador de ar na massa específica aparente de argamassas com diferentes teores de hidrofugante

A figura 53 mostra a variação da massa específica aparente com o aumento do teor de hidrofugante em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar. Percebe-se que em argamassas com alto teor de incorporador de ar ocorre maior redução da massa específica aparente em função do aumento do teor de hidrofugante.

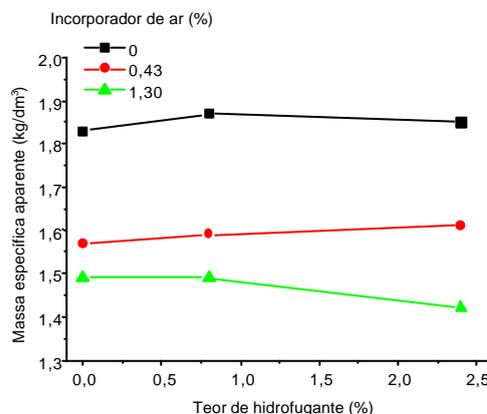


Figura 53: influência do aditivo hidrofugante na massa específica aparente de argamassas com diferentes teores de incorporador de ar

A recomendação alemã para os rebocos de recuperação, de acordo com a WTA 2-2-91, é de que a massa específica aparente das argamassas deve ser inferior a  $1,4 \text{ kg/dm}^3$ . Desta forma, as misturas que apresentaram valores de massa específica aparente no estado endurecido foram somente as argamassas com altos teores de incorporador de ar e hidrofugante.

A tabela 66 apresenta os valores médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade. De acordo com a análise de variância destes resultados, não houve influência significativa dos aditivos incorporador de ar e hidrofugante, bem como da interação entre eles, como pode ser verificado na tabela 67

Tabela 66: valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Abs. Capilar ( $\text{kg/m}^2$ ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Abs. Capilar ( $\text{kg/m}^2$ ) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Abs. Capilar ( $\text{kg/m}^2$ ) |
|------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------|
| 0                      | 0                | 5,02                             | 0,43                   | 0                | 4,30                             | 1,30                   | 0                | 4,50                             |
|                        | 0,80             | 5,27                             |                        | 0,80             | 4,55                             |                        | 0,80             | 4,64                             |
|                        | 2,40             | 4,78                             |                        | 2,40             | 4,67                             |                        | 2,40             | 4,04                             |

Tabela 67: análise de variância dos resultados de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 0,681207       | 3,193300               | 4,26              | NS            | 0,089526 |
| HID       | 2                  | 0,163905       | 0,768337               | 4,26              | NS            | 0,491955 |
| Interação | 4                  | 0,112358       | 0,526701               | 3,63              | NS            | 0,719371 |
| Erro      | 9                  | 0,213324       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar  
 HID – Hidrofugante  
 NS- Não significativo  
 S- Significativo  
 $F_{\text{calculado}}$ - Valor calculado de F  
 $F_{0,05}$ - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

Na tabela 68 estão apresentados os valores médios da altura de penetração de água por capilaridade das argamassas. Ao verificar a influência dos aditivos na altura de penetração de água por capilaridade nas argamassas estudadas, apenas o aditivo hidrofugante mostrou significância para esta propriedade, como mostra a tabela 69.

Tabela 68: valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido

| Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Alt. pen. de água (mm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Alt. pen. de água (mm) | Teor de Inc. de Ar (%) | Teor de Hid. (%) | Alt. pen. de água (mm) |
|------------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| 0                      | 0                | 21,83                  | 0,43                   | 0                | 21,14                  | 1,30                   | 0                | 22,43                  |
|                        | 0,80             | 21,36                  |                        | 0,80             | 21,16                  |                        | 0,80             | 20,78                  |
|                        | 2,40             | 22,28                  |                        | 2,40             | 22,14                  |                        | 2,40             | 22,97                  |

Tabela 69: análise de variância dos resultados de altura de penetração de água por capilaridade das argamassas no estado endurecido

| Fator     | Graus de Liberdade | Média Quadrada | F <sub>calculado</sub> | F <sub>0,05</sub> | Significância | p-level  |
|-----------|--------------------|----------------|------------------------|-------------------|---------------|----------|
| IA        | 2                  | 0,507572       | 2,28305                | 4,26              | NS            | 0,157777 |
| HID       | 2                  | 2,802401       | 12,60513               | 4,26              | S             | 0,002457 |
| Interação | 4                  | 0,440691       | 1,98222                | 3,63              | NS            | 0,181007 |
| Erro      | 9                  | 0,222322       | -                      | -                 | -             | -        |

IA – Incorporador de ar  
 HID – Hidrofugante  
 NS- Não significativo  
 S- Significativo  
 $F_{\text{calculado}}$ - Valor calculado de F  
 $F_{0,05}$ - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

A figura 54 apresenta a altura de penetração de água em função do aditivo hidrofugante para as argamassas com diferentes teores de incorporador de ar. Percebe-se que a menor altura de penetração de água ocorre em corpos-de-prova com teor de hidrofugante de 0,8%, em argamassas com altos teores de incorporador de ar.

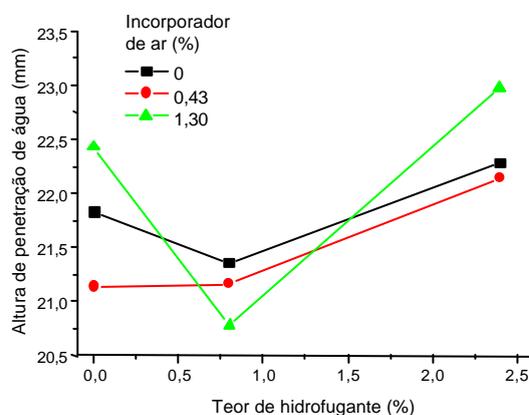


Figura 54: influência do aditivo hidrofugante na altura de penetração de água em argamassas com diferentes teores de incorporador de ar

As argamassas estudadas não apresentaram resistência aos sais, sendo que a solução salina atravessou o corpo-de-prova após algumas horas do início do ensaio. Desta forma, não há possibilidade de analisar os resultados. Entretanto, Bianchin (1999, p. 135), ao avaliar argamassas 1:2:9 (cimento: cal: areia), encontrou resistência aos sais de 6 a 12 dias.

#### 4. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ENSAIOS PRELIMINARES

As argamassas não apresentaram todas as propriedades necessárias para satisfazer as prescrições recomendadas para argamassas de reboco de recuperação WTA 2-2-91. A tabela 70 apresenta um comparativo dos resultados obtidos com os valores prescritos pelo Caderno de Recomendações Alemão WTA 2-2-91 (ARENDDT, 1995, p.25), bem como a indicação dos teores de aditivo incorporador de ar (IA) e hidrofugante (HID) das argamassas que atenderam a estas prescrições.

Tabela 70: comparação dos resultados obtidos com as propriedades prescritas pela WTA 2-2-91

| Propriedade                                     | Prescrição WTA 2-2-91 | Propriedade alcançada | Teores de IA e HID (%) indicado |
|---|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| <b>Estado Fresco</b>                            |                       |                       |                                 |
| Índice de consistência (cm)                     | 17,0±0,5              | não*                  | -                               |
| Trabalhabilidade (cm)                           | < 3                   | sim                   | 1,3 / 2,4                       |
| Teor de ar incorporado (%)                      | > 20                  | sim                   | 1,3 / 2,4                       |
| <b>Estado Endurecido</b>                        |                       |                       |                                 |
| Massa específica aparente (kg/dm <sup>3</sup> ) | < 1,40                | sim                   | 1,3 / 2,4                       |
| Absorção capilar de água (kg/m <sup>2</sup> )   | > 0,30                | sim                   | 0 / 0,8                         |
| Profundidade de penetração de água (mm)         | < 5                   | não                   | -                               |
| Resistência aos sais (dias)                     | > 10                  | não                   | -                               |

\* índice de consistência de 18,5±1 cm, em função da aplicabilidade do material

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que, dentre as sete propriedades analisadas, duas não puderam ser alcançadas, como é o caso da profundidade de penetração de água e resistência aos sais. Estas propriedades estão relacionadas com a alta permeabilidade das argamassas estudadas. Sabendo-se que o teor de cal nas argamassas é diretamente proporcional à permeabilidade das mesmas, optou-se por reduzir a relação cal/cimento das argamassas a serem estudadas o estudo experimental. Além disso, procurou-se utilizar uma composição granulométrica contínua do agregado miúdo, pois, desta forma, a permeabilidade das argamassas pode ser reduzida (SABATINI, 1986, p. 20).

Uma vez que algumas argamassas apresentaram valores de massa específica aparente superior ao limite prescrito pela WTA 2-2-91, decidiu-se adicionar na composição do material inerte uma fração de agregado miúdo leve.

A retentividade de água é uma característica das argamassas que favorece as reações de hidratação do cimento, pois evitam a perda de água da argamassa para o substrato e regulam a retração por secagem, melhorando também a resistência de aderência do revestimento (SELMO, 1989, p. 60). Assim, foi utilizado um aditivo retentor de água juntamente com os aditivos incorporador de ar e hidrofugante, buscando otimizar a proposta apresentada por Biachin (1999).

**APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS  
PRELIMINARES**

Tabela 71: resultados dos ensaios realizados durante a etapa preliminar

| Teor de Aditivo |         | Argamassa Fresca |                    |                 |                |                               | Argamassa Endurecida          |                                |                     |  |
|-----------------|---------|------------------|--------------------|-----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|--|
| IA (%)          | HID (%) | A/Agl            | Índ. Consist. (cm) | Trabalhab. (cm) | Ar Incorp. (%) | M. Esp. (kg/dm <sup>3</sup> ) | M. Esp. (kg/dm <sup>3</sup> ) | Abs. Cap. (kg/m <sup>2</sup> ) | Alt. Pen. Água (mm) |  |
| 1,3             | 0       | 1,18             | 18,50              | 0,00            | 24             | 1,61                          | 1,50                          | 4,53                           | 22,99               |  |
| 1,3             | 0       | 1,19             | 19,50              | 0,70            | 26             | 1,64                          | 1,48                          | 4,48                           | 21,86               |  |
| média           |         | 1,19             | 19,00              | 0,35            | 25             | 1,63                          | 1,49                          | 4,50                           | 22,43               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,71               | 0,49            | 1,41           | 0,02                          | 0,01                          | 0,04                           | 0,80                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,31             | 3,72               | 141,42          | 5,66           | 1,31                          | 0,95                          | 0,80                           | 3,56                |  |
| 0               | 2,4     | 1,37             | 18,00              | 0,90            | 5              | 2,04                          | 1,85                          | 4,89                           | 22,58               |  |
| 0               | 2,4     | 1,37             | 17,00              | 0,50            | 5              | 2,01                          | 1,85                          | 4,68                           | 21,99               |  |
| média           |         | 1,37             | 17,50              | 0,70            | 5              | 2,03                          | 1,85                          | 4,78                           | 22,28               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,71               | 0,28            | 0,28           | 0,02                          | 0,00                          | 0,15                           | 0,42                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,04             | 4,04               | 40,41           | 5,44           | 1,05                          | 0,02                          | 3,11                           | 1,87                |  |
| 1,3             | 2,4     | 1,18             | 19,30              | 0,70            | 30             | 1,61                          | 1,42                          | 3,75                           | 23,01               |  |
| 1,3             | 2,4     | 1,18             | 18,80              | 0,00            | 28             | 1,57                          | 1,42                          | 4,33                           | 22,94               |  |
| média           |         | 1,18             | 19,05              | 0,35            | 29             | 1,59                          | 1,42                          | 4,04                           | 22,97               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,35               | 0,49            | 1,41           | 0,03                          | 0,00                          | 0,41                           | 0,05                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,28             | 1,86               | 141,42          | 4,88           | 1,78                          | 0,14                          | 10,23                          | 0,22                |  |
| 0               | 0       | 1,33             | 17,90              | 2,00            | 5              | 2,04                          | 1,83                          | 4,94                           | 21,62               |  |
| 0               | 0       | 1,34             | 17,90              | 2,40            | 6              | 2,02                          | 1,83                          | 5,11                           | 22,05               |  |
| média           |         | 1,33             | 17,90              | 2,20            | 5              | 2,03                          | 1,83                          | 5,02                           | 21,83               |  |
| desv pad        |         | 0,01             | 0,00               | 0,28            | 0,28           | 0,01                          | 0,01                          | 0,12                           | 0,30                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,62             | 0,00               | 12,86           | 5,24           | 0,70                          | 0,32                          | 2,39                           | 1,38                |  |
| 0,43            | 0,8     | 1,18             | 18,20              | 1,20            | 18             | 1,78                          | 1,59                          | 3,69                           | 20,75               |  |
| 0,43            | 0,8     | 1,18             | 18,50              | 1,50            | 18             | 1,71                          | 1,59                          | 5,42                           | 21,57               |  |
| média           |         | 1,18             | 18,35              | 1,35            | 18             | 1,75                          | 1,59                          | 4,55                           | 21,16               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,21               | 0,21            | 0,28           | 0,05                          | 0,00                          | 1,22                           | 0,58                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,28             | 1,16               | 15,71           | 1,57           | 2,84                          | 0,06                          | 26,73                          | 2,74                |  |
| 1,3             | 0,8     | 1,16             | 19,30              | 1,50            | 23             | 1,65                          | 1,49                          | 4,95                           | 20,69               |  |
| 1,3             | 0,8     | 1,16             | 19,30              | 1,60            | 21             | 1,59                          | 1,49                          | 4,32                           | 20,87               |  |
| média           |         | 1,16             | 19,30              | 1,55            | 22             | 1,62                          | 1,49                          | 4,64                           | 20,78               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,00               | 0,07            | 1,41           | 0,04                          | 0,00                          | 0,44                           | 0,13                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,26             | 0,00               | 4,56            | 6,43           | 2,62                          | 0,06                          | 9,56                           | 0,61                |  |
| 0,43            | 2,4     | 1,18             | 17,80              | 0,70            | 16             | 1,77                          | 1,62                          | 4,79                           | 22,69               |  |
| 0,43            | 2,4     | 1,18             | 18,00              | 0,90            | 16             | 1,73                          | 1,61                          | 4,54                           | 21,60               |  |
| média           |         | 1,18             | 17,90              | 0,80            | 16             | 1,75                          | 1,61                          | 4,67                           | 22,14               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,14               | 0,14            | 0,21           | 0,03                          | 0,00                          | 0,18                           | 0,77                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,28             | 0,79               | 17,68           | 1,33           | 1,62                          | 0,20                          | 3,82                           | 3,50                |  |
| 0               | 0,8     | 1,37             | 17,70              | 2,00            | 5              | 2,01                          | 1,87                          | 5,29                           | 21,38               |  |
| 0               | 0,8     | 1,37             | 17,30              | 2,20            | 5              | 2,05                          | 1,87                          | 5,25                           | 21,34               |  |
| média           |         | 1,37             | 17,50              | 2,10            | 5              | 2,03                          | 1,87                          | 5,27                           | 21,36               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,28               | 0,14            | 0,07           | 0,03                          | 0,00                          | 0,03                           | 0,02                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,04             | 1,62               | 6,73            | 1,52           | 1,39                          | 0,07                          | 0,49                           | 0,12                |  |
| 0,43            | 0       | 1,18             | 17,90              | 1,40            | 17             | 1,60                          | 1,56                          | 4,29                           | 20,88               |  |
| 0,43            | 0       | 1,18             | 18,00              | 1,70            | 17             | 1,80                          | 1,57                          | 4,30                           | 21,41               |  |
| média           |         | 1,18             | 17,95              | 1,55            | 17             | 1,70                          | 1,57                          | 4,30                           | 21,14               |  |
| desv pad        |         | 0,00             | 0,07               | 0,21            | 0,14           | 0,14                          | 0,01                          | 0,01                           | 0,38                |  |
| coef.var. (%)   |         | 0,01             | 0,39               | 13,69           | 0,84           | 8,32                          | 0,37                          | 0,24                           | 1,79                |  |

## **APÊNDICE C – RESULTADOS DOS ENSAIOS**

Tabela 72: resultados dos ensaios realizados em argamassa fresca

| Código nº     | A/Cim | A/Agl | Índ.Consist.<br>(cm) | Trabalhab.<br>(cm) | Ar Incorp.<br>(%) | Ret. de<br>Água (%) | M. Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------|-------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1             | 1,36  | 1,07  | 18,67                | 0,70               | 42                | 99                  | 1,47                             |
| 1             | 1,36  | 1,07  | 18,87                | 1,60               | 40                | 99                  | 1,48                             |
| 1             | 1,36  | 1,07  | 18,77                | 1,10               | 41                | 100                 | 1,45                             |
| média         | -     | -     | 18,77                | 1,13               | 41,24             | 99,08               | 1,47                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,45               | 0,89              | 0,42                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,52                 | 39,79              | 2,15              | 0,42                | 0,91                             |
| 2             | 1,41  | 1,11  | 19,11                | 1,65               | 44                | 100                 | 1,45                             |
| 2             | 1,41  | 1,11  | 19,30                | 1,60               | 43                | 100                 | 1,45                             |
| 2             | 1,41  | 1,11  | 19,21                | 1,60               | 42                | 100                 | 1,45                             |
| média         | -     | -     | 19,21                | 1,62               | 43,15             | 99,71               | 1,45                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,03               | 1,24              | 0,03                | 0,00                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,51                 | 1,79               | 2,86              | 0,03                | 0,27                             |
| 3             | 1,39  | 1,10  | 19,45                | 0,70               | 44                | 99                  | 1,43                             |
| 3             | 1,39  | 1,10  | 19,54                | 1,35               | 42                | 99                  | 1,44                             |
| 3             | 1,39  | 1,10  | 19,50                | 1,05               | 43                | 99                  | 1,42                             |
| média         | -     | -     | 19,50                | 1,03               | 42,78             | 99,17               | 1,43                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,04                 | 0,33               | 1,21              | 0,02                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,23                 | 31,48              | 2,83              | 0,02                | 0,68                             |
| 4             | 1,36  | 1,07  | 18,62                | 1,42               | 39                | 100                 | 1,49                             |
| 4             | 1,36  | 1,07  | 18,24                | 2,30               | 38                | 100                 | 1,52                             |
| 4             | 1,36  | 1,07  | 18,43                | 2,09               | 39                | 100                 | 1,50                             |
| média         | -     | -     | 18,43                | 1,94               | 38,83             | 99,79               | 1,50                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,19                 | 0,46               | 0,58              | 0,12                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 1,05                 | 23,73              | 1,49              | 0,12                | 0,95                             |
| 5             | 1,37  | 1,08  | 19,57                | 1,56               | 46                | 98                  | 1,38                             |
| 5             | 1,37  | 1,08  | 19,33                | 1,55               | 44                | 98                  | 1,38                             |
| 5             | 1,37  | 1,08  | 19,45                | 1,58               | 45                | 99                  | 1,38                             |
| média         | -     | -     | 19,45                | 1,56               | 44,81             | 98,48               | 1,38                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,12                 | 0,01               | 0,75              | 0,03                | 0,00                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,61                 | 0,81               | 1,67              | 0,03                | 0,27                             |
| 6             | 1,41  | 1,11  | 18,82                | 0,90               | 44                | 100                 | 1,44                             |
| 6             | 1,41  | 1,11  | 18,92                | 1,50               | 43                | 99                  | 1,42                             |
| 6             | 1,41  | 1,11  | 18,87                | 1,22               | 42                | 100                 | 1,47                             |
| média         | -     | -     | 18,87                | 1,21               | 43,02             | 99,60               | 1,44                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,30               | 1,23              | 0,42                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,26                 | 24,88              | 2,85              | 0,42                | 1,59                             |
| 7             | 1,36  | 1,07  | 19,43                | 2,20               | 41                | 100                 | 1,45                             |
| 7             | 1,36  | 1,07  | 19,57                | 1,45               | 41                | 100                 | 1,44                             |
| 7             | 1,36  | 1,07  | 19,50                | 1,87               | 42                | 99                  | 1,44                             |
| média         | -     | -     | 19,50                | 1,84               | 41,61             | 99,35               | 1,44                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,07                 | 0,38               | 0,51              | 0,40                | 0,00                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,35                 | 20,44              | 1,22              | 0,40                | 0,15                             |
| 8             | 1,41  | 1,11  | 19,58                | 1,29               | 45                | 99                  | 1,37                             |
| 8             | 1,41  | 1,11  | 19,30                | 1,00               | 44                | 100                 | 1,38                             |
| 8             | 1,41  | 1,11  | 19,44                | 1,20               | 45                | 100                 | 1,36                             |
| média         | -     | -     | 19,44                | 1,16               | 44,56             | 99,49               | 1,37                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,14                 | 0,15               | 0,49              | 0,27                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,74                 | 12,73              | 1,10              | 0,27                | 0,88                             |
| 9             | 2,23  | 1,15  | 19,38                | 2,39               | 46                | 97                  | 1,36                             |
| 9             | 2,23  | 1,15  | 19,57                | 2,85               | 44                | 97                  | 1,36                             |
| 9             | 2,23  | 1,15  | 19,48                | 2,57               | 46                | 97                  | 1,36                             |
| média         | -     | -     | 19,48                | 2,60               | 45,01             | 96,83               | 1,36                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,09                 | 0,23               | 1,01              | 0,28                | 0,00                             |

## Continuação

| Código nº     | A/Cim | A/Agl | Índ.Consist.<br>(cm) | Trabalhab.<br>(cm) | Ar Incorp.<br>(%) | Ret. de<br>Água (%) | M. Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------|-------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|
| 10            | 2,26  | 1,17  | 19,49                | 1,83               | 46                | 99                  | 1,41                             |
| 10            | 2,26  | 1,17  | 19,33                | 2,20               | 44                | 100                 | 1,43                             |
| 10            | 2,26  | 1,17  | 19,41                | 1,47               | 45                | 100                 | 1,39                             |
| média         | -     | -     | 19,41                | 1,83               | 44,98             | 99,48               | 1,41                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,08                 | 0,37               | 1,07              | 0,31                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,40                 | 20,05              | 2,38              | 0,31                | 1,68                             |
| 11            | 2,23  | 1,15  | 19,11                | 0,96               | 46                | 97                  | 1,34                             |
| 11            | 2,23  | 1,15  | 19,40                | 2,80               | 43                | 97                  | 1,36                             |
| 11            | 2,23  | 1,15  | 19,25                | 1,91               | 45                | 97                  | 1,37                             |
| média         | -     | -     | 19,25                | 1,89               | 44,79             | 96,89               | 1,36                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,15                 | 0,92               | 1,48              | 0,24                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,76                 | 48,69              | 3,31              | 0,25                | 1,20                             |
| 12            | 2,26  | 1,17  | 19,57                | 0,60               | 46                | 100                 | 1,40                             |
| 12            | 2,26  | 1,17  | 19,44                | 0,80               | 44                | 100                 | 1,42                             |
| 12            | 2,26  | 1,17  | 19,50                | 1,10               | 45                | 100                 | 1,38                             |
| média         | -     | -     | 19,50                | 0,83               | 44,76             | 99,63               | 1,40                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,07                 | 0,25               | 1,03              | 0,07                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,34                 | 30,20              | 2,30              | 0,07                | 1,62                             |
| 13            | 2,20  | 1,14  | 18,67                | 1,50               | 46                | 96                  | 1,39                             |
| 13            | 2,20  | 1,14  | 18,72                | 2,00               | 44                | 96                  | 1,39                             |
| 13            | 2,20  | 1,14  | 18,70                | 1,00               | 45                | 96                  | 1,38                             |
| média         | -     | -     | 18,70                | 1,50               | 45,04             | 96,34               | 1,39                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,02                 | 0,50               | 1,01              | 0,04                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,13                 | 33,33              | 2,25              | 0,04                | 0,66                             |
| 14            | 2,19  | 1,13  | 17,54                | 1,50               | 46                | 100                 | 1,34                             |
| 14            | 2,19  | 1,13  | 17,64                | 1,00               | 46                | 100                 | 1,33                             |
| 14            | 2,19  | 1,13  | 17,59                | 1,35               | 46                | 100                 | 1,34                             |
| média         | -     | -     | 17,59                | 1,28               | 46,08             | 99,65               | 1,34                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,26               | 0,47              | 0,10                | 0,00                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,28                 | 19,99              | 1,02              | 0,10                | 0,27                             |
| 15            | 2,20  | 1,14  | 17,44                | 1,00               | 45                | 97                  | 1,36                             |
| 15            | 2,20  | 1,14  | 17,64                | 1,90               | 46                | 97                  | 1,35                             |
| 15            | 2,20  | 1,14  | 17,54                | 1,55               | 45                | 97                  | 1,38                             |
| média         | -     | -     | 17,54                | 1,48               | 45,01             | 97,22               | 1,36                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,45               | 0,73              | 0,17                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,56                 | 30,59              | 1,62              | 0,17                | 1,12                             |
| 16            | 2,17  | 1,12  | 17,54                | 1,30               | 45                | 100                 | 1,35                             |
| 16            | 2,17  | 1,12  | 17,49                | 1,55               | 46                | 100                 | 1,34                             |
| 16            | 2,17  | 1,12  | 17,52                | 1,35               | 45                | 99                  | 1,37                             |
| média         | -     | -     | 17,52                | 1,40               | 45,06             | 99,59               | 1,35                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,02                 | 0,13               | 0,61              | 0,17                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,14                 | 9,45               | 1,35              | 0,17                | 0,90                             |
| 17            | 1,69  | 1,06  | 17,62                | 1,80               | 39                | 99                  | 1,50                             |
| 17            | 1,69  | 1,06  | 17,42                | 1,15               | 39                | 100                 | 1,49                             |
| 17            | 1,69  | 1,06  | 17,52                | 1,65               | 38                | 100                 | 1,52                             |
| média         | -     | -     | 17,52                | 1,53               | 38,70             | 99,71               | 1,50                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,34               | 0,72              | 0,38                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,56                 | 22,20              | 1,85              | 0,38                | 1,17                             |
| 18            | 1,69  | 1,06  | 17,37                | 1,70               | 39                | 100                 | 1,46                             |
| 18            | 1,69  | 1,06  | 17,62                | 1,30               | 41                | 100                 | 1,44                             |
| 18            | 1,69  | 1,06  | 17,50                | 0,85               | 40                | 100                 | 1,47                             |
| média         | -     | -     | 17,50                | 1,28               | 40,17             | 99,70               | 1,46                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,12                 | 0,43               | 0,94              | 0,13                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,71                 | 33,14              | 2,34              | 0,13                | 0,89                             |

## Continuação

| Código nº     | A/Cim | A/Agl | Índ.Consist.<br>(cm) | Trabalhab.<br>(cm) | Ar Incorp.<br>(%) | Ret. de<br>Água (%) | M. Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------|-------|----------------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------------------|
| 19            | 1,13  | 1,03  | 17,45                | 0,40               | 37                | 100                 | 1,52                             |
| 19            | 1,13  | 1,03  | 17,55                | 0,70               | 37                | 100                 | 1,53                             |
| 19            | 1,13  | 1,03  | 17,50                | 0,55               | 38                | 100                 | 1,51                             |
| média         | -     | -     | 17,50                | 0,55               | 37,38             | 99,79               | 1,52                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,15               | 0,81              | 0,08                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,29                 | 27,27              | 2,18              | 0,08                | 0,54                             |
| 20            | 2,43  | 1,16  | 17,65                | 0,60               | 46                | 98                  | 1,32                             |
| 20            | 2,43  | 1,16  | 17,55                | 1,10               | 48                | 98                  | 1,30                             |
| 20            | 2,43  | 1,16  | 17,60                | 0,85               | 46                | 98                  | 1,34                             |
| média         | -     | -     | 17,60                | 0,85               | 46,74             | 98,05               | 1,32                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,25               | 1,12              | 0,43                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,28                 | 29,41              | 2,40              | 0,44                | 1,57                             |
| 21            | 1,80  | 1,12  | 17,45                | 0,60               | 39                | 99                  | 1,46                             |
| 21            | 1,80  | 1,12  | 17,55                | 1,00               | 40                | 99                  | 1,44                             |
| 21            | 1,80  | 1,12  | 17,50                | 0,85               | 41                | 99                  | 1,47                             |
| média         | -     | -     | 17,50                | 0,82               | 40,00             | 99,13               | 1,46                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,20               | 0,80              | 0,04                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,29                 | 24,74              | 2,01              | 0,04                | 1,01                             |
| 22            | 1,72  | 1,08  | 17,50                | 0,60               | 42                | 100                 | 1,42                             |
| 22            | 1,72  | 1,08  | 17,55                | 1,40               | 42                | 100                 | 1,44                             |
| 22            | 1,72  | 1,08  | 17,53                | 1,02               | 42                | 100                 | 1,44                             |
| média         | -     | -     | 17,53                | 1,01               | 41,98             | 99,85               | 1,43                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,03                 | 0,40               | 0,40              | 0,09                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,14                 | 39,81              | 0,96              | 0,09                | 0,86                             |
| 23            | 1,75  | 1,09  | 17,42                | 1,40               | 44                | 99                  | 1,40                             |
| 23            | 1,75  | 1,09  | 17,60                | 2,00               | 43                | 100                 | 1,41                             |
| 23            | 1,75  | 1,09  | 17,51                | 1,72               | 43                | 100                 | 1,41                             |
| média         | -     | -     | 17,51                | 1,71               | 43,25             | 99,54               | 1,41                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,09                 | 0,30               | 0,25              | 0,14                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,51                 | 17,59              | 0,57              | 0,14                | 0,44                             |
| 24            | 1,76  | 1,10  | 17,62                | 1,60               | 41                | 100                 | 1,46                             |
| 24            | 1,76  | 1,10  | 17,43                | 2,20               | 42                | 100                 | 1,44                             |
| 24            | 1,76  | 1,10  | 17,53                | 1,25               | 42                | 100                 | 1,42                             |
| média         | -     | -     | 17,53                | 1,68               | 41,58             | 99,65               | 1,44                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,48               | 0,82              | 0,07                | 0,02                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,54                 | 28,54              | 1,97              | 0,07                | 1,40                             |
| 25            | 1,74  | 1,09  | 17,62                | 0,45               | 42                | 96                  | 1,44                             |
| 25            | 1,74  | 1,09  | 17,42                | 1,10               | 42                | 96                  | 1,44                             |
| 25            | 1,74  | 1,09  | 17,52                | 0,80               | 42                | 97                  | 1,43                             |
| média         | -     | -     | 17,52                | 0,78               | 41,98             | 96,14               | 1,44                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,10                 | 0,33               | 0,12              | 0,48                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,56                 | 41,53              | 0,29              | 0,50                | 0,35                             |
| 26            | 1,73  | 1,08  | 17,45                | 0,40               | 39                | 100                 | 1,50                             |
| 26            | 1,73  | 1,08  | 17,56                | 0,55               | 40                | 100                 | 1,49                             |
| 26            | 1,73  | 1,08  | 17,51                | 0,35               | 40                | 100                 | 1,48                             |
| média         | -     | -     | 17,51                | 0,43               | 39,56             | 99,88               | 1,49                             |
| desv pad      | -     | -     | 0,05                 | 0,10               | 0,37              | 0,06                | 0,01                             |
| coef.var. (%) | -     | -     | 0,31                 | 24,02              | 0,94              | 0,06                | 0,61                             |

Tabela 73: resultados dos ensaios realizados em  
argamassa endurecida

| Código nº     | fc<br>(Mpa) | ft<br>(Mpa) | fc/ft | A.. Cap.<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Alt.Pen.<br>Ág. | M.Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Abs.<br>Im. (%) | Poros.<br>(%) | R.Sais<br>(dias) | Resist.<br>D.. Vap. |
|---------------|-------------|-------------|-------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------|------------------|---------------------|
| 1             | 2,46        | 1,33        | 1,86  | 4,93                             | 21,84           | 1,55                            | 24,83           | 53,00         | 1,0              | 10,77               |
| 1             | 2,47        | 1,27        | 1,95  | 5,05                             | 21,52           | 1,60                            | 23,28           | 53,22         | 1,0              | 9,70                |
| 1             | 2,16        | 1,16        | 1,86  | 5,55                             | 23,02           | 1,60                            | 23,55           | 51,49         | 1,0              | 11,85               |
| Média         | 2,37        | 1,25        | 1,89  | 5,18                             | 22,13           | 1,59                            | 23,89           | 52,57         | 1,00             | 10,77               |
| desv pad      | 0,18        | 0,08        | 0,05  | 0,33                             | 0,79            | 0,03                            | 0,83            | 0,94          | 0,00             | 1,07                |
| coef.var. (%) | 7,50        | 6,56        | 2,89  | 6,38                             | 3,57            | 1,92                            | 3,48            | 1,79          | 0,00             | 9,98                |
| 2             | 2,46        | 1,42        | 1,74  | 4,87                             | 22,76           | 1,52                            | 26,62           | 55,96         | 1,0              | 12,79               |
| 2             | 2,95        | 1,31        | 2,25  | 4,52                             | 21,28           | 1,57                            | 25,07           | 54,73         | 1,0              | 9,56                |
| 2             | 2,23        | 1,27        | 1,76  | 5,21                             | 22,60           | 1,55                            | 25,54           | 53,54         | 1,0              | 15,21               |
| média         | 2,55        | 1,33        | 1,91  | 4,87                             | 22,21           | 1,55                            | 25,74           | 54,74         | 1,00             | 12,52               |
| desv pad      | 0,37        | 0,08        | 0,29  | 0,35                             | 0,81            | 0,02                            | 0,80            | 1,21          | 0,00             | 2,83                |
| coef.var. (%) | 14,42       | 5,73        | 15,10 | 7,10                             | 3,66            | 1,46                            | 3,10            | 2,21          | 0,00             | 22,62               |
| 3             | 1,97        | 1,26        | 1,57  | 3,99                             | 10,79           | 1,60                            | 23,13           | 53,35         | 5,5              | 13,29               |
| 3             | 2,27        | 1,24        | 1,83  | 3,87                             | 9,66            | 1,61                            | 22,58           | 53,87         | 3,0              | 10,80               |
| 3             | 1,68        | 1,26        | 1,34  | 3,53                             | 11,92           | 1,61                            | 22,55           | 53,58         | 8,0              | 15,09               |
| média         | 1,97        | 1,25        | 1,58  | 3,80                             | 10,79           | 1,61                            | 22,76           | 53,60         | 5,50             | 13,06               |
| desv pad      | 0,29        | 0,01        | 0,25  | 0,24                             | 1,13            | 0,01                            | 0,33            | 0,26          | 2,50             | 2,16                |
| coef.var. (%) | 14,94       | 0,89        | 15,76 | 6,22                             | 10,47           | 0,61                            | 1,44            | 0,48          | 45,45            | 16,51               |
| 4             | 3,24        | 1,91        | 1,69  | 3,74                             | 12,67           | 1,66                            | 21,21           | 52,87         | 3,0              | 15,58               |
| 4             | 3,38        | 1,91        | 1,77  | 3,96                             | 13,60           | 1,63                            | 22,25           | 52,03         | 5,5              | 12,33               |
| 4             | 3,00        | 1,77        | 1,69  | 3,59                             | 11,73           | 1,63                            | 22,40           | 49,67         | 8,0              | 18,83               |
| média         | 3,21        | 1,87        | 1,72  | 3,76                             | 12,67           | 1,64                            | 21,95           | 51,52         | 5,50             | 15,58               |
| desv pad      | 0,19        | 0,08        | 0,04  | 0,19                             | 0,93            | 0,02                            | 0,65            | 1,66          | 2,50             | 3,25                |
| coef.var. (%) | 5,93        | 4,35        | 2,50  | 4,95                             | 7,38            | 1,12                            | 2,97            | 3,22          | 45,45            | 20,84               |
| 5             | 1,92        | 1,07        | 1,79  | 5,22                             | 23,55           | 1,56                            | 24,81           | 54,99         | 1,0              | 8,73                |
| 5             | 1,58        | 1,13        | 1,39  | 5,17                             | 23,13           | 1,58                            | 23,98           | 53,72         | 1,0              | 8,23                |
| 5             | 1,23        | 1,10        | 1,12  | 5,01                             | 21,59           | 1,52                            | 24,54           | 51,21         | 1,0              | 9,23                |
| média         | 1,58        | 1,10        | 1,43  | 5,13                             | 22,76           | 1,55                            | 24,44           | 53,30         | 1,00             | 8,73                |
| desv pad      | 0,34        | 0,03        | 0,34  | 0,11                             | 1,03            | 0,03                            | 0,42            | 1,92          | 0,00             | 0,50                |
| coef.var. (%) | 21,80       | 2,74        | 23,60 | 2,20                             | 4,53            | 1,96                            | 1,72            | 3,60          | 0,00             | 5,74                |
| 6             | 2,06        | 1,28        | 1,61  | 4,66                             | 23,96           | 1,55                            | 25,49           | 55,15         | 2,0              | 13,54               |
| 6             | 2,26        | 1,20        | 1,88  | 4,88                             | 22,34           | 1,55                            | 25,66           | 54,92         | 2,0              | 10,60               |
| 6             | 1,82        | 1,13        | 1,61  | 4,77                             | 22,41           | 1,55                            | 25,33           | 53,24         | 1,0              | 15,70               |
| média         | 2,04        | 1,20        | 1,70  | 4,77                             | 22,90           | 1,55                            | 25,49           | 54,44         | 1,67             | 13,28               |
| desv pad      | 0,22        | 0,07        | 0,15  | 0,11                             | 0,92            | 0,00                            | 0,17            | 1,04          | 0,58             | 2,56                |
| coef.var. (%) | 10,81       | 6,06        | 9,07  | 2,28                             | 4,00            | 0,08                            | 0,65            | 1,91          | 34,64            | 19,28               |
| 7             | 2,39        | 1,37        | 1,75  | 3,58                             | 6,93            | 1,64                            | 21,28           | 54,36         | 6,0              | 15,99               |
| 7             | 2,86        | 1,49        | 1,92  | 3,43                             | 7,20            | 1,69                            | 19,23           | 51,20         | 4,0              | 11,07               |
| 7             | 1,92        | 1,25        | 1,54  | 3,13                             | 6,65            | 1,66                            | 20,37           | 52,22         | 8,0              | 19,73               |
| média         | 2,39        | 1,37        | 1,73  | 3,38                             | 6,93            | 1,67                            | 20,30           | 52,59         | 6,00             | 15,60               |
| desv pad      | 0,47        | 0,12        | 0,19  | 0,22                             | 0,28            | 0,03                            | 1,03            | 1,61          | 2,00             | 4,35                |
| coef.var. (%) | 19,68       | 8,83        | 11,02 | 6,65                             | 3,97            | 1,65                            | 5,07            | 3,06          | 33,33            | 27,87               |
| 8             | 2,23        | 1,35        | 1,65  | 4,12                             | 14,00           | 1,58                            | 24,05           | 54,66         | 3,0              | 13,66               |
| 8             | 1,96        | 1,29        | 1,52  | 3,72                             | 10,98           | 1,54                            | 25,23           | 55,16         | 2,0              | 11,13               |
| 8             | 1,70        | 1,35        | 1,26  | 4,45                             | 12,43           | 1,56                            | 25,20           | 56,04         | 2,0              | 15,48               |
| média         | 1,96        | 1,33        | 1,48  | 4,10                             | 12,47           | 1,56                            | 24,83           | 55,29         | 2,33             | 13,42               |
| desv pad      | 0,27        | 0,03        | 0,20  | 0,37                             | 1,51            | 0,02                            | 0,67            | 0,70          | 0,58             | 2,18                |
| coef.var. (%) | 13,59       | 2,56        | 13,63 | 8,95                             | 12,13           | 1,06                            | 2,71            | 1,27          | 24,74            | 16,26               |
| 9             | 0,83        | 0,46        | 1,81  | 6,44                             | 22,29           | 1,35                            | 33,36           | 52,07         | 1,0              | 7,98                |
| 9             | 0,71        | 0,53        | 1,35  | 6,99                             | 21,89           | 1,44                            | 30,45           | 56,06         | 1,0              | 7,84                |
| 9             | 0,63        | 0,49        | 1,28  | 7,11                             | 22,78           | 1,39                            | 31,70           | 53,66         | 1,0              | 8,13                |
| média         | 0,73        | 0,49        | 1,48  | 6,85                             | 22,32           | 1,39                            | 31,83           | 53,93         | 1,00             | 7,98                |
| desv pad      | 0,10        | 0,03        | 0,29  | 0,36                             | 0,45            | 0,05                            | 1,46            | 2,01          | 0,00             | 0,14                |
| coef.var. (%) | 13,92       | 6,72        | 19,37 | 5,21                             | 2,00            | 3,38                            | 4,59            | 3,72          | 0,00             | 1,80                |

## Continuação

| Código nº     | fc<br>(Mpa) | ft (Mpa) | fc/ft | Abs.<br>Cap. | Alt.Pen.<br>Ág. | M.Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Abs.<br>Imers. | Poros.<br>(%) | R.Sais<br>(dias) | Resist.<br>D.. Vap |
|---------------|-------------|----------|-------|--------------|-----------------|---------------------------------|----------------|---------------|------------------|--------------------|
| 10            | 0,97        | 0,59     | 1,64  | 6,66         | 22,87           | 1,35                            | 35,09          | 56,96         | 1,0              | 12,16              |
| 10            | 0,89        | 0,65     | 1,38  | 7,15         | 24,31           | 1,38                            | 33,25          | 57,62         | 1,0              | 8,37               |
| 10            | 0,86        | 0,60     | 1,43  | 7,03         | 23,49           | 1,42                            | 30,97          | 53,10         | 1,0              | 15,05              |
| média         | 0,91        | 0,61     | 1,48  | 6,95         | 23,56           | 1,39                            | 33,11          | 55,89         | 1,00             | 11,86              |
| desv pad      | 0,06        | 0,03     | 0,14  | 0,26         | 0,72            | 0,03                            | 2,07           | 2,44          | 0,00             | 3,35               |
| coef.var. (%) | 6,41        | 4,48     | 9,31  | 3,68         | 3,07            | 2,51                            | 6,24           | 4,36          | 0,00             | 28,24              |
| 11            | 1,01        | 0,56     | 1,80  | 6,14         | 23,29           | 1,50                            | 27,06          | 53,98         | 1,0              | 11,93              |
| 11            | 0,92        | 0,55     | 1,69  | 5,37         | 22,30           | 1,52                            | 25,71          | 53,18         | 1,0              | 9,13               |
| 11            | 0,97        | 0,56     | 1,72  | 5,83         | 22,17           | 1,48                            | 27,48          | 53,53         | 1,0              | 14,72              |
| média         | 0,97        | 0,56     | 1,74  | 5,78         | 22,59           | 1,50                            | 26,75          | 53,56         | 1,00             | 11,93              |
| desv pad      | 0,05        | 0,01     | 0,06  | 0,38         | 0,61            | 0,02                            | 0,92           | 0,40          | 0,00             | 2,80               |
| coef.var. (%) | 4,66        | 1,59     | 3,38  | 6,65         | 2,71            | 1,44                            | 3,45           | 0,75          | 0,00             | 23,43              |
| 12            | 0,97        | 0,57     | 1,70  | 5,74         | 21,33           | 1,48                            | 28,64          | 54,82         | 1,0              | 12,35              |
| 12            | 1,01        | 0,57     | 1,77  | 6,06         | 22,55           | 1,48                            | 28,40          | 57,02         | 1,0              | 9,31               |
| 12            | 0,84        | 0,55     | 1,53  | 6,26         | 22,90           | 1,47                            | 28,59          | 54,42         | 1,0              | 14,61              |
| média         | 0,94        | 0,56     | 1,67  | 6,02         | 22,26           | 1,48                            | 28,54          | 55,42         | 1,00             | 12,09              |
| desv pad      | 0,09        | 0,01     | 0,12  | 0,26         | 0,82            | 0,01                            | 0,12           | 1,40          | 0,00             | 2,66               |
| coef.var. (%) | 9,24        | 1,98     | 7,40  | 4,32         | 3,70            | 0,59                            | 0,43           | 2,53          | 0,00             | 21,99              |
| 13            | 0,68        | 0,46     | 1,48  | 6,27         | 22,52           | 1,40                            | 29,07          | 56,63         | 1,0              | 11,71              |
| 13            | 0,77        | 0,43     | 1,78  | 6,24         | 22,88           | 1,47                            | 29,13          | 56,31         | 1,0              | 8,86               |
| 13            | 0,86        | 0,51     | 1,71  | 6,30         | 22,15           | 1,52                            | 28,82          | 51,65         | 1,0              | 13,84              |
| média         | 0,77        | 0,47     | 1,65  | 6,27         | 22,52           | 1,46                            | 29,01          | 54,86         | 1,00             | 11,47              |
| desv pad      | 0,09        | 0,04     | 0,16  | 0,03         | 0,37            | 0,06                            | 0,16           | 2,79          | 0,00             | 2,50               |
| coef.var. (%) | 11,82       | 7,65     | 9,60  | 0,47         | 1,62            | 4,28                            | 0,56           | 5,08          | 0,00             | 21,79              |
| 14            | 0,97        | 0,83     | 1,17  | 6,23         | 21,83           | 1,43                            | 30,82          | 55,95         | 1,0              | 8,37               |
| 14            | 1,07        | 0,75     | 1,43  | 6,38         | 21,48           | 1,36                            | 30,77          | 52,43         | 1,0              | 8,26               |
| 14            | 1,02        | 0,91     | 1,12  | 5,69         | 22,40           | 1,40                            | 28,31          | 48,59         | 1,0              | 8,34               |
| média         | 1,02        | 0,83     | 1,24  | 6,10         | 21,90           | 1,40                            | 29,97          | 52,32         | 1,00             | 8,32               |
| desv pad      | 0,05        | 0,08     | 0,16  | 0,36         | 0,46            | 0,04                            | 1,43           | 3,68          | 0,00             | 0,05               |
| coef.var. (%) | 4,92        | 9,55     | 13,20 | 5,96         | 2,12            | 2,81                            | 4,79           | 7,03          | 0,00             | 0,64               |
| 15            | 0,63        | 0,59     | 1,07  | 5,66         | 22,52           | 1,51                            | 26,85          | 56,42         | 1,0              | 7,28               |
| 15            | 0,63        | 0,55     | 1,15  | 5,97         | 22,40           | 1,46                            | 27,26          | 53,08         | 1,0              | 8,31               |
| 15            | 0,68        | 0,59     | 1,16  | 5,82         | 23,01           | 1,50                            | 24,79          | 50,82         | 1,0              | 8,99               |
| média         | 0,65        | 0,58     | 1,12  | 5,82         | 22,64           | 1,49                            | 26,30          | 53,44         | 1,00             | 8,20               |
| desv pad      | 0,03        | 0,02     | 0,05  | 0,16         | 0,32            | 0,03                            | 1,33           | 2,82          | 0,00             | 0,86               |
| coef.var. (%) | 4,34        | 3,58     | 4,46  | 2,73         | 1,43            | 1,88                            | 5,04           | 5,28          | 0,00             | 10,50              |
| 16            | 1,02        | 0,73     | 1,40  | 5,43         | 21,63           | 1,53                            | 26,29          | 55,18         | 1,0              | 8,61               |
| 16            | 1,04        | 0,72     | 1,43  | 5,25         | 20,61           | 1,53                            | 28,07          | 66,90         | 1,0              | 7,28               |
| 16            | 1,10        | 0,79     | 1,40  | 5,60         | 23,00           | 1,53                            | 25,88          | 54,68         | 1,0              | 8,98               |
| média         | 1,05        | 0,75     | 1,41  | 5,43         | 21,75           | 1,53                            | 26,75          | 58,92         | 1,00             | 8,29               |
| desv pad      | 0,04        | 0,04     | 0,02  | 0,17         | 1,20            | 0,00                            | 1,16           | 6,91          | 0,00             | 0,89               |
| coef.var. (%) | 4,17        | 4,80     | 1,42  | 3,19         | 5,51            | 0,08                            | 4,35           | 11,73         | 0,00             | 10,75              |
| 17            | 1,96        | 1,11     | 1,76  | 6,15         | 23,12           | 1,59                            | 23,87          | 50,01         | 1,0              | 10,78              |
| 17            | 2,01        | 1,12     | 1,79  | 6,19         | 23,39           | 1,59                            | 24,48          | 58,62         | 1,0              | 8,58               |
| 17            | 1,82        | 1,23     | 1,48  | 6,17         | 22,88           | 1,59                            | 23,33          | 53,24         | 1,0              | 9,32               |
| média         | 1,93        | 1,16     | 1,68  | 6,17         | 23,13           | 1,59                            | 23,89          | 53,96         | 1,00             | 9,56               |
| desv pad      | 0,10        | 0,07     | 0,17  | 0,02         | 0,26            | 0,00                            | 0,57           | 4,35          | 0,00             | 1,12               |
| coef.var. (%) | 5,10        | 5,71     | 10,31 | 0,35         | 1,10            | 0,12                            | 2,40           | 8,06          | 0,00             | 11,70              |
| 18            | 1,89        | 1,18     | 1,60  | 6,16         | 23,21           | 1,59                            | 23,80          | 51,55         | 1,0              | 10,92              |
| 18            | 1,91        | 1,23     | 1,56  | 5,28         | 20,82           | 1,67                            | 23,95          | 54,45         | 1,0              | 9,50               |
| 18            | 1,71        | 1,27     | 1,35  | 5,72         | 23,81           | 1,56                            | 23,18          | 50,03         | 1,0              | 9,96               |
| média         | 1,84        | 1,23     | 1,50  | 5,72         | 22,61           | 1,61                            | 23,64          | 52,01         | 1,00             | 10,13              |
| desv pad      | 0,11        | 0,04     | 0,13  | 0,44         | 1,58            | 0,06                            | 0,40           | 2,25          | 0,00             | 0,73               |
| coef.var. (%) | 5,88        | 3,43     | 8,80  | 7,68         | 6,99            | 3,55                            | 1,71           | 4,33          | 0,00             | 7,17               |

Continuação

| Código nº     | fc<br>(Mpa) | ft (Mpa) | fc/ft | Abs.<br>Cap.<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Alt.Pen.<br>Ág.<br>(mm) | M.Esp.<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Abs.<br>Imers.<br>(%) | Poros.<br>(%) | R.Sais<br>(dias) | Resist.<br>Dif.<br>Vapor |
|---------------|-------------|----------|-------|--------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------|------------------|--------------------------|
| 19            | 4,06        | 2,22     | 1,83  | 3,32                                 | 9,83                    | 1,67                            | 20,44                 | 48,50         | 6,0              | 12,83                    |
| 19            | 4,33        | 2,19     | 1,97  | 3,35                                 | 10,11                   | 1,70                            | 19,36                 | 47,99         | 6,0              | 13,08                    |
| 19            | 4,20        | 2,25     | 1,86  | 3,29                                 | 10,15                   | 1,66                            | 20,71                 | 51,99         | 6,0              | 12,95                    |
| média         | 4,20        | 2,22     | 1,89  | 3,32                                 | 10,03                   | 1,68                            | 20,17                 | 49,49         | 6,00             | 12,95                    |
| desv pad      | 0,13        | 0,03     | 0,08  | 0,03                                 | 0,17                    | 0,02                            | 0,71                  | 2,18          | 0,00             | 0,12                     |
| coef.var. (%) | 3,22        | 1,28     | 4,04  | 0,91                                 | 1,74                    | 1,11                            | 3,54                  | 4,41          | 0,00             | 0,96                     |
| 20            | 0,63        | 0,64     | 0,99  | 6,82                                 | 22,47                   | 1,43                            | 31,05                 | 55,24         | 1,0              | 9,71                     |
| 20            | 0,51        | 0,71     | 0,71  | 6,32                                 | 20,90                   | 1,46                            | 31,08                 | 49,20         | 1,0              | 7,90                     |
| 20            | 0,48        | 0,68     | 0,71  | 6,25                                 | 23,25                   | 1,49                            | 29,57                 | 57,29         | 1,0              | 8,95                     |
| média         | 0,54        | 0,68     | 0,80  | 6,46                                 | 22,21                   | 1,46                            | 30,57                 | 53,91         | 1,00             | 8,85                     |
| desv pad      | 0,08        | 0,04     | 0,16  | 0,31                                 | 1,20                    | 0,03                            | 0,86                  | 4,20          | 0,00             | 0,91                     |
| coef.var. (%) | 15,06       | 5,51     | 20,01 | 4,84                                 | 5,39                    | 2,34                            | 2,83                  | 7,80          | 0,00             | 10,27                    |
| 21            | 1,51        | 0,61     | 2,47  | 5,84                                 | 22,48                   | 1,52                            | 26,72                 | 53,65         | 1,0              | 13,79                    |
| 21            | 1,59        | 0,62     | 2,56  | 6,05                                 | 23,14                   | 1,53                            | 27,22                 | 46,90         | 1,0              | 10,70                    |
| 21            | 1,41        | 0,63     | 2,25  | 6,15                                 | 23,56                   | 1,53                            | 25,87                 | 53,75         | 1,0              | 9,07                     |
| média         | 1,50        | 0,62     | 2,43  | 6,01                                 | 23,06                   | 1,53                            | 26,60                 | 51,43         | 1,00             | 11,19                    |
| desv pad      | 0,09        | 0,01     | 0,16  | 0,16                                 | 0,54                    | 0,00                            | 0,68                  | 3,92          | 0,00             | 2,40                     |
| coef.var. (%) | 5,90        | 1,34     | 6,67  | 2,65                                 | 2,36                    | 0,29                            | 2,55                  | 7,63          | 0,00             | 21,44                    |
| 22            | 1,78        | 1,02     | 1,75  | 5,91                                 | 24,05                   | 1,57                            | 24,53                 | 53,13         | 1,0              | 11,95                    |
| 22            | 1,57        | 0,95     | 1,66  | 5,71                                 | 22,38                   | 1,58                            | 25,61                 | 55,06         | 1,0              | 8,83                     |
| 22            | 1,43        | 1,09     | 1,32  | 5,37                                 | 22,41                   | 1,55                            | 23,21                 | 50,99         | 1,0              | 9,20                     |
| média         | 1,59        | 1,02     | 1,57  | 5,66                                 | 22,95                   | 1,57                            | 24,45                 | 53,06         | 1,00             | 9,99                     |
| desv pad      | 0,18        | 0,07     | 0,23  | 0,28                                 | 0,96                    | 0,02                            | 1,20                  | 2,04          | 0,00             | 1,71                     |
| coef.var. (%) | 11,04       | 6,97     | 14,56 | 4,89                                 | 4,16                    | 1,07                            | 4,92                  | 3,84          | 0,00             | 17,06                    |
| 23            | 1,48        | 1,14     | 1,30  | 6,12                                 | 23,38                   | 1,54                            | 26,08                 | 53,77         | 1,0              | 11,16                    |
| 23            | 1,41        | 1,03     | 1,37  | 6,17                                 | 22,28                   | 1,38                            | 27,65                 | 51,15         | 1,0              | 8,50                     |
| 23            | 1,49        | 1,24     | 1,20  | 6,15                                 | 20,45                   | 1,52                            | 25,52                 | 53,08         | 1,0              | 9,01                     |
| média         | 1,46        | 1,14     | 1,29  | 6,15                                 | 22,04                   | 1,48                            | 26,42                 | 52,67         | 1,00             | 9,56                     |
| desv pad      | 0,05        | 0,11     | 0,08  | 0,02                                 | 1,48                    | 0,09                            | 1,10                  | 1,36          | 0,00             | 1,41                     |
| coef.var. (%) | 3,16        | 9,32     | 6,47  | 0,37                                 | 6,72                    | 5,85                            | 4,18                  | 2,58          | 0,00             | 14,79                    |
| 24            | 1,58        | 0,87     | 1,82  | 5,48                                 | 22,93                   | 1,57                            | 23,81                 | 52,00         | 1,0              | 11,02                    |
| 24            | 1,56        | 1,05     | 1,49  | 5,43                                 | 22,94                   | 1,56                            | 24,93                 | 53,67         | 1,0              | 8,66                     |
| 24            | 1,59        | 0,96     | 1,66  | 5,19                                 | 22,55                   | 1,60                            | 23,14                 | 53,53         | 1,0              | 10,80                    |
| média         | 1,58        | 0,96     | 1,65  | 5,37                                 | 22,81                   | 1,57                            | 23,96                 | 53,07         | 1,00             | 10,16                    |
| desv pad      | 0,01        | 0,09     | 0,16  | 0,15                                 | 0,22                    | 0,02                            | 0,90                  | 0,93          | 0,00             | 1,30                     |
| coef.var. (%) | 0,95        | 9,19     | 9,90  | 2,88                                 | 0,97                    | 1,33                            | 3,77                  | 1,75          | 0,00             | 12,81                    |
| 25            | 1,33        | 0,60     | 2,23  | 6,12                                 | 23,82                   | 1,59                            | 23,49                 | 50,99         | 1,0              | 12,22                    |
| 25            | 1,32        | 0,59     | 2,22  | 6,40                                 | 22,57                   | 1,57                            | 22,00                 | 44,60         | 1,0              | 8,17                     |
| 25            | 1,29        | 0,60     | 2,15  | 5,53                                 | 22,93                   | 1,56                            | 23,80                 | 52,80         | 1,0              | 9,09                     |
| Média         | 1,31        | 0,60     | 2,20  | 6,02                                 | 23,11                   | 1,57                            | 23,10                 | 49,46         | 1,00             | 9,83                     |
| desv pad      | 0,02        | 0,00     | 0,04  | 0,45                                 | 0,64                    | 0,01                            | 0,97                  | 4,31          | 0,00             | 2,12                     |
| coef.var. (%) | 1,81        | 0,31     | 2,04  | 7,42                                 | 2,78                    | 0,89                            | 4,18                  | 8,72          | 0,00             | 21,60                    |
| 26            | 1,83        | 1,23     | 1,49  | 6,08                                 | 22,37                   | 1,61                            | 22,40                 | 47,50         | 1,0              | 16,50                    |
| 26            | 1,93        | 1,05     | 1,84  | 5,90                                 | 22,62                   | 1,59                            | 24,66                 | 46,78         | 1,0              | 10,36                    |
| 26            | 1,74        | 1,15     | 1,51  | 5,99                                 | 21,41                   | 1,57                            | 24,12                 | 51,46         | 1,0              | 11,67                    |
| média         | 1,83        | 1,14     | 1,61  | 5,99                                 | 22,13                   | 1,59                            | 23,73                 | 48,58         | 1,00             | 12,84                    |
| desv pad      | 0,10        | 0,09     | 0,20  | 0,09                                 | 0,64                    | 0,02                            | 1,18                  | 2,52          | 0,00             | 3,23                     |
| coef.var. (%) | 5,25        | 7,95     | 12,15 | 1,54                                 | 2,89                    | 1,18                            | 4,98                  | 5,18          | 0,00             | 25,17                    |

**APÊNDICE D – RESULTADOS DAS ANÁLISES POR REGRESSÃO  
MÚLTIPLA E NÃO LINEAR**

Tabela 74: resultados da análise por regressão não linear da relação água/aglomerante

Model:  $a/agl=c1+\exp(c2*cc^k1+c3*ia)$   
 Dep. var: AG\_AGL Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: 0,012617688 R=,80642 R<sup>2</sup>: 0,6503

|          | C1       | C2       | K1       | C3       |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| Estimate | 0,100805 | 0,076141 | 2,899557 | -0,03723 |
| Std.Err. | 0,018927 | 0,012120 | 1,199049 | 0,02655  |
| t(22)    | 5,326132 | 6,282136 | 2,418215 | -1,40216 |
| p-level  | 0,000024 | 0,000003 | 0,024323 | 0,17482  |

Tabela 75: resultados da análise por regressão múltipla do índice de consistência

Regression Summary for Dependent Variable: CONSIST  
 R= ,80344867 R<sup>2</sup>=0,64552977  
 F(5,20)=7,2844 p<,00050 Std.Error of estimate: ,59060

|          | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err. of B | t(20)    | p-level  |
|----------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| Intercpt |          |                  | 16,8194  | 0,324033      | 51,90648 | 8,34E-23 |
| CC*CC    | 0,35591  | 0,133185         | 0,500261 | 0,187203      | 2,672291 | 0,014638 |
| IA*IA    | 0,344052 | 0,133185         | 0,483594 | 0,187203      | 2,583261 | 0,017758 |
| HID*HID  | 0,345633 | 0,133185         | 0,485817 | 0,187203      | 2,595132 | 0,017308 |
| RET*RET  | 0,344527 | 0,133185         | 0,484261 | 0,187203      | 2,586823 | 0,017622 |
| CC*IA    | -0,4314  | 0,13313          | -0,47845 | 0,14765       | -3,24045 | 0,004099 |

Tabela 76: resultado da análise por regressão não linear do teor de ar incorporado

Model:  $tar=36+\exp(0,6*cc^k1+c2*ia+1,1*hid^k2)$   
 Dep. var: AR\_INC Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: 75,674702415 R=,72609 Variance explained: 52,720%

|          | K1       | C2       | K2       |
|----------|----------|----------|----------|
| Estimate | 3,29112  | 0,709492 | -0,25427 |
| Std.Err. | 1,217753 | 0,104856 | 0,13006  |
| t(22)    | 2,691133 | 6,827417 | -1,82428 |
| p-level  | 0,013039 | 0,000001 | 0,08113  |

Tabela 77: resultados da análise por regressão múltipla da retenção de água das argamassas

Regression Summary for Dependent Variable: RET\_A  
 R= ,97347383 R<sup>2</sup>= 0,94765129  
 F(5,20)=72,411 p<,00000 Std.Error of estimate: ,30559

|           | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err. of B | t(21)    | p-level  |
|-----------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| Intercept |          |                  | 99,60835 | 0,124267      | 801,5645 | 0        |
| CC        | -0,43046 | 0,051161         | -0,56789 | 0,067494      | -8,41389 | 5,3E-08  |
| RET       | 0,709921 | 0,051161         | 0,936568 | 0,067494      | 13,87624 | 1E-11    |
| CC*CC     | -0,12579 | 0,051168         | -0,23807 | 0,096837      | -2,45845 | 0,023198 |
| RET*RET   | -0,34066 | 0,051168         | -0,64471 | 0,096837      | -6,65772 | 1,76E-06 |
| CC*RET    | 0,35763  | 0,051161         | 0,534048 | 0,076398      | 6,990297 | 8,77E-07 |

Tabela 78: resultados da análise por regressão não linear da massa específica das argamassas no estado fresco

Model:  $mef=-0,44+\exp(c1*cc^k1+0,63*ia^(-0,036))$   
 Dep. var: ME\_FR Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: ,029088694 R=,78371 Variance explained: 61,420%

|          | C1       | K1       |
|----------|----------|----------|
| Estimate | -0,05914 | 3,817811 |
| Std.Err. | 0,007802 | 1,117133 |
| t(22)    | -7,57952 | 3,417508 |
| p-level  | 8,1E-08  | 0,002258 |

Tabela 79: resultados da análise por regressão não linear da resistência à compressão das argamassas

|  |          |
|--|----------|
| Model: $fc=1+\exp(-4,23*cc-0,84*ia^k2+0,6*hid+1,2*ret^0,33)$ |          |
| Dep. var: FC Loss: (OBS-PRED)**2                             |          |
| Final loss: 2,501607675 R=,92602 Variance explained: 85,752% |          |
|  | K2       |
| Estimate   | 5,242464 |
| Std.Err.   | 1,608244 |
| t(22)  | 3,259745 |
| p-level  | 0,003209 |

Tabela 80: resultados da análise por regressão não linear da resistência à tração na flexão das argamassas

|   |          |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|----------|
| Model: $ft=0,16+\exp(-3*cc^0,65-0,78*ia^k2+0,2*hid+c4*ret^k4+c5*cc*ia)$ |          |          |          |          |
| Dep. var: FT Loss: (OBS-PRED)**2  |          |          |          |          |
| Final loss: ,527523780 R=,94159 Variance explained: 88,659%             |          |          |          |          |
|   | K2       | C4       | K4       | C5       |
| Estimate  | 4,969777 | 1,27923  | 0,285833 | 1,679686 |
| Std.Err.  | 1,90186  | 0,064768 | 0,095627 | 0,166382 |
| t(22)   | 2,613115 | 19,75102 | 2,989045 | 10,09539 |
| p-level   | 0,015877 | 1,73E-15 | 0,006764 | 1,02E-09 |

Tabela 81: resultados da análise por regressão não linear da relação entre as resistências à compressão e à tração na flexão

|   |          |          |
|---|----------|----------|
| Model: $fc/ft=0,75+\exp(0,65*cc^0,3+0,001*ia^k2-0,3*ret^0,51+c5*cc*ia)$ |          |          |
| Dep. var: FCFT Loss: (OBS-PRED)**2                                      |          |          |
| Final loss: 1,306655191 R=,72031 Variance explained: 51,885%            |          |          |
|   | K2       | C5       |
| Estimate  | -5,36531 | -1,34475 |
| Std.Err.  | 0,165702 | 0,162428 |
| t(22)   | -32,3792 | -8,27907 |
| p-level   | 2,57E-21 | 1,71E-08 |

Tabela 82: resultados da análise por regressão não linear da absorção de água por capilaridade

|  |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| Model: $ac=1,95+\exp(2*cc^k1+c3*hid+c5*cc*ia)$               |          |          |          |
| Dep. var: ABSCA Loss: (OBS-PRED)**2                          |          |          |          |
| Final loss: 3,501265228 R=,93060 Variance explained: 86,602% |          |          |          |
|  | K1       | C3       | C5       |
| Estimate   | 0,308666 | -0,41025 | -0,28538 |
| Std.Err.   | 0,035976 | 0,073197 | 0,092407 |
| t(23)  | 8,579753 | -5,60467 | -3,08831 |
| p-level  | 1,27E-08 | 1,05E-05 | 0,005189 |

Tabela 83: resultados da análise por regressão múltipla da altura de penetração de água por capilaridade

|   |          |                  |          |              |          |          |
|---|----------|------------------|----------|--------------|----------|----------|
| Regression Summary for Dependent Variable: H (h.sta)  |          |                  |          |              |          |          |
| R= ,94284079 R <sup>2</sup> =0,88894876               |          |                  |          |              |          |          |
| F(4,21)=42,025 p<,00000 Std.Error of estimate: 1,7888 |          |                  |          |              |          |          |
|   | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err.of B | t(21)    | p-level  |
| Intercept   |          |                  | 22,63637 | 0,56812      | 39,84438 | 2,84E-21 |
| CC  | 0,583119 | 0,07272          | 3,168033 | 0,39508      | 8,018719 | 7,93E-08 |
| HID   | -0,42246 | 0,07272          | -2,29519 | 0,39508      | -5,80943 | 9,12E-06 |
| CC*CC   | -0,38863 | 0,07272          | -3,02888 | 0,566759     | -5,34421 | 2,67E-05 |
| CC*HID  | 0,468419 | 0,07272          | 2,880604 | 0,4472       | 6,441426 | 2,2E-06  |

Tabela 84: resultados da análise por regressão não linear da massa específica seca das argamassas

Model:  $me=0,6+\exp(-0,36*cc^{1,42+c2*ia+c3*his+c5*cc*ia})$   
 Dep. var: ME\_S Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: ,028454231 R=,89690 Variance explained: 80,443%

|          | C2       | C3       | C5       |
|----------|----------|----------|----------|
| Estimate | -0,12697 | 0,1176   | 0,28458  |
| Std.Err. | 0,035985 | 0,021843 | 0,036741 |
| t(23)    | -3,52848 | 5,383899 | 7,745649 |
| p-level  | 0,001799 | 1,81E-05 | 7,43E-08 |

Tabela 85: resultados da análise por regressão não linear da absorção de água por imersão

Model:  $i=21,6+\exp(2,95*cc^{k1-0,49*ia+c3*hid+c4*ret})$   
 Dep. var: ABSIM Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: 33,617447743 R=,93682 Variance explained: 87,764%

|          | K1       | C3       | C4       |
|----------|----------|----------|----------|
| Estimate | 0,676879 | -1,0686  | 0,380872 |
| Std.Err. | 0,112564 | 0,170599 | 0,134346 |
| t(23)    | 6,013283 | -6,26379 | 2,835011 |
| p-level  | 3,93E-06 | 2,16E-06 | 0,009382 |

Tabela 86: resultados da análise por regressão múltipla do índice de vazios (porosidade aparente) das argamassas

Regression Summary for Dependent Variable: IND\_V\_F  
 R= ,76028440 R<sup>2</sup>= 0,57803237  
 F(4,21)=7,1917 p<,00082 Std.Error of estimate: 1,6283

|           | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err. of B | t(21)    | p-level  |
|-----------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| Intercept |          |                  | 50,94373 | 0,66215       | 76,93689 | 3,12E-27 |
| CC        | 0,308952 | 0,141752         | 0,783841 | 0,359639      | 2,179523 | 0,040821 |
| IA        | 0,433304 | 0,141752         | 1,099332 | 0,359639      | 3,056769 | 0,00599  |
| IA*IA     | 0,386447 | 0,141771         | 1,4065   | 0,515987      | 2,725846 | 0,012662 |
| HID*HID   | 0,387822 | 0,141771         | 1,411507 | 0,515987      | 2,735549 | 0,012392 |

Tabela 87: resultados da análise por regressão múltipla da resistência das argamassas aos sais

Regression Summary for Dependent Variable: SAIS  
 R= ,90568293 R<sup>2</sup>= 0,82026158  
 F(4,21)=23,959 p<,00000 Std.Error of estimate: ,81852

|           | BETA     | St. Err. of BETA | B        | St. Err. of B | t(21)    | p-level  |
|-----------|----------|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| Intercept |          |                  | 0,975869 | 0,259961      | 3,753903 | 0,001168 |
| CC        | -0,60328 | 0,092515         | -1,17886 | 0,180781      | -6,52093 | 1,85E-06 |
| HID       | 0,36613  | 0,092515         | 0,715447 | 0,180781      | 3,957532 | 0,000719 |
| CC*CC     | 0,387953 | 0,092515         | 1,087516 | 0,259338      | 4,193425 | 0,000409 |
| CC*HID    | -0,41443 | 0,092515         | -0,91667 | 0,20463       | -4,47962 | 0,000206 |

Tabela 88: resultados da análise por regressão não linear do coeficiente de resistência à difusão de vapor das argamassas

Model:  $i=5,5+\exp(c1*cc+c2*ia+c4*ret)$   
 Dep. var: DVAP Loss: (OBS-PRED)\*\*2  
 Final loss: 141,40710765 R=,71741 Variance explained: 51,468%

|          | C1       | C2       | C4       |
|----------|----------|----------|----------|
| Estimate | -2,26176 | 1,433915 | 1,597872 |
| Std.Err. | 0,639396 | 0,683303 | 0,533732 |
| t(23)    | -3,53734 | 2,098507 | 2,993769 |
| p-level  | 0,00176  | 0,047041 | 0,006484 |