

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO E DA FISSURAÇÃO EM
REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NA FASE PLÁSTICA**

NARCISO GONÇALVES DA SILVA



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

NARCISO GONÇALVES DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO E DA FISSURAÇÃO EM
REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NA FASE PLÁSTICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize.

Florianópolis
2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

S586a Silva, Narciso Gonçalves da
Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de
argamassa na fase plástica [tese] / Narciso Gonçalves da
Silva ; orientador, Philippe Jean Paul Gleize. –
Florianópolis, SC, 2011.
329 p.: grafs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina,
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Argamassa. 3. Revestimentos.
4. Matérias - Deformações. I. Gleize, Philippe Jean Paul. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO E DA FISSURAÇÃO EM REVESTIMENTO DE ARGAMASSA NA FASE PLÁSTICA

Por

Narciso Gonçalves da Silva

Tese julgada para a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Civil**, área de Concentração em Construção Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr.-Ing. Philippe Jean Paul Gleize
Orientador

Prof.^ª Dr.^a Janaíde Cavalcante Rocha
Coordenadora

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Elton Bauer

Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr.

Dr.^a. Helena Carasek Cascudo

Dr.-Ing. Malik Cheriaf

Florianópolis, 08 de Abril de 2011

Dedico este trabalho aos meus pais Glicério e Josélia,
in memoriam, à minha esposa Mara Lúcia
e aos meus filhos Evelyn e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e à minha mãe que, com muita dedicação, foi a maior incentivadora, sempre acreditando na minha capacidade e que infelizmente prematuramente nos deixou.

Um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize que aceitou me orientar depositando em mim sua confiança.

Ao Prof. Dr. Luis Alberto Gómez pelas orientações na área de instrumentação dos ensaios e pelo auxílio importante nas montagens dos dispositivos para monitoramento das medidas de retrações e perda de massa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC que transmitiram seus conhecimentos com grande dedicação.

Às funcionárias do PPGEC da UFSC, Mari e Savanna pelo atendimento atencioso e competente.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Luiz Henrique e Renato e ao Roque Medeiros pelo auxílio e, muitas vezes, pelas dicas preciosas.

Agradeço a todos os colegas e professores do Grupo de Desenvolvimento de Alvenaria – GDA pelos conselhos e palavras de incentivo nas horas difíceis.

Aos bolsistas de iniciação científica, Douglas, Mário e Franciel pela dedicação no trabalho árduo na condução dos inúmeros ensaios.

As empresas Votorantin Cimentos e Cal Cem pela doação dos materiais utilizados na confecção das argamassas e ao CNPq pelo apoio financeiro na aquisição dos equipamentos.

Aos estagiários Vantuil do Design Gráfico, Matheus e João Guilherme da Divisão de Recursos Didáticos pelo apoio nas reproduções da tese.

A todos meus colegas professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR que me estimularam e auxiliaram na condução deste trabalho e aos colegas da Universidade Federal do Paraná – UFPR e do LACTEC pelo apoio.

Agradeço a toda minha família, às minhas irmãs e meu irmão que rezaram e torceram pela conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi adaptar metodologias para avaliação da fissuração em revestimentos de argamassas e para medidas de retração livre e restringida à partir da moldagem. Foi adaptado da norma ASTM C1579 (2006) um método para avaliar a fissuração em laboratório com ambiente controlado utilizando moldes com restrições à retração e, simultaneamente, molde para medida da perda de massa por evaporação da água. Foi proposto um dispositivo para medida de retração livre linear utilizando a técnica unilateral, ou seja, com deformação de apenas uma extremidade, onde foi conectado um transdutor de deslocamento. Foi proposto, também, outro dispositivo para medida de retração restringida por uma célula de carga que registra as forças induzidas pela deformação da amostras desde a sua moldagem. O mesmo dispositivo foi utilizado para determinar a energia de ruptura à tração também denominada tenacidade. Os métodos foram avaliados utilizando cinco argamassas industrializadas de grande aceitação no mercado brasileiro. Foram utilizadas argamassas produzidas com cimento, cal hidratada, areia natural e britada, com adições de fibras de polipropileno e aditivo incorporador de ar para testar as metodologias. Foi proposta uma técnica para determinar a quantidade de água evaporada da argamassa e a quantidade de água absorvida pelo substrato. Os materiais constituintes das argamassas foram caracterizados química e fisicamente e todas as argamassas foram caracterizadas no estado fresco e no estado endurecido. Os resultados demonstraram que os métodos propostos são viáveis, comprovados pela praticidade de moldagem das amostras e pela sensibilidade e reprodutividade dos ensaios. Também se comprovou que existe correlação significativa entre as retrações livre e restringida com a fissuração dos revestimentos de argamassas.

Palavras-chave: Argamassa. Revestimento. Fissuração. Retração livre. Retração restringida.

ABSTRACT

The main objective of this study was to adapt methods for evaluation of cracking in rendering mortars for measurements of free and restrained shrinkage from the molding. It was adapted from ASTM C1579 (2006) a method to evaluate the cracking in the laboratory with a controlled environment using molds with shrinkage restrictions on and simultaneously measure water mass loss through evaporation. It was proposed a device to measure free linear shrinkage using the same side technique, with deformation of only one tip connected to a displacement transducer. It was also proposed another device for measuring restrained shrinkage by a load cell that records the strengths induced by the deformation of samples since its casting. This same device was used to measure the disrupture energy strength, also known as toughness. These devices and methods were evaluated using five commercial mortars widely accepted in Brazil. It was also used mortars made with cement, hydrated lime, natural sand and crushed rock sand, with additions of polypropylene fibers and air incorporation agent to test the methodologies. It was proposed a technique for determining the amount of water that evaporates from the mortar and the amount of water absorbed by the substrate. The ingredients of the mortars were characterized chemically and physically, and all mortars were characterized in fresh and hardened state. The results showed that the proposed methods are viable, demonstrated by the convenience of samples casting and the sensitivity and reproducibility of the tests. It was also showed a significant correlation between free and restrained cracking shrinkage of the rendering mortars.

Keywords: Rendering. Mortar. Cracking. Free shrinkage. Restrained shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Material sólido: (a) impermeável; (b) permeável (ISMAL, 2006)	58
Figura 2 – Representação esquemática da presença da água na estrutura da pasta de cimento (BREUGEL, 1991)	60
Figura 3 – Modelo esquemático da estrutura da pasta de cimento hidratado (FELDMAN e SEREDA citados por NEVILLE, 1982)	61
Figura 4 – Esquema de um capilar não saturado	62
Figura 5 – Esquemática da pressão capilar (P_c) e da pressão de desligamento (P_d): (a) na região confinada e (b) na região entre camadas (VISSER citado por KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006)	64
Figura 6 – Modelo de Newton para viscosidade de um fluido (TATTERSALL citado por FERRARIS, 1999)	67
Figura 7 – Curva de escoamento para uma suspensão binghamiana (FERRARIS, 1999)	68
Figura 8 – Ilustração do equipamento do <i>dropping ball</i>	69
Figura 9 – Ensaio de reologia através da penetração do cone (HOPPE FILHO et al., 2006)	70
Figura 10 – Equipamento utilizado no ensaio <i>vane test</i> (ALVES, 2002)	71
Figura 11 – Ilustração do ensaio de <i>squeeze-flow</i>	71
Figura 12 – Resultado típico de um ensaio de <i>squeeze-flow</i>	72
Figura 13 – Diagrama dos estágios e tipos de retrações (HOLT, 2001)	73
Figura 14 – Ilustração do mecanismo de retração total (ESPING, 2007)	74
Figura 15 – Representação esquemática da retração química da pasta de cimento com: (a) baixo grau de hidratação; (b) alto grau de hidratação (JENSEN e HANSEN, 2001)	76
Figura 16 – Esquemática dos mecanismos da retração plástica em pasta de cimento (TURCRY, 2004)	79
Figura 17 – Modelo de retração plástica (RADOCEA, 1992)	80
Figura 18 – Curvas fictícias do desenvolvimento das pressões capilares dos sistemas A e B da Figura 17	81
Figura 19 – Molde desenvolvido por Jensen e Hansen (1995) para medida da retração	85
Figura 20 – Sistema de fixação: (a) em palhetas (BASTOS, 2001; NICOT, 2008) e (b) em pinos (HAMMER, 2007)	86

Figura 21 – Detalhe do prato de alumínio móvel onde a amostra é fixada através de um parafuso central (MORIOKA et al., 1999).....	86
Figura 22 – Esquematização das barras transversais conectadas a LVDTs (TAKADA et al., 1999)	87
Figura 23 – Esquematização da barra introduzida na amostra verticalmente (HOLT e LEIVO, 1999).....	87
Figura 24 – Dispositivo utilizado por Kasai et al. (1982) para medida da retração linear (MITANI, 2003)	88
Figura 25 – Dispositivo utilizado por Tazawa e Miyazawa (1995) para medida de retração linear Dispositivo desenvolvido no <i>Technical Research Centre of Finland</i> (HOLT e LEIVO, 1999)	89
Figura 26 – Dispositivo desenvolvido no <i>Technical Research Centre of Finland</i> (HOLT e LEIVO, 1999).....	90
Figura 27 – Dispositivo utilizado por Veiga (1997) para medida de retração livre linear.....	91
Figura 28 – Curva de retração livre linear (Adaptado de VEIGA, 1997)	91
Figura 29 – Dispositivo utilizado por Holt (2001) de 270 x 270 x 100 mm	93
Figura 30 – Ilustração do ensaio de medida de retração plástica de Holt (2001).....	94
Figura 31 – Dispositivo para medida da retração plástica linear (FOURDRIN et al., 2001).....	94
Figura 32 – Representação esquemática do dispositivo utilizado por Almusallam (2001)	95
Figura 33 – Vista superior do dispositivo de Princigallo et al. (2003) desenvolvido por Lura et al. (2003).....	96
Figura 34 – Dispositivo para medida da retração plástica utilizado por Turcry (2004).....	97
Figura 35 – Secção esquemática do dispositivo de medir pressão capilar (TURCRY, 2004).....	97
Figura 36 – Moldes utilizados nas pesquisas de Jasiczak e Szymanski (2004)	98
Figura 37 – Vista lateral do dispositivo desenvolvido por Sanjuán e Moragues (1994).....	98
Figura 38 – Dispositivo utilizado por Al-Amoudi et al. (2004, 2006)..	99
Figura 39 – Molde de Cusson e Hoogeveen (2006) proposto pela norma ASTM C157/C157M (2006).....	100
Figura 40 – Dispositivo utilizado por Nicot (2008) para medida da retração linear.....	100

Figura 41 – Curva de retração da argamassa de cimento, cal e areia na proporção 1 : 1 : 6, em volume (BASTOS, 2001).....	101
Figura 42 – Dispositivo utilizado por Esping (2007) desenvolvido por Jensen e Hansen (1995)	102
Figura 43 – No dispositivo superior é realizado o ensaio de retração plástica e no inferior de retração autógena (ESPING, 2007)	102
Figura 44 – Dispositivo utilizado por Wongtanakitcharoen e Naaman (2007).....	103
Figura 45 – Relógio comparador utilizado no ensaio de retração por secagem.....	104
Figura 46 – Dispositivo desenvolvido por Springenschmid et al. (1985).....	105
Figura 47 – Desenvolvimento das deformações elásticas, retração e fluência (KOVLER, 1994)	106
Figura 48 – Dispositivo utilizado por Paillère et al. (1989)	107
Figura 49 – Dispositivo utilizado por Bissonnette e Pigeon (1995)....	107
Figura 50 – Vista do ensaio de retração restringida de Veiga (1997) .	108
Figura 51 – Dispositivo utilizado para medida de retração restringida.....	109
Figura 52 – Dispositivo desenvolvido por Altoubat (2000).....	109
Figura 53 – Dispositivo utilizado por Tao e Weizu (2006) medida de retração linear.....	110
Figura 54 – Vista lateral e superior do dispositivo utilizado por Hammer (2007)	111
Figura 55 – Detalhes dos pinos de fixação e do feltro utilizado para minimizar o atrito (HAMMER, 2007)	111
Figura 56 – Detalhes do equipamento para ensaio de retração restringida (MELO NETO, 2008)	112
Figura 57 – Esquematização das deformações no estado fresco (BAYASI e MACINTYRE, 2002).....	114
Figura 58 – Influência da retração e da fluência na fissuração do concreto (WEISS, 1999)	115
Figura 59 – Decréscimo da capacidade de deformação do concreto nas primeiras horas (KASAI citado por HOLT e LEIVO, 2004 e ESPING, 2007)	117
Figura 60 – Mudanças de volume do concreto fresco (KRONLÖF et al., 1995).....	118
Figura 61– Estimativa da perda de água do concreto por evaporação (ACI 305R, 1999).....	119
Figura 62 – Vista superior e lateral do molde utilizado por Yool e Lees (1998) na avaliação da fissuração.....	121

Figura 63 – Representação esquemática do molde com restrições para avaliar a fissuração devido à retração plástica desenvolvido por Berke e Dallaire citados por Bentur e Kovler (2003) e Qi (2003)	126
Figura 64 – Molde para avaliação da fissuração em argamassas (TURCRY, 2004).....	127
Figura 65 – Secção do molde para avaliação da fissuração em concreto alto-adensável (TURCRY, 2004; TURCRY e LOUKILI, 2006)	128
Figura 66 – Geometria do molde para avaliação da fissuração (QI et al., 2005; LURA et al., 2006, 2007)	129
Figura 67 – Molde utilizado na avaliação da fissuração por Sivakumar e Santhanam (2007)	130
Figura 68 – Molde desenvolvido para avaliar o desempenho de argamassas e concretos de reparos quanto a fissuração (MORENCY et al., 2005)	131
Figura 69 – Dispositivo desenvolvido na <i>Technical Academy</i> da Alemanha (VAYSBURD et al., 1999, 2002).....	131
Figura 70 – Representação esquemática da placa utilizada por Yokoyama et al. (1994) citados por Bentur e Kovler (2003).....	132
Figura 71 – Painel de madeira para avaliar a incidência de fissuras (MA et al., 2004).....	133
Figura 72 – Configurações do anel utilizado por Weiss (1999).....	134
Figura 73 – Difractograma da cal CH III. (a) antes da maturação e (b) depois da maturação	141
Figura 74 – Distribuição granulométrica da areia natural e da areia britada	143
Figura 75 – Espectro de infravermelho do aditivo incorporador de ar.....	145
Figura 76 – Estrutura química do lauril sulfato de sódio	145
Figura 77 – Distribuição granulométrica das argamassas anidras industrializadas	146
Figura 78 – Valores médios das dimensões, em milímetro, do bloco cerâmico.....	147
Figura 79 – Misturador planetário de eixo vertical	149
Figura 80 – Teor de ar incorporado no estudo-piloto.....	151
Figura 81 – Teor de água no estudo-piloto	152
Figura 82 – Mesa de consistência (<i>flow table</i>).....	153
Figura 83 – Ensaio de <i>squeeze-flow</i>	154
Figura 84 – Funil de Buchner modificado	154
Figura 85 – Ensaio de densidade de massa no estado fresco	155
Figura 86 – Calorímetro isotérmico	155

Figura 87 – Ensaio de retração por secagem.....	156
Figura 88 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmica	157
Figura 89 – Ensaio de resistências: (a) à tração na flexão e (b) à compressão	157
Figura 90 – Ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade	158
Figura 91 – Equipamento de medida de retração livre linear de argamassa no estado fresco	161
Figura 92 – Representação esquemática do dispositivo para medida de retração livre linear.....	162
Figura 93 – Ensaio de retração livre linear nos moldes unilateral e bilateral.....	163
Figura 94 – Resultados de retração livre linear nos moldes unilateral e bilateral	164
Figura 95 – Retração linear por unidade de área da superfície da amostra da argamassa IAR 27.0	165
Figura 96 – Representação esquemática do dispositivo para medida de retração restringida linear	165
Figura 97 – (a) Molde de aço inox utilizado para obter a força com retração restringida pela célula de carga e (b) Vista dos ensaios de retração livre à esquerda e restringida à direita	166
Figura 98 – Ensaio de retração livre e restringida	167
Figura 99 – Molde adaptado da norma ASTM C1579 (2006) para avaliar a fissuração	168
Figura 100 – Ensaio de avaliação da fissuração (ASTM C1579, 2006)	169
Figura 101 – Anemômetro digital utilizado na medição da velocidade do vento.....	170
Figura 102 – Ensaio de perda de massa por evaporação da água.....	171
Figura 103 – Perda de massa por evaporação da água com e sem vento	171
Figura 104 – Amostra de bloco cerâmico para determinação da quantidade de água absorvida da argamassa	172
Figura 105 – Ensaio para determinar quantidade de água evaporada e absorvida pelo bloco cerâmico	173
Figura 106 – Diagrama esquemático do programa experimental.....	176
Figura 107 – Perfil da curva devido aos efeitos da adição de fibras no teor de ar incorporado (SILVA, 2006)	180
Figura 108 – Avaliação reológica pelo <i>squeeze-flow</i> das argamassas industrializadas. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 20,0 N de carga	182

Figura 109 – Avaliação reológica pelo <i>squeeze-flow</i> das argamassas mistas com areia natural e britada. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 15,0 N de carga.....	183
Figura 110 – Avaliação reológica pelo <i>squeeze-flow</i> das argamassas com fibras. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 15,0 N de carga.....	184
Figura 111 – Correlação entre consumo de fibras de polipropileno e carga máxima para deformar 2,50 mm as amostras das argamassas com fibras no ensaio de <i>squeeze-flow</i>	185
Figura 112 – Avaliação reológica pelo <i>squeeze-flow</i> das argamassas com ar incorporado. Ampliação das curvas na região de 2,50 mm de deformação com 80,0 N de carga.....	185
Figura 113 – Avaliação reológica pelo <i>squeeze-flow</i> das argamassas com ar incorporado até a deformação de 5,00 mm	186
Figura 114 – Correlação entre teor de ar incorporado e carga máxima para deformar 2,50 mm as amostras das argamassas com ar incorporado no ensaio de <i>squeeze-flow</i>	187
Figura 115 – Viscosidade plástica (a) e tensão de escoamento (b) para a deformação de 2,50 mm obtidos através das Equações 5 e 6, respectivamente, através do ensaio de <i>squeeze-flow</i>	188
Figura 116– Retenção de água após 15 minutos de sucção no funil de Buchner modificado	189
Figura 117 – Correlação linear das argamassas com aditivo da retenção de água: (a) com o teor de ar incorporado e (b) com o consumo de água.....	191
Figura 118 – Representação esquemática de curva de fluxo de calor de hidratação (QUARCIONI, 2008)	192
Figura 119 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas industrializadas	193
Figura 120 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita	193
Figura 121 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas com fibras de polipropileno	194
Figura 122 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas com ar incorporado	194
Figura 123 – Resultados médios das argamassas 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita da: (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água	197
Figura 124 – Resultados médios das argamassas com fibras da: (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água ...	198

Figura 125 – Resultados médios das argamassas com ar incorporado da (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água.....	198
Figura 126 – Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração por secagem das argamassas: (a) 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita; (b) com fibras de polipropileno e (c) com ar incorporado.....	199
Figura 127 – Curva característica da correlação entre perda de massa e retração por secagem	200
Figura 128 – Densidade de massa aparente no estado endurecido.....	201
Figura 129 – Resultados médios das resistências à compressão e à tração na flexão.....	202
Figura 130 – Correlação exponencial da relação água/cimento das argamassas com aditivo incorporador de ar (a) com resistência à compressão e (b) com resistência à tração na flexão.....	204
Figura 131 – Correlação linear do teor de ar incorporado das argamassas com aditivo incorporador de ar (a) com resistência à compressão e (b) com resistência à tração na flexão.....	205
Figura 132 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmica	205
Figura 133 – Correlação exponencial do módulo de elasticidade com (a) resistência à compressão e (b) resistência à tração na flexão.....	206
Figura 134 – Correlação linear do módulo de elasticidade: (a) com teor de fibras e (b) com teor de ar incorporado	207
Figura 135 – Resultados médios do coeficiente de capilaridade.....	207
Figura 136 – Micrografia das argamassas com ar incorporado. (a) 1 : 1 : 6; (b) IAR 9.0; (c) IAR 15.0; (d) IAR 21.0; (e) IAR 27.0 ...	209
Figura 137 – Absorção de água após imersão e após imersão e fervura	210
Figura 138 – Índice de vazios após imersão e após imersão e fervura	210
Figura 139 – Correlação das argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar entre índice de vazios e (a) consumo de água; (b) teor de ar incorporado.....	212
Figura 140 – (a) Perda de massa por evaporação da água das argamassas industrializadas e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água	213
Figura 141 – (a) Perda de massa por evaporação da água da argamassa mista com areia natural e areia britada e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água..	214

Figura 142 – Detalhes das aparências das superfícies das argamassas após 20 horas de exposição.....	215
Figura 143 – (a) Perda de massa por evaporação da água da argamassa com fibras e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água.....	216
Figura 144 – Perda de massa por evaporação da água da argamassa com ar incorporado e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água.....	217
Figura 145 – Perfil da curva de retração livre linear das argamassas avaliadas	218
Figura 146 – Argamassas Industrializadas: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear	220
Figura 147 – Detalhes das curvas de retração livre das argamassas industrializadas com 4 horas de ensaio	221
Figura 148 – Argamassas mistas com areia natural e com areia britada: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear.....	222
Figura 149 – Argamassas com fibras de polipropileno: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear	225
Figura 150 – Argamassas com ar incorporado: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear	226
Figura 151 – Forças na retração restringida das argamassas industrializadas. Ampliação até 4 horas de ensaio com forças de até 4 N.....	229
Figura 152 – Detalhe da ruptura da argamassa D no ensaio de retração livre e de retração restringida	230
Figura 153 – Forças na retração restringida das argamassas mistas com areia natural e areia britada. Ampliação até 8 horas de ensaio com forças de até 10 N.....	231
Figura 154 – Forças na retração restringida das argamassas com fibras de polipropileno. Ampliação até 6 horas de ensaio com forças de até 6 N.	231
Figura 155 – Forças na retração restringida das argamassas com ar incorporado. Ampliação até 5 horas de ensaio com forças de até 4 N.....	232
Figura 156 – Correlação linear entre a máxima retração livre e a máxima força na retração restringida.....	234

Figura 157 – Ensaio para determinação da força de ruptura na retração restringida.....	235
Figura 158 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas industrializadas <i>versus</i> deformação.....	235
Figura 159 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas mistas com areia natural e areia britada <i>versus</i> deformação	236
Figura 160 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas com fibras <i>versus</i> deformação.....	236
Figura 161 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas com ar incorporado <i>versus</i> deformação.....	237
Figura 162 – (a) Ensaio de fissuração e perda de massa nos moldes dentro da caixa e (b) Fissuração do molde número 2 da argamassa D	239
Figura 163 – Resultados do tempo, comprimento e área total das fissuras.....	240
Figura 164 – Área total das fissuras em função da perda de massa por evaporação da água.....	242
Figura 165 – Área total das fissuras em função da perda de massa por evaporação da água nas argamassas: (a) com fibras de polipropileno; (b) com ar incorporado	242
Figura 166 – Correlação linear entre a área total das fissuras: (a) e máxima retração livre; (b) e máxima força na retração restringida.....	243
Figura 167 – Correlação entre área total das fissuras e módulo de elasticidade	247
Figura 168 – (a) Energia de ruptura (tenacidade); (b) Relação R_t/R_c	252
Figura 169 – Porcentagem de água absorvida pelo bloco cerâmico e evaporada em relação à massa total de água da argamassa 1 : 1 : 6. Ampliação até o nível de 10%.....	253
Figura 170 – Porcentagem de água absorvida pelo bloco cerâmico e evaporada em relação à massa total de água da argamassa 1 : 2 : 9. Ampliação até o nível de 10%.....	253
Figura 171 – (a) Parede dividida em dois painéis preparadas para o chapisco e (b) Painéis após o chapisco preparados para o recebimento da argamassa.....	254
Figura 172 – Revestimento da argamassa 1 : 1 : 6 após lançamento aguardando o sarrafeamento.....	255
Figura 173 – Vista dos revestimentos de argamassa 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 com 35 dias de idade.....	256
Figura 174 – Curvas de carga <i>versus</i> deformação do ensaio de <i>squeeze-flow</i> – NBR 15839 (ABNT, 2010): (a) Arg A; (b) Arg B;	

(c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6; (g) 1 : 2 : 9;	
(h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30; (l) IAR 9.0;	
(m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0.....	294
Figura 175 – Retração por secagem – NBR 15261 (ABNT, 2005):	
(a) 1 : 1 : 6; (b) 1 : 2 : 9; (c) BRITA; (d) FPP 0.10; (e) FPP 0.20;	
(f) FPP 0.30; (g) IAR 9.0; (h) IAR 15.0; (i) IAR 21.0; (j) IAR 27.0 ..	298
Figura 176 – Perda de massa dos corpos-de-prova utilizados no	
ensaio da retração por secagem – NBR 15261 (ABNT, 2005):	
(a) 1 : 1 : 6; (b) 1 : 2 : 9; (c) BRITA; (d) FPP 0.10; (e) FPP 0.20;	
(f) FPP 0.30; (g) IAR 9.0; (h) IAR 15.0; (i) IAR 21.0; (j) IAR 27.0 ...	300
Figura 177 – Curvas de retração livre linear: (a) Arg A;	
(b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6; (g) 1 : 2 : 9;	
(h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30; (l) IAR 9.0;	
(m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0.....	319
Figura 178 – Curvas das forças na retração restringida linear:	
(a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6;	
(g) 1 : 2 : 9; (h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30;	
(l) IAR 9.0; (m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0	321
Figura 179 – Curvas das forças de tração até a ruptura da	
amostra: (a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg E; (e) 1 : 1 : 6;	
(f) 1 : 2 : 9; (g) BRITA; (h) FPP 0.10; (i) FPP 0.20; (j) FPP 0.30;	
(k) IAR 9.0; (l) IAR 15.0; (m) IAR 21.0; (n) IAR 27.0	323

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das propriedades das argamassas (CSTB, 1993).....	52
Tabela 2 – Classificação das argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)	53
Tabela 3 – Limites de resistência de aderência à tração para emboço e camada única segundo NBR 13749 (ABNT, 1996).....	54
Tabela 4 – Classificação dos poros da pasta de cimento (IUPAC, 1997)	59
Tabela 5 – Tensão capilar obtida da Equação de Laplace (BENTZ e AÏTCIN, 2008)	63
Tabela 6 – Caracterização química do cimento CII-Z 32	139
Tabela 7 – Caracterização física e mecânica do cimento CII-Z 32	139
Tabela 8 – Caracterização química da cal dolomítica CH III	140
Tabela 9 – Caracterização física da cal moída após a hidratação, secagem e moagem	140
Tabela 10 – Caracterização física das areias	142
Tabela 11 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno	144
Tabela 12 – Características físicas do aditivo incorporador de ar.....	144
Tabela 13 – Massa específica e teor de finos do material seco das argamassas industrializadas	146
Tabela 14 – Traços, teor de fibras de polipropileno, de aditivo incorporador de ar e de finos.....	150
Tabela 15 – Teor de aditivo incorporador de ar obtido através da regressão.....	152
Tabela 16 – Medidas da velocidade do vento	170
Tabela 17 – Principais características das argamassas confeccionadas	175
Tabela 18 – Principais características das argamassas industrializadas.....	176
Tabela 19 – Consumo dos materiais utilizados na produção das argamassas	178
Tabela 20 – Teor de água, índice de consistência e teor de ar incorporado	179
Tabela 21 – Máxima retração livre linear ou retração livre linear obtida na idade de 20 horas.....	228

Tabela 22 – Máxima força na retração restringida ou força obtida na idade de 20 horas.....	233
Tabela 23 – Força de ruptura e energia de ruptura à tração	238
Tabela 24 – Critérios de avaliação de susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa (CSTB, 1982)	244
Tabela 25 – Resultados da retração por secagem, módulo de elasticidade e resistências mecânicas	245
Tabela 26 – Critérios de avaliação de susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa (CSTB, 1982) utilizando a máxima retração livre linear	248
Tabela 27 – Classificação da tendência à fissuração	249
Tabela 28 – Resultados médios dos parâmetros obtidos na retração restringida linear	250
Tabela 29 – Massa de materiais utilizados na produção das argamassas	288
Tabela 30 – Densidade de massa no estado fresco calculada	289
Tabela 31 – Densidade de massa no estado fresco medida – NBR 13278 (ABNT, 2005).....	290
Tabela 32 – Teor de ar incorporado – NBR 13278 (ABNT, 2005) ..	290
Tabela 33 – Índice de consistência – NBR 13276 (ABNT, 2005).....	291
Tabela 34 – Análise de variância para o teor de ar incorporado ao nível de significância de 5%	291
Tabela 35 – Análise de variância para o índice de consistência ao nível de significância de 5%	292
Tabela 36 – Carga máxima para deformação de 2,5 mm no ensaio <i>squeeze-flow</i>	295
Tabela 37 – Análise de variância para a carga máxima para deformação de 2,5 mm no ensaio de <i>squeeze-flow</i> ao nível de significância de 5%	295
Tabela 38 – Retenção de água – NBR 13277 (ABNT, 2005).....	296
Tabela 39 – Análise de variância para a retenção de água ao nível de significância de 5%	296
Tabela 40 – Medida da retração por secagem na idade de 28 dias	300
Tabela 41 – Perda de massa da retração por secagem na idade de 28 dias.....	301
Tabela 42 – Análise de variância para a retração por secagem ao nível de significância de 5%	301
Tabela 43 – Análise de variância para a perda de massa da retração por secagem ao nível de significância de 5%	302
Tabela 44 – Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm	303

Tabela 45 – Densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280 (ABNT, 2005).....	305
Tabela 46 – Análise de variância para a densidade de massa ao nível de significância de 5%	306
Tabela 47 – Resistência à compressão na idade de 28 dias – NBR 13279 (ABNT, 2005).....	307
Tabela 48 – Resistência à tração na flexão na idade de 28 dias – NBR 13279 (ABNT, 2005).....	308
Tabela 49 – Análise de variância para a resistência à compressão ao nível de significância de 5%.....	308
Tabela 50 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão ao nível de significância de 5%.....	309
Tabela 51 – Módulo de elasticidade dinâmico na idade de 28 dias utilizando a densidade de massa aparente no estado endurecido da Tabela 45 – NBR 15630 (ABNT, 2008)	310
Tabela 52 – Análise de variância para o módulo de elasticidade dinâmico ao nível de significância de 5%	310
Tabela 53 – Coeficiente de capilaridade – NBR 13279 (ABNT, 2005)	311
Tabela 54 – Análise de variância para o coeficiente de capilaridade ao nível de significância de 5%.....	312
Tabela 55 – Massas dos corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água e índice de vazios.....	313
Tabela 56 – Absorção de água após imersão em água e após imersão e fervura – NBR 9778 (ABNT, 1987).....	314
Tabela 57 – Índice de vazios após imersão em água e após imersão e fervura – NBR 9778 (ABNT, 1987).....	315
Tabela 58 – Análise de variância para a absorção de água após imersão ao nível de significância de 5%	316
Tabela 59 – Análise de variância para a absorção de água após imersão e fervura ao nível de significância de 5%.....	316
Tabela 60 – Análise de variância para o índice de vazios após imersão ao nível de significância de 5%	317
Tabela 61 – Análise de variância para o índice de vazios após imersão e fervura ao nível de significância de 5%.....	317
Tabela 62 – Análise de variância para a medida da retração livre linear na idade de 20 horas ao nível de significância de 5%	324
Tabela 63 – Análise de variância para as forças na retração restringida linear na idade de 20 horas ao nível de significância de 5%	324

Tabela 64 – Análise de variância para as forças de ruptura ao nível de significância de 5%	325
Tabela 65 – Tempo de ocorrência da primeira fissura após a moldagem	326
Tabela 66 – Comprimento total das fissuras medidas após 20 horas da moldagem.....	327
Tabela 67 – Área total das fissuras medidas após 20 horas da moldagem	328
Tabela 68 – Análise de variância para o tempo de ocorrência da primeira fissura ao nível de significância de 5%	328
Tabela 69 – Análise de variância para o comprimento das fissuras após 20 horas da moldagem ao nível de significância de 5%	329
Tabela 70 – Análise de variância para a área das fissuras após 20 horas da moldagem ao nível de significância de 5%	329

LISTA DE SÍMBOLOS

- σ_{cap} – tensão capilar
 p_v – pressão de vapor de água
 p_c – pressão na água
 γ – tensão superficial da água
 r – raio do poro onde está o menisco
 θ – ângulo do menisco
 R – constante universal dos gases
 T – temperatura
 M_v – massa molar da água
 H – umidade relativa
 τ – tensão de cisalhamento
 τ_o – tensão de escoamento
 F – força
 A – área
 V – velocidade
 η – viscosidade plástica
 $\dot{\gamma}$ – taxa de cisalhamento
 dv/dy – gradiente de velocidade
 t – tempo
 h – altura
 D – diâmetro
 π – pi radiano
 ε – deformação
 α^T – coeficiente de dilatação térmica
 V_{hidratos} – volume de hidratos
 $V_{\text{cimento anidro}}$ – volume de cimento anidro
 $V_{\text{água}}$ – volume de água
 W_S – quantidade de água exsudada
 W – quantidade de água evapora da amostra
 W_E – quantidade de água evaporada no poro equivalente
 P – pressão capilar da amostra
 P_E – pressão capilar no poro equivalente
 C – coeficiente de capilaridade
 m_{90} – absorção de água por capilaridade no tempo de 90 minutos
 m_{10} – absorção de água por capilaridade no tempo de 10 minutos
 t_{90} – tempo de 90 minutos
 t_{10} – tempo de 10 minutos

ρ – massa específica da água

m – massa

F_r – força de ruptura

F_m – força máxima de retração restringida

E – energia de ruptura

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ACI – American Concrete Institute
ASTM – American Society of Testing and Materials
BS – British Standart
BSI – British Standart Institution
CH – cal hidratada
CP – Cimento portland
CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IDT – Inductive Displacement Transducers
INSA – Institut National dès Sciences Appliquées
IUPAC – Union of Pure and Applied
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT – Linear variable differential transducer
MEV – Microscopia eletrônica de varredura
MF – Módulo de finura
NBR – Normalização brasileira
NM – Normalização do mercosul
RILEM – International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials
SBTA – Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas
SRA – Aditivo redutor de retração

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
LISTA DE FIGURA.....	xv
LISTA DE TABELA.....	xxv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxix
LISTA DE SIGLAS.....	xxx
1	INTRODUÇÃO.....37
1.1	CONTEXTO GERAL37
1.2	JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES37
1.3	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO39
1.4	OBJETIVOS.....40
1.5	ESTRUTURA DA TESE40
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA42
2.1	REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA42
2.1.1	Introdução42
2.1.2	Conceitos42
2.1.3	Funções43
2.1.4	Propriedades43
2.1.4.1	No estado fresco44
2.1.4.2	No estado endurecido.....47
2.1.5	Perda de água da argamassa de revestimento49
2.1.5.1	Evaporação49
2.1.5.2	Sucção do substrato50
2.1.6	Caracterização das argamassas51
2.1.6.1	Classificação Meruc.....51
2.1.6.2	Classificação segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) ...52
2.1.7	Classificação dos revestimentos54
2.1.8	Conclusões.....56
2.2	MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA ÁGUA NA ARGAMASSA.....57
2.2.1	Introdução57
2.2.2	Poros capilares.....57
2.2.3	Mecanismos da ação da água.....59
2.2.4	Conclusões.....65
2.3	DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS E CONCRETOS65

2.3.1	Introdução.....	65
2.3.2	Aspectos reológicos.....	66
2.3.3	Retrações em materiais cimentícios.....	73
2.3.4	Conclusões.....	83
2.4	MÉTODOS DE MEDIDAS DE RETRAÇÃO.....	84
2.4.1	Medida linear e volumétrica.....	84
2.4.2	Fixação dos suportes para medida de retração linear ...	85
2.4.3	Dispositivos de medidas de retração livre linear	88
2.4.4	Dispositivos de medidas de retração restringida linear.....	104
2.4.5	Conclusões.....	112
2.5	FISSURAÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO.....	113
2.5.1	Introdução.....	113
2.5.2	Fissuras provenientes de retração plástica.....	114
2.5.3	Fatores que influenciam a fissuração.....	120
2.5.3.1	Cimento.....	120
2.5.3.2	Cal.....	120
2.5.3.3	Areia.....	121
2.5.3.4	Fibras.....	122
2.5.3.5	Aditivos.....	124
2.5.4	Métodos para avaliar a fissuração.....	124
2.5.4.1	Moldes com restrições.....	125
2.5.4.2	Placas.....	132
2.5.4.3	Anéis.....	134
2.5.5	Conclusões.....	135
2.6	CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	136
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	138
3.1	INTRODUÇÃO.....	138
3.2	MATERIAIS.....	138
3.2.1	Cimento.....	138
3.2.2	Cal.....	139
3.2.3	Areias.....	141
3.2.4	Fibras de polipropileno.....	143
3.2.5	Aditivo incorporador de ar.....	144
3.2.6	Argamassa industrializadas.....	146
3.2.7	Blocos cerâmicos.....	147
3.3	METODOLOGIA.....	148
3.3.1	Definição dos traços e preparo da mistura.....	148
3.3.2	Estudo-piloto para determinação do teor de ar	

	incorporado.....	151
3.3.3	Ensaio realizado.....	152
3.3.3.1	Índice de consistência.....	152
3.3.3.2	Squeeze-flow.....	153
3.3.3.3	Retenção de água.....	154
3.3.3.4	Teor de ar incorporado.....	154
3.3.3.5	Calorimetria de condução isotérmica.....	155
3.3.3.6	Retração por secagem.....	156
3.3.3.7	Densidade de massa aparente no estado endurecido...	156
3.3.3.8	Módulo de elasticidade.....	156
3.3.3.9	Resistência à compressão e à tração na flexão.....	157
3.3.3.10	Capilaridade.....	158
3.3.3.11	Absorção de água e índice de vazios.....	159
3.3.3.12	Microscopia eletrônica de varredura.....	160
3.3.3.13	Retração livre linear.....	160
3.3.3.14	Retração restringida linear.....	165
3.3.3.15	Método para avaliação da fissuração.....	168
3.3.3.16	Perda de massa por evaporação da água.....	170
3.3.3.17	Perda de massa por evaporação da água e por sucção do substrato.....	171
3.3.3.18	Fissuração dos revestimentos da parede de alvenaria.....	174
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	177
4.1	INTRODUÇÃO.....	177
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO.....	177
4.2.1	Consumo de materiais.....	177
4.2.2	Índice de consistência e teor de ar incorporado.....	178
4.2.3	Squeeze-flow.....	181
4.2.4	Retenção de água.....	189
4.2.5	Calorimetria de condução isotérmica.....	191
4.3	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO.....	196
4.3.1	Retração por secagem.....	196
4.3.2	Densidade de massa aparente no estado endurecido...	200
4.3.3	Resistência à compressão e à tração na flexão.....	202
4.3.4	Módulo de elasticidade.....	205
4.3.5	Capilaridade.....	207
4.3.6	Absorção de água e índice de vazios.....	210
4.4	PERDA DE MASSA POR EVAPORAÇÃO DA ÁGUA..	212
4.5	RETRAÇÃO LIVRE E RESTRINGIDA.....	218

4.5.1	Retração livre linear.....	218
4.5.2	Retração restringida linear.....	228
4.5.2.1	Força na retração restringida linear.....	228
4.5.2.2	Força de ruptura na retração restringida linear.....	234
4.6	FISSURAÇÃO.....	238
4.7	SUSCEPTIBILIDADE À FISSURAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA.....	244
4.7.1	Associada às propriedades mecânicas.....	244
4.7.2	Associada à retração restringida.....	248
4.8	REVESTIMENTOS DA PAREDE.....	252
4.8.1	Avaliação da perda de massa por evaporação da da água e por sucção do substrato.....	252
4.8.2	Avaliação da fissuração dos revestimentos da parede de alvenaria.....	254
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	257
5.1	CONCLUSÕES.....	257
5.2	QUANTO ÀS METODOLOGIAS.....	258
5.3	QUANTO À INFLUÊNCIAS DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO.....	258
5.4	QUANTO A INFLUÊNCIA DO AR INCORPORADO.....	259
5.5	QUANTO À INFLUÊNCIA DO TIPO DE AREIA.....	260
5.6	QUANTO À INFLUÊNCIA DO TRAÇO.....	260
5.7	QUANTO AOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO.....	261
5.8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	262
	REFERÊNCIAS.....	263
	ANEXOS.....	288

Capítulo 1 – Introdução

1.1 CONTEXTO GERAL

Observando-se as fachadas dos edifícios com revestimentos de argamassas constata-se que a fissuração é um dos fenômenos patológicos de maior incidência. A fissuração pode resultar de um ou mais fatores, entre eles a retração da argamassa, gerando tensões por vezes combinadas desfavoravelmente com as propriedades mecânicas como resistência à tração e módulo de elasticidade.

A retração no estado fresco de uma argamassa, devido principalmente à perda de água quando a fração sólida da mistura dispõe de mobilidade entre as partículas, é a principal causa das fissuras que ocorrem nos revestimentos de argamassa nas primeiras 24 horas. Não existem normas brasileiras e nem procedimentos normalizados para medir as deformações e as tensões que são geradas na argamassa de revestimento no estado fresco. As normas NBR 8490 (ABNT, 1984) – *Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem* e NBR 15261 (ABNT, 2005) – *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)*, ambas especificam procedimentos para determinação das retrações livres autógenas e por secagem no estado endurecido. Nota-se uma carência de metodologias e dispositivos para ensaios que procurem reproduzir em laboratório condições próximas às que são encontradas nas obras de construção civil.

1.2 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

Argamassa de revestimento utilizando cimento, cal e areia é um material que já vem sendo utilizado nas edificações da Grécia desde o período micênico. No Brasil, são frequentes os processos construtivos de edifícios residenciais e comerciais que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas, tanto no sistema de vedação interna como externa.

O revestimento de argamassa, além de contribuir para a estética de uma edificação, tem outras funções tais como: proteger a estrutura da

ação direta dos agentes agressivos, promover o isolamento termo-acústico e a estanqueidade à água e aos gases, servir de base regular e adequada para o acabamento final. Portanto, para que os revestimentos possam cumprir adequadamente suas funções é fundamental que não apresentem patologias, principalmente a ocorrências de fissuras.

A fissuração em revestimentos de argamassas é muito comum, principalmente nas fachadas externas dos edifícios. Este tipo de patologia, além de comprometer a estética da edificação e causar sérios danos à durabilidade do revestimento, pode, até mesmo, causar acidentes como consequência do descolamento do revestimento. A manutenção e os reparos em revestimentos de argamassas, principalmente das fachadas de grandes edifícios, tornam-se onerosos, pois exigem equipamentos e materiais apropriados e, também, mão-de-obra qualificada.

O fato da camada de revestimento ficar sempre aderida ao substrato e ser exposta, muitas vezes, diretamente às condições severas do meio ambiente, conduz principalmente ao surgimento de tensões de tração e de cisalhamento na interface substrato/revestimento, como consequência dos movimentos diferenciais ocorridos entre a camada de revestimento e o substrato. A restrição imposta pelo substrato a estes movimentos, muitas vezes associada à mudança de volume da argamassa devido à retração plástica, provoca o surgimento de fissuras no revestimento.

A retração plástica é um dos fenômenos associado à perda de água da argamassa no estado fresco, o que provoca a mudança de volume do compósito cimentício. Esta deformação é uma das causas relacionadas à fissuração nas primeiras idades do revestimento.

Nas últimas duas décadas, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas sobre retração plástica livre e restringida nos grandes centros de pesquisas em vários países do mundo, porém, no Brasil, pesquisas sobre este assunto são muito escassas. Como resultados destas pesquisas, diversos dispositivos e métodos foram desenvolvidos para avaliar as tensões produzidas com retração restringida que provocam a fissuração. A maioria destes dispositivos é destinada para aplicação prática em concretos e muito pouco se destina a argamassas de cimento, cal (ou aditivos) e areia de assentamento e revestimento de paredes de alvenaria.

Muitos materiais têm sido pesquisados tais como, fibras, sílica ativa, aditivos, entre outros, para reduzir e até mesmo eliminarem as fissuras decorrentes de retração plástica na superfície do concreto e nos revestimentos de argamassas, melhorando assim o seu desempenho e

durabilidade. Porém, as pesquisas experimentais carecem de uma metodologia e dispositivos adequados para verificar a real eficiência destes materiais ao fim a que se propõem.

A areia é um dos materiais constituintes da argamassa que ocupa a maior proporção do volume na sua constituição. Pesquisas desenvolvidas creditam à baixa qualidade e ao tipo da areia a responsabilidade pelo grande número de patologias no revestimento de argamassa. Atualmente no Brasil grande parte da areia é extraída de leitos de rios ou cavas, provocando a retirada da cobertura vegetal e a degradação dos cursos d'água, causando grande impacto ao meio ambiente. Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), vêm coibindo esta prática. Com isso, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que onera o preço final do produto. Novas alternativas vêm sendo buscadas para suprir a demanda de areia na construção civil, como a utilização de resíduos ou substituição da areia natural pela areia de britagem de rochas. Esta substituição foi a solução encontrada por vários países do mundo que teve início há mais de 30 anos. Hoje há uma tendência mundial no uso da areia de britagem de rocha com várias vantagens. Entre elas, destacam-se o aproveitamento integral das pedreiras, a obtenção de areia com características físicas e químicas constantes, o teor de umidade praticamente zero, as soluções de problemas ambientais, entre outras. Porém, Silva et al. (2007) constataram que a utilização de areia de britagem de rocha calcária em substituição a areia natural para a produção de argamassas provoca no revestimento um aumento considerável na incidência de fissuras no revestimento.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

As variáveis relacionadas ao meio ambiente que influenciam principalmente na fissuração de um revestimento de argamassa são temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, dentre outras. Esta pesquisa foi desenvolvida em sala climatizada com estas variáveis fixas, exceto para o ensaio de reologia e avaliação da fissuração no revestimento da parede de alvenaria.

A retração livre linear, a retração restringida, a perda de massa e a fissuração foram avaliadas em moldes considerando a perda de água utilizada na mistura provocada, essencialmente, pela evaporação.

1.4 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a fissuração em revestimentos de argamassas a partir das medidas de retração livre e das tensões provocadas por esta retração nas primeiras idades da argamassa.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Adaptar um método para avaliar a fissuração em revestimentos de argamassas;
- Medir as tensões geradas pela retração restringida da argamassa nas primeiras idades;
- Adaptar uma técnica para determinar a medida da retração livre linear à partir da moldagem provocada pela evaporação da água;
- Avaliar a influência da perda de massa devido à evaporação da água na fissuração e na retração livre linear;
- Determinar a força de ruptura da argamassa através da retração restringida no estado endurecido;
- Propor um método para determinar a quantidade de água da argamassa que é transferida ao substrato;
- Avaliar a susceptibilidade da fissuração dos revestimentos de argamassas utilizando as propriedades da argamassa no estado endurecido;
- Avaliar a susceptibilidade da fissuração dos revestimentos de argamassas utilizando os resultados de retração livre e restringida;
- Avaliar os efeitos da adição de fibras de polipropileno e incorporação de ar na fissuração dos revestimentos de argamassas no estado fresco;
- Avaliar os efeitos do tipo de areia e do proporcionamento dos materiais (traço) na fissuração de revestimentos de argamassas no estado fresco.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada em cinco capítulos, sendo que a introdução foi apresentada no capítulo 1 com o contexto geral, justificativas e contribuições que motivaram esta pesquisa, delimitação do trabalho e objetivos.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica enfocando o revestimento de argamassa e os fatores que influenciam na fissuração e apresenta, também, pesquisas desenvolvidas que abordam, de alguma forma, o tema deste trabalho.

O programa experimental é apresentado no capítulo 3, onde se descrevem os materiais empregados na pesquisa, a metodologia dos ensaios realizados e os dispositivos propostos para medição das retrações.

Os resultados do programa experimental, bem como as discussões, são apresentados no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 REVESTIMENTOS DE ARGAMASSAS

2.1.1 Introdução

São freqüentes, em todos os países do mundo, os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas, tanto no sistema de vedação interna como externa.

Os revestimentos de argamassas têm papel importante durante a vida útil das edificações, contribuindo para a estética e servindo como suporte para novos acabamentos, dentre outras funções.

A qualidade e a durabilidade de um revestimento dependem, além das características que são intrínsecas dos materiais empregados, ao proporcionamento entre eles, ao sistema de mistura, transporte e da técnica de execução, dentre outros fatores.

No Brasil, apesar de existirem métodos de ensaios para as diversas propriedades das argamassas e dos revestimentos e requisitos específicos para sua classificação de acordo com a norma NBR 13281 (ABNT, 2005) – *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos*, não existem, porém, critérios que especifiquem a sua utilização. A única propriedade com especificação é a resistência de aderência à tração prescrita pela norma NBR 13749 (ABNT, 1996) que determina a resistência mínima para determinadas funções do revestimento. Torna-se necessário a criação de indicadores que possibilitem avaliar as argamassas quanto à exigência do desempenho do revestimento associado às funções e às condições climáticas dos estados brasileiros.

2.1.2 Conceitos

A NBR 13529 (ABNT, 1995) define a argamassa para revestimento como sendo “uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. Nesta mesma norma brasileira são definidos outros termos usuais envolvendo o

revestimento executado à base de cimento e cal, ou ambos, quanto ao campo de sua aplicação. Podem-se encontrar definições como:

adições: materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração no proporcionamento;

argamassa de cal: argamassa preparada com cal como único aglomerante;

argamassa de cimento: argamassa preparada com cimento como único aglomerante;

Revestimento: é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final.

2.1.3 Funções

Os revestimentos de argamassas têm, em geral, as seguintes funções:

- Proteger as vedações e a estrutura contra a ação de agentes agressivos, com isso evitando a degradação precoce das mesmas, aumentar a durabilidade e reduzir os custos de manutenção das edificações;
- Servir como isolamento termo-acústico, impedir a penetração de água/gases e promover segurança ao fogo;
- Estéticas, como acabamento final ou servindo de base para novos revestimentos.

2.1.4 Propriedades

O desempenho satisfatório dos revestimentos quanto as suas funções depende das propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. A correta adequação das propriedades da argamassa no estado fresco permitirá que o revestimento cumpra as funções específicas no estado endurecido.

As propriedades da argamassa no estado endurecido são basicamente as mesmas do próprio revestimento, porém, não no mesmo nível de exigência. Recentemente, as normas técnicas brasileira introduziram os corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm para a

avaliação das propriedades das argamassas no estado endurecido. Algumas propriedades do revestimento dependem da interação entre a argamassa e o substrato.

Serão abordadas a seguir, sucintamente, as principais propriedades exigidas das argamassas.

2.1.4.1 No estado fresco

a) Consistência

Segundo Cincotto et al. (1995) é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. Diversos autores classificam as argamassas, segundo a consistência, em *secas* (a pasta preenche os vazios entre os grãos), *plásticas* (a pasta forma uma fina película e atua como lubrificante na superfície dos grãos dos agregados) e *fluidas* (os grãos ficam imersos na pasta). A consistência é diretamente determinada pelo conteúdo de água, sendo influenciada pelos seguintes fatores: relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, granulometria da areia, natureza e qualidade do aglomerante.

Na avaliação da consistência da argamassa é utilizada tradicionalmente no Brasil a mesa de consistência (*flow table*) apresentada pela NBR 7215 (ABNT, 1997) e são realizados procedimentos de ensaio para determinação do índice de consistência prescrito pela NBR 13276 (ABNT, 2005). Entretanto, apesar da grande utilização, este ensaio é muito criticado, pois vários são os pesquisadores que argumentam que a mesa não tem sensibilidade para medir a reologia da argamassa.

Existem outros métodos utilizados para avaliar a consistência: o método da penetração do cone preconizado pela norma ASTM C780 (2009); o método *vane test* (ensaio de palheta); ensaio de *dropping ball* prescrito pela norma BS 4551 (BSI, 2005), e mais recentemente, vem sendo empregado o método *squeeze-flow*, devido, principalmente, à grande sensibilidade às variações do comportamento reológico da argamassa.

b) Trabalhabilidade

Esta propriedade, que se relaciona principalmente à consistência, na prática significa facilidade de manuseio. Uma argamassa é dita

trabalhável, de um modo geral, quando ela distribui-se facilmente ao ser assentada, não gruda na colher do pedreiro quando está sendo aplicada, não segrega ao ser transportada, não endurece em contato com superfícies absorptivas e permanece plástica por tempo suficiente até que a operação seja finalizada.

O documento MR-3 (RILEM, 1982) descreve trabalhabilidade das argamassas como sendo uma propriedade complexa, resultante da conjunção de diversas outras propriedades, tais como consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, endurecimento sob sucção e tixotropia.

A plasticidade é influenciada pelo teor de ar incorporado, características e proporcionamentos dos materiais constituintes da argamassa e pelo processo de mistura.

A avaliação da trabalhabilidade das argamassas através de ensaios é uma tarefa muito difícil, pois ela depende, além das características dos materiais constituintes da argamassa, também da habilidade do oficial que está executando o serviço e de diversas propriedades do substrato, além da técnica de aplicação.

c) Coesão e Tixotropia

A coesão, segundo Cincotto et al. (1995), refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e às ligações químicas da pasta aglomerante. Ainda, segundo os autores, a influência da cal sobre a consistência e a trabalhabilidade das argamassas provém das condições de coesão interna que a mesma proporciona, em função da diminuição da tensão superficial da pasta aglomerante e da adesão ao agregado.

A tixotropia é a propriedade pela qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o estado gel (SELMO, 1989).

d) Retenção de água

A retenção de água é a capacidade da argamassa no estado fresco de manter sua consistência ou trabalhabilidade quando sujeita a situações que provocam principalmente a perda de água por evaporação e sucção do substrato.

A retenção de água é uma propriedade importante da argamassa, pois a água deve permanecer em seu interior o tempo necessário de

modo a permitir a hidratação do cimento e manter a plasticidade da argamassa até o momento de sua aplicação.

Vários fatores influenciam na capacidade de retenção de água da argamassa, sendo a cal considerada como um dos principais devido a sua elevada área específica. O aumento da capacidade de retenção de água também pode ser obtido com a utilização de aditivos incorporadores de ar, pois segundo Hanzic e Ilic (2003) as microbolhas de ar desconectam os poros e impedem a percolação da água.

e) Densidade de massa e ar incorporado

A densidade de massa no estado fresco é definida como sendo a razão entre a massa de argamassa que ocupa um recipiente e o volume do mesmo. A norma NBR 13278 (ABNT, 2005) que prescreve o ensaio, determinada que o recipiente deve ser cilíndrico de aproximadamente 400 cm³ com a densidade de massa, que inclui os vazios impermeáveis, expressa em kg/m³. A densidade de massa é muito utilizada para determinar o rendimento da argamassa no estado fresco e influencia significativamente diversas propriedades no estado fresco e endurecido. Esta propriedade é também utilizada para calcular a quantidade de ar incorporado¹ ou de ar aprisionado² no interior da argamassa, também prescrita pela NBR 13278 (ABNT, 2005), que compara a densidade de massa da argamassa obtida teoricamente, que não incluem vazios, com a densidade de massa medida.

O teor de ar incorporado em argamassas de revestimento deve ser criteriosamente analisado, pois além de modificar propriedades como plasticidade e trabalhabilidade, facilitando a aplicação da argamassa, também afeta diversas propriedades no estado endurecido. Alves (2002) e Antunes (2005), em suas pesquisas, comprovaram a redução da resistência de aderência à tração com aumento do teor de ar incorporado em argamassas de revestimentos, que atribuem à redução dos pontos de contato da argamassa com o substrato devido, principalmente, à presença das bolhas de ar nesta interface. Silva et al. (2009) verificaram que, além da redução das resistências mecânicas em argamassas de

¹ A incorporação de ar em argamassas de revestimento é um processo muito utilizado principalmente em argamassas industrializadas com utilização de aditivos tensoativos que introduzem nas argamassas vazios em forma de microbolhas de ar estáveis (ALVES, 2002).

² Ar aprisionado é o vazio no interior da argamassa no estado fresco devido ao inadequado adensamento durante a aplicação e/ou devido ao processo de mistura.

cimento e areia, o ar incorporado reduz sensivelmente a permeabilidade e o módulo de elasticidade.

Não existe consenso entre os pesquisadores quanto o teor de ar incorporado ideal para as argamassas de revestimentos. A norma ASTM C270 (1999) da American Society of Testing and Materials recomenda teores de ar incorporado entre 12% e 18% para argamassas de revestimento. Alves (2002) recomenda mínimo de 14% e máximo de 20% de ar incorporado para argamassas de revestimento, sendo os mesmos limites recomendados pela BS 4887 (BSI, 1986) da *British Standard Institution*. O mesmo autor cita que BENINGFIELD (1988) em um estudo do Instituto de Desenvolvimento de Pesquisa em Alvenaria de Melbourne, ocorrido em 1977, estabelecia que o teor de ar incorporado para as argamassas não deveria nunca exceder 20% e, preferencialmente, não ultrapassar 15%.

2.1.4.2 No estado endurecido

a) Resistência mecânica

É a propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos das mais diversas origens e que se traduzem, em geral, por tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (SELMO, 1989). Ainda, segundo a autora, a resistência mecânica dos revestimentos é uma propriedade que envolve solicitações de natureza distinta:

- Resistência à tração e à compressão;
- Resistência ao desgaste superficial;
- Resistência ao impacto.

A resistência mecânica é influenciada pelas características e o proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa, melhorando com o aumento do consumo de cimento.

b) Capacidade de deformação

É a capacidade que o revestimento apresenta em se deformar sem ruptura, retornando às suas dimensões iniciais quando cessam as solicitações que lhes são impostas (CINCOTTO et al., 1995). Esta propriedade por ser avaliada através do módulo de elasticidade, utilizando o método estático ou dinâmico. Quanto menor o valor do

módulo, maior é a capacidade do revestimento de absorver deformações.

Segundo Silva e Campiteli (2008), o módulo de elasticidade é uma expressão da rigidez da argamassa no estado endurecido que é proporcionado pelo cimento hidratado, pelo embricamento entre as partículas dos agregados, devido à forma e rugosidades dos grãos e pelos teores de ar incorporado e de material pulverulento. Concluem os autores que o consumo de água e o teor de cimento são variáveis determinantes nas resistências à compressão, à tração na flexão e de aderência à tração, que influenciam diretamente no módulo de elasticidade.

c) 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.

A permeabilidade é influenciada, essencialmente, pela granulometria da areia, características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa, quantidade de água utilizada na mistura e, também, pela utilização de aditivos químicos.

d) Aderência

A aderência, dentre as propriedades no estado endurecido, é considerada fundamental para garantir o desempenho das funções do revestimento e da durabilidade.

A aderência é significativamente influenciada pelas condições do substrato, características e proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa, principalmente pelo consumo de cimento e, também, pela técnica de execução, dentre outros fatores. Segundo Carasek et al. (2001), as argamassas formuladas com cal preenchem mais facilmente toda a superfície do substrato, propiciando maior extensão de aderência.

A resistência de aderência do revestimento ao substrato depende, também, das propriedades da argamassa no estado fresco, principalmente, da retenção de água, consistência e plasticidade.

2.1.5 Perda de água da argamassa de revestimento

A fissuração que ocorre em revestimentos de argamassa nas primeiras idades tem como causa predominante a saída da água seja por sucção do substrato ou por evaporação. A saída da água provoca a redução de volume da argamassa induzindo grandes deformações restringidas pela aderência ao substrato, gerando tensões no revestimento que podem culminar na fissuração.

Normalmente, as argamassas de revestimento, por serem constituídas de uma grande quantidade de finos ligantes e inertes, exigem, muitas vezes, uma quantidade muito maior de água para obter a trabalhabilidade adequada para sua utilização. Com isso, nos instantes iniciais após a aplicação da argamassa no substrato, devido à grande quantidade de água livre antes do início de pega do cimento, a quantidade de água perdida pela argamassa torna-se muito grande.

2.1.5.1 Evaporação

Os revestimentos de argamassas, já nas primeiras horas, sofrem severas ações provenientes do ambiente como temperaturas altas, umidade relativa baixa, ventos fortes que agem sobre o revestimento favorecendo a perda de água por evaporação. Os revestimentos de argamassas, especialmente de fachadas, estão mais sujeitos as estas intempéries da natureza devido à sua elevada relação área/volume.

A argamassa de revestimento, quando exposta ao ambiente, tende a entrar em equilíbrio com a umidade relativa do ar, que depende da porosidade do sólido. Em particular, os poros capilares, devido ao seu tamanho relativamente grande, esvaziam-se quando a umidade relativa do ambiente está abaixo de 45%, mas parte da água permanece adsorvida nos poros de gel mesmo a umidades relativas inferiores (NEVILLE, 1982). Esta perda de massa contínua da argamassa nos instantes iniciais é resultado da saída da água, mas também da decomposição de outras substâncias como, por exemplo, a liberação de CO₂ contido nos carbonatos (GALLIAS, 1982).

É fundamental que a argamassa no estado fresco tenha capacidade de retenção de água reduzindo assim a perda de água por evaporação. Détriché e Maso (1986) citam os seguintes fatores que influenciam a retenção de água: condições climáticas que interferem na cura e no equilíbrio higrotérmico; consumo dos aglomerantes e fração de finos que irão influenciar as características dos microporos nos

instantes iniciais; características químicas dos aglomerantes e espessuras do revestimento.

O Brasil, devido à sua grande extensão territorial, possui uma grande diversidade de clima para cada Estado. A NBR 15220 (ABNT, 2005) editada em 5 partes, na parte 3 estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro, dividindo o território em oito zonas. Esta norma abrange um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações de interesse social, considerando as diferentes características climáticas do país.

A umidade relativa média máxima anual na maioria dos estados brasileiros é em média 60%, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. As regiões brasileiras com menor umidade relativa são os Estados do Piauí, Ceará e Bahia que apresentam umidade média máxima anual entre 40% a 50%, enquanto que na região norte, a umidade média máxima anual é superior a 80%. Segundo o INMET, a temperatura média máxima anual varia entre 30°C e 33°C nas regiões norte, centro-oeste e nordeste; na região centro-oeste chega a 36°C; variam entre 27°C e 30°C na região sudeste e variam de 21°C a 24°C na região sul, sendo que no verão podem atingir 30°C. Já a velocidade média dos ventos que atingem grande parte do território brasileiro é menor que 5,0 m/s, de acordo com o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE.

2.1.5.2 Sucção do substrato

A maior quantidade de água que o revestimento de argamassa perde é devida à sucção pelo substrato, porém este fenômeno é relativamente rápido, pois se inicia quando os poros do substrato estão vazios e se encerram com a saturação. Segundo Groot (1988) citado por Pereira (2007), a perda de água por sucção do substrato, nos primeiros minutos, pode representar 50 a 60% da perda total de água, dependendo da combinação entre o substrato e a argamassa e da espessura do revestimento.

Os substratos que servem de base para o revestimento de argamassa podem ser de alvenaria ou de concreto. Nos substratos de alvenaria normalmente são empregados blocos cerâmicos ou blocos de concretos dentre outros elementos de vedação.

Segundo Paes (2004), os substratos podem ser caracterizados, dentre outras formas, pela porosidade, estrutura e distribuição dos tamanhos dos poros, pela capacidade de absorção de água e pela textura

superficial de contato, seja ela lisa ou rugosa. Estas características influenciam a velocidade e a quantidade da água transportada da argamassa fresca para o substrato e, conseqüentemente, na alteração da microestrutura da argamassa nesta região de contato.

O transporte da água da argamassa para o substrato é o principal responsável pela resistência de aderência à tração do revestimento pois, através da passagem da água, ocorre a transferência dos produtos de hidratação do cimento para o interior dos poros do substrato.

A saída de água da argamassa por sucção do substrato poroso afeta não somente o comportamento da argamassa na fase de sucção, mas também em toda a fase de endurecimento do cimento (DÉTRICHÉ et al., 1984). Segundo os autores, a velocidade de hidratação depende da quantidade de água intersticial presente na argamassa e o avanço da hidratação é ligado ao histórico de dessecação. Os autores observaram também que nas primeiras horas ocorre uma aproximação das partículas dos agregados, devido à absorção de parte da água de amassamento pelo substrato, gerando uma aceleração do início da hidratação do cimento, com isso diminuindo o início do tempo de pega. Isto provoca uma melhoria das características mecânicas iniciais, mas que evoluem pouco no tempo, devido a uma hidratação incompleta do cimento.

2.1.6 Caracterização das argamassas

2.1.6.1 Classificação Meruc

A França é um dos países mais desenvolvidos no setor da construção civil. Tem seus processos construtivos industrializados e possui mais de 200 tipos de argamassas industrializadas homologadas pelo *Centre Scientifique et Technique du Batiment* (CSTB). O CSTB criou a classificação MERUC, com base nas seguintes propriedades:

M – densidade de massa no estado endurecido (kg/dm^3)

E – módulo de deformação (MPa)

R – resistência à tração na flexão (MPa)

U – retenção de umidade (%)

C – coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2/\text{min}^{1/2}$)

As propriedades da argamassa industrializada possuem critérios de desempenho que são divididos em seis classes, prescritas segundo o *Cahier des prescriptions techniques d'emploi et de mise en oeuvre – Cahier 2669-2* (CSTB, 1993), conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação das propriedades das argamassas (CSTB, 1993)

Classes	M	E	R	U	C
	kg/m ³	MPa	MPa	%	g/dm ² /min ^{1/2}
1	< 1.200	< 5.000	< 1,5	< 78	< 1,5
2	1.000 a 1.400	3.500 a 7.000	1,0 a 2,0	72 a 85	1,0 a 2,5
3	1.200 a 1.600	5.000 a 10.000	1,5 a 2,7	80 a 90	2,0 a 4,0
4	1.400 a 1.800	7.500 a 14.000	2,0 a 3,5	86 a 94	3,0 a 7,0
5	1.600 a 2.000	12.000 a 20.000	2,7 a 4,5	91 a 97	5,0 a 12,0
6	> 1.800	> 16.000	> 3,5	95 a 100	> 10,0

Assim, as argamassas são formuladas para diferentes tipos de exposição da parede, condições atmosféricas e utilização do revestimento. As condicionantes e os requisitos para as argamassas, condicionados às condições das regiões da França, são:

- a) tipo de exposição da parede:
 - forte exposição à chuva: C1 ou C2
 - exposição a choques e deterioração: $E \geq 3$ e $R \geq 3$
 - parede enterrada: $M \geq 4$, $R \geq 3$ e $C \leq 2$
- b) condições atmosféricas:
 - clima quente ou vento: U5 ou U6
 - clima frio: M5 ou M6
- c) utilização do revestimento:
 - cerâmica: $E \geq 4$ e $R \geq 4$

2.1.6.2 Classificação segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)

A norma NBR 13281 (ABNT, 1995) – *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos*, estabelecia exigências mecânicas e reológicas para as argamassas dosadas em obra ou industrializadas, a saber: resistência à compressão aos 28 dias, capacidade de retenção de água e teor de ar incorporado.

A partir de 31 de Outubro de 2005, a norma reformulada NBR 13281 (ABNT, 2005) com o mesmo título, entrou em vigor, utilizando sete propriedades para as argamassas:

- P – resistência à compressão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005)

- M – densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m^3) – NBR 13280 (ABNT, 2005)
- R – resistência à tração na flexão (MPa) – NBR 13279 (ABNT, 2005)
- C – coeficiente de capilaridade ($\text{g/dm}^2/\text{min}^{1/2}$) – NBR 15259 (ABNT, 2005)
- D – densidade de massa no estado fresco (kg/m^3) – NBR 13278 (ABNT, 2005)
- U – retenção de água (%) – NBR 13277 (ABNT, 2005)
- A – resistência potencial de aderência à tração (MPa) – NBR 15258 (ABNT, 2005)

As propriedades foram subdivididas em 6 classes, exceto a resistência potencial de aderência à tração, que foi subdividida em 3 classes. As argamassas são classificadas conforme as características e propriedades apresentadas na Tabela 2. Caso haja sobreposição entre faixas, deve ser considerado o desvio de cada ensaio e, caso o valor fique no meio de duas faixas, adota-se a maior como classificação.

A norma NBR 13279 (ABNT, 2005) passou a adotar o corpo-de-prova prismático 40x40x160 mm e incluiu o ensaio de resistência à tração na flexão. A NBR 13277 (ABNT, 2005), que anteriormente utilizava o papel filtro para a realização do ensaio de retenção de água passou a utilizar o Funil de Buchner modificado. O ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade utiliza a NBR 15259 (ABNT, 2005) cujos procedimentos de ensaios são semelhantes ao descrito pela norma CSTB 2669-4 (1993).

Tabela 2 – Classificação das argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005)

Classes	P	M	R	C	D	U	A
	MPa	kg/m^3	MPa	$\text{g/dm}^2/\text{min}^{1/2}$	kg/m^3	%	MPa
1	$\leq 2,0$	≤ 1200	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	≤ 1400	≤ 78	$\leq 0,20$
2	1,5 a 3,0	1000 a 1400	1,0 a 2,0	1,0 a 2,5	1200 a 1600	72 a 85	$\geq 0,20$
3	2,5 a 4,5	1200 a 1600	1,5 a 2,7	2,0 a 4,0	1400 a 1800	80 a 90	$\geq 0,30$
4	4,0 a 6,5	1400 a 1800	2,0 a 3,5	3,0 a 7,0	1600 a 2000	86 a 94	-
5	5,5 a 9,0	1600 a 2000	2,7 a 4,5	5,0 a 12,0	1800 a 2200	91 a 97	-
6	$> 8,0$	> 1800	$> 3,5$	$> 10,0$	> 2000	95 a 100	-

Uma argamassa, por exemplo, poderá ter a seguinte designação: P3, M4, R5, C3, D4, U3, A4.

Comparando com a classificação MERUC, a classificação da NBR 13281 (ABNT, 2005) não incluiu o ensaio de módulo de elasticidade, pois somente no ano de 2008 foi publicada a norma. Observa-se também que os requisitos da norma brasileira possuem as faixas para cada classe muito similares às faixas da classificação MERUC.

Apesar da norma NBR 13281 (ABNT, 2005) exigir que venha impressa nas embalagens das argamassas industrializadas a indicação do tipo de argamassa (revestimento interno, revestimento externo, assentamento de alvenaria de vedação, etc.) não deixa claro o requisito e a classe que deve ser exigida para cada utilização.

A norma NBR 13749 (ABNT, 1996) estabelece os limites de resistência de aderência à tração para emboço e camada única, conforme estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites de resistência de aderência à tração para emboço e camada única segundo NBR 13749 (ABNT, 1996)

Local		Acabamento	Resistência de aderência à tração (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto			$\geq 0,20$

2.1.7 Classificação dos revestimentos

Segundo a NBR 13530 (ABNT, 1995), os revestimentos são considerados como sistemas constituídos de uma ou mais camadas de argamassa, podendo cada uma delas ter uma função característica; são aplicadas sobre paredes ou tetos, objetivando uma aparência desejada. Em casos específicos, atendem às exigências de conforto térmico e de

proteção conta radiação e umidade. Esta norma classifica os revestimentos de argamassa de acordo com os seguintes critérios:

- a) quanto ao número de camadas de aplicação:
 - revestimento de camada única
 - revestimento de duas camadas
- b) quanto ao ambiente de exposição:
 - revestimento de paredes internas
 - revestimento de paredes externas
 - revestimento com contato com o solo
- c) quanto ao comportamento à umidade:
 - revestimento comum
 - revestimento de permeabilidade reduzida
 - revestimento hidrófugo
- d) quanto ao comportamento à radiação:
 - revestimento de proteção radiológica
- e) quanto ao comportamento ao calor:
 - revestimento termoisolante
- f) quanto ao acabamento de superfície:
 - camuçado
 - chapiscado
 - desempenado
 - sarrafeado
 - imitação travertino
 - lavado
 - raspado

As camadas de argamassas de revestimentos, segundo SABBATINI (1984), recebem as seguintes denominações:

Emboço

O emboço, também conhecido por massa grossa, é uma camada cuja principal função é a regularização da superfície de alvenaria, devendo apresentar espessura média entre 15 mm e 25 mm. É aplicado diretamente sobre a base previamente preparada (com ou sem chapisco) e se destina a receber as camadas posteriores do revestimento (reboco, cerâmica, ou outro revestimento final). Para tanto, deve apresentar porosidade e textura superficiais compatíveis com a capacidade de aderência do acabamento final previsto. Ambas são características determinadas pela granulometria dos materiais e pela técnica de execução.

Reboco

O reboco, ou massa fina, é a camada de acabamento dos revestimentos de argamassa que é aplicada sobre o emboço, e sua espessura é apenas o suficiente para constituir uma película contínua e íntegra sobre o emboço, com no máximo 5 mm de espessura.

É o reboco que confere a textura superficial final aos revestimentos de múltiplas camadas, sendo a pintura, em geral, aplicada diretamente sobre o mesmo. Portanto, não deve apresentar fissuras, principalmente em aplicações externas. Para isto, a argamassa deverá apresentar elevada capacidade de acomodar deformações.

Massa Única

A massa única é o revestimento com acabamento para pintura executado em uma única camada. Neste caso, a argamassa utilizada e a técnica de execução deverão resultar em um revestimento capaz de cumprir as funções tanto do emboço quanto do reboco, ou seja, regularização da base e acabamento.

Chapisco

O chapisco não é considerado como uma camada de revestimento. É um procedimento de preparação da base, de espessura irregular, sendo necessário ou não, conforme a natureza da base. O principal objetivo do chapisco é melhorar as condições de aderência da primeira camada do revestimento ao substrato, em situações críticas basicamente vinculadas a dois fatores:

- limitações na capacidade de aderência da base: quando a superfície é muito lisa ou com porosidade inadequada, por exemplo concreto ou substrato com capacidade de sucção incompatíveis com a aderência do revestimento;
- revestimento sujeito a ações de maior intensidade: os revestimentos externos em geral e revestimentos de teto.

2.1.8 Conclusões

A qualidade e a durabilidade do revestimento de argamassa estão diretamente associadas às propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido. Portanto, são fundamentais os conhecimentos intrínsecos das características dos materiais e proporcionamentos destes materiais

para a produção da argamassa e, também, o domínio conceitual das propriedades das argamassas.

Atualmente, os aditivos químicos vêm cada vez mais sendo utilizados na produção de argamassas para melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido, de modo que os revestimentos cumpram suas funções de forma adequada, contribuindo também para aumentar a sua durabilidade.

Não basta ter argamassa de qualidade para ser aplicada como revestimento. É necessário que exista um planejamento quanto ao projeto de revestimento, definindo geometria, juntas, reforços, acabamentos e procedimentos de execução, de modo a obter um desempenho satisfatório do revestimento ao longo da sua vida útil.

2.2 MOVIMENTAÇÃO E FIXAÇÃO DA ÁGUA NA ARGAMASSA

2.2.1 Introdução

A argamassa é um material poroso, o que favorece a condensação e a evaporação da água, bem como o transporte e fixação dentro de seus poros capilares. Estes poros podem estar secos, parcialmente preenchidos por água ou saturados.

A movimentação e a fixação da água no interior de uma argamassa dependerão da forma como a água está presente e do tipo de poro onde ela está contida e serão responsáveis pela deformação de toda a estrutura, influenciando no desempenho da argamassa no estado fresco e endurecido.

2.2.2 Poros capilares

A porosidade é uma das características de grande importância dos materiais à base de cimento, que influencia várias propriedades como permeabilidade, resistência e durabilidade (ANDRIAMANANTSILAVO, 2003).

Em um material poroso é possível distinguir três fases: sólida, líquida e gasosa. No caso de uma argamassa endurecida, a matriz representa a fase sólida e os poros preenchidos de ar ou de água

representam as fases gasosas ou líquidas, respectivamente. Estes poros podem estar conectados entre si ou não.

A impermeabilidade de um material sólido é uma propriedade caracterizada, dentre outros fatores, pelo volume de poros que não estão interconectados, enquanto que a permeabilidade é uma propriedade que caracteriza a tendência de um material sólido deixar-se penetrar por líquidos e gases através dos poros conectados (ISMAIL, 2006). A Figura 1 mostra a representação esquemática de um material sólido impermeável e permeável quanto à conectividade dos poros.

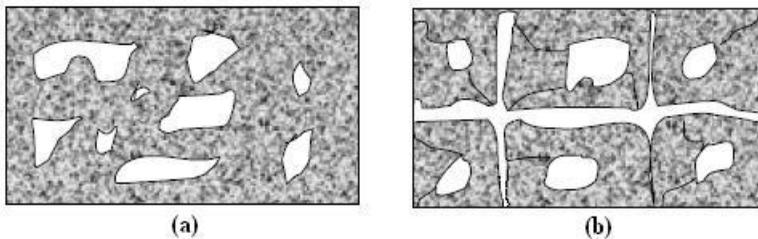


Figura 1 – Material sólido: (a) impermeável; (b) permeável (ISMAIL, 2006)

Quando ocorre a hidratação do cimento em compósitos com relação água/cimento superior a 0,38, uma parte do volume não é preenchida pelos hidratos que irão formar os poros capilares que possuem formas variadas e em geral estão interconectados (NEVILLE, 1982).

Noções de microestrutura são necessárias para permitir descrever o desenvolvimento da porosidade de uma argamassa. A descrição da geometria dos poros está associada essencialmente ao tamanho e à forma dos poros, bem como da sua organização espacial. Esses fatores exercem influências importantes na movimentação e fixação da água de uma argamassa e, conseqüentemente, na retração.

Dentre todos os parâmetros microestruturais, possivelmente o de maior importância é a distribuição de tamanho dos poros, sendo a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio a mais utilizada para caracterização da estrutura porosa de materiais a base de cimento (SATO, 1998; SILVA, 2001; IGARASHI et al., 2005). Entretanto, Diamond (2000) salienta que as características da estrutura dos poros caracterizadas por esta técnica não são representativas da estrutura real dos poros, por causa das suposições impróprias feitas da forma dos

poros e de suas conectividades. Uma das grandes críticas ao método se deve à suposição de que os poros têm formato cilíndrico (diâmetro constante ao longo do seu comprimento), e o que fica determinado é o diâmetro da entrada do poro, e não o diâmetro do poro propriamente dito, que pode ser diversas vezes maior (FERNANDES, 1994). Além disso, as elevadas pressões necessárias para a intrusão do mercúrio no interior dos poros podem causar danos na estrutura interna das amostras, distorcendo os resultados (SILVA, 2001). Porém, segundo Sarkar citado por Silva (2001), apesar da porosimetria por intrusão de mercúrio não representar de forma real a microestrutura de materiais como pastas, argamassas e concretos, os resultados podem ser indiretamente relacionados à mesma, servindo como um bom suplemento para caracterização detalhada da microestrutura com ênfase na porosidade.

A classificação dos poros de uma pasta de cimento quanto ao diâmetro, segundo *Union of Pure and Applied* (IUPAC, 1997), está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação dos poros da pasta de cimento (IUPAC, 1997)

Denominação	Tipo	Diâmetro
Microporos	Poros de gel	< 2,5 nm
Mesoporos	Poros capilares	2,5 nm a 50 nm
Macroporos	Poros capilares	50 nm a 10 μ m

A quantidade de poros encontrados nos produtos hidratados do cimento, conhecidos por poros de gel, aumenta com a hidratação do cimento cujas dimensões não ultrapassam alguns nanômetros, porém maiores que as dimensões das moléculas de água. Com o aumento do volume de poros de gel ocorre uma diminuição do volume de poros capilares e conseqüentemente ocorre uma redução da conectividade dos capilares (BRESSION, 2006).

2.2.3 Mecanismos da ação da água

A movimentação da água no interior de uma argamassa de revestimento depende das condições de cura, das condições ambientais (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento), da natureza dos

substratos porosos, entre outros, que condicionam o grau de hidratação numa certa idade e que é função da evolução da quantidade de água livre presente na argamassa.

A água está presente sob diferentes formas no interior de uma argamassa e apresenta uma grande diversidade de tipos de ligações com os componentes anidros do cimento (COPELAND e KANTRO citados por GALLIAS, 1982; FERON, 2002):

- Água combinada quimicamente com a formação dos produtos hidratados da microestrutura;
- Água adsorvida que é constituída de camadas de moléculas de água condensadas sobre a superfície dos agregados constituintes da argamassa ou concreto. O aumento da quantidade água adsorvida se deve às interações físicas e químicas entre as moléculas de água e os agregados por meio de ligações do tipo van der Waals e eletrostática;
- Água intersticial ou capilar retida dentro dos poros da argamassa por forças capilares. Neste caso a água é separada da fase gasosa por um menisco.

A água intersticial pode se apresentar também na forma livre dentro do espaço dos poros da microestrutura, sem nenhuma força de interação que sob a ação de uma pressão pode passar para o meio poroso (BAROGHEL-BOUNY, 1994; FERON, 2002).

A Figura 2 apresenta a representação esquemática da presença da água no interior da estrutura de uma pasta de cimento (BREUGEL, 1991).

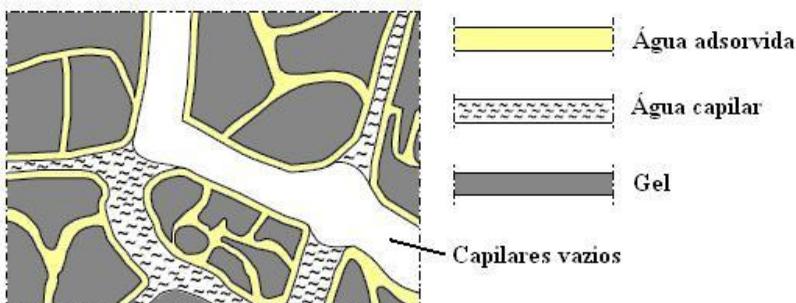


Figura 2 – Representação esquemática da presença da água na estrutura da pasta de cimento (BREUGEL, 1991)

A elevação da temperatura provoca um desequilíbrio termodinâmico das ligações que levam a sua ruptura e à evaporação da água. Toda a água capilar é completamente eliminada a uma temperatura de 105°C, enquanto que a água combinada quimicamente começa a evaporar após esta temperatura até 900°C (GALLIAS, 1982).

As águas capilares, presentes nos poros maiores que 50 nm, são águas livres da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, diferentemente da água adsorvida que está ligada à superfície sólida através de forças de atração molecular (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A Figura 3 ilustra as diferentes formas que a água pode estar presente na estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) de acordo com o modelo de Feldman e Sereda citados por Neville (1982).

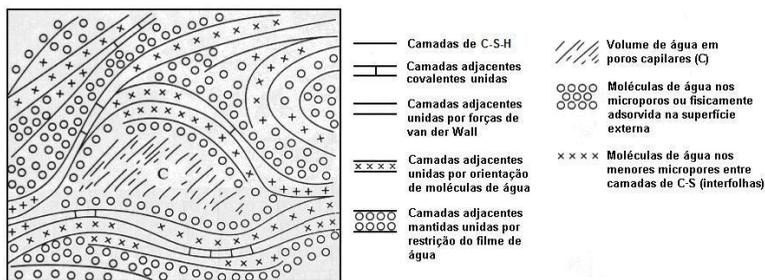


Figura 3 – Modelo esquemático da estrutura da pasta de cimento hidratado (FELDMAN e SEREDA citados por NEVILLE, 1982)

A água retida pelas forças superficiais das partículas de gel é denominada água adsorvida, e a parte que fica retida entre as superfícies de certos planos num cristal é denominada água intersticial ou interfolha. A água estrutural é a parte da água de cristalização não quimicamente associada aos principais componentes de malha cristalina (NEVILLE, 1982). A água interfolha está localizada nos nanoporos do gel de C-S-H de aproximadamente 2,5 nm e constitui em uma camada monomolecular fortemente ligadas às lamelas do C-S-H por ponte de hidrogênio (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Sob efeito de secagem (autodessecação³ ou através de equilíbrio com o meio ambiente), esta água livre coexiste no estado gasoso e no estado líquido e as depressões

³ É o fenômeno de esvaziamento dos poros capilares no decorrer da hidratação do cimento (AÏTCIN, 2003).

criadas pelos meniscos dentro dos capilares permitem assegurar o equilíbrio entre estes dois estados. Para manter o equilíbrio com o meio exterior, esta água movimenta-se através da rede de poros da microestrutura e evapora para o meio exterior, o que provoca uma grande retração (GALLIAS, 1982). As leis que registram a difusão dos gases e dos líquidos se aplicam então a este material.

A depressão capilar e variações de tensões superficiais que estão associadas ao movimento e perda de água durante a secagem são creditadas como sendo as principais causas da retração (HUA et al., 1995; BENTZ, 2008). A Equação de Laplace (Equação 1) e de Kelvin (Equação 2) deduzem a variação da depressão capilar.

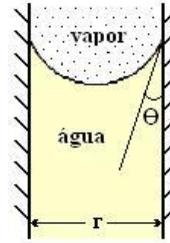


Figura 4 – Esquema de um capilar não saturado

$$\sigma_{\text{cap}} = p_v - p_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \quad \text{Equação 1}$$

$$\sigma_{\text{cap}} = p_v - p_c = -\frac{RT}{M_v} \ln H \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

σ_{cap} = tensão capilar (Pa)

γ = tensão superficial da água (N/m)

θ = ângulo do menisco

p_c = pressão na água (Pa)

p_v = pressão no vapor de água (Pa)

r = raio do poro onde está o menisco (m)

R = constante universal dos gases

M_v = massa molar da água

T = temperatura (°K)

H = umidade relativa

Assumindo ângulo do menisco de 0° e tensão superficial da água de 0,072 N/m, a Tabela 5 apresenta alguns valores de tensão capilar (σ_{cap}) em função do raio obtido através da Equação 1 (BENTZ e AİTCIN, 2008).

Tabela 5 – Tensão capilar obtida da Equação de Laplace (BENTZ e AİTCIN, 2008)

Raio do poro (μm)	Tensão capilar (Pa)
10	0,014
5	0,029
2	0,072
1	0,14
0,5	0,29
0,2	0,72
0,1	1,4
0,05	2,9

Em um sistema não saturado com um capilar de raio r , conforme mostra a Figura 4, todos os capilares com raio menor que r estarão cheios de água enquanto que todos os capilares com raio maior do que r estarão vazios. De acordo com as leis de Laplace e de Kelvin, com a presença de um menisco no poro capilar, ocorre uma depressão do líquido que deve ser equilibrado por uma compressão do sólido. Quando o cimento hidrata-se, consome água dos capilares, diminuindo assim os meniscos dos poros, conseqüentemente a pressão do líquido aumenta e o sólido é comprimido cada vez mais, ocorrendo a retração (HUA et al, 1995).

A situação se agrava quando inicia a secagem da argamassa com a evaporação da água. Quando a taxa de água perdida por evaporação for ligeiramente maior que a taxa de exsudação, surge o menisco entre as partículas dos agregados na superfície, e uma tensão capilar é criada na água de acordo com as leis de Laplace e de Kelvin. Esta tensão capilar comprimirá os meios porosos, principalmente próximos à superfície da argamassa (WITTMANN, 1976; BENTZ, 2008).

Além da pressão capilar do menisco, o poro está submetido também à pressão de desligamento (ou de separação), que é uma tensão normal localizada na camada adsorvida entre duas superfícies formada pelo estreitamento dos poros, induzindo a separação das camadas, conforme mostra a Figura 5 (VISSER citado por KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006).

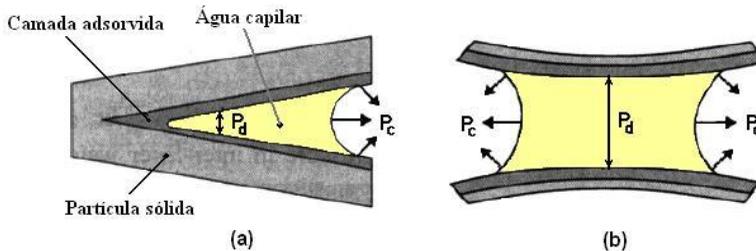


Figura 5 – Esquemática da pressão capilar (P_c) e da pressão de desligamento (P_d): (a) na região confinada e (b) na região entre camadas (VISSER citado por KOVLER e ZHUTOVSKY, 2006)

Analisando o efeito da espessura da camada da argamassa em relação à do substrato poroso, o tipo e o consumo de cimento, a granulometria do agregado e a utilização de aditivos, Détriché et al. (1985) concluíram que os parâmetros essenciais da dessecação são o diâmetro dos capilares da argamassa e a cinética da evolução destes. O valor do raio médio dos capilares da argamassa controla a velocidade de evaporação da água e, a absorção por capilaridade pelo substrato ocorre enquanto existirem capilares não saturados de raio inferior aos da argamassa; ainda, o tamanho dos capilares da argamassa é representado por uma função decrescente do tempo devido ao progresso da hidratação do cimento. Os autores salientam que todos os fatores susceptíveis de mudar a textura porosa inicial e sua velocidade de evolução influem diretamente no modo de dessecação e, conseqüentemente, no comportamento antes e durante a pega, enquanto ocorre o endurecimento do cimento. Por exemplo, uma camada de argamassa de baixa espessura ao contato com um substrato poroso limitará bastante a hidratação do cimento e sofrerá grandes solicitações mecânicas. Portanto, é recomendada a especificação de uma espessura mínima que dependerá das características porosas do substrato, da granulometria do agregado e da natureza do cimento. Por isso, Détriché et al. (1985)

consideram que argamassas para revestimento devem ser formuladas de acordo com a porosidade do substrato no qual será aplicada.

2.2.4 Conclusões

A distribuição e o tamanho dos poros de uma argamassa no estado endurecido são funções diretas da quantidade de água adicionada e das condições ambientais, principalmente temperatura e umidade relativa. Para a hidratação do cimento são necessários aproximadamente 38% de água em relação à massa de cimento. As argamassas de cimento, cal e areia exigem uma quantidade de água muito superior a 38% da massa de cimento devido, essencialmente, a grande área específica dos agregados e dos aglomerantes. Com isso, a água não utilizada na hidratação ficará adsorvida aos agregados e nos capilares, contribuindo para um aumento da porosidade.

A movimentação e a perda da água de uma argamassa dependem do tamanho e das conectividades dos poros e também das condições ambientais, entre outros fatores. Este fenômeno é provocado pelas diferenças de pressão entre o meio gasoso e o líquido, explicado pelas leis de Laplace e Kelvin.

O desempenho de uma argamassa de revestimento depende, fundamentalmente, da distribuição e tamanho dos poros capilares e, também, da movimentação e perda da água que estão diretamente ligadas a condições ambientais e tipo de substrato ao qual é aplicada, dentre outros fatores.

2.3 DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS E CONCRETOS

2.3.1 Introdução

Ocorrem constantemente alterações nos volumes dos materiais cimentícios logo após a adição da água em função do tempo, contraindo-se ou expandindo-se devido à movimentação da água e às reações de hidratação do cimento. Imediatamente após a aplicação de uma argamassa ou concreto, as forças gravitacionais e as condições ambientais locais começam a agir na estrutura.

A retração é um fenômeno que ocorre pela diminuição do volume da argamassa ou do concreto quando da perda de água para o substrato por sucção, por evaporação ou pela reação química dos componentes do

cimento e da cal. A magnitude da retração em materiais cimentícios é diretamente proporcional ao volume de pasta para diferentes relações água/cimento (NEVILLE, 1982; MASSAZA, 1993; BISSONNETTE et al, 1999).

As propriedades reológicas de uma argamassa são de fundamental importância na execução de um revestimento, refletindo nos resultados da retração plástica. A argamassa deve possuir uma viscosidade plástica adequada de modo a minimizar o trabalho de adensamento e espalhamento e, também, exige-se uma tensão de escoamento relativamente elevada de modo que, após o lançamento da argamassa no substrato, não ocorra o deslizamento.

2.3.2 Aspectos reológicos

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento de suspensões com ênfase nas relações entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo. A deformação de um material pode ser dividida em dois tipos: elasticidade ou deformação espontaneamente reversível e escoamento ou deformação irreversível (WAZER et al. citados por CASTRO, 2007).

Argamassa e concreto são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) em um líquido viscoso (pasta de cimento) sujeitas à retração plástica que induzem à incidência de fissuras, muitas vezes, relacionadas a um sistema de forças que fazem com que as mesmas escoem, relacionando à tensão de escoamento, deformação e viscosidade.

A tensão mínima necessária para que ocorra o escoamento de uma suspensão é denominada tensão de escoamento (OLIVEIRA et al., 2000). Se submetidas a tensões inferiores à tensão de escoamento, tais suspensões se comportam como sólidos elásticos rígidos. A aglomeração das partículas da suspensão originada pela atração entre as mesmas determina a formação de uma estrutura espacial rígida de partículas, cuja ruptura ocorre somente com a aplicação da tensão de escoamento, momento a partir do qual há o escoamento da suspensão (FERRARIS, 1999).

Isaac Newton talvez tenha sido o primeiro que correlacionou a taxa de deformação de um fluido com a tensão externa ao qual é submetido. Com o objetivo de investigar a relação entre a tensão e a taxa de deformação dos fluidos, Newton propôs um modelo composto por

duas placas paralelas de área A , separadas por uma distância infinitesimal y , conforme mostra a Figura 6.

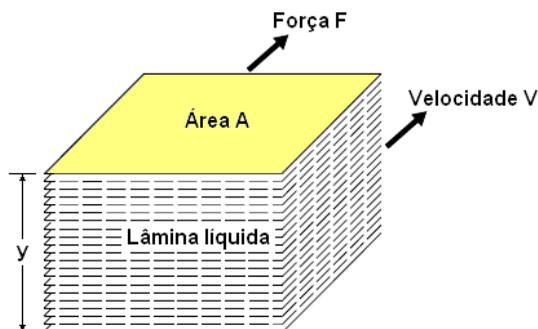


Figura 6 – Modelo de Newton para viscosidade de um fluido (TATTERSALL citado por FERRARIS, 1999)

Se uma força de cisalhamento F é aplicada na lâmina líquida, um gradiente de velocidade $\frac{dv}{dy}$ é induzido ao líquido. O fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente de velocidade é chamado de viscosidade plástica (η). Suspensões que obedecem à Equação 3 são chamadas de Newtonianas (BARTOS citado por FERRARIS, 1999).

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dv}{dy} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento (Pa)

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1})

η = viscosidade plástica (Pa.s)

A tensão e a deformação que caracterizam reologicamente um material podem apresentar-se de diferentes formas. Em função deste comportamento, as suspensões são caracterizadas em Newtonianas e não-Newtonianas. A reologia das suspensões não-Newtonianas (suspensões em que a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento não é linear, ou seja, a viscosidade plástica não é constante, como pasta de cimento, argamassa e concreto) é freqüentemente caracterizada utilizando-se ao menos dois parâmetros,

tensão de escoamento e viscosidade plástica, definidos pela Equação de Bingham (FERRARIS e LARRARD, 1998).

$$\tau = \tau_o + \eta\dot{\gamma} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: τ = tensão de cisalhamento (Pa)

τ_o = tensão de escoamento (Pa)

η = viscosidade plástica (Pa.s)

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (s^{-1})

A representação gráfica das suspensões que obedecem à Equação de Bingham, conhecidas por Binghamianas, é uma reta conforme mostra a Figura 7. A interseção da reta com o eixo da tensão de cisalhamento é denominada tensão de escoamento e a inclinação da reta corresponde à viscosidade plástica da suspensão (FERRARIS, 1999).

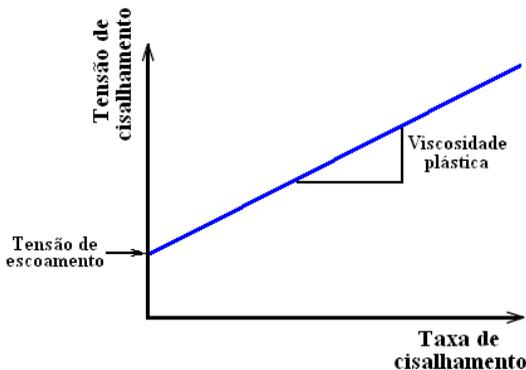


Figura 7 – Curva de escoamento para uma suspensão binghamiana (FERRARIS, 1999)

As argamassas de revestimentos são composições de partículas de uma fração inerte (areia) com dimensões que variam de 75 μm até 2,4 mm e de uma fração de finos (normalmente de cimento e cal) com dimensões inferiores a 75 μm . A correta seleção destas frações é responsável pelo grau de empacotamento cujos efeitos serão observados na viscosidade plástica da argamassa. Também, a utilização de adições

de diversas naturezas e de aditivos químicos são responsáveis por alterações significativas do comportamento reológico da argamassa.

Existem diversas técnicas e dispositivos para obter os parâmetros reológicos de suspensões como pastas de cimento, argamassas e concretos. Algumas destas técnicas fornecem apenas um parâmetro reológico, como por exemplo, a tensão de escoamento ou a viscosidade plástica e outras técnicas fornecem ambas. Apesar da complexidade do comportamento reológico, alguns ensaios e equipamentos relativamente simples são utilizados na caracterização das argamassas como a mesa de consistência (*flow table*), o método *dropping Ball*, os penetrômetros, o método *vane test*, os reômetros e *squeeze-flow*.

O ensaio na mesa de consistência, conhecida por *flow table* descrita na norma NBR 7215 (ABNT, 1997), é prescrito pela norma NBR 13276 (ABNT, 2005). No Brasil ainda é muito utilizada para determinar a quantidade de água necessária na mistura de argamassa para obter uma consistência padrão. O ensaio consiste em determinar o diâmetro do espalhamento sobre a mesa de uma argamassa imprimida em um tronco de cone metálico mediante a 30 quedas de uma altura padrão.

O método *dropping Ball* consiste na liberação de uma esfera em queda livre de uma altura padrão que penetra na superfície de uma amostra de argamassa localizada dentro de um cilindro com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura. Os procedimentos de ensaios deste método constam da norma BS 4551 (BSI, 2005). A Figura 8 ilustra o equipamento e uma amostra de argamassa com a esfera após a queda livre. O resultado do ensaio é determinado pelo índice de penetração, ou seja, pela profundidade que a esfera penetra na amostra depois da queda livre. Este método não se mostrou adequado para avaliar a plasticidade de argamassas com adição de fibras de polipropileno e com incorporação de ar.



Figura 8 – Ilustração do equipamento do *dropping ball*

O método da penetração do cone consiste determinar a medida da penetração de um cone lançado de uma altura padrão sobre a argamassa moldada no porta-amostra. A *American Society of Testing and Materials* regulamenta a realização deste ensaio através da norma ASTM C780 (2009).

Como o conjunto cone/haste pesa 200 gramas, a taxa de cisalhamento imposta à argamassa depende da dissipação da energia cinética, restringida pela viscosidade do material e pelo progressivo aumento da área de contato (atrito) com a argamassa (HOPPE FILHO et al., 2006). Segundo os autores, quando a tensão gerada pelo cone igualar-se com a tensão de escoamento da argamassa o sistema entrará em repouso, indicando um parâmetro relacionado com a tensão de escoamento (penetração), porém sem correlação direta.

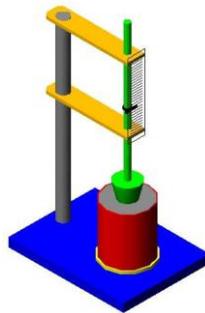


Figura 9 – Ensaio de reologia através da penetração do cone (HOPPE FILHO et al., 2006)

O método *vane test* originalmente desenvolvido para análise de solos, com procedimentos de ensaios normalizados pela *American Society of Testing and Materials* através da norma ASTM D4648 (2005), é utilizado para determinar viscosidade plástica e resistência de cisalhamento em argamassas. A norma descreve que o ensaio consiste basicamente em introduzir a palheta na amostra da argamassa e aplicar à palheta uma velocidade angular de 60° a 90° por minutos até o cisalhamento da amostra, quando se tem o torque máximo. A Figura 10 ilustra a realização do ensaio. Segundo Bauer et al. (2005) a situação de torque máximo ou ruptura fornece o valor da tensão limite de escoamento que está associada diretamente à consistência da argamassa.



Figura 10 – Equipamento utilizado no ensaio *vane test* (ALVES, 2002)

A técnica de *squeeze-flow* foi utilizada na análise reológica de pasta de cimento pela primeira vez, possivelmente, por Min et al. (1994). Esta técnica por muitas décadas vem sendo utilizada na caracterização de alimentos, cosméticos, materiais cerâmicos, compósitos poliméricos, entre outros materiais. Na realização do ensaio, o escoamento do material é induzido pela aplicação de uma carga de compressão na amostra no estado fresco, provocando um deslocamento devido aos esforços de cisalhamento radial, conforme mostra a Figura 11.



Figura 11 – Ilustração do ensaio de *squeeze-flow*

A Figura 12 apresenta o gráfico de um ensaio de *squeeze-flow* com um perfil típico onde se destacam três regiões. Na região I, o

material apresenta pequenas deformações elásticas quase lineares; na região II, a suspensão se encontra no estágio plástico, onde ocorrem deformações relativamente grandes, com pequena variação de carga e, na região III, a amostra apresenta deslocamentos razoáveis com um aumento expressivo da carga.

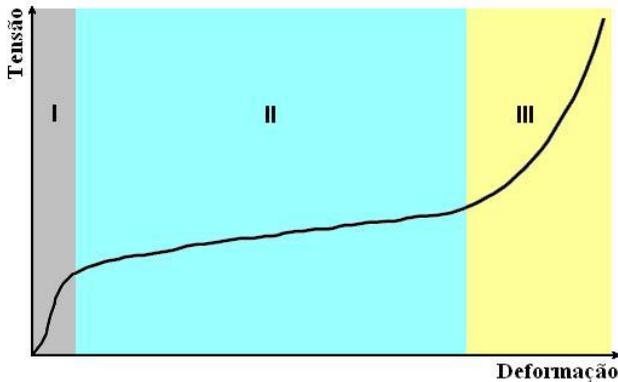


Figura 12 – Resultado típico de um ensaio de *squeeze-flow*

No ensaio de *squeeze-flow* pode-se obter parâmetros reológicos fundamentais como viscosidade plástica, dada pela Equação 5 (COVEY e SATANMORE citados por MEETEN, 2000) e tensão de escoamento, dada pela Equação 6 (LEE et al. citados por MEETEN, 2000).

$$\eta = \frac{64Ft}{3\pi(h^{-2} - h_o^{-2})D^4} \quad \text{Equação 5}$$

$$\tau_o = \frac{12hF}{\pi D^3} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: η = viscosidade plástica (Pa.s)
 τ_o = tensão de escoamento (Pa)
 F = carga de compressão (N)
 t = tempo (s)
 h = altura instantânea da amostra (m)

h_o = altura inicial da amostra (m)

D = diâmetro da amostra (m)

As propriedades de uma argamassa no estado fresco e endurecido estão associadas à qualidade e ao proporcionamento dos materiais constituintes, bem como às adições utilizadas, tais como fibras, aditivos, etc. As propriedades reológicas de uma argamassa, essencialmente a viscosidade plástica e a tensão de escoamento, devem ser adequadas para a finalidade de utilização desta argamassa, de modo a facilitar o seu manuseio e, também, minimizar os efeitos prejudiciais devido à retração.

2.3.3 Retrações em materiais cimentícios

A retração no concreto pode ser separada em dois estágios após a mistura: antes de 24 horas e depois de 24 horas. Para cada um destes estágios podem ocorrer diversos tipos de retrações conforme mostra a Figura 13 (HOLT e LEIVO, 2004). Esta transição de estado plástico para o estado rígido com aproximadamente 24 horas não é um consenso entre os pesquisadores.

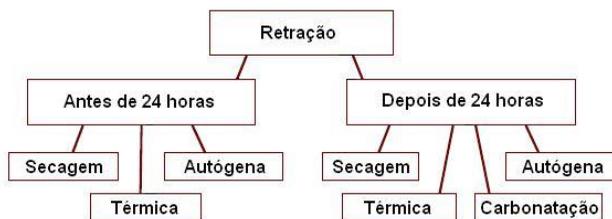


Figura 13 – Diagrama dos estágios e tipos de retrações (HOLT, 2001)

Os mecanismos que agem sobre a retração total se distinguem entre estado plástico e endurecido conforme mostra o diagrama da Figura 14 (ESPING, 2007). Segundo Holt (2001), a soma das mudanças de volume devido à carbonatação, dilatação térmica e retrações autógenas e por secagem caracterizam a retração total.

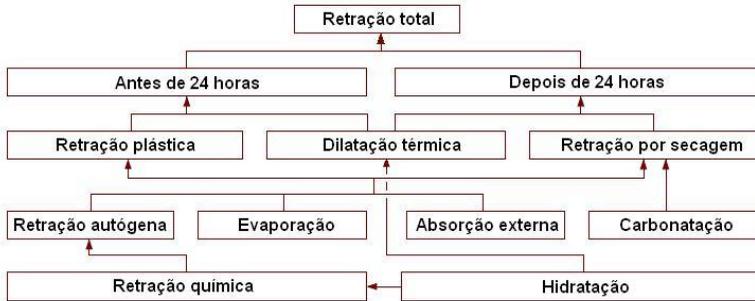


Figura 14 – Ilustração do mecanismo de retração total (ESPING, 2007)

Fatores ambientais podem causar expansões nos materiais cimentícios provocadas por reabsorção da água de exsudação, ataques de sulfatos, utilização de cimentos expansivos, etc. A expansão também pode ocorrer devido à absorção de água pelo gel de cimento. As moléculas de água atuam contra as forças de coesão e tendem a afastar as partículas de gel, uma das outras, resultando numa pressão de expansão (NEVILLE, 1982). Ainda segundo o autor, o acréscimo de massa é bem maior do que o de volume, pois a água entra para ocupar o espaço que surge em decorrência da redução de volume devido à hidratação do sistema cimento e água. Porém, freqüentemente o mecanismo de retração é predominante nas argamassas e concretos.

A mudança de volume no estado fresco e no estado endurecido, essencialmente em concreto, é a soma dos seguintes fenômenos (HAMMER, 2007):

- Retração autóloga que resulta na retração química;
- Saída do ar do interior do concreto;
- Exsudação da água da superfície;
- Perda de água por evaporação;
- Deformação do concreto causada pela reabsorção da água exsudada;
- Dilatação térmica devido ao calor de hidratação do cimento.

Os diferentes tipos de retração que ocorrem em compósitos cimentícios são: plástica, química, autóloga, por carbonatação, térmica e por secagem. As retrações plástica e química são consideradas retrações que ocorrem no estado fresco, enquanto que as demais são retrações que ocorrem em idades mais avançadas.

Lynam citado por Jensen e Hansen (2001) talvez tenha sido o primeiro a considerar, em 1934, que a **retração autóloga** não é devida

às causas térmicas ou à perda de água por evaporação. Retração autógena é a deformação de um material cimentício em condições isotérmicas não sujeita às forças externas, ocasionada principalmente pela hidratação do cimento e sem mudança de temperatura (TAZAWA et al., 1995; WEISS, 1999, JENSEN e HANSEN, 2001; BENTZ e JENSEN, 2004). Aitcin (2003) acrescenta que a retração autógena é consequência da contração química que ocorre na pasta de cimento quando a água hidrata as partículas de cimento. A retração autógena normalmente é acompanhada de um aumento na tensão superficial da água dentro dos capilares sem troca de umidade com o ambiente (LURA, 2003).

Hua et al. (1995) demonstraram que a pressão capilar criada pelo menisco da água pode qualitativamente explicar a retração autógena no estado endurecido. Este mecanismo explica o fato de que a retração autógena no concreto depende principalmente da retração provocada pelas reações químicas dos elementos constituintes do cimento e, também, da distribuição da rede porosa. A Figura 15 mostra a representação esquemática que ilustra a seguinte consequência no processo de hidratação na pasta de cimento (JENSEN e HANSEN, 2001):

- Redução da quantidade de água nos poros devido à hidratação do cimento;
- Expansão do material sólido;
- Refinamento da estrutura dos poros;
- Aumento do volume de poros vazios devido à retração química;
- Diminuição do raio de curvatura dos meniscos;
- Aumento da retração devido ao incremento da tensão superficial da água nos poros.

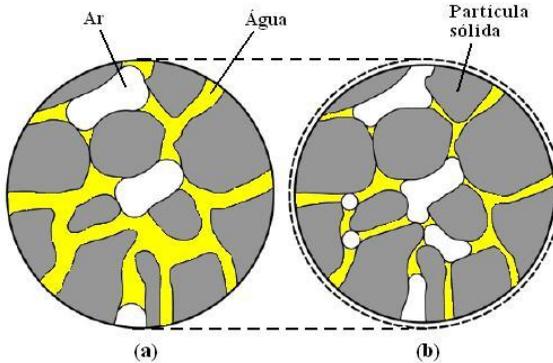


Figura 15 – Representação esquemática da retração química da pasta de cimento com: (a) baixo grau de hidratação; (b) alto grau de hidratação (JENSEN e HANSEN, 2001)

A carbonatação ocorre quando os produtos de hidratação do cimento reagem, na presença de umidade, com o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. A velocidade da carbonatação depende do teor de umidade do compósito e da umidade relativa do ambiente, sendo que a quantidade de carbonatação depende do tipo e consumo dos aglomerantes, principalmente do cimento. A espessura do revestimento de argamassa ou do concreto é um fator determinante na carbonatação, pois a umidade liberada pela reação do CO_2 com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deve sofrer difusão⁴ a fim de manter o equilíbrio higroscópico entre o interior do compósito e a atmosfera. Se a difusão for muito lenta, a pressão de vapor dentro do compósito se eleva até a saturação, e a difusão do CO_2 dentro da pasta é praticamente paralisada (NEVILLE, 1982). Dependendo do tipo do concreto, a carbonatação é limitada geralmente a 2 cm de profundidade na superfície (HOLT, 2001), enquanto que os revestimentos de argamassa, devido às pequenas espessuras e a sua elevada permeabilidade aos gases, estão muito sujeitos a carbonatação com o dióxido de carbono do ar (VEIGA, 1997). A **retração por carbonatação** de materiais cimentícios é causada, provavelmente, pela dissolução de cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se encontram sob tensão de compressão resultante da saída de água, e pela deposição do CaCO_3 em espaços não sujeitos à tensão (NEVILLE, 1982).

⁴ Processo espontâneo de transporte de massa num sistema físico-químico, por efeito de gradientes de concentração (FERREIRA, 1986).

A maior parte dos materiais e também das argamassas e concretos sofrem variações volumétricas sob o efeito de mudanças de temperatura. A **retração térmica** nos compósitos cimentícios ocorre devido à diminuição do calor provocada pela hidratação do cimento e, também, devido à variação da temperatura (MOHAMED e HANSEN, 1996). Frequentemente, quando a temperatura da argamassa ou do concreto está em ascensão nas primeiras horas ocorre uma expansão seguida de uma contração, quando do resfriamento (HOLT, 2001). Estas mudanças volumétricas são proporcionais à variação de temperatura e ao coeficiente de dilatação térmica (α^T). As variações de deformações (ϵ) em função do tempo sob o efeito da temperatura (T) são definidas pela Equação (BUFFO-LACARRIERE, 2007):

$$\epsilon = \alpha^T \cdot T \quad \text{Equação 7}$$

O valor do coeficiente de dilatação térmica altera-se rapidamente devido à mudança do concreto do estado plástico para o estado endurecido, influenciado principalmente pela umidade (BJØNTEGAARD, 1999). Contudo, resultados experimentais mostraram que este coeficiente de dilatação estabiliza-se por volta das 16 horas após a aplicação do concreto (LAPLANTE et al., 1994).

A **retração por secagem** que ocorre nos materiais cimentícios no estado endurecido é conseqüência do movimento da água. A reação do cimento com a água resulta na formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), com espaços vazios ocupados pela água. Durante a secagem do material cimentício, diferenças de pressões removem a água adsorvida dos poros e forças hidrostáticas (tensões capilares) formam meniscos que exercem tensões no esqueleto do C-S-H, causando a retração na pasta de cimento (WEISS, 1999).

O teor de água utilizado na mistura é a variável de maior influência na retração por secagem, pois influencia diretamente no tamanho e quantidade de poros. Quanto maior a relação água/cimento, maior a porosidade. O grau de hidratação do cimento é outra variável que influencia na retração por secagem. Argamassas e concretos produzidos com baixo teor de água apresentarão baixa quantidade de água nos poros e, conseqüentemente, haverá redução na retração por secagem.

Em 1942, Swayse citado por Uno (1998) definiu **retração plástica** como sendo uma contração volumétrica da pasta do cimento que é da ordem de 1% do volume absoluto do cimento seco.

A mudança de volume de compósitos cimentícios devido ao adensamento e retração plástica tem por causas (HAMMER, 2001):

- retração química;
- perda de água provocada pela exsudação e/ou evaporação quando expostas à secagem externa;
- contrações devido ao menisco da água entre as partículas na superfície.

Barcelo et al. (1999) acrescentam que, além das reações químicas, a retração autógena devido à hidratação do cimento também é responsável pela retração nas primeiras idades.

A Figura 16 apresenta os principais mecanismos da retração plástica em pasta de cimento (TURCRY, 2004). Logo após a aplicação de uma pasta de cimento, os grãos de cimento e o ar incorporado estão em suspensão na água. Sob o efeito da gravidade, as partículas sólidas sedimentam, enquanto que as bolhas de ar sobem para a atmosfera e, com isso, a massa de cimento compacta-se, conforme mostra a Figura 16(b). Durante este adensamento da massa sólida, a água é obrigada a fluir para a superfície, formando uma camada de água, chamada de água exsudada, esquematizada na Figura 16(c). A espessura da camada de água exsudada depende da velocidade de adensamento e também da taxa de evaporação da água. Se a taxa de evaporação da água for maior que a taxa de exsudação, não se formará a lâmina de água na superfície, criando-se, assim, um complexo sistema de meniscos entre as partículas sólidas (BENTZ, 2008). Wittmann (1976) salienta que se a taxa de evaporação exceder a taxa de exsudação, a superfície do concreto seca e forma meniscos próximo à superfície. Este fenômeno provoca tensões capilares nos poros produzindo forças de contrações entre as partículas. Kronlöff et al. (1995) salientam que tensões capilares mesmo baixas, influenciam significativamente na retração plástica.

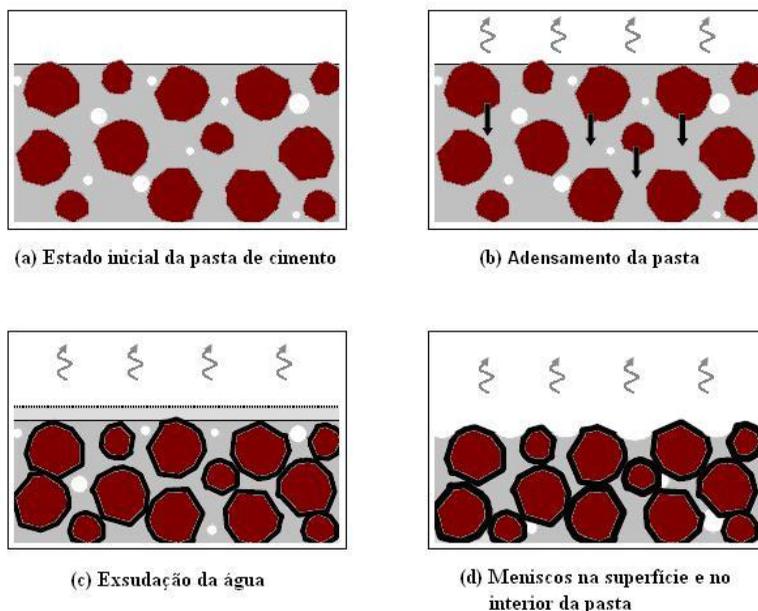


Figura 16 – Esquematisação dos mecanismos da retração plástica em pasta de cimento (TURCRY, 2004)

Apesar de ocorrer um período de dormência, as reações de hidratação do cimento iniciam a partir do contato da água com o cimento formando os hidratos que irão fixar-se na superfície das partículas do cimento, conforme pode ser observado nas representações esquemáticas das Figuras 16(c) e 16(d). Segundo Feron (2002), o volume destes hidratos é inferior ao volume do cimento anidro e água de acordo com a Equação 8.

$$V_{\text{hidratos}} = 0,9.(V_{\text{cimento anidro}} + V_{\text{água}}) \quad \text{Equação 8}$$

A diferença destes volumes provoca a redução do volume da pasta de cimento que é conhecido por retração química ou contração de Le Chatelier. Além da sedimentação das partículas e da retração química, ocorre a evaporação da água provocando ainda mais a redução do volume da pasta de cimento, conforme mostra a Figura 16(d).

A retração plástica está relacionada com a pressão capilar no interior da argamassa e do concreto no estado fresco. A pressão ocorre durante as primeiras horas e depende da umidade relativa, temperatura,

velocidade do vento e espaços entre as partículas sólidas (WITTMANN, 1976). Elevada temperatura, baixa umidade relativa do ar ou combinação de ambas aceleram a retração plástica do concreto (ALMUSALLAM, 2001). A evaporação da água aumenta quando a temperatura do concreto estiver muito acima da temperatura ambiente; nestas circunstâncias, pode ocorrer a retração plástica mesmo com a umidade relativa do ar alta (NEVILLE, 1982).

Radocea (1992, 1994, 1997), utilizando-se de um modelo experimental para medidas contínuas da evaporação da água e pressão capilar, deduziu a Equação da retração plástica. Utilizou dois recipientes cheios de água, A e B expostos à secagem conforme mostra a Figura 17. A placa porosa do sistema A é fixa e do sistema B é móvel, sendo sustentada por uma mola. Os poros da estrutura porosa das duas placas são idênticos.

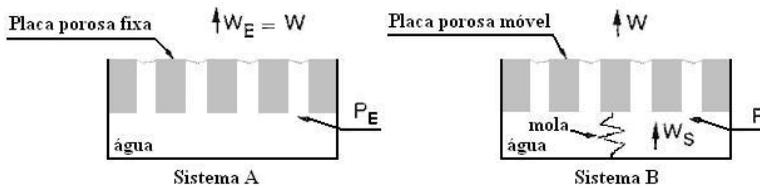


Figura 17 – Modelo de retração plástica (RADOCEA, 1992)

O modelo proposto por Radocea (1992) baseia-se no princípio de que, devido à transferência da água para a superfície no sistema B (W_S), a taxa de progressão da pressão capilar neste sistema será inferior à taxa de progressão da pressão capilar do sistema A. A deformação do sistema B, ou seja, o abatimento da placa porosa será equivalente a quantidade de água que foi transferida para a superfície, sendo função da quantidade de água evaporada (W) e das pressões capilares P e P_E . No modelo convencionou-se: W_E e P_E são a quantidade de água evaporada e a pressão capilar, respectivamente, no poro equivalente⁵ do sistema A. W_S é a quantidade de água transferida

⁵ Poro equivalente é uma simplificação geométrica do espaço cheio de água, e que, quando expostos à secagem, tem uma curva de perda de água em função da pressão capilar idêntica à curva da amostra do sistema B.

para a superfície, W é a quantidade de água evaporada e P é a medida da pressão capilar no sistema B.

A Figura 18 apresenta as curvas de perda de água em função da pressão capilar dos sistemas A e B da Figura 17.

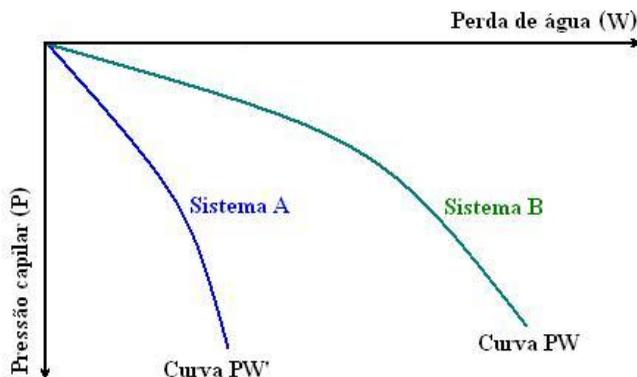


Figura 18 – Curvas fictícias do desenvolvimento das pressões capilares dos sistemas A e B da Figura 17

A Equação da retração plástica deduzida a partir das curvas de perda de água da Figura 18 é dada por:

$$W_s = \int_0^t \frac{dW}{dt} dt - \int_0^t \Gamma \frac{dP}{dt} dt \quad \text{Equação 9}$$

Onde: W_s = quantidade de água exsudada (kg/m^2)

W = quantidade de água evaporada da amostra (kg/m^2)

P = medida da pressão capilar da amostra (Pa)

$\Gamma = \frac{dW_E}{dP_E}$ representa a geometria dos poros na superfície da

amostra, sendo W_E a quantidade de água evaporada no poro equivalente e P_E a medida da pressão capilar no poro equivalente ($\text{kg/m}^2\text{Pa}$)

Se $W(t)$ e $P(t)$ são determinados experimentalmente, o problema da retração plástica é reduzido na determinação de $\Gamma = \frac{dW_E}{dP_E}$,

que é projetado para descrever a geometria dos poros na superfície de evaporação (RADOCEA, 1992).

O significado físico da Equação 9 é o seguinte (RADOCEA, 1992):

- 1) Quando a superfície da amostra é atingida pela exsudação da água, $\frac{dP}{dt} = 0$ e a quantidade de água exsudada é igual à quantidade de água evaporada ($W_s = W$);
- 2) O processo de retração plástica inicia quando a água nos meniscos se desenvolve entre as partículas na superfície da amostra, $\frac{dP}{dt} > 0$ e a quantidade de água exsudada é menor que a quantidade de água evaporada ($W_s < W$);
- 3) Quando a taxa de progressão da pressão capilar é igual à taxa de progressão da pressão capilar no poro equivalente, $dP = dP_E$ e a quantidade de água exsudada torna-se igual a zero ($W_s = 0$).

Diversos pesquisadores relacionam outros parâmetros que influenciam a retração plástica (WITTMANN, 1976; KRONLÖF et al., 1995; HAMMER, 1999; HOLT e LEIVO, 2004; TURCRY, 2004):

- Relação entre massa de água e massa de finos (A/F). O aumento da relação A/F provoca a diminuição das dimensões dos poros e conseqüentemente reduz também o raio médio dos meniscos nos capilares, induzindo ao aumento da retração (Lei de Laplace);
- Relação entre massa de água e massa de cimento (A/C). A retração autógena é influenciada pela relação A/C (JENSEN e HANSEN, 2001). O consumo de água dos poros na hidratação do cimento aumenta quando a relação A/C da mistura é baixa;
- Massa de cimento ou massa de finos. O aumento da massa de cimento ou da massa de finos provoca um aumento na retração plástica devido ao aumento nas tensões capilares da mistura;
- Natureza dos finos. A retração plástica aumenta devido ao aumento da área específica dos agregados. O emprego de um cimento mais fino ou de sílica ativa origina uma rede de poros mais “empacotada” e conseqüentemente aumentam as tensões capilares sob o efeito da secagem ou da hidratação do cimento;

- Aditivos. Os aditivos que atrasam o início de pega do cimento aumentam a retração plástica, porque retardam a formação do “esqueleto” sólido da pasta que se opõe às tensões capilares.

2.3.4 Conclusões

A qualidade de um revestimento é o reflexo de diversas propriedades que uma argamassa deve satisfazer no estado fresco, principalmente no que diz respeito ao comportamento reológico. Portanto, é importante decidir corretamente pela técnica a ser utilizada para obter os parâmetros reológicos desejados, de modo que os resultados obtidos correspondam ao desempenho que se deseja da argamassa. Dentre as diversas técnicas de caracterização do comportamento reológico de uma argamassa, as mais utilizadas são: mesa de consistência (*flow table*), *vane test*, *dropping ball* e, nos últimos anos, muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a técnica conhecida por *squeeze-flow*.

O revestimento de argamassa tem espessura relativamente pequena e com elevada relação entre área e volume o que favorece a rápida perda de água, seja por evaporação ou por sucção do substrato, provocando elevadas deformações já nas primeiras idades.

De modo geral, as três principais causas da retração total nos revestimentos de argamassas são: dessecação (evaporação da água livre), hidratação e carbonatação. Estas causas podem agir isoladamente ou interagir entre si durante toda a vida útil do revestimento. No entanto, a dessecação é a principal causa da retração total que ocorre ainda no estado fresco, provocando grandes deformações. Também ocorre no estado endurecido, porém com menores deformações, quando já encerrou a hidratação do cimento e as deformações são pequenas. As variações dimensionais devidas à hidratação ocorrem essencialmente no estado endurecido. A retração por carbonatação ocorre ao longo da vida útil do revestimento e ocorre devido à elevada relação área/volume do revestimento que favorece a combinação do dióxido de carbono da atmosfera com hidróxido de cálcio do cimento.

2.4 MÉTODOS DE MEDIDAS DE RETRAÇÃO

2.4.1 Medida linear e volumétrica

São inúmeros os métodos de ensaios utilizados para a medida de retração. Os estudos experimentais utilizam essencialmente dois métodos:

- Medida linear horizontal: mede o deslocamento horizontal de uma amostra de argamassa ou concreto colocado em molde prismático (TAZAWA e MIYAZAWA, 1995; KRONLÖF et al., 1995; HOLT e LEIVO, 1999; BJONTEGAARD, 1997, 1999, 2004; FOURDRIN et al., 2000; TURCRY, 2004; JASICZAK e SZYMANSKI, 2004; NICOT, 2008). Quando a amostra é exposta ao ar livre, em sala climatizada, a medida consiste da retração total, resultado da perda de água da amostra e da hidratação do cimento. Quando a evaporação é impedida e o substrato não é absorvente, a medida corresponde à retração autógena que é provocada pela hidratação do cimento e pelas deformações térmicas se a temperatura da amostra não é constante.
- Medida volumétrica: a retração química e a retração autógena podem ser medidas através de balança hidrostática colocando a massa da amostra dentro de um balão de membrana flexível (LOUKILI et al., 2000). Já em 1928, Neville e Jones, citados por Jensen e Hansen (2001), descreveram técnicas para medidas de deformações volumétricas para pasta de cimento.

Ambos os métodos têm vantagens e desvantagens. Uma vantagem do método volumétrico é a possibilidade de iniciar as medidas imediatamente após o preparo da amostra, e uma desvantagem é a falta de contato constante entre o balão e a amostra provocado pela exsudação, ou devido ao ar incorporado (JENSEN e HANSEN, 2001). Gagné et al. (1999) sugeriram uma técnica volumétrica em que a retração química e a retração autógena podem ser medidas simultaneamente com a mesma amostra. Uma das desvantagens do método linear é o atrito entre a amostra e o molde que pode reduzir a deformação da amostra, que é minimizado com a lubrificação do molde ou colocação de película de teflon.

Lura e Jensen (2007) constataram que as medidas da retração autógena utilizando o método volumétrico apresentaram resultados 3 a 5 vezes maiores que os resultados obtidos pelo método linear. Um motivo

fundamental para a inconsistência destes resultados é o fato do transporte da água para o interior da amostra através da membrana (LURA e JENSEN, 2005).

As diferentes técnicas de medição da retração volumétrica são as grandes causas de desacordos encontrados na literatura. Barcelos et al. (1999) demonstraram a dificuldade de interpretar os resultados baseados nas diferentes técnicas de medição utilizadas.

Jensen e Hansen (1995) sugeriram um molde como mostra a Figura 19 que utiliza um tubo flexível de poliuretano que combina as vantagens da medida volumétrica e linear. Antes da pega do cimento o ensaio transforma a deformação volumétrica em uma deformação linear e após a pega a deformação linear é bem definida.



Figura 19 – Molde desenvolvido por Jensen e Hansen (1995) para medida da retração

Alguns métodos de medida de retração plástica linear normalmente são acompanhados de medidas de pressão capilar e perda de massa da amostra. Outros métodos avaliam a influência da hidratação do cimento e os efeitos da secagem dos corpos-de-prova, realizando as medidas no estado endurecido da amostra.

2.4.2 Fixação dos suportes para medida de retração linear

Inúmeros dispositivos para medida de retração linear no estado fresco e endurecido são citados na literatura, sendo que a maioria tem a geometria prismática. Em comum, utilizam equipamento para medida de deslocamento horizontal e/ou vertical da amostra como transdutor indutivo (*IDT – Inductive Displacement Transducers*), *LVDT (Linear Variable Differential Transformer)*, sensor laser e relógio comparador.

Para a medida da retração linear no estado fresco, o suporte conectado ao equipamento de medida de deslocamento deve ser fixado no interior da amostra. A seguir serão apresentadas algumas técnicas.

- Pino ou palheta que são introduzidos no interior da amostra através de furos localizados nas extremidades do molde (DÉTRICHÉ, 1983; RAVINA, 1986; TAZAWA e MIYAZAWA, 1995; BJØNTEGAARD et al, 2004, HAMMER, 2007), conforme esta ilustra a Figura 20.

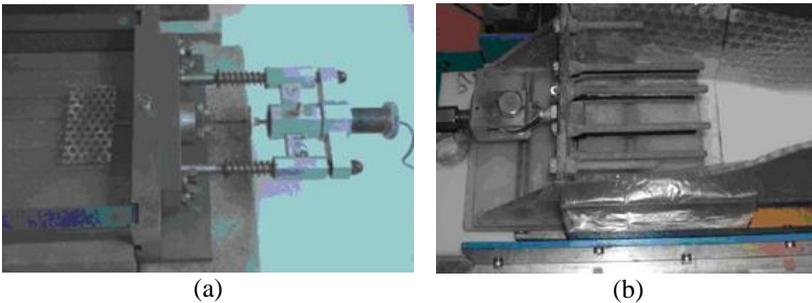


Figura 20 – Sistema de fixação: (a) em palhetas (BASTOS, 2001; NICOT, 2008) e (b) em pinos (HAMMER, 2007)

- Placas móveis colocadas nas extremidades do molde onde a amostra é fixada (MORIOKA et al., 1999; FOURDRIN et al., 2000; TURCRY, 2004), conforme mostra o dispositivo apresentado na Figura 21.

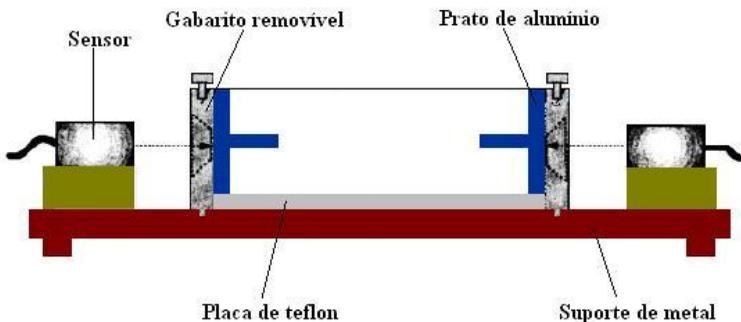


Figura 21 – Detalhe do prato de alumínio móvel onde a amostra é fixada através de um parafuso central (MORIOKA et al., 1999)

- Barras transversais horizontais colocadas nas laterais do molde (KOENDERS, 1997; TAKADA et al., 1999; LURA et al., 2003; ATRUSHI, 2003; PRINCIGALLO et al., 2003; ALY et al., 2008), conforme pode ser observado na Figura 22.

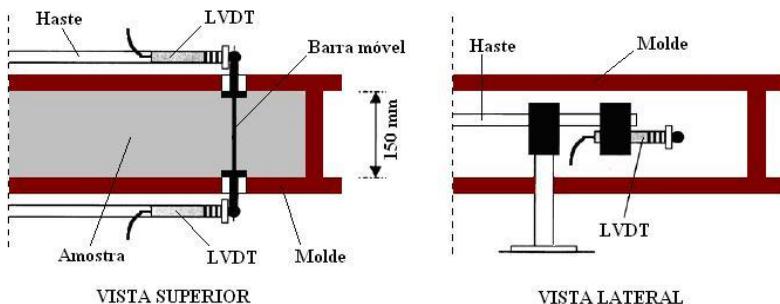


Figura 22 – Esquematização das barras transversais conectadas a LVDTs (TAKADA et al., 1999)

- Barras verticais (HOLT e LEIVO, 1999; ALMUSALLAM, 2001; AL-AMOUDI et al., 2004). Nas barras introduzidas verticalmente no interior da amostra são conectados os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*), conforme mostra a Figura 23. Segundo os autores, este método demonstrou boa repetitividade dos ensaios.

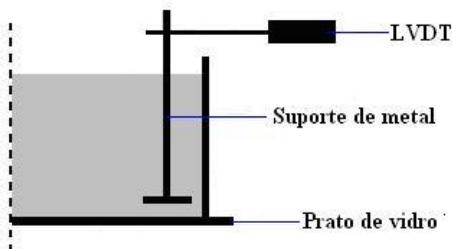


Figura 23 – Esquematização da barra introduzida na amostra verticalmente (HOLT e LEIVO, 1999)

2.4.3 Dispositivos de medidas de retração livre linear

Na literatura são inúmeros os dispositivos citados para medidas de retração livre linear nas últimas décadas. A seguir serão descritas algumas pesquisas pioneiras com utilização de moldes para medidas de retração livre linear em argamassas e concretos.

Brüll e Komlos (1980) utilizaram um molde com dimensões 40 x 40 x 160 mm para a medida de retração plástica de argamassas. Os resultados não mostraram deformação na fase inicial à exceção de uma expansão térmica.

Kasai et al. (1982) citados por Mitani (2003) utilizaram o dispositivo de secção quadrada de 100 mm de lado e comprimento de 400 mm apresentado na Figura 24. Este dispositivo permite medir a retração autógena na posição horizontal de modo que a amostra pode deformar-se livremente. Na parte inferior foi utilizada película de teflon para minimizar o atrito entre a amostra e o molde. A medida da retração iniciou-se 2 ou 3 horas após a moldagem com temperatura e umidade controladas.

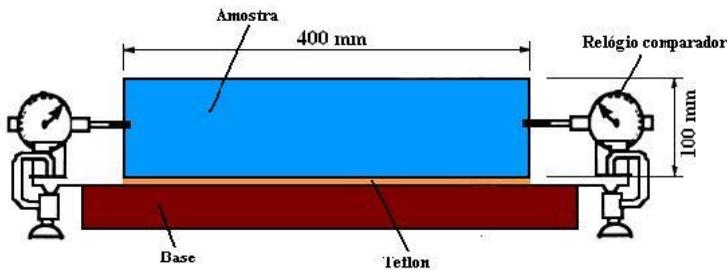


Figura 24 – Dispositivo utilizado por Kasai et al. (1982) para medida da retração linear (MITANI, 2003)

Ravina (1986) utilizou um molde de 70 x 70 x 280 mm para determinar a retração por secagem de argamassas com temperatura de 30°C, umidade de 50% e com ventos produzidos por ventiladores. As medidas foram realizadas pelo deslocamento dos parafusos fixados nas extremidades do molde a 7 mm da superfície da amostra. As medidas foram iniciadas uma hora após a moldagem. Os resultados mostraram uma expansão acentuada na primeira hora de medição, segundo o autor, devido à formação da etringita. Como a taxa de exsudação foi superior a

taxa de evaporação da água, ocorreu a reabsorção de água contribuindo para a expansão.

Um dispositivo semelhante ao utilizado por Kasai et al. (1982) foi desenvolvido por Tazawa e Miyazawa (1995). Três amostras com dimensões 100 x 100 x 400 mm foram moldadas para medir a retração autógena e retração por secagem. Nas primeiras 24 horas após a moldagem, as medidas de retração foram executadas no próprio molde apresentado na Figura 25. Foi colocada uma película de teflon de 1 mm de espessura a fim de minimizar o efeito do atrito entre a amostra e a parte inferior do molde. Após 24 horas da moldagem as amostras foram retiradas do molde e seladas com papel alumínio para evitar a evaporação da água e iniciou-se a medida da retração. Segundo Tazawa e Miyazawa (1995), a influência da perda de água pode ser ignorada, pois a variação de perda de massa não ultrapassou 0,02%.

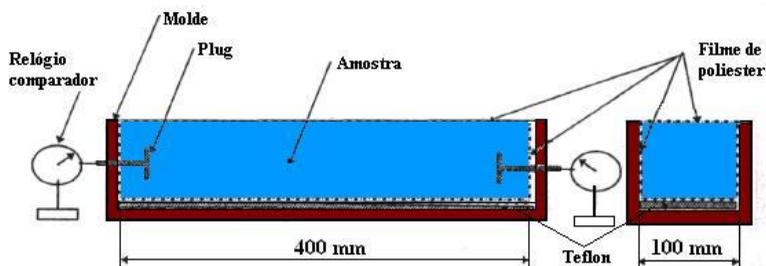


Figura 25 – Dispositivo utilizado por Tazawa e Miyazawa (1995) para medição de retração linear

O *Technical Research Centre of Finland* desenvolveu o dispositivo apresentado na Figura 26 que utiliza dois suportes de metal posicionados verticalmente dentro da amostra conectados a LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*). O molde de aço possui base quadrada de 270 mm de lado e altura de 100 mm. O problema com este tipo de técnica é que a deformação medida pode estar associada ao movimento vertical de adensamento do concreto no estado plástico. Como a amostra se submete à deformação vertical na primeira hora após a moldagem exercendo pressão nas paredes laterais do molde, torna-se impossível distinguir entre a medição de retração linear horizontal e a vertical (HOLT e LEIVO, 1999).

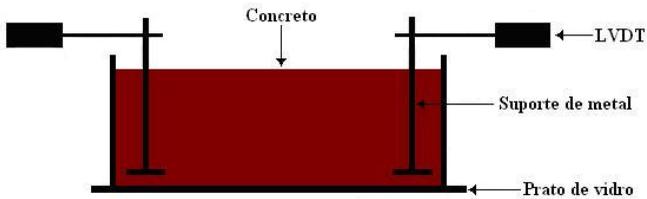


Figura 26 – Dispositivo desenvolvido no *Technical Research Centre of Finland* (HOLT e LEIVO, 1999)

Kronlöf et al. (1995) adaptaram o dispositivo desenvolvido no *Technical Research Centre of Finland* apresentado na Figura 26 para estudar o fenômeno de retração e fissuração em argamassas de cimento e areia no estado fresco com a utilização de aditivos e fibras de polipropileno. Foram realizadas medidas de retração plástica horizontal, retração vertical (adensamento), evaporação da água e pressão capilar de argamassas expostas ao vento produzido por ventilador com velocidade de 4 m/s, à temperatura de $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(40 \pm 5)\%$.

Veiga (1997) utilizou um dispositivo, inspirado nos trabalhos de Tamin (1986) e de outros pesquisados, construído no *Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC* em Portugal, para medida de retração livre linear de argamassas de revestimentos. O dispositivo é constituído de uma estrutura rígida, a qual está ligada uma cabeça inferior fixa à estrutura e outra cabeça superior que desliza longitudinalmente, conectada um transdutor de deslocamento. O dispositivo tem 400 mm de comprimento, a secção tem 50 mm de largura e 20 mm de espessura. Os ensaios das amostras que são moldadas sobre placas de acrílico bem lubrificadas são realizados em ambiente com $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ de temperatura e umidade relativa de $(50 \pm 5)\%$. A Figura 27 ilustra a realização do ensaio.

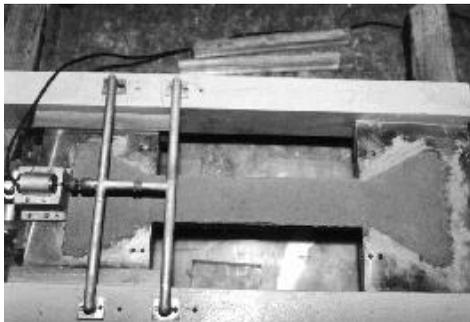


Figura 27 – Dispositivo utilizado por Veiga (1997) para medida de retração livre linear

As medidas de retração livre linear obtidas por diversos pesquisadores, dentre eles Tamin (1986) e Détriché (1977), dão origem a curvas semelhantes à apresentada na Figura 28, onde são identificadas várias fases no desenvolvimento da retração.

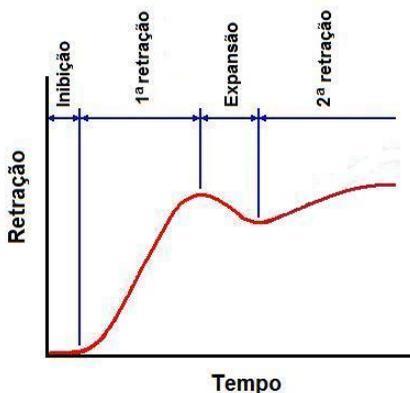


Figura 28 – Curva de retração livre linear (Adaptado de VEIGA, 1997)

Fase de inibição

A fase de inibição ocorre logo após a moldagem. O assentamento das partículas sólidas provoca o deslocamento da água do interior da argamassa para a superfície da amostra (exsudação). As deformações, quando ocorrem, são provenientes das reações químicas da hidratação do cimento (DÉTRICHÉ, 1977). Esta água de exsudação, que sai sem provocar a redução do volume da argamassa e sem gerar tensões na

pasta, é designada por *água livre* (TAMIN, 1986). A penetração desta água entre os grãos da partícula sólida pode, em alguns casos, provocar até mesmo expansão (VEIGA, 1997). A fase de inibição muitas vezes não ocorre nas argamassas de cimento, cal e areia, dependendo do proporcionamento destes materiais e do consumo de água, fato verificado nos resultados de Bastos (2001) e Veiga (1997). Enquanto que nos resultados de Kronlöf et al. (1995), na argamassa de referência de cimento e areia no traço 1 : 3 esta fase durou aproximadamente 3 horas, nas pastas de cimento de Détriché (1977) durou entre 1 e 6 horas e no concreto sem aditivo de Holt e Leivo (2004) foi de 2 horas, aproximadamente.

1ª Retração

A 1ª retração, também denominada por alguns pesquisadores de retração plástica, dura apenas algumas horas, inicia-se logo após a evaporação da água exsudada, podendo ocorrer antes ou durante a pega do cimento, dependendo da relação água/cimento e das condições do ambiente. Parte da água presente no interior dos poros e nos capilares da argamassa vai evaporar e a outra parte vai participar das reações de hidratação, induzindo pressões capilares, originando rápidas variações dimensionais acompanhadas de perda de massa com variações sensivelmente constantes. Durante esta fase, a velocidade de retração vai diminuindo à medida que prossegue a pega do cimento. Com o aumento do consumo de água da argamassa, retarda-se o início da 1ª retração e menor é a retração máxima (VEIGA, 1997).

Esta fase da retração é de fundamental importância nos revestimentos de argamassas, pois as tensões geradas devidas a estes fenômenos no interior da argamassa, que ainda está pouco coesa, são as principais causas de fissuração. Nesta fase, os revestimentos perdem água rapidamente por evaporação, devido à grande área exposta às intempéries como ventos fortes e insolação e, agravado pela perda de água por sucção do substrato.

Expansão

Esta fase é caracterizada por pequenas deformações e inicia-se logo após o fim de pega do cimento e dura várias horas. Ocorre a sobreposição de retração devido à dessecação com a expansão causada pelas reações químicas de hidratação. Em cimentos com concentrações maiores de C₃A e com pouca gipsita, esta fase pode não ocorrer. Em argamassas é pouco provável a ocorrência de expansão, pois o calor das

reações químicas de hidratação é dissipado no ambiente devido à pequena espessura do revestimento.

2ª Retração

Esta fase ocorre durante o endurecimento e caracteriza-se por deformação muito lenta, onde a quantidade de água que evapora é muito pequena e independe das condições do ambiente. A 2ª retração resulta essencialmente das reações de hidratação do cimento e, também, aos efeitos da carbonatação. Baron (1971) citado por Veiga (1997), relacionou a susceptibilidade à fissuração do revestimento de argamassa com a velocidade da 2ª retração. Segundo Baron, quanto maior a declividade da curva da 2ª retração, maior a probabilidade de fissuração devido aos gradientes de tensões geradas.

Holt (2001) incluiu no dispositivo apresentado na Figura 26 do *Technical Research Centre of Finland* um suporte de sustentação para as hastes verticais, utilizando pivôs para permitir o movimento horizontal, ficando suspensas 15 cm acima da superfície da amostra, conforme mostra a Figura 29. As hastes verticais penetraram 2 cm na amostra. Em cada suporte foi conectado um LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) posicionado 3 cm acima da superfície da amostra, calibrados com precisão nas medidas de 0,005 mm/m. Esta técnica também pode inferir nos LVDTs forças verticais produzidas pelo adensamento da amostra transferida às hastes verticais por meio do atrito.

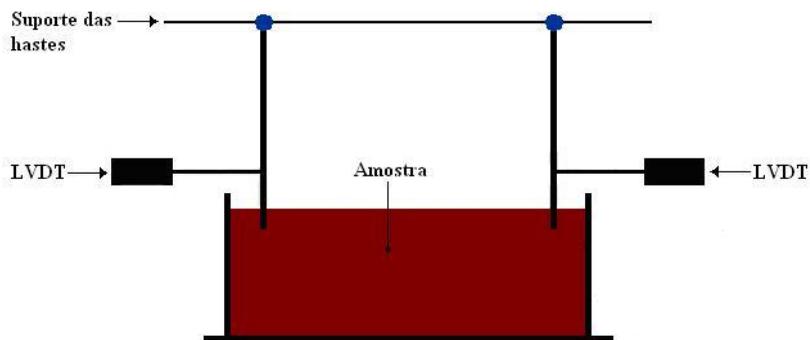


Figura 29 – Dispositivo utilizado por Holt (2001) de 270 x 270 x 100 mm

A medida da retração foi iniciada 30 minutos após a adição da água de mistura por um período de 24 horas, realizada em sala climatizada com temperatura de 20°C e umidade relativa de 40%. A pressão capilar e a deformação por adensamento também foram medidas. A Figura 30 ilustra a realização do ensaio.



Figura 30 – Ilustração do ensaio de medida de retração plástica de Holt (2001)

Fourdrin et al. (2001) desenvolveu um molde prismático de poliestireno expandido com 40 x 40 x 160 mm para medir retrações plásticas de argamassas. Duas placas metálicas de pequena espessura são colocadas nas faces internas das duas extremidades do molde que permitirão os registros das sondas laser quando da deformação longitudinal da amostra, conforme mostra a Figura 31. As sondas laser permitem medir deslocamentos com precisão de ± 1 mm e acurácia de aproximadamente 3 μm . Além das medidas de retrações realizadas por um período de 24 horas foram determinadas medidas da temperatura e pressão capilar.

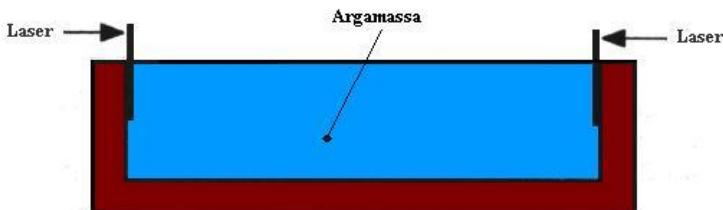


Figura 31 – Dispositivo para medida da retração plástica linear (FOURDRIN et al., 2001)

Almusallam (2001) utilizou o dispositivo cuja representação esquemática está apresentado na Figura 32 para avaliar a influência das condições ambientais na retração plástica do concreto. O autor justificou a utilização de um molde com dimensões quadradas de 915 mm de lado e espessura de 51 mm por representar a relação área/volume de uma laje de concreto. Para a medida da retração plástica utilizou-se 4 LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) posicionados em cada lado do molde conectados a um sistema de aquisição de dados. Os concretos foram expostos a condições de temperaturas de 30°C e 45°C, umidades relativas de 25%, 50% e 95%, ventos de 0 e 15 km/h. A quantidade de água evaporada foi determinada e as fissuras por retração plástica foram avaliadas quanto ao tempo e a área total expressa em porcentagem da área da amostra.

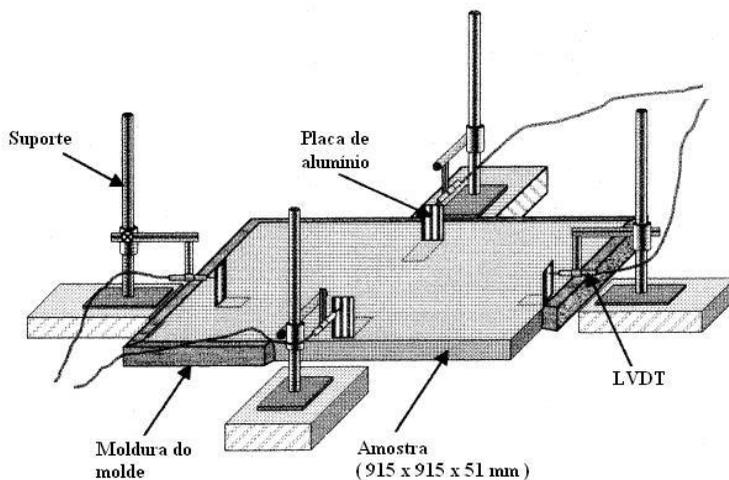


Figura 32 – Representação esquemática do dispositivo utilizado por Almusallam (2001)

Princigallo et al. (2003) mediram as deformações livres de pasta de cimento utilizando molde prismático de 150 mm de largura, 1000 mm de comprimento e 40 mm de altura desenvolvido por Lura et al. (2003) para medida de retração autóloga, conforme mostra a Figura 33. A superfície interna do molde foi revestida com película de teflon para minimizar o atrito com a amostra. A retração foi medida avaliando os movimentos das barras de aço, separadas de 750 mm, introduzidas na

amostra e acopladas a LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*), com leituras realizadas por um período de cinco dias. Os ensaios foram repetidos com erro inferior a 3%.

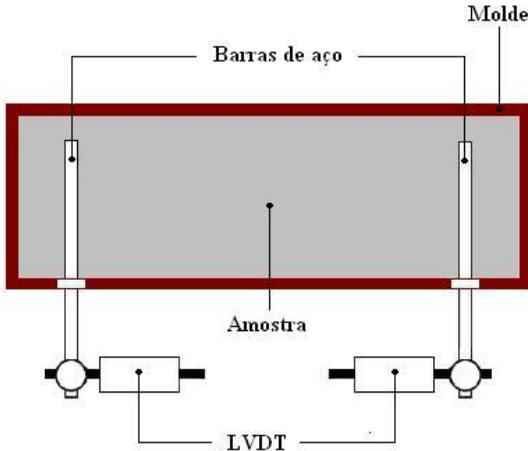


Figura 33 – Vista superior do dispositivo de Princigallo et al. (2003) desenvolvido por Lura et al. (2003)

O dispositivo utilizado por Turcry (2004) para medida de retração plástica de concreto possui os lados internos revestidos com película de teflon para minimizar o atrito entre o molde e a amostra de dimensões 70 x 70 x 280 mm. Primeiramente a amostra foi moldada em um envelope prismático de plástico cujas medidas são iguais às medidas internas do molde. Para medir a retração foram utilizados dois sensores laser, localizados nas extremidades do molde que medem o deslocamento das placas. Um terceiro sensor laser, localizado acima do molde, foi usado para medir o deslocamento de uma placa quadrada de 10 x 10 mm colocada na superfície da amostra. Durante a realização do ensaio, a perda de massa de uma amostra cilíndrica de 70 mm de altura e 100 mm de diâmetro foi calculada. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e umidade de $(50 \pm 5)\%$. A precisão das medidas de retração foi de aproximadamente 5%. Os dados foram armazenados em computador a cada 5 minutos durante o período de 24 horas. Um ventilador, colocado a 40 mm do dispositivo de medida de retração que produzia um vento de 5 m/s, foi utilizado para acelerar a taxa de evaporação da água. O molde, o envelope de plástico e os sensores laser estão representados na Figura 34.

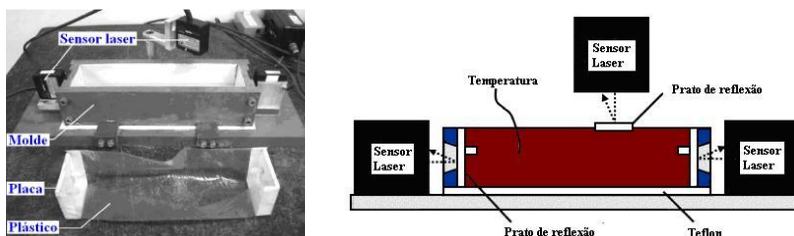


Figura 34 – Dispositivo para medida da retração plástica utilizado por Turcry (2004)

Turcry (2004) mediu também a pressão capilar da amostra de concreto utilizando um molde cilíndrico de 70 mm de altura e 100 mm de diâmetro onde foram colocadas duas cerâmicas porosas conectadas a sensores de pressão, conforme mostra a Figura 35.

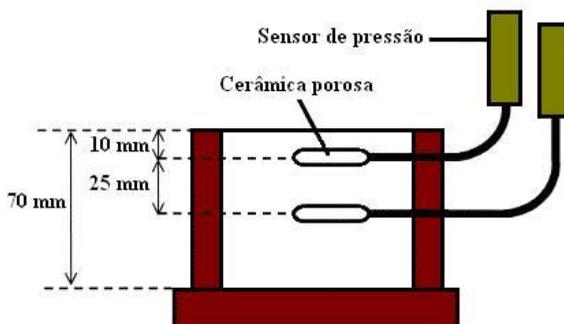


Figura 35 – Secção esquemática do dispositivo de medir pressão capilar (TURCRY, 2004)

Jasiczak e Szymanski (2004) mediram a retração plástica utilizando um molde de 100 mm de largura, 250 mm de comprimento e 20 mm de espessura para avaliar a influência de superplastificante no concreto. As medidas foram registradas por um sistema de aquisição de dados a cada 10 minutos nas primeiras 50 horas e a cada 15 minutos após 50 horas, até 92 horas. A Figura 36 apresenta os moldes e a moldagem da amostra de concreto. Sensores denominados potenciômetros foram utilizados para medidas das deformações.



Figura 36 – Moldes utilizados nas pesquisas de Jasiczak e Szymanski (2004)

Toledo Filho et al. (1999) utilizaram o dispositivo desenvolvido por Sanjuán e Moragues (1994) apresentado na Figura 37, para avaliar o desempenho de argamassas com adição de fibras de polipropileno e vegetais quanto à fissuração por retração plástica. O dispositivo de madeira possui as dimensões internas de 150 mm de largura, 1200 mm de comprimento e 15 mm de espessura. A fim de evitar a perda de água da amostra para o molde e reduzir o atrito, o interior foi revestido com uma película de polietileno. Foi utilizado um extensômetro de 0,01 mm de precisão posicionado sobre os pratos de aço para a medida de retração. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura de 40°C e vento com velocidade de 0,5 m/s. Os autores não mencionam a umidade relativa. As medidas de retração plástica iniciaram imediatamente após a moldagem e os dados foram registrados em intervalos de 5 minutos até 280 minutos.

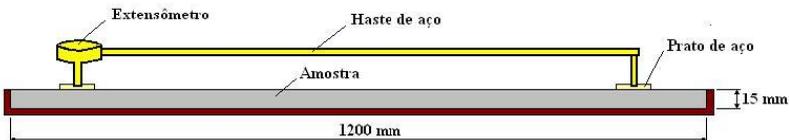


Figura 37 – Vista lateral do dispositivo desenvolvido por Sanjuán e Moragues (1994)

Al-Amoudi et al. (2004, 2006) avaliaram a influência do teor de sílica ativa (2004) e do superplastificante (2006) na retração plástica do concreto exposto a condições ambientais desfavoráveis. Os concretos foram moldados em painéis de base quadrada de 1000 mm de lado e espessura de 3 mm, semelhante ao dispositivo utilizado por Almusallam (2001), mantidos em sala climatizada com temperatura de $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$, umidade relativa de $(35 \pm 5)\%$ e vento com velocidade de (15 ± 2) km/h simulando um ambiente de clima quente. As ocorrências de fissuras por

retração plástica foram monitoradas visualmente registrando o tempo e a intensidade das fissuras pelo período de 24 horas. A Figura 38 apresenta a vista superior do painel. Os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) foram conectados em hastes fixadas perpendicularmente à superfície da amostra em cada um dos lados do painel. Os dados da retração linear foram registrados por um sistema de aquisição de dados em computador a cada 30 minutos pelo período de 24 horas.

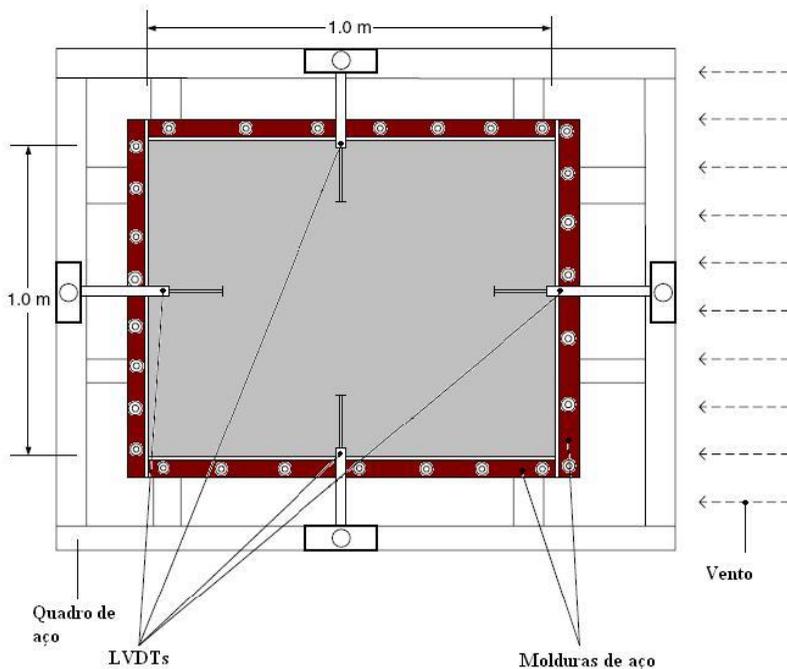


Figura 38 – Dispositivo utilizado por Al-Amoudi et al. (2004, 2006)

Cusson e Hoogeveen (2006) utilizaram três moldes de base quadrada com 75 mm de lado e 275 mm de altura proposto pela norma ASTM C157/C157M (2006), conforme mostra a Figura 39, para determinar a medida da expansão e contração térmica do concreto nas primeiras idades. Antes da moldagem passou-se vaselina e revestiram-se as paredes internas com uma película plástica para minimizar o atrito entre a amostra e o molde. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de 25°C a 30°C pelo período de 7 dias.

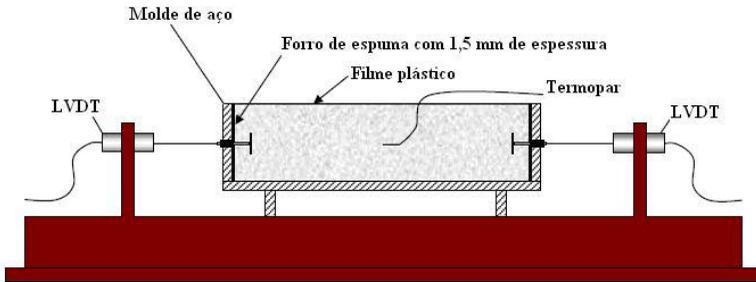


Figura 39 – Molde de Cusson e Hoogeveen (2006) proposto pela norma ASTM C157/C157M (2006)

Nicot (2008) mediu a retração linear horizontal de argamassas no estado fresco, utilizando molde apresentado na Figura 40 com 30 mm de espessura com dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) posicionados em cada extremidade. Bastos (2001) moldou argamassas de revestimento com espessuras variando de 15 mm a 25 mm utilizando moldes semelhantes para a medida de retração plástica. Este dispositivo de medida de retração foi originalmente desenvolvido por Détriché (1977).

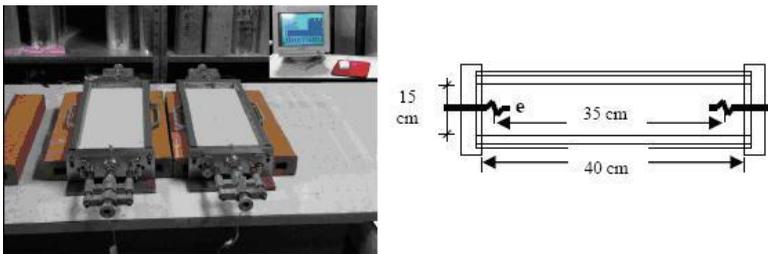


Figura 40 – Dispositivo utilizado por Nicot (2008) para medida da retração linear

Nas pesquisas de Bastos (2001), todas as argamassas sujeitas apenas à perda de água por evaporação, apresentaram curvas semelhantes à curva apresentada na Figura 41, onde é possível identificar três estágios principais de deformações. A 1ª retração ocorreu na primeira hora após a moldagem; a 2ª retração, após o fim de pega do cimento, com a argamassa no estado endurecido. Segundo o autor, foi observada, ainda, uma nítida divisão da 2ª retração em dois trechos de

velocidades de retração bem distintas: o primeiro, entre a 5^a e a 10^a hora de ensaio, aproximadamente, e o segundo, da 10^a hora até o término do ensaio.

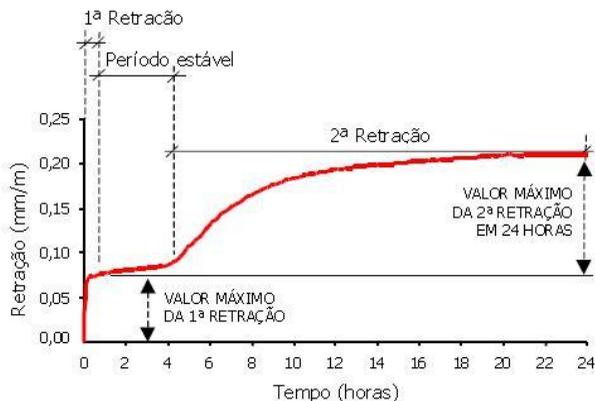


Figura 41 – Curva de retração da argamassa de cimento, cal e areia na proporção 1 : 1 : 6, em volume (BASTOS, 2001)

Diferentemente dos moldes prismáticos apresentados anteriormente, o dispositivo conhecido por dilatômetro digital desenvolvido por Jensen e Hansen (1995) foi adaptado para as pesquisas de Esping (2007). Consiste de um tubo flexível de poliuretano de 82 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento fixado em uma placa rígida e outra móvel acoplada a um relógio comparador digital de 1 μ m de precisão, conforme mostra a Figura 42. É muito utilizado para medida de retração linear autógena em que não há perda de água. Nas pesquisas de Esping (2007) para avaliar a influência dos finos de calcário em concreto autocompactante no estado fresco foram utilizados três dispositivos. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, com os registros da retração iniciados após 30 minutos da adição da água no concreto, com medidas a cada 5 minutos por um período de 24 horas. Foram utilizados sensores colocados no interior da amostra para monitorar a temperatura e a pressão da água nos poros. Devido à rigidez maior do tubo no sentido radial do que no longitudinal, o tubo flexível transforma a maioria da deformação volumétrica em deformação linear quando a amostra está no estado plástico, baseado em avaliações experimentais.

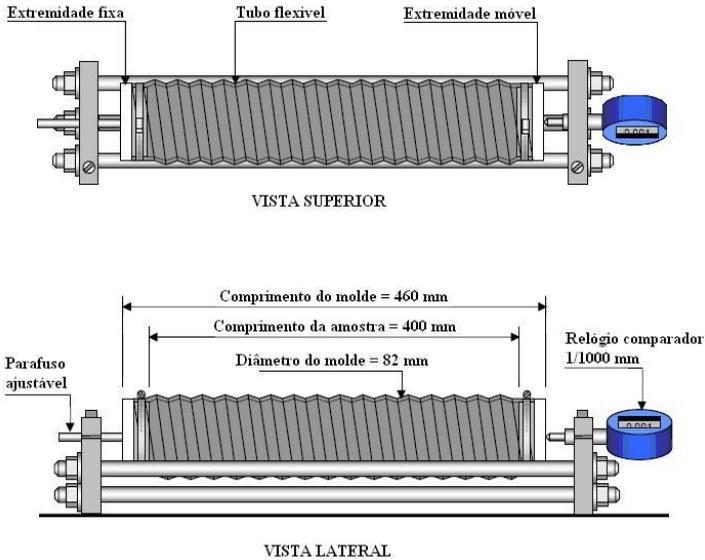


Figura 42 – Dispositivo utilizado por Esping (2007) desenvolvido por Jensen e Hansen (1995)

Esping (2007) sugere desenvolver uma metodologia para medir a retração plástica utilizando o dilatômetro digital com exposição da amostra ao ambiente para perda de água por evaporação, com medidas feitas simultaneamente com o sistema selado, conforme ilustra a Figura 43.

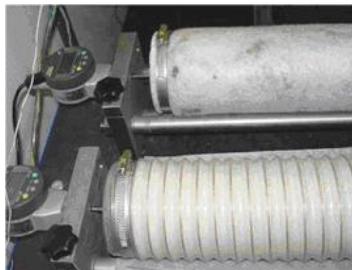


Figura 43 – No dispositivo superior é realizado o ensaio de retração plástica e no inferior de retração autógena (ESPING, 2007)

Wongtanakitcharoen e Naaman (2007) avaliaram a influência de fibras de polipropileno, carbono e PVA na retração livre e na

evaporação da água do concreto nas primeiras 24 horas. Para a medida da retração, utilizaram moldes prismáticos de alumínio com 1000 mm de comprimento e 100 x 60 mm de seção transversal, com uma extremidade fixa e outra móvel, onde foi conectado LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) com acurácia de $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Simultaneamente, moldes de 327 x 230 x 50 mm foram utilizados para determinar a perda de massa por evaporação da água. Antes das moldagens, os dispositivos foram revestidos internamente por película de teflon, para minimizar o atrito entre as paredes do molde e a amostra. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura variando de 35°C a 40°C, umidade relativa de $(22,5 \pm 2,5)\%$ e um ventilador foi utilizado para fornecer um fluxo de ar sobre a superfície das amostras, de modo a acelerar a evaporação da água. As medidas iniciaram imediatamente após a moldagem, utilizando dois prismas simultaneamente com os dados registrados em um sistema de aquisição de dados. A Figura 44 ilustra a realização do ensaio.

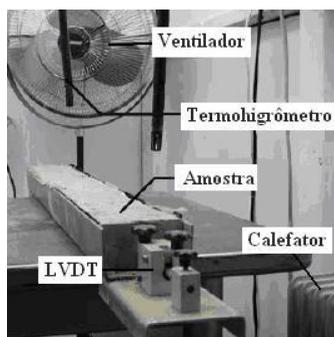


Figura 44 – Dispositivo utilizado por Wongtanakitcharoen e Naaman (2007)

Andrade (2008) utilizou um dispositivo semelhante com dimensões 70 x 70 x 500 mm para medida da retração plástica em concretos incorporados com materiais granulares reciclados. Após o início de pega do cimento, as placas laterais do molde foram retiradas para a medida da deformação horizontal, utilizando LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) posicionado em uma das extremidades do molde.

No Brasil, as medidas da retração por secagem e da retração autógena de argamassas no estado endurecido são realizadas em corpos-de-prova prismáticos de 25 x 25 x 285 mm normalizado pela NBR

15261 (ABNT, 2005) – *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)*. A medida da variação dimensional dos corpos-de-prova é realizada utilizando o aparelho comparador, conforme ilustra a Figura 45.



Figura 45 – Relógio comparador utilizado no ensaio de retração por secagem

2.4.4 Dispositivos de medidas de retração restringida linear

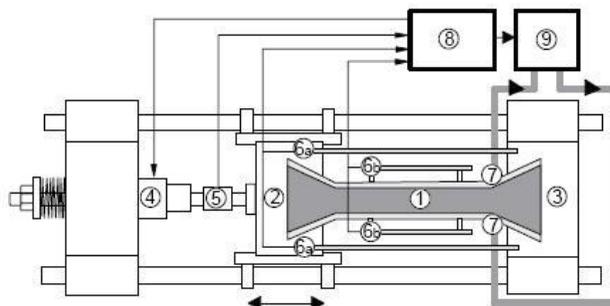
A fluência pode ser definida como sendo o aumento da deformação sob ação de uma tensão constante (NEVILLE, 1982). Diferentemente da retração por secagem que ocorre por perda de água, a fluência é devido às tensões aplicadas ao compósito cimentício. A maioria das pesquisas realizadas sobre fluência aborda apenas métodos de determinação para o estado de compressão (MELO NETO, 2008) que é prescrita pela norma brasileira NBR 8224 (ABNT, 1983) – *Concreto Endurecido – Determinação da Fluência*. Porém, em materiais sujeitos à retração restringida, a fluência é consequência de tensões de tração.

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo dispositivos para estimar os valores de resistências, devido às tensões desenvolvidas na retração restringida como Orr e Haig (1971), Kasai et al. (1972), Weigler e Karl (1974), Byfors (1980), Hannant et al. (1999) entre outros citados por Hammer (2007).

A seguir serão apresentadas algumas pesquisas e dispositivos desenvolvidos para medidas de retração restringida linear.

Na Alemanha, Springenschmid et al. (1985) desenvolveram o *Temperature-Stress Testing Machine (TSTM)* para conduzir ensaios, de

modo a compreender os níveis de tensões que são geradas no concreto nas primeiras idades, conforme mostra a Figura 46. O dispositivo possui um motor que é utilizado para restringir a retração da amostra desde as primeiras idades e as tensões, criadas para conter esta deformação são medidas através de uma célula de carga. Uma amostra é utilizada para medida da retração livre, que serve como base para o cálculo da deformação. Assim, este método além de obter a tensão de fluência desenvolvida na retração restringida obtém, também, a capacidade de relaxação da amostra. As medidas de deformação são realizadas após a moldagem, diretamente no dispositivo, através de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*) acoplados nas barras de fibras de carbono com 500 mm de comprimento dispostos lateralmente à amostra. Sempre que a deformação da amostra atingir 1 μm , o motor é acionado para retornar à posição inicial sendo a força registrada pela célula de carga. Com este dispositivo é possível determinar as deformações devido à autodessecação, a resistência à tração que leva a ruptura e obter a evolução do módulo de elasticidade do concreto (TOMA, 1999).



- ① Amostra: 150x150x1500 mm
- ② Extremidade ajustável
- ③ Extremidade fixa
- ④ Motor: precisão de 0,001 m
- ⑤ Célula de carga
- ⑥a Medida da extremidade móvel
- ⑥b Medida do comprimento com barra de fibra de carbono
- ⑦ Caixa de trabalho com sistema de aquecedor/resfriador
- ⑧ Computador
- ⑨ Dispositivo para aquecer/resfriar a caixa de trabalho

Figura 46 – Dispositivo desenvolvido por Springenschmid et al. (1985)

Após a moldagem, nos instantes iniciais a amostra se encontra no estado elástico (sem fluência), então a soma da fluência com a retração no molde restringido é igual à retração livre do segundo molde. Com o aumento da rigidez tem início a deformação devido à fluência, resultante da carga aplicada para restringir a amostra e retornar a posição inicial. Assim, no molde restringido tem-se fluência mais a retração, enquanto que no segundo molde tem-se apenas retração livre. A fluência é a diferença entre as duas medidas, conforme mostra a Figura 47.

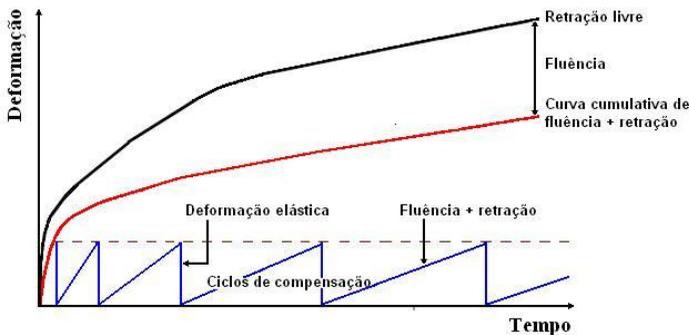


Figura 47 – Desenvolvimento das deformações elásticas, retração e fluência (KOVLER, 1994)

Em Paris na França, Paillère et al. (1989) desenvolveram no *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* um dispositivo para efetuar medidas uniaxiais nas primeiras idades de concretos com deformações restringidas. O dispositivo compreende de um molde cujas extremidades são alargadas em relação à secção central de 120 x 85 mm e comprimento de 1500 mm, conforme mostra a Figura 48. A extremidade alargada assegura a ancoragem da amostra, sendo uma fixa e outra móvel. O concreto é moldado diretamente no dispositivo posicionado na horizontal, onde fica durante os 28 dias em que o ensaio é realizado. Após esta idade, as paredes do molde podem ser retiradas e a amostra é selada com resina para evitar a evaporação da água e posicionada verticalmente. Uma força é aplicada por um sistema hidráulico que é medida através de um dinamômetro. Medidas de retração livre simultaneamente são executadas numa amostra similar com uma extremidade livre.

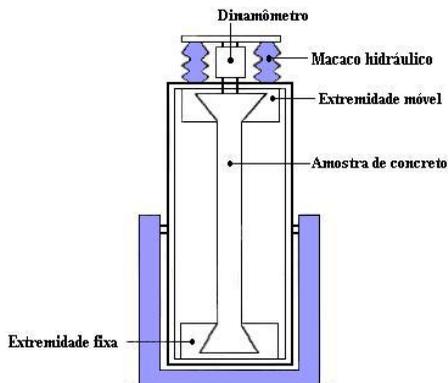


Figura 48 – Dispositivo utilizado por Paillère et al. (1989)

Diferentemente das amostras com extremidades alargadas, Bissonnette e Pigeon (1995) utilizaram em seus experimentos três amostras prismáticas com seção transversal de 50 x 50 mm e comprimento de 700 mm, conforme mostra a Figura 49. Avaliou-se a influência da relação água/cimento e tipo de cimento em concreto com adição de sílica ativa e fibras de aço na retração por secagem e na fluência por tração com aplicação de uma carga constante. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 5)\%$.

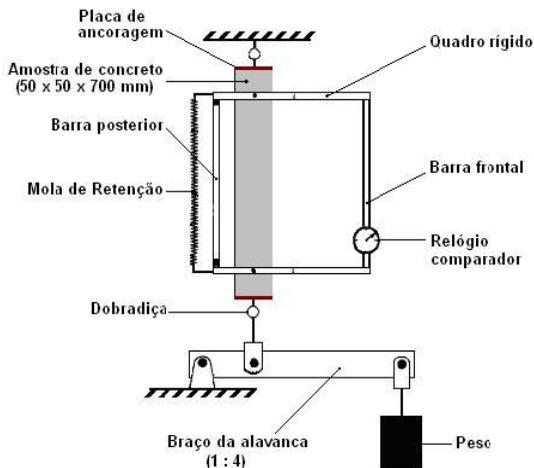


Figura 49 – Dispositivo utilizado por Bissonnette e Pigeon (1995)

O dispositivo de Veiga (1997), que foi apresentado para ensaios de retração livre linear, através de adaptações também foi utilizado para ensaios de retração restringida com argamassas de revestimento, conforme ilustra a Figura 50. Através de um método quantitativo utilizando os resultados dos ensaios de retração livre e restringida realizou avaliações da susceptibilidade à fissuração em revestimento de argamassa em condições próximas às reais.



Figura 50 – Vista do ensaio de retração restringida de Veiga (1997)

Diversos pesquisadores desenvolveram equipamentos similares focalizando os estudos na medida da fluência produzida no concreto nas primeiras idades devido à retração restringida e as consequências provocadas por estas deformações, entre elas, a fissuração. Destaca-se Bloom e Bentur (1995), Bjøntegaard et al. (1997), Toma et al. (1999), Pigeon et al. (2000, 2003), Lura et al. (2001) e Atrushi (2003) que utilizaram o dispositivo apresentado na Figura 51, semelhante ao desenvolvido por Springenschmid et al. (1985). Este dispositivo é dotado de LVDT para medir a deformação e de uma célula de carga para medir a carga aplicada na amostra para retornar a posição inicial. A amostra de concreto é moldada diretamente no equipamento com uma seção de 50 x 50 mm e comprimento de 1000 mm que é selada para evitar a evaporação da água.

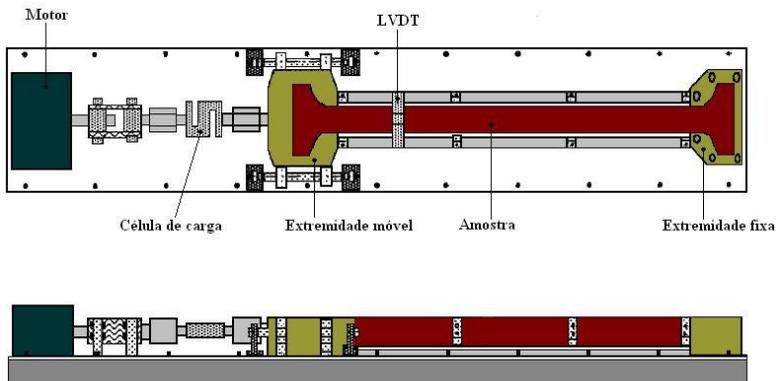


Figura 51 – Dispositivo utilizado para medição de retração restringida

Com a finalidade de medir a fluência associada à retração restringida de amostras de concreto inteiramente contido em um molde de aço, Altoubat (2000) desenvolveu um dispositivo baseado nos trabalhos de Kovler (1994), conforme mostra a Figura 52. Duas amostras são utilizadas, uma para medição de retração livre e outra para determinar as tensões de carregamento unilateral, de modo a avaliar o desenvolvimento da tensão no concreto, utilizando a metodologia apresentada por Springenschmid et al. (1985). A amostra tem seção transversal de 76,6 x 76,6 mm e comprimento de 1000 mm (ØSTERGAARD et al., 2001; ØSTERGAARD, 2003; ALTOUBAT e LANGE, 2001, 2002, 2003; D'AMBROSIA et al., 2001, 2004; GRASLEY e LANGE, 2004).

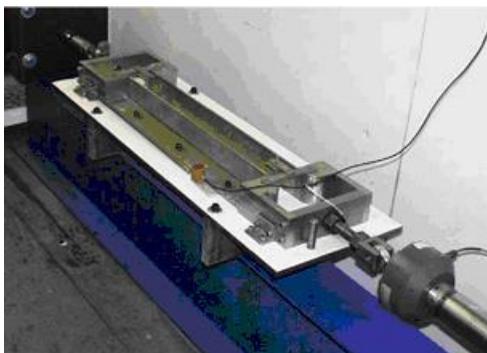


Figura 52 – Dispositivo desenvolvido por Altoubat (2000)

Tao e Weizu (2006) utilizaram nas suas pesquisas um dispositivo desenvolvido no *Institute of Building Materials of Tsinghua University* na China, para investigar as propriedades no desenvolvimento da fluência e medir a retração unilateral de concretos de alta resistência nas primeiras idades, conforme mostra a Figura 53. Este método foi baseado nos estudos de Kovler (1994) e utiliza a mesma metodologia de Springenschmid et al. (1985) e Bjontegaard et al. (1997). No ensaio de retração restringida, a carga é aplicada à amostra quando a deformação atinge o valor de $2 \mu\text{m}$, que é o dobro daquele adotado por Springenschmid et al. (1985). Este dispositivo utiliza duas amostras de concretos idênticos, com secção transversal de $100 \times 100 \text{ mm}$ e comprimento de 1000 mm , sendo uma para o ensaio de retração livre e a outra para o ensaio de retração restringida.

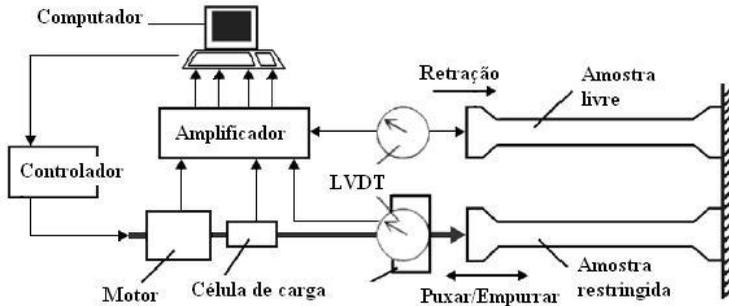


Figura 53 – Dispositivo utilizado por Tao e Weizu (2006) medida de retração linear

Com base nos trabalhos de Kasai et al. (1972), Hammer (2007) desenvolveu o dispositivo apresentado na Figura 54, equipado com duas células de carga de 5 KN , para avaliar os efeitos da aplicação de carga de tração no concreto no estado plástico. A amostra de concreto possui 460 mm de comprimento e $100 \times 100 \text{ mm}$ de secção transversal. Os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de 21°C , umidade relativa de 50% , sem vento e com vento de 5 m/s . No programa experimental utilizaram-se três relações diferentes de água/cimento $0,30$, $0,35$ e $0,40$, dois tipos de cimentos e três tipos de aditivos plastificantes. Com a aplicação de carga de tração na amostra através do motor posicionado em cada uma das extremidades do molde, com velocidade de $0,005 \text{ mm/seg}$, dois IDTs (*Inductive Displacement Transducers*) posicionados sobre a amostra registraram as deformações.

Os resultados expressaram a capacidade de deformação (mm) e tensão (MPa) em função da idade (horas) dos concretos. Registrou-se o tempo, a deformação e a tensão no momento em que ocorreu a primeira fissura.

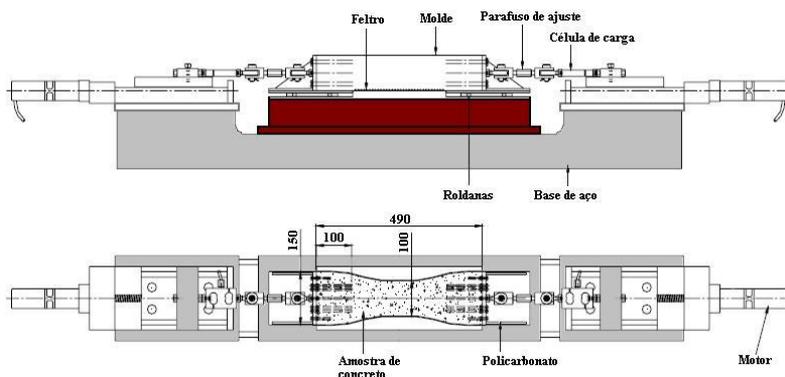


Figura 54 – Vista lateral e superior do dispositivo utilizado por Hammer (2007)

Um feltro foi utilizado para minimizar o atrito entre as paredes do molde e a amostra que foi ancorada em pinos, conforme pode ser observado na Figura 55.



Figura 55 – Detalhes dos pinos de fixação e do feltro utilizado para minimizar o atrito (HAMMER, 2007)

Melo Neto (2008) apresentou o equipamento que está sendo desenvolvido na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo baseados nos trabalhos de Kovler (1994) para avaliar a retração

restringida. Segundo o pesquisador é o primeiro equipamento do gênero em desenvolvimento na America Latina que se tem conhecimento. A Figura 56 apresenta os detalhes do equipamento.

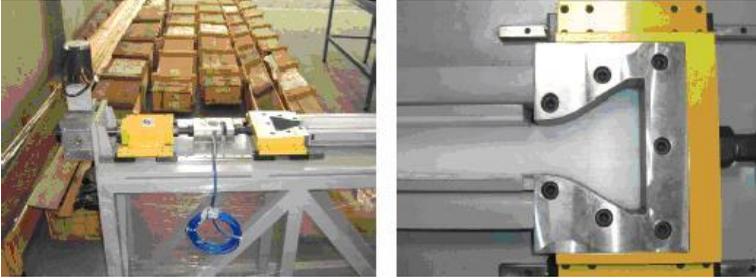


Figura 56 – Detalhes do equipamento para ensaio de retração restringida (MELO NETO, 2008)

Outros pesquisadores desenvolveram pesquisas para avaliar a influência de fibras e aditivos na fluência utilizando a retração restringida, entre os quais Kovler et al., (1999); Bentur e Kovler, (2003); Kamen, (2007); Aly e Sanjayan, (2007); Aly et al., (2008); Loser e Leemann, (2009).

2.4.5 Conclusões

A avaliação da retração livre e restringida nas primeiras idades da argamassa é uma tarefa muito difícil, pois exige medições das variações dimensionais em corpos-de-prova ainda no estado fresco, quando a argamassa ainda apresenta pouca coesão. Com o intuito de medir estas deformações em argamassas a partir das primeiras horas, foram apresentados nas últimas décadas, diversos moldes prismáticos de pequenas dimensões onde a argamassa fica confinada. A *American Society for Testing and Materials* instituiu a norma ASTM C157/C157M (2006) que preconiza a realização do ensaio de retração livre em concretos através de molde prismático. Jensen e Hansen (1995) desenvolveram o molde, conhecido por dilatômetro digital, muito utilizado nos últimos anos para medida de retração autógena. Na avaliação da retração restringida, moldes prismáticos com extremidades alargadas para facilitar a ação da carga de tração, com dimensões relativamente grandes, são muito utilizados em vários centros de pesquisas.

A retração livre com adição de fibras, aditivos, sílica ativa, entre outros materiais, vem sendo pesquisada nas últimas duas décadas, porém, com maior ênfase para aplicação em pasta de cimento e concreto. No entanto, pesquisas no Brasil envolvendo retração restringida até o presente momento são ainda muito pouco exploradas, enquanto que no exterior já existem muitas publicações com resultados relevantes inclusive no que se refere à fissuração.

2.5 FISSURAÇÃO DE COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO

2.5.1 Introdução

A fissuração é prejudicial ao desempenho, à durabilidade e à qualidade estética de revestimentos de argamassas e concretos. Estas fissuras quando ocorrem em revestimentos de argamassas, além de comprometer a estética, torna os revestimentos vulneráveis às infiltrações de água e gases provocando sérias deteriorações, comprometendo a sua durabilidade.

Devido à alta relação superfície/volume, os revestimentos de argamassa são submetidos a condições de cura particularmente severas. Por um lado, são expostos às condições atmosféricas ambientais (vento, temperatura e higrometria variável), e por outro lado, à ação de um substrato poroso (absorção capilar). Isto provoca uma movimentação da água intersticial que afeta a hidratação dos componentes anidros dos aglomerantes podendo gerar vários tipos de patologias tais como: falta de aderência ao substrato, fissuração e estanqueidade insuficiente (GALLIAS, 1982).

As causas que provocam a fissuração e os fatores que influenciam este fenômeno são inúmeras e complexas, que torna difícil a avaliação com base num único critério levando em conta apenas as características dos revestimentos (VEIGA, 1997). A fissuração pode ter origem nos procedimentos de projeto e/ou de execução, na seleção dos materiais constituintes e até mesmo no proporcionamento dos materiais. Porém, muitas fissuras são devidas aos efeitos da retração, associadas à incapacidade da argamassa de absorver as movimentações do revestimento.

Muitas pesquisas desenvolvidas nos últimos anos associam como uma das principais causas da fissuração em compósitos à base de cimento à retração plástica (WITTMANN, 1976; RADOCEA, 1994; GARCI, 1999; BARCELO et al., 1999; DENARIÉ, 2000; LOUKILI et

al., 2000; LAURENCE, 2001; FERON, 2002; QI, 2003; TURCRY, 2004; BANTHIA e GUPTA, 2006; AL-AMOUDI et al., 2006; ESPING, 2007; HAMMER, 2007).

2.5.2 Fissuras provenientes da retração plástica

As retrações plásticas, muitas vezes, provocam fissuras internas ou microscópicas que poderão acentuar as suas dimensões, com retrações nas idades mais avançadas (HOLT e LEIVO, 2004). As fissuras provenientes da retração plástica na superfície do concreto são normalmente paralelas entre si, espaçadas entre 0,3 e 1,0 m (NEVILLE, 1982) e profundidade de 25 mm a 50 mm (BAYASI e MACINTYRE, 2002).

Quando a argamassa aplicada em um substrato não pode deformar-se livremente devido às restrições, surgem tensões no interior do revestimento e conseqüentemente aumenta o risco da fissuração, conforme pode ser observado na Figura 57 (BAYASI e MACINTYRE, 2002). Existe por um lado o surgimento das tensões internas na argamassa, devido à retração plástica, e por outro lado a capacidade que a argamassa deve ter para resistir a estas tensões, ou seja, a capacidade de deformação da argamassa no estado fresco. Estes dois mecanismos sempre irão ocorrer e não podem estar desassociados um do outro. A fissuração no estado plástico da argamassa ocorre quando a retração plástica impedida excede a capacidade de absorver deformação.

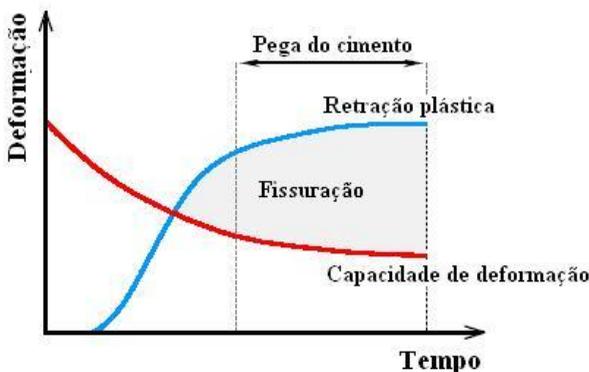


Figura 57 – Esquemática das deformações no estado fresco (BAYASI e MACINTYRE, 2002)

As tensões produzidas nas argamassas de revestimentos e nos concretos ainda no estado plástico, devido às retrações, podem ser severas e causar micro e macro fissuras, já nos instantes iniciais. Estas fissuras tornam-se visíveis primeiramente na superfície, devido à contração volumétrica que é acelerada pela perda de água provocada pela sucção do substrato e pela evaporação.

As fissuras em compósitos à base de cimento ocorrem quando as mudanças de volume associadas à retração restringida geram tensões que excedem a resistência do compósito, conforme se observa na Figura 58. As principais tensões provenientes da mudança de volume nas primeiras idades são as que estão relacionadas às condições térmicas e com a umidade (WEISS, 1999).

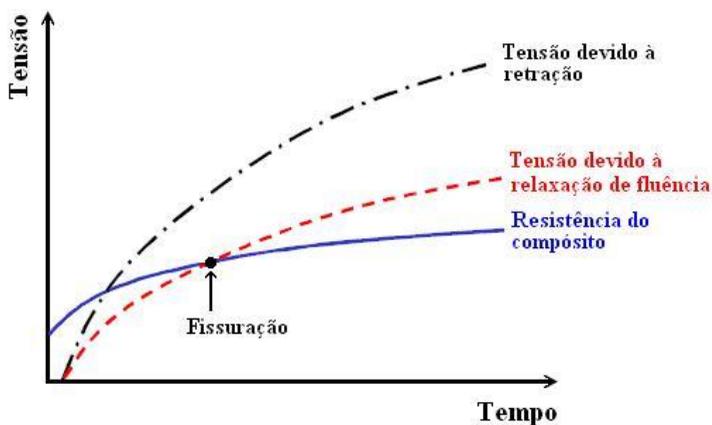


Figura 58 – Influência da retração e da fluência na fissuração do concreto (WEISS, 1999)

O desenvolvimento das fissuras provenientes da retração plástica é atribuído geralmente a quatro fatores que muitas vezes agem simultaneamente (LURA et al., 2007):

- Taxa de evaporação de água elevada que cria meniscos e tensões capilares elevadas próximos à superfície (WITTMANN, 1976; COHEN et al., 1990; RADOCEA, 1992). A tensão capilar que é máxima durante a secagem, é proporcional à tensão superficial da água e inversamente proporcional ao raio capilar dos poros que estão sendo esvaziados de acordo com a Lei de Laplace. Estas

considerações foram utilizadas por Cohen et al. (1990) para demonstrar que argamassas utilizando cimento mais fino com adição de sílica ativa são mais susceptíveis a incidências de fissuras por retração plástica;

- Adensamentos diferenciais: as fissuras são observadas acima das barras de aço ou em posições onde há redução na espessura da secção transversal (QI et al., 2003, 2005). Os autores observaram que nos concretos com adição de fibras diminui a incidência de fissuras por retração plástica devido à redução da deformação vertical (adensamento);
- Dilatação térmica diferencial: um gradiente de temperatura desenvolve no interior do concreto fresco devido à evaporação da água;
- Retração autógena que ocorre na fase plástica. Esta deformação é causada pela formação dos meniscos dentro do material na interface líquido-vapor, devido ao consumo de água pelas reações de hidratação do cimento. Experimento desenvolvido por Bjøntegaard (1999) mostrou que ocorre retração autógena na fase plástica do concreto, provocando fissurações mesmo quando a evaporação da água é impedida.

Logo após a mistura do concreto a capacidade de resistência é reduzida, tornando mais sensíveis às tensões internas. O concreto no estado plástico muitas vezes não tem tempo para desenvolver resistência suficiente para resistir às forças produzidas pela contração nos poros capilares, devido à rápida evaporação da água (WITTMANN, 1976). Trabalhos desenvolvidos por Byfors e Kasai citados por Holt e Leivo (2004), mostraram que o concreto tem uma perda de tensão nestas primeiras horas. A Figura 59 mostra que nas pesquisas de Kasai após aproximadamente 10 horas que a capacidade de deformação do concreto passa a aumentar.

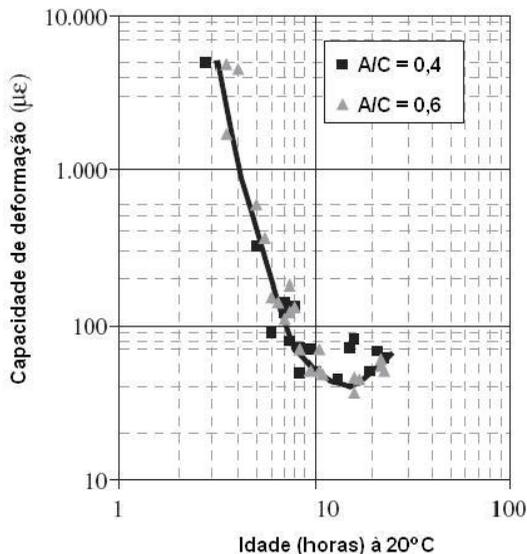


Figura 59 – Decréscimo da capacidade de deformação do concreto nas primeiras horas (KASAI citado por HOLT e LEIVO, 2004 e ESPING, 2007)

Uno (1998) salienta que há alto risco de fissuração em concretos nas primeiras idades quando a retração excede a magnitude de 1 mm/m (1000 µε). Este limite é aproximadamente 10 vezes a capacidade de deformação do concreto nas primeiras idades, conforme mostra a Figura 59 (HOLT e LEIVO, 2004).

Segundo Mann (1993) citado por Kronlöf et al. (1995), retração linear até 1 mm/m é normal ocorrer no concreto e não é a causa provável da fissuração.

As pesquisas desenvolvidas têm revelado que a retração autógena e a dilatação térmica são os dois principais mecanismos responsáveis pela geração de tensões no concreto nas primeiras idades. O aumento da temperatura devido ao calor de hidratação é acompanhado do aumento de volume do concreto que, quando restringido, conduz ao aumento de resistências de compressão (ATRUSHI, 2003). Ainda segundo o autor, a ocorrência simultânea da retração autógena, no início em sentido oposto à dilatação térmica, conduz à redução das resistências de compressão. Se o concreto for restringido nas primeiras horas, tensões significativas serão geradas e podem resultar em ocorrências de muitas fissuras.

Muitas pesquisas relacionam a incidência de fissuras em concretos e argamassas com a mudança de volume do compósito devido à evaporação da água. Em condições climáticas com alta temperatura, baixa umidade relativa do ar, elevada velocidade do vento e com radiação solar, a evaporação da água da superfície do concreto é acelerada (TOPÇU e ELGUN, 2004). A alta temperatura do concreto também acelera a evaporação da água (UNO, 1998). Kronlöf et al. (1995) desenvolveram pesquisas medindo a retração horizontal, adensamento, evaporação de água e pressão capilar de argamassas. Os autores concluíram que a fração de redução do volume final depende da magnitude da evaporação da água e da contração devido à hidratação do cimento. A Figura 60 mostra a representação esquemática das mudanças de volume.

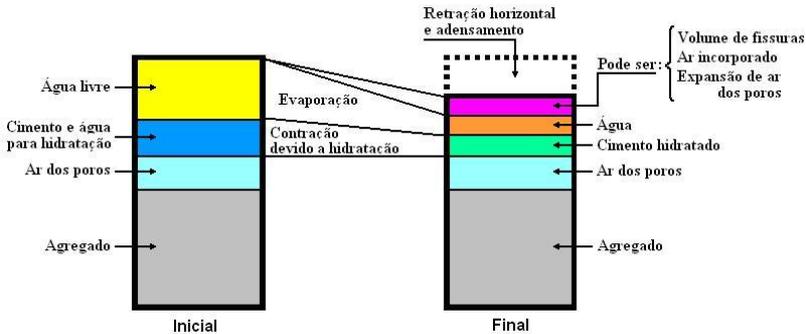


Figura 60 – Mudanças de volume do concreto fresco (KRONLÖF et al., 1995)

Nas pastas de cimento se manifestam as variações dimensionais ocasionadas, sobretudo, pela dessecação (evaporação da água livre) e devido a sua estruturação progressiva provocada pela hidratação do cimento (MITANI, 2003), o que provoca a retração autógena que é uma das principais causas de incidências de fissuras no concreto nas primeiras idades (BENTZ, 2008).

ACI 305R (1999) publicou um método gráfico para estimar a perda de água do concreto por evaporação de acordo com a temperatura do concreto e do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Estima-se neste gráfico apresentado na Figura 61, que o concreto que apresentar perda de massa por evaporação superior a $1,0 \text{ kg/m}^2\text{h}$ tem

grandes possibilidades de fissurar. A recomendação da norma é que a perda de massa por evaporação seja inferior a $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}$.

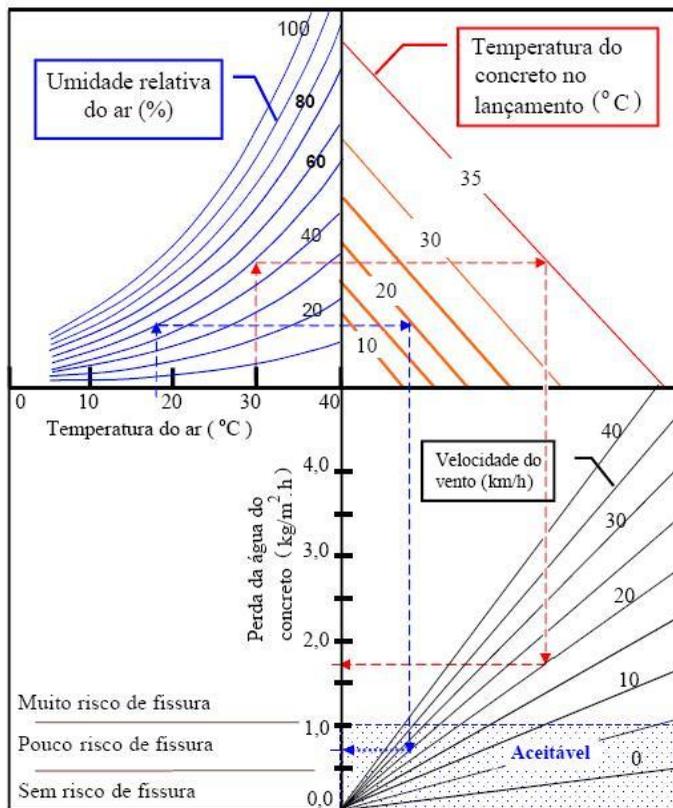


Figura 61 – Estimativa da perda de água do concreto por evaporação (ACI 305R, 1999)

Entretanto, na prática, pode ocorrer fissuração com perda de massa por evaporação abaixo da recomendada pela ACI 305R (1999). Isto se comprova quando a incidência de fissuras no estado plástico é proveniente do adensamento da massa sólida ou da retração autógena (QI, 2003).

Os fatores que diminuem a exsudação podem aumentar a retração plástica e, conseqüentemente, provocar o surgimento de fissuras na superfície do concreto (TOPÇU e ELGUN, 2004).

2.5.3 Fatores que influenciam a fissuração

O elevado consumo de cimento, utilização de areias com alto teor de fino, excesso de água na mistura, aplicação das argamassas em condições climáticas desfavoráveis (alta temperatura, baixa umidade relativa e vento forte) são algumas condições que favorecem a fissuração devido à retração (VEIGA, 1997).

Um material impedido de deformar-se livremente gera tensões internas que provocará algum dano, muitas vezes gerando fissuras. No caso de revestimento, a restrição à deformação é imposta pelo substrato ao qual a argamassa foi aplicada e, também, pelos inertes, entre outros, que oferecem restrições principalmente nos instantes iniciais após a mistura. Portanto os materiais que compõem a argamassa, bem como, o proporcionamento destes materiais são fatores decisivos no desempenho de um revestimento de argamassa.

As causas e os efeitos que os materiais utilizados na confecção de uma argamassa provocam na retração plástica e na fissuração de um revestimento não fizeram parte dos estudos que foram desenvolvidos nesta pesquisa. Alguns materiais como fibras de polipropileno e aditivo incorporador de ar serão utilizados como adições nas argamassas a serem avaliadas, porém, não se pode deixar de discutir os resultados de algumas pesquisas desenvolvidas que creditam como sendo fatores importantes no desempenho de um revestimento envolvendo retração e fissuração.

2.5.3.1 Cimento

As propriedades do cimento têm pouca influência na retração do concreto (SWAYZE citado por NEVILLE, 1982). Swayze demonstrou que uma maior retração de uma pasta pura não implica, necessariamente, em maior retração do concreto para um dado cimento.

2.5.3.2 Cal

A influência da cal na retenção da água de mistura da argamassa e, conseqüentemente, na retração e no módulo de elasticidade já foi objeto de inúmeras pesquisas (JOHN et al., 1994; BASTOS, 2001; TRISTÃO, 2005; SILVA e CAMPITELI, 2006).

Bastos (2001) e Tristão (2005) constataram que o aumento do teor de cal de uma argamassa promove o aumento da retração plástica, devido, possivelmente, ao aumento da tensão capilar da mistura (WITTMANN, 1976; KRONLÖF et al., 1995; HAMMER, 1999; HOLT e LEIVO, 2004, TURCRY, 2004), o que não significa que necessariamente reflete na fissuração do revestimento.

2.5.3.3 Areia

A areia ou agregado miúdo é o material de maior proporção na composição das argamassas, portanto, é um dos principais fatores responsáveis pelas restrições às deformações no estado fresco. Segundo Neville (1982), o agregado miúdo é o fator mais importante que restringe a retração que ocorre na pasta de cimento. O autor cita que o tamanho e a granulometria do agregado miúdo em si não tem influência sobre os valores da retração, mas um agregado maior permite o uso de uma mistura mais pobre, resultando, desta forma, em retração menor.

Os efeitos das características da areia foram focos de estudos de Yool e Lees (1998) no potencial de retração plástica e retração por secagem das argamassas. Foram utilizados seis tipos de areias, variando o teor de material pulverulento e argila com diferentes granulometrias. As argamassas foram preparadas com aditivo incorporador de ar, todas com mesma consistência utilizando o traço 1 : 1 : 5 (cimento : cal : areia), em volume. Para a avaliação da fissuração os autores utilizaram o molde apresentado na Figura 62. Os resultados mostraram que as medidas de retração plástica, de retração por secagem e de fissuração dos revestimentos são diretamente proporcionais ao teor de material pulverulento e de argila das areias.

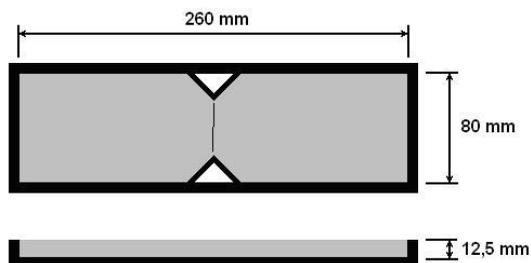


Figura 62 – Vista superior e lateral do molde utilizado por Yool e Lees (1998) na avaliação da fissuração

Silva et al. (2007) desenvolveram pesquisas para avaliar a influência da areia proveniente de rio (areia natural) e da areia britada de rocha calcária na fissuração de revestimentos de argamassas. Os autores concluíram que o tipo de areia influenciou significativamente na incidência de fissuras nos revestimentos, sendo maiores nos revestimentos com areia britada, porém, não foram realizados ensaios de retrações plásticas.

Tristão (2005) constatou que fixando a composição granulométrica e as proporções em volume, as argamassas produzidas com areia de britagem de rocha granítica apresentaram as maiores retrações plásticas quando comparadas com argamassas produzidas com areia de rio, porém, não foram realizadas análises quanto à fissuração.

2.5.3.4 Fibras

A utilização de fibras em argamassas e concretos tem geralmente como objetivo principal aumentar a resistência à tração, à flexão e ao choque do material e incrementar a ductilidade (VEIGA, 1997).

Muitos tipos de fibras poliméricas são utilizadas em matrizes cimentícias tais como, fibras de nylon, polietileno, poliamida e poliéster, sendo as fibras de polipropileno as de maior aplicação atualmente. Também, fibras de coco, de sisal, de vidro e até mesmo fibras de bagaço de cana já foram utilizadas na mistura de compósitos à base de cimento. Estes diferentes tipos de fibras apresentam características diferenciadas principalmente com relação as suas propriedades, eficiência e custo. Segundo Oliveira et al. (2003), devido a estas diferenças, existem restrições quanto ao seu emprego e, por se tratar de um componente de reforço, é relevante conhecer as características físicas e mecânicas das fibras, para melhor empregá-las.

Um dos mecanismos de atuação das fibras é na diminuição da exsudação, reduzindo com isso a deformação vertical por adensamento e a segregação dos agregados (SOROUSHIAN e RAVANBAKSH, 1998) e, também, contribuem na distribuição das tensões internas funcionando como ponte de transferência de tensões ao longo das fissuras (MA et al., 2004), retardando e reduzindo as dimensões das primeiras fissuras.

Nos últimos anos, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas para avaliar a influência de fibras na redução da fissuração em argamassas e concretos (WANG et al., 1990; BRANCH et al., 2002; MA et al., 2004;

QI et al., 2003, 2005; TOLEDO FILHO et al., 2005; BANTHIA e GUPTA, 2006; WONGTANAKITCHAROEN e NAAMAN, 2007; SIVAKUMAR e SANTHANAM, 2007). Algumas destas pesquisas comprovaram que a utilização de fibras reduz significativamente a fissuração nos revestimentos de argamassas e na superfície do concreto, sem, no entanto, reduzir a retração plástica. Existem muitas controvérsias nos resultados destas pesquisas sendo, a composição da matriz, características geométricas e teor de fibras, granulometria e tipo dos agregados, geometria dos corpos-de-prova e metodologia de ensaios, alguns dos fatores intervenientes.

As fibras de polipropileno, polímero derivado do petróleo, são muito utilizadas como adição em argamassas de assentamento e revestimento de paredes de alvenaria e, também, em concretos. Existem disponíveis para comercialização normalmente dois tipos de fibras de polipropileno, monofilamentos e fibriladas com comprimentos variados. As principais vantagens das fibras de polipropileno, de acordo com Bentur e Mindess (1990), é a sua resistência ao meio alcalino, apresentarem alta temperatura de fusão e baixo custo de produção. Os autores citam como desvantagem a fraca resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar, fraca aderência com a matriz cimentícia, reduzida resistência mecânica e baixo módulo de elasticidade.

Os efeitos da adição de fibras de polipropileno em argamassas de revestimentos dependem das características geométricas, físicas e mecânicas das fibras e, também, do teor de fibras. Segundo Silva (2006), apoiados na necessidade de aplicabilidade da argamassa de revestimentos, os fabricantes de fibras de polipropileno e resultados de pesquisas científicas nacionais desenvolvidas nos últimos anos recomendam o consumo de 500 a 1000 g/m³, ou seja, 0,045% a 0,09% do volume de argamassa.

A capacidade de reforço após a fissuração da matriz está diretamente relacionada ao volume de fibras de polipropileno adicionado ao compósito cimentício, melhorando a tenacidade com o aumento do consumo de fibras. Isto ocorre devido ao aumento da quantidade de pontes de transferência de tensões nas fissuras (BENTUR e MINDESS, 1990). Neste sentido, Bauer e Cortez (2001) que utilizaram adição de 500 g/m³, 1500 g/m³ e 3000 g/m³ de fibras de polipropileno com 20 mm de comprimento em argamassas de revestimento, verificaram um aumento nas resistências à compressão e à tração na flexão mais acentuado com 1500 g/m³ e, também, observaram aumento significativo da tenacidade.

O volume de adição de fibras de polipropileno em argamassas de revestimentos deve ser criteriosamente avaliado, pois devido à elevada área específica das fibras, com o aumento do teor de fibras, há necessidade de maior quantidade de água para manter a trabalhabilidade, o que pode comprometer as resistências mecânicas.

2.5.3.5 Aditivos

A quantidade de aditivos químicos desenvolvidos para reduzir os efeitos da retração em argamassas e concretos é inúmera, sendo o aditivo redutor de retração (SRA) e o aditivo compensador de retração (SCA) os mais utilizados. O SRA tem efeito ao longo do tempo e combate a retração à medida que a mesma for surgindo, pois interfere na tensão superficial da água que, por sua vez, tem papel fundamental na evolução das reações de hidratação (MELO NETO, 2008). Segundo o autor, o SCA tem efeito no combate à retração em determinados intervalos de tempo, geralmente nas idades iniciais.

O aditivo incorporador de ar reduz sensivelmente o consumo de água na produção das argamassas e concretos, refletindo possivelmente na redução da exsudação e na segregação dos agregados (RAMACHANDRAN, 1984). John et al. (1994) e, também, Yool e Lees (1998) verificaram uma redução na retração por secagem nas argamassas com ar incorporado. Porém, nas pesquisas de Hammer e Fossa (2006) com taxa de evaporação de água da argamassa relativamente alta, o ar incorporado não influenciou significativamente na retração plástica.

Muitas pesquisas vêm sendo conduzidas nos últimos anos para avaliar o efeito de aditivos na redução da retração por secagem que atuam na tensão superficial da água nos poros capilares (D'AMBROSIA et al., 2001; BENTZ et al., 2001; BENTZ e JENSEN, 2004; MALTESE et al., 2005; RONGBING e JIAN, 2005; LAM, 2005; LURA et al., 2006; RAJABIPOUR et al., 2008, MELO NETO, 2008).

2.5.4 Métodos para avaliar a fissuração

As fissuras muitas vezes são detectáveis e perceptíveis a olho nu, o que não é o caso das microfissuras. Slate e Hover citados por Toma (1999) consideram o limite superior para a largura das microfissuras em 100 µm enquanto que o limite inferior encontra-se no domínio da

nanometria. É muito provável que existem microfissuras que não são detectáveis com as técnicas atualmente disponíveis.

As técnicas de estudo das fissuras e microfissuras utilizam métodos diretos e indiretos (TOMA, 1999). Consideram-se métodos diretos aqueles baseados em observação a olho nu, com utilização de uma lupa ou microscópio. O problema ligado a algumas técnicas diretas é o fato de que a amostra deve estar seca. Os métodos indiretos utilizam informações qualitativas vinculadas indiretamente a fissuras e microfissuras. Como métodos indiretos podem ser citadas as técnicas que utilizam ultra-som, penetração de mercúrio, simulações numéricas, entre outras.

Ultimamente muitos métodos diretos foram propostos para avaliar a fissuração devido à retração plástica de materiais a base de cimento. A maioria destes métodos utiliza a avaliação visual e descrevem a largura, comprimento e área das fissuras que ocorrem em dispositivos onde foi aplicada a amostra. Muitos destes métodos foram desenvolvidos para avaliar a incidência de fissuras no concreto com adição de fibras.

Existem inúmeras técnicas e dispositivos para determinar a medida de retração plástica, como já foi descrito anteriormente. Quanto à incidência de fissuras no estado fresco, em um revestimento de argamassa e em concreto não existe, no entanto, um método direto padronizado para descrevê-la, sendo realizado essencialmente de modo experimental através da visualização, utilizando moldes, placas ou anéis.

2.5.4.1 Moldes com restrições

Diversos pesquisadores utilizaram moldes para avaliar o desenvolvimento da fissuração devido à retração plástica (COHEN et al., 1990; WANG et al., 1990; ALMUSALLAM et al., 1998; SOROUSHIAN e RAVANBAKSH, 1998; QI et al., 2005; TURCRY e LOUKILI, 2006; LURA et al., 2006, 2007; SIVAKUMAR e SANTHANAM, 2007). Qi (2003) cita outros pesquisadores que utilizaram métodos similares entre eles, Kraai, (1985); Schaeles e Hoover, (1988); Balaguru, (1994); Berke e Dallinare, (1994) e Ramakrishnan et al., (2001). As diferenças entre os diversos métodos diretos propostos são a geometria do molde, a quantidade e o tipo de restrições colocadas no fundo do molde para induzir a fissuração. A seguir serão apresentados algumas pesquisas realizadas com utilização de moldes para avaliar a fissuração.

Berke e Dallaire (1994) citados por Bentur e Kovler (2003) e Qi (2003), avaliaram a ocorrência de fissuras por retração plástica em argamassas com baixos volumes de fibras utilizando um molde de 550 mm de comprimento, 368 mm de largura e 100 mm de altura, conforme mostra a Figura 63. Os autores colocaram uma folha de metal dobrada no fundo do molde a fim de criar restrições e diminuir a espessura da argamassa de modo a induzir a fissuração. A amostra ficou exposta em sala climatizada a um ambiente de secagem por um período de 24 horas. Para avaliar a fissuração, a superfície da amostra foi gradeada em quadrados de 50 mm de lado. O comprimento e a largura média das fissuras dentro de cada quadrado foram medidos e a área total das fissuras foi calculada. Bentur e Kovler (2003) e Qi (2003) não comentam os resultados dos ensaios.

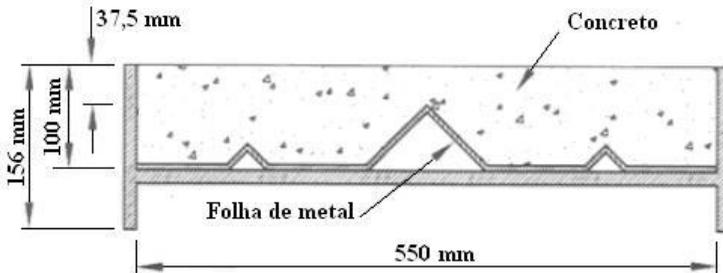


Figura 63 – Representação esquemática do molde com restrições para avaliar a fissuração devido à retração plástica desenvolvido por Berke e Dallaire citados por Bentur e Kovler (2003) e Qi (2003)

Almusallam et al. (1998) utilizaram molde semelhante ao desenvolvido por Berke e Dallaire com dimensões de 450 x 450 x 20 mm, para avaliar a influência do teor de cimento (300, 350 e 450 kg/m³) e de água ($A/C = 0,40, 0,50$ e $0,65$) em ambientes quentes na retração plástica do concreto. Os autores justificam a espessura de 20 mm do molde por representar a relação área/volume típica de uma laje de concreto. O ensaio foi realizado em sala climatizada com temperatura de 45°C, umidade relativa de 50% e vento com velocidade de 15 km/h, simulando as condições de regiões áridas quentes do mundo. Mediu-se a taxa de exsudação e perda de massa. O tempo do surgimento da primeira fissura foi registrado e a área total das fissuras foi calculada expressando o resultado em porcentagem da área da superfície do concreto. Os resultados mostraram que a intensidade de fissuras é diretamente

proporcional ao consumo de água e de cimento enquanto que o tempo de ocorrência da primeira fissura é inversamente proporcional. A primeira fissura foi observada no concreto com 300 kg/m^3 e relação água/cimento de 0,40 após 2,5 horas. O aumento da fissuração no concreto, devido ao aumento do consumo de cimento e de água foi atribuído ao aumento da exsudação e baixa resistência do concreto. Os autores observaram que as fissuras por retração plástica ocorreram nos concretos com taxa de evaporação de água variando de 0,2 a $0,7 \text{ kg/m}^2\text{h}$, mesmo estando abaixo do valor de $1,0 \text{ kg/m}^2\text{h}$ sugerido pela norma ACI 305R (1999).

Turcry (2004) utilizou um molde quadrado de 200 mm de lado com restrições no fundo onde a amostra foi moldada com 10 mm de espessura para avaliar o desempenho das argamassas no estado fresco quanto à fissuração, conforme mostra a Figura 64. O ensaio foi realizado em sala climatizada com temperatura de 20°C , umidade relativa de 50% e vento com velocidade de 5 m/s. Este molde não apresentou sensibilidade para esta finalidade. O autor acredita que a taxa de impedimento da retração não foi suficiente para induzir a fissuração.

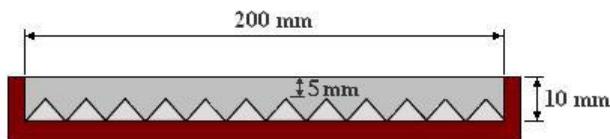


Figura 64 – Molde para avaliação da fissuração em argamassas (TURCRY, 2004)

Na avaliação experimental da fissuração devido à retração plástica em concreto alto-adensável, Turcry (2004) utilizou um molde com medidas internas de 400 mm de largura, 200 mm de comprimento e 70 mm de altura, conforme mostra a Figura 65, inspirado nos trabalhos de Soroushian e Ravanbakhsh (1998). As condições ambientais de ensaios foram as mesmas descritas para o ensaio em argamassas. Os resultados mostraram que a fissuração é influenciada pelo volume de pasta de cimento, finos calcários, polímeros orgânicos e teores de adições.

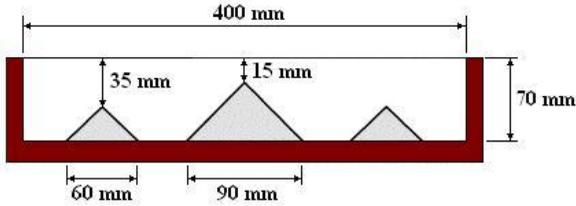


Figura 65 – Seção do molde para avaliação da fissuração em concreto alto-adensável (TURCRY, 2004; TURCRY e LOUKILI, 2006)

Qi et al. (2005) utilizaram um molde proposto pela norma ASTM C1579 (2006), apresentado na Figura 64 semelhante ao utilizado por Berke e Dallaire (Figura 63), para avaliar a influência do tipo e do teor de fibras de polipropileno no desenvolvimento da fissuração em concretos. Mediu-se, também, o adensamento e a perda de massa. Trinta minutos após a adição da água para o preparo do concreto, os moldes foram colocados em sala climatizada, com as amostras expostas ao vento com velocidade de (27 ± 2) km/h, temperatura de $(35 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(40 \pm 2)\%$. Nestas circunstâncias a taxa de evaporação da água da amostra foi de $1,6 \text{ kg/m}^2/\text{h}$. A fissura na superfície do concreto sem fibras, localizada acima da restrição central, ocorreu aproximadamente 60 minutos após a adição da água na mistura e aproximadamente 90 minutos no concreto com fibras. Após 6 horas eliminou-se o vento e adotou-se a temperatura e umidade relativa do ambiente de $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 2)\%$, respectivamente, ficando as amostras expostas nestas condições pelo período de 18 horas. Foram utilizadas análises de imagem automatizada e em microscópio ótico para avaliar as dimensões das fissuras, conforme proposta de Qi et al. (2003). Os resultados demonstraram que com o aumento do teor de fibras, ocorreu uma redução da deformação por adensamento do concreto, um aumento na taxa de evaporação de água e uma redução significativa nas larguras das fissuras. Não foi medida a retração plástica. Os autores concluíram que o molde é apropriado para avaliação da fissuração em concretos com adição de fibras, salientando que esta técnica já foi utilizada por diversos laboratórios com resultados satisfatórios.

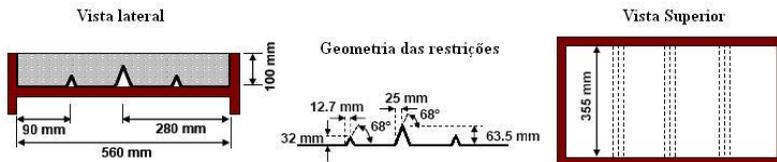


Figura 66 – Geometria do molde para avaliação da fissuração (Qi et al., 2005; LURA et al., 2006, 2007)

Lura et al. (2006) utilizaram o mesmo molde de Qi et al. (2005) para avaliar a influência de aditivo redutor de retração (SRA) no desenvolvimento de fissuras por retração plástica em argamassas. As argamassas foram moldadas e colocadas em ambiente com temperatura de $(30\pm 1)^{\circ}\text{C}$, umidade relativa de $(50\pm 2)\%$ e vento com velocidade de (24 ± 2) km/h. Após 6 horas, as condições ambientais da sala climatizada foram as mesmas de Qi et al. (2005). Para determinar a taxa de evaporação de água, utilizaram-se moldes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 75 mm de altura colocados sobre balança conectada a um sistema de aquisição de dados que registrou a perda de massa a cada 30 segundos. Na idade de 24 horas, realizaram-se aproximadamente 300 medidas da largura das fissuras de cada molde, utilizando análise de imagem proposta por Qi et al. (2003). A deformação por adensamento foi avaliada com a utilização de sensores laser. Os resultados demonstraram que as argamassas com SRA apresentaram redução na taxa de evaporação da água, no adensamento e na tensão desenvolvida na superfície da argamassa, devido à redução da pressão capilar nos poros, refletindo na redução da fissuração no estado plástico. A primeira fissura foi observada na restrição central do molde após 90 minutos da moldagem.

Sivakumar e Santhanam (2007) utilizaram nas suas pesquisas molde de 500 mm de comprimento, 250 mm de largura e 75 mm altura, confeccionado em madeira laminada conforme ilustra a Figura 67. Moldaram concretos utilizando sílica ativa e quatro tipos de fibras: aço, poliéster, polipropileno e vidro com diferentes dosagens de superplastificante. A restrição central tem 55 mm de altura, enquanto que as duas laterais tem 35 mm de altura. A cura foi realizada dentro de uma estufa com dimensões 2750 x 900 x 900 mm. O ensaio realizou-se em sala climatizada com temperatura de $(35\pm 1)^{\circ}\text{C}$, umidade relativa de $(45\pm 1)\%$ e com vento de 6 m/s produzido por um ventilador. Colocou-se um reservatório de porcelana para determinar a perda de água que foi de 0,62 kg/m²/h. O molde foi observado por 24 horas e a medida das

fissuras foi realizada a cada 30 minutos. Anotou-se o tempo do surgimento da primeira fissura que ocorreu no centro do molde. Foi obtida a imagem digital e capturada através de um software de análise de imagem para medida do comprimento e da largura das fissuras. Os resultados comprovaram a eficiência das fibras na redução da fissuração dos concretos no estado fresco (50 a 99%) e o molde utilizado foi considerado adequado para esta finalidade. Não foi realizada medida de retração plástica. No concreto de referência, sem fibras, a primeira fissura foi observada sobre a restrição central após 90 minutos, enquanto que nos concretos com fibras, a primeira fissura ocorreu após 7 horas.



Figura 67 – Molde utilizado na avaliação da fissuração por Sivakumar e Santhanam (2007)

Morency et al. (2005) utilizaram moldes confeccionados com concretos de 35 MPa de resistência com o objetivo de desenvolver uma metodologia para avaliar o desenvolvimento de fissuras a longo prazo de materiais de reparos (argamassas e concretos) utilizando aditivos. Os moldes, com ranhuras de 20 mm no fundo, tinham três diferentes geometrias com as seguintes dimensões internas: 900 x 300 x 75 mm, 1400 x 375 x 75 mm e 1900 x 450 x 75 mm (comprimento x largura x espessura). A Figura 68 mostra a perspectiva do molde. Os resultados mostraram que os moldes não são adequados para avaliar a fissuração em concretos, contrariamente quando utilizadas para argamassas. A intensidade da fissuração nos revestimentos com argamassas é diretamente proporcional à área de superfície do molde.



Figura 68 – Molde desenvolvido para avaliar o desempenho de argamassas e concretos de reparos quanto a fissuração (MORENCY et al., 2005)

Um método de retração linear que utiliza uma canaleta de aço dobrado no centro de pesquisa da *Technical Academy*, na Alemanha, para monitorar a fissuração, conforme mostra a Figura 69. Este método foi desenvolvido para avaliar a eficiência de aditivos químicos quanto à fissuração. A amostra é colocada na canaleta que é mantida ao ambiente. O número de fissuras, a medida da largura média (com precisão de 0,02 mm) e o tempo de ocorrência são registrados. Se a fissura exceder 0,1 mm de diâmetro, o material é considerado inapropriado (VAYSBURD et al., 1999, 2002). Os resultados apresentados por Morency et al. (2005) são contraditórios com os resultados de outros laboratórios.

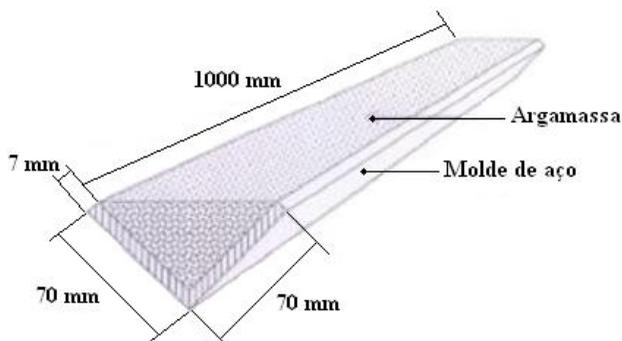


Figura 69 – Dispositivo desenvolvido na *Technical Academy* da Alemanha (VAYSBURD et al., 1999, 2002)

2.5.4.2 Placas

Placas ou painéis com dimensões maiores que os moldes e de pequena espessura são utilizados para avaliar a incidência de fissuras em revestimentos de argamassas ou concretos sob o efeito da evaporação da água. Este método foi desenvolvido em diversos laboratórios com a intenção de avaliar o desempenho de fibras, para reduzir ou até mesmo eliminar a ocorrência de fissuras provocada por retração plástica (BENTUR e KOVLER, 2003)

Yokoyama et al. (1994) citados por Bentur e Kovler (2003) utilizaram um painel de base quadrada com 660 mm de lado onde a amostra é ancorada nas barras de aço dispostas nas bordas, conforme mostra a Figura 70. A superfície é exposta à secagem com vento produzido por ventilador. O tempo de ocorrência da primeira fissura visível, largura, comprimento total e número de fissuras por unidade de área foram anotados. Os autores não comentaram sobre a eficiência do método e resultados dos ensaios.

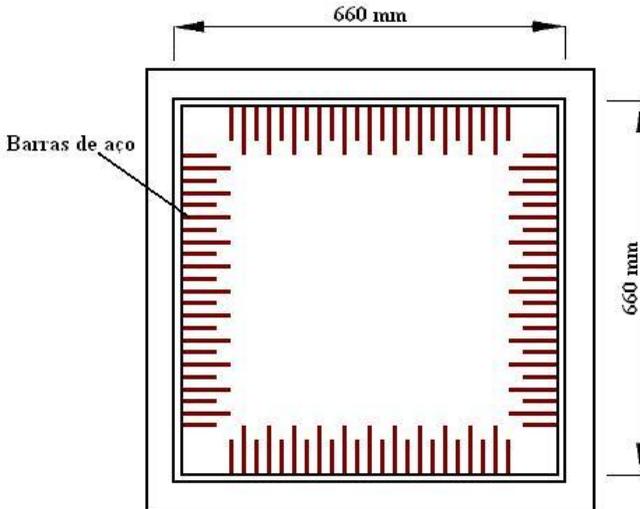


Figura 70 – Representação esquemática da placa utilizada por Yokoyama et al. (1994) citados por Bentur e Kovler (2003)

Ma et al. (2004) utilizaram três painéis de madeira de 610 x 914 mm para avaliar a incidência de fissuras no revestimento de pasta de cimento com fibras de polipropileno. As pastas foram preparadas com 4

dosagens de fibras (0%, 0,05%, 0,10% e 0,15% com relação a massa de cimento) que ficaram expostas a 4 diferentes ambientes com temperatura e umidade relativa de 11,5°C e 57%, 12,5°C e 86%, 13,0°C e 66%, 18,0°C e 42%, respectivamente. A espessura do revestimento foi limitada por um contorno de madeira de 19 mm de altura. Fios de aço de 8 mm de diâmetro foram soldados formando uma moldura de 874 x 570 mm para conter o movimento provocado pela retração de secagem. Os painéis foram revestidos com película de polietileno para evitar a absorção de água da amostra pela madeira. Os revestimentos foram expostos a um vento de 5 m/s produzido por ventiladores, e lâmpadas de 1000 W foram colocados sobre os painéis a uma distância de 1,5 m para acelerar o processo de secagem. O vento foi produzido por um período de 24 horas e o aquecimento com lâmpadas por 4 horas. O tempo em que a primeira fissura tornou-se visível foi anotado e após 24 horas a medida da largura e o comprimento das fissuras foram registrados. As fissuras foram divididas em 4 categorias conforme a medida da largura, designando pesos. Utilizando regressão linear os autores encontraram uma função que relaciona o peso total atribuído às fissuras com teor de fibras, temperatura e umidade relativa. A Figura 71 apresenta a vista superior de um dos painéis.

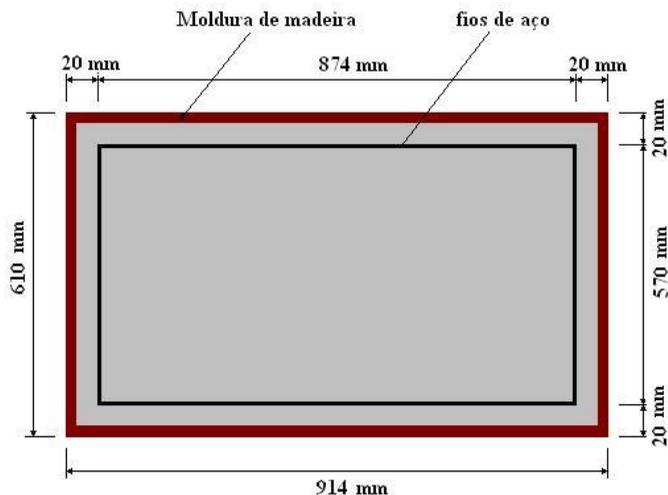


Figura 71 – Painel de madeira para avaliar a incidência de fissuras (MA et al., 2004)

Os resultados comprovaram a eficiência das fibras de polipropileno na redução da fissuração (47,7 a 87,7%). Não foram determinadas as medidas da retração plástica. O método de regressão linear mostrou-se viável na avaliação das variáveis. Estatisticamente verificou-se que o volume de fibras é o fator que influencia mais na redução da fissuração que a temperatura e a umidade relativa.

2.5.4.3 Anéis

Os primeiros testes com anel foram realizados entre os anos de 1939 e 1942 por Carlson e Reading para avaliar a propensão de ocorrência de fissuras nas primeiras idades devido ao proporcionamento dos materiais do concreto (WEISS, 1999).

O método do anel foi projetado para restringir a retração do concreto e induzir a ocorrência de fissuras de modo que as tendências pudessem ser comparadas sob circunstâncias similares na prática. Diversos pesquisadores utilizaram este método, em pasta de cimento e concretos, diferenciando apenas pelas dimensões do anel e o tipo de instrumentação utilizado para a medida da retração e da fissuração (SHAH et al., 1998; LIM et al., 1999; WEISS, 1999; MESBAH e BUYLE-BODIN, 1999; MOKAREM, 2002; BRANCH et al., 2002; JENSEN e HANSEN, 2002; BENTUR e KOVLER, 2003; HOSSAIN et al., 2003; MIHASHI e LEITE, 2004; MOMAYEZ et al., 2005; CARLSWÄRD, 2006; HOSSAIN e WEISS, 2004, 2006; SHAH e WEISS, 2006; LURA et al., 2007).

A Figura 72 apresenta um dos modelos de anéis utilizado nas pesquisas de Weiss (1999) para monitorar a fissuração e as tensões produzidas no concreto.

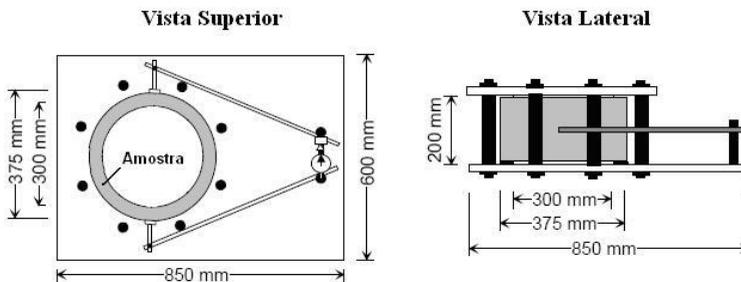


Figura 72 – Configurações do anel utilizado por Weiss (1999)

A *American Society of Testing and Materials* (ASTM) regulamenta a realização do ensaio com utilização do anel através da norma ASTM C1581 (2004) que não tem o propósito de determinar a idade em que ocorrem as fissuras. Este método é utilizado para avaliar os efeitos das variações nas proporções dos materiais de argamassas e concretos na incidência de fissuração devido à retração por secagem restringida.

O método do anel é muito utilizado para avaliar a susceptibilidade de fissuração em pastas de cimento, porém apresenta grandes dificuldades na interpretação da correlação com estruturas lineares. Na avaliação em concretos, Hossain e Weiss (2004) constataram que diferentes diâmetros de anéis e espessuras do concreto conduzem a resultados diferentes. Os autores salientam, também, que as tensões produzidas na amostra podem ser erroneamente interpretadas quando não é detectada a fissuração. Veiga (1997) salienta que o método do anel apresenta grandes desvantagens com relação a outros métodos quando se trata de argamassa de revestimento. Cita que a reduzida intensidade das tensões geradas, dependendo do diâmetro do anel, é incapaz de provocar a fissuração da amostra, pois normalmente possui baixo consumo de cimento, o que conduz a reduzido módulo de elasticidade. Outra desvantagem citada por Veiga (1997) é a dificuldade de relacionar os valores de tensões medidas através do anel e os induzidos na realidade, em aplicações com formas geométricas totalmente distintas e com valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração obtidos em corpos-de-prova com formas muito diferentes.

Devido a estas dificuldades, pesquisadores do *Institut National des Sciences Appliquées – INSA* e da *Université Paul Sabatier de Toulouse* na França abandonaram este tipo de ensaio (FERON, 2002).

2.5.5 Conclusões

A fissuração devido à retração plástica é um dos maiores problemas que acometem os materiais à base de cimento e que ficam evidenciados nos revestimentos de argamassas e nas superfícies dos concretos. Muitas vezes, a causa principal desta retração plástica é a perda de água por evaporação ou por sucção do substrato. A fissuração na superfície do concreto, provocada por retração plástica, pode ser controlada simplesmente evitando a evaporação da água, executando

uma cura eficaz. Este desafio, no entanto, é maior quando envolve revestimento de argamassa de cimento, cal e areia.

Os revestimentos de argamassa apresentam boas resistências aos esforços de compressão, embora ofereçam fragilidades aos esforços de tração que são as principais causas da fissuração.

O alto índice de patologias nos revestimentos de argamassa, principalmente nas fachadas das edificações, é devido a uma série de fatores que podem agir isolada ou simultaneamente. Além das condições ambientais não apropriadas para a cura da argamassa e a técnica de execução do revestimento, pode ser citada, também, a seleção incorreta e o proporcionamento inadequado dos materiais constituintes da argamassa como, cimento, cal e areia. As características físicas e químicas destes materiais também são fundamentais no desempenho do revestimento de argamassa.

A intensidade da fissuração em revestimentos de argamassas e concretos pode ser atenuada com adições de fibras ou com a utilização de aditivos químicos. Porém, a escolha adequada da fibra ou do aditivo, além do teor ideal, deve ser criteriosamente avaliada, pois algumas propriedades podem ser melhoradas em detrimento do desempenho de outras propriedades.

Os estudos experimentais descritos na literatura utilizam diversos dispositivos e métodos diretos e indiretos para avaliar o desenvolvimento de fissuras em argamassas e concretos, sendo que os mais utilizados com o método direto são os moldes prismáticos, placas e anéis. Entre estes, os moldes com ranhuras ou reduções de espessuras para criar restrições à retração e induzir à fissuração são os mais aplicados. Muitas vezes, a amostra moldada no dispositivo fica sujeita a um ambiente favorável à fissuração, aumentando a temperatura, reduzindo a umidade relativa do ar e com ventos utilizando ventiladores.

2.6 CONCLUSÕES DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As revisões bibliográficas serviram para compreensão e delineamento das diversas variáveis envolvidas no fenômeno de fissuração provocada por retração. Também, foram determinantes para a utilização de fibras de polipropileno e de aditivo incorporador de ar no programa experimental, por serem materiais inibidores da fissuração em revestimentos de argamassa.

A ocorrência de patologias em revestimentos de argamassas produzidas com areia britada de rocha, principalmente a fissuração, foi o desafio para a utilização dessa variável no programa experimental.

Os equipamentos propostos para medida de retração livre e restringida, utilizados no programa experimental, foram inspirados em dispositivos utilizados em pesquisas desenvolvidas em diversos países, apresentados na revisão bibliográfica.

A carência de metodologias para avaliação da fissuração em ambiente de laboratório, sem a utilização de paredes de alvenaria, foi o desafio para o desenvolvimento do método adaptado da norma ASTM C1579 (2006) para revestimento de argamassa.

Capítulo 3 – Programa Experimental

3.1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de atingir os objetivos propostos foi desenvolvido este programa experimental. Primeiramente foram caracterizados os materiais e determinadas as propriedades das argamassas no estado fresco, realizando-se então a avaliação da fissuração, utilizando-se moldes em condições climáticas controladas. Posteriormente foram determinadas as propriedades das argamassas no estado endurecido e realizadas as avaliações de retração livre e restringida. Concluiu-se o programa experimental com a avaliação da fissuração nos revestimentos das argamassas em paredes de alvenaria, logo após a aplicação e o desempenho.

As metodologias e os dispositivos propostos para o desenvolvimento do programa experimental serão avaliados utilizando cinco argamassas industrializadas para assentamento e revestimento de alvenaria de grande aceitação no mercado brasileiro e duas argamassas mistas de cimento, cal e areia nos traços, em volume, 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9, que são as usualmente utilizadas em obras para revestimento externo e interno, respectivamente. Como o revestimento externo é o que sofre maior solicitação devido às variações das condições climáticas, foi utilizado o traço 1 : 1 : 6 para avaliar os efeitos da adição de fibras de polipropileno, incorporação de ar e tipo de areia. Portanto as variáveis independentes definidas para o programa experimental foram:

- Argamassa industrializada
- Traço
- Tipo de areia
- Teor de fibras de polipropileno
- Teor de ar incorporado

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Cimento

O tipo e o consumo de cimento não fazem parte dos estudos desta pesquisa. Todas as argamassa foram confeccionadas utilizando o cimento

Portland CII-Z 32 da Votorantim Cimentos. A escolha deste tipo de cimento deve-se ao fato de ser o usualmente utilizado nas argamassas para assentamento e revestimento de alvenaria nas obras dos estados da região sul do país. A Tabela 6 apresenta a caracterização química do cimento fornecida pelo fabricante e a Tabela 7 apresenta os resultados das caracterizações físicas e mecânica do cimento.

Tabela 6 – Caracterização química do cimento CII-Z 32

Análise química (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CO ₂	Res. Insol.	Perda ao fogo
22,91	7,25	3,18	52,29	5,56	1,04	0,18	2,82	4,23	12,91	4,97

Tabela 7 – Caracterização física e mecânica do cimento CII-Z 32

Característica	Resultado	Limites	Norma
Massa unitária (kg/m ³)	976	-	NBR 7251/1982
Massa específica (kg/m ³)	2923	-	NBR NM 23/2001
Início de pega	2h50min	≥ 1 hora	NBR 7215/1997
Fim de pega	7h18min	≤ 12 horas	
Finura # 75 µm (% retida)	1,65	≤ 12	NBR 11579/1991
Resistência à compressão – 3 dias (MPa)	19,6	≥ 10	NBR 7215/1997
Resistência à compressão – 7 dias (MPa)	23,8	≥ 20	
Resistência à compressão – 28 dias (MPa)	34,7	≥ 32	

3.2.2 Cal

A cal utilizada foi a hidratada dolomítica CH III fornecida pela empresa Cal Cem, atestada com o selo de conformidade da Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Apesar da cal hidratada ser obtida pela maturação da cal virgem em processos industriais, existe a possibilidade da cal não estar 100% hidratada. Por isso, a cal utilizada nesta pesquisa foi novamente maturada utilizando-se betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros sob agitação contínua por 20 minutos para

produção da pasta de cal, a qual ficou em processo de maturação por aproximadamente 30 dias, em recipiente fechado e vedado. Em seguida, a pasta foi seca em estufa à 50°C até a constância de massa. Após o resfriamento, foi moída através de um moinho de bola e peneirada. A Tabela 8 apresenta a caracterização química da cal fornecida pelo fabricante e a Tabela 9 apresenta a caracterização física da cal moída após a hidratação, secagem e moagem.

Tabela 8 – Caracterização química da cal dolomítica CH III

Análise química (%)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CO ₂	Óxido de cálcio não hidratado	Óxidos totais	Óxidos totais não hidratados	Perda ao fogo
3,0	0,2	0,3	42,1	28,2	0,0	2,8	0,0	96,6	5,7	26,4

Tabela 9 – Caracterização física da cal moída após a hidratação, secagem e moagem

Característica	Resultado
Massa unitária (kg/m ³) – NBR 7251 (ABNT, 1982)	631
Massa específica (kg/m ³) – NBR NM 23 (ABNT, 2001)	2420
Granulometria – 0,600 mm (%)	0
Granulometria – 0,075 mm (%)	12
Umidade (%)	0,2

Foi realizada a difratometria de raios-X da cal no laboratório de materiais do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina em difratômetro Philips X-Pert com o objetivo de verificar se ocorreu a carbonatação no processo de hidratação, secagem e moagem da cal. Analisando os difratogramas de raios-X da cal, apresentado na Figura 73, verificou-se a presença de carbonato de cálcio (CaCO₃) nas amostras colhidas da cal fornecida pelo fabricante, antes da maturação, e também nas amostras colhidas da cal em pó após a maturação, secagem e moagem. O carbonato de cálcio presente na cal fornecido pelo fabricante deve ser resultado da carbonatação do hidróxido de cálcio ou resíduo do processo de

calcinação para obtenção da cal.

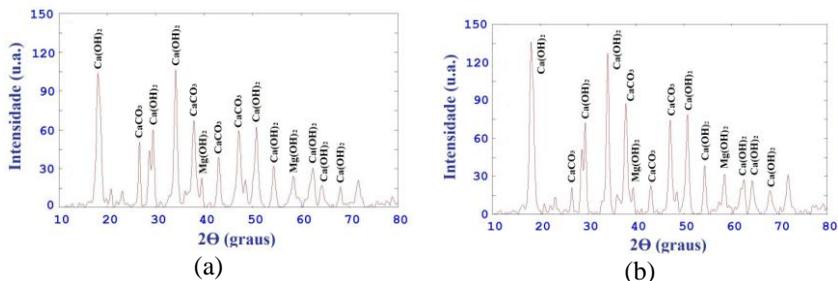


Figura 73 – Difratoograma da cal CH III. (a) antes da maturação e (b) depois da maturação

3.2.3 Areias

Foram selecionados dois tipos de areia, uma extraída do leito do rio Tijucas no município de Tijucas-SC e outra obtida através da britagem de rocha calcária calcítica produzida em moinho de bola proveniente de pedreira do município de Rio Branco do Sul-PR. Justifica-se a utilização da areia britada de rocha, pois devido à restrição de extração da areia dos leitos dos rios em muitos estados brasileiros pelos órgãos governamentais, como forma de preservação ambiental, esta areia cada vez mais vem sendo utilizada na produção de argamassas para assentamento e revestimento de paredes de alvenaria. Acrescenta-se a isto o fato dos revestimentos de argamassas produzidas com a areia britada apresentarem muitas patologias (SILVA et al., 2007).

A areia natural e a areia britada foram colocadas em estufa à 105°C pelo período de 24 horas e após o resfriamento foram peneiradas utilizando a malha 1,2 mm. A Tabela 10 apresenta as caracterizações físicas da areia natural e da areia britada, média de três determinações.

Tabela 10 – Caracterização física das areias

Característica	Areia natural	Areia britada
Massa unitária (kg/m ³) – NBR 7251 (ABNT, 1982)	1370	1464
Massa específica (kg/m ³) – NBR NM 23 (ABNT, 2001)	2665	2789
Módulo de finura – NBR 7211 (ABNT, 2005)	2,16	2,67
Índice de vazios (%) - adaptado ⁶	48,59	47,51
Teor de material pulverulento (%) – NBR 7219 (ABNT, 1982)	1,54	4,17

A norma NBR 7211 (ABNT, 2005) – *Agregados para concreto – Especificações*, que passou a vigorar a partir de 29/04/2005, criou novos limites de utilização para agregados miúdos para concreto. Na versão anterior, esta norma classificava o agregado miúdo em muito fino (zona 1), fino (zona 2), médio (zona 3) e grosso (zona 4). Agora, conforme o módulo de finura (MF) classifica em zona utilizável inferior (MF varia de 1,55 a 2,20), zona ótima (MF varia de 2,20 a 2,90) e zona utilizável superior (MF varia de 2,90 a 3,50). De acordo com a classificação de SELMO (1989), o agregado miúdo que se encontra na zona utilizável inferior pode ser considerado como areia fina; aquele que se encontra na zona ótima é uma areia média e aquele que se encontra na zona utilizável superior é uma areia grossa.

Portanto, a areia natural e a areia britada utilizada nesta pesquisa localizada na zona ótima de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005) é uma areia média segundo SELMO (1989).

A Figura 74 apresenta a distribuição granulométrica das areias realizada segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) resultado da média de duas determinações.

⁶ Para um volume unitário, a diferença entre a massa específica e a massa unitária corresponde ao volume de vazios expresso pela massa equivalente da areia. Esse valor dividido pela massa específica determina o índice percentual de vazios.

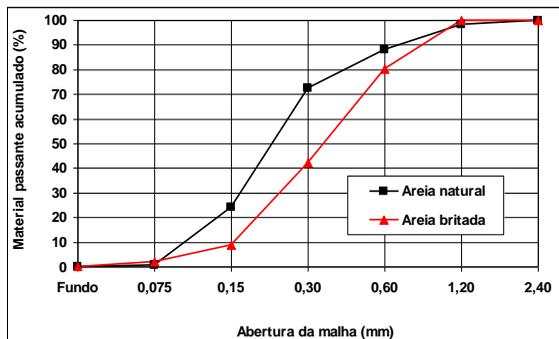


Figura 74 – Distribuição granulométrica da areia natural e da areia britada

3.2.4 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno do tipo monofilamento foram adquiridas junto à empresa FITESA que também foram utilizadas nas pesquisas de Siqueira (2006). A temperatura de transição vítrea⁷ e a temperatura de fusão foram determinadas no ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura em equipamento da marca Shimadzu no Laboratório de Materiais Poliméricos do Departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Nesse mesmo local, através de uma máquina de ensaio universal da marca Emic DL2000, foram realizados os ensaios mecânicos com velocidade de carregamento de 25 mm/min. As características físicas fornecidas pelo fabricante e as mecânicas estão apresentadas na Tabela 11.

⁷ Temperatura característica na qual há a passagem da fase amorfa de um material da fase rígida para a fase flexível.

Tabela 11 – Características físicas e mecânicas das fibras de polipropileno

Característica	Resultado
Diâmetro médio	20 μm
Comprimento	6 mm
Cor	Translúcido a branco
Aparência	Monofilamentos cortados
Área superficial específica	225 m^2/kg
Temperatura de transição vítrea	30,5°C
Temperatura de fusão	165,6°C
Alongamento na ruptura	111,50%
Densidade	0,76 g/cm^3
Resistência à tração direta	231 MPa
Módulo de elasticidade	2,4 GPa

A quantidade de fibras de polipropileno para cada argamassa obtida em massa foi inicialmente adicionada ao cimento em sacos plásticos e realizada a mistura manualmente. Em seguida, adicionou-se a cal em pó e areia seca e novamente foi realizada a mistura manualmente.

3.2.5 Aditivo incorporador de ar

Foi utilizado o aditivo incorporador de ar em pó tensoativo aniônico a base de lauril sulfato de sódio, cujas características físicas fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Características físicas do aditivo incorporador de ar

Característica	Resultado
Massa específica	1,09 g/cm^3
Área superficial específica	1,47 m^2/g
Cor	Marrom claro
Umidade	Menos que 5%

A espectroscopia de infravermelho, apresentado na Figura 75, foi realizada na central de análise do departamento de Química da Universidade Federal de Santa Catarina utilizando espectrofotômetro, modelo FTLA 2000, marca ABB, com o objetivo de identificar os grupos funcionais e analisar a conformação da estrutura química do aditivo incorporador de ar.

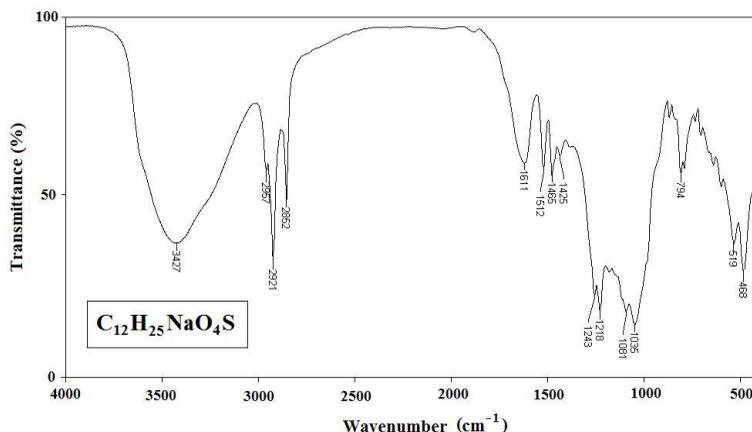


Figura 75 – Espectro de infravermelho do aditivo incorporador de ar

O espectro de infravermelho do aditivo mostrou bandas características de hidrocarbonetos em 1465 cm^{-1} e 2957 cm^{-1} , correspondentes às deformações angular e axial de C-H, respectivamente e bandas correspondentes à deformação axial assimétrica de CH_2 e simétrica de CH_3 em 2852 cm^{-1} e 2921 cm^{-1} , respectivamente. Na frequência de 1081 cm^{-1} apresenta uma banda de deformação axial do sistema S-O-C e em 1218 cm^{-1} , uma deformação axial do grupo S=O. A Figura 76 apresenta a estrutura química do lauril sulfato de sódio.

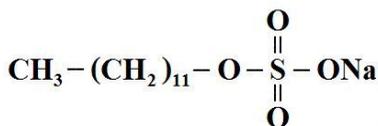


Figura 76 – Estrutura química do lauril sulfato de sódio

A quantidade de aditivo para cada argamassa obtida em massa foi inicialmente adicionada ao cimento em sacos plásticos e realizada a mistura manualmente. Em seguida, adicionou-se a cal em pó e areia seca e novamente foi realizada a mistura manualmente.

3.2.6 Argamassas industrializadas

Utilizaram-se cinco argamassas industrializadas de assentamento e revestimento de paredes dos Estados do Paraná e Santa Catarina de grande aceitação no mercado brasileiro. A Tabela 13 apresenta as características físicas das argamassas anidras industrializadas.

Tabela 13 – Massa específica e teor de finos do material seco das argamassas industrializadas

Característica	Arg A	Arg B	Arg C	Arg D	Arg E
Massa específica (kg/m ³) – NBR NM 23 (ABNT, 2001)	2719	2855	2688	2806	2708
Teor de finos < 0,075 mm (%)	15,18	31,47	17,91	3,87	2,43

A Figura 77 apresenta a distribuição granulométrica das argamassas anidras industrializadas, média de duas determinações.

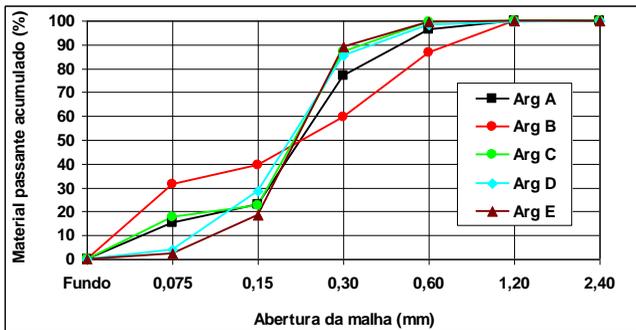


Figura 77 – Distribuição granulométrica das argamassas anidras industrializadas

Observa-se que a distribuição granulométrica das argamassas anidras são similares para o material passante pelas peneiras de malha acima de 0,075 mm, exceto a argamassa B que possui uma distribuição mais contínua. Todas as argamassas têm quase 100% de material passante na peneira de malha 1,2 mm, porém a quantidade de material compreendido entre 0,15 mm e 0,30 mm é superior a 50% em todas as argamassas, exceto na B, o que demonstra que a areia utilizada nestas argamassas é fina.

A quantidade de material passante pela peneira de malha 0,075 mm foi expressiva para as argamassas A, B e C. Este material retido no fundo, que na Tabela 13 foi denominado teor de finos, representa basicamente os finos reativos (cimento, cal e aditivos, em algumas argamassas) e os finos inertes (teor de material pulverulento dos agregados).

3.2.7 Blocos cerâmicos

Na confecção da parede de alvenaria foram utilizados blocos cerâmicos para alvenaria estrutural de resistência característica nominal de 15 MPa classificados, segundo a NBR 6136 (ABNT, 2007), como Classe A.

A Figura 78 mostra os resultados médios das medidas das dimensões realizadas em sete blocos cerâmicos.

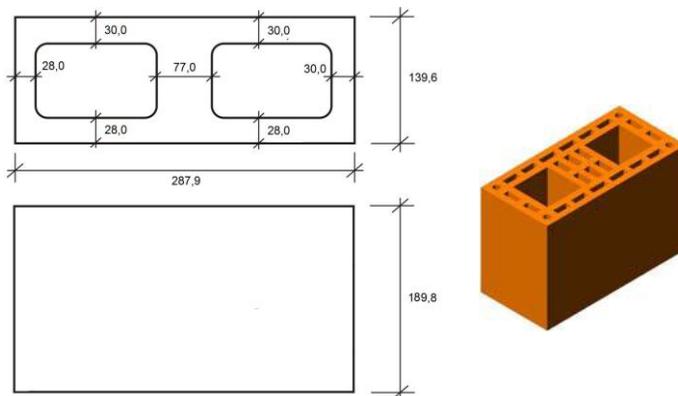


Figura 78 – Valores médios das dimensões, em milímetro, do bloco cerâmico

A absorção inicial de água na face do bloco que recebeu a argamassa foi realizada segundo a norma ASTM C67 (2009), que é similar ao recomendado pela norma NBR 15270 (ABNT, 2005). O resultado médio foi de 5,60 g/193cm²/min com coeficiente de variação de 14,53%.

A absorção de água dos blocos foi realizada segundo a NBR 15270 (ABNT, 2005) utilizando os mesmos sete blocos que foram ensaiados na absorção inicial de água. O resultado médio foi de 13,93% com coeficiente de variação de 5,92%.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Definição dos traços e preparo da mistura

Foram definidos dois traços em volume com relação aglomerante/areia igual a 1 : 3 e mesmo consumo de água (24,0% com relação a argamassa anidra) exceto para as argamassas com aditivo incorporador de ar e com areia britada. A quantidade de água utilizada nas argamassas industrializadas foi a recomendada pelos fabricantes. A utilização de cal nas argamassas sem aditivo provoca um consumo maior de água para produzir uma argamassa trabalhável, o que justifica o teor de 24,0% de água. Os traços em volume propostos foram (cimento : cal hidratada em pó : areia seca):

- 1 : 1 : 6
- 1 : 2 : 9

O traço 1 : 1 : 6, com maior consumo de cimento, é usualmente utilizado nas obras da construção civil para o revestimento externo por ser mais solicitado devido às condições climáticas e o traço 1 : 2 : 9, como revestimento interno, por ser mais econômico. As avaliações com aditivo incorporador de ar, fibras de polipropileno e areia de britagem foram realizadas nas argamassas com traço 1 : 1 : 6. Definiram-se três dosagens de fibras de polipropileno, 0,10%, 0,20% e 0,30% em relação à massa de cimento. Os traços em volume adotados foram convertidos para os traços em massa através da massa unitária dos materiais constituintes. As argamassas foram produzidas fazendo a mistura em massa dos materiais.

Foram preparados com antecedência aproximadamente 3 kg de argamassa anidra fazendo-se a mistura de cimento, cal e areia para os ensaios que necessitavam de menor volume de argamassa. Para os

ensaios de avaliação da fissuração, perda de massa e retração por secagem foram preparados aproximadamente 17 kg, pois os ensaios exigiam maior volume de argamassa. Todas as argamassas foram acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente fechados até o momento do ensaio.

As argamassas com 3 kg foram confeccionadas em argamassadeira da marca Emic com capacidade de 5 litros com procedimentos adaptados na norma NBR 13276 (ABNT, 2005) com a seguinte seqüência: (a) colocou-se o material seco dentro da cuba da argamassadeira e realizou-se a homogeneização por 30 segundos na velocidade baixa; (b) com a argamassadeira ligada na velocidade baixa adicionou-se a água de modo contínuo até 20 segundos e permaneceu pelo período de 90 segundos.

Foi adotada a adição da água no material seco, contrariamente ao que prescreve a norma NBR 13276 (ABNT, 2005), pois segundo Antunes (2005) esta seqüência produz argamassas mais homogêneas, influenciando significativamente no comportamento reológico.

As argamassas com maior volume foram confeccionadas em misturador planetário de eixo vertical com capacidade de 30 litros, conforme mostra a Figura 79. Foi realizada uma pesquisa experimental para determinar o tempo de mistura de modo a obter o mesmo teor de ar incorporado das argamassas produzidas na argamassadeira de 5 litros. O procedimento de mistura foi o seguinte: (a) colocou-se o material seco na cuba do misturador e procedeu-se a mistura sem adição de água pelo período de 2 minutos para homogeneização; (b) ainda com o misturador ligado adicionou-se a água até 20 segundos, permanecendo ligado por mais 3 minutos.



Figura 79 – Misturador planetário de eixo vertical

Os traços em volume das argamassas foram convertidos para o traço em massa utilizando as massas unitárias dos materiais constituintes. A Tabela 14 apresenta os traços, os teores de fibras de

polipropileno e os teores de aditivo incorporador de ar utilizado para a produção das argamassas.

Tabela 14 – Traços, teor de fibras de polipropileno, de aditivo incorporador de ar e de finos

Argamassa	Traço em volume (cimento : cal : areia)	Traço em massa (cimento : cal : areia)	Teor de fibras (%)	Teor de aditivo (%)	Teor de finos⁸ (%)
1 : 1 : 6	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	-	-	7,26
1 : 2 : 9	1 : 2 : 9	1 : 1,29 : 12,64	-	-	5,01
Brita	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 9,00	-	-	12,72
FPP 0.10	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	0,10	-	7,26
FPP 0.20	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	0,20	-	7,26
FPP 0.30	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	0,30	-	7,26
IAR 9.0	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	-	0,0194	7,19
IAR 15.0	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	-	0,0429	7,13
IAR 21.0	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	-	0,0723	7,04
IAR 27.0	1 : 1 : 6	1 : 0,65 : 8,43	-	0,1207	6,95

Com as argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 foram realizadas diversas misturas em argamassadeira de 5 litros para determinar a quantidade de água de mistura de modo a obter uma argamassa apropriada para revestimento. Fixou-se, então, o teor de água de 24,0% (com relação ao material seco) de modo a obter uma argamassa adequada para aplicação como revestimento, segundo a opinião de um experiente oficial pedreiro. Foi adotado o mesmo teor também para as argamassas com adição de fibras, obtendo-se o índice de consistência de aproximadamente de (280±10) mm. Para a argamassa com areia britada foi utilizado o teor de água de 21,0% para obter o mesmo índice de consistência. O aditivo incorporador de ar, devido ao efeito dispersante, provoca a redução do consumo de água das argamassas. Portanto, houve redução da quantidade de água de mistura nas argamassas com aditivo incorporador de ar, que foi ajustada para obter a incorporação de ar de 9,0%, 15,0%, 21,0% e 27,0%, conforme foi definido no programa

⁸ Teor de finos é a quantidade de material seco passante pela peneira de malha 0,075 mm.

experimental. A quantidade de água da mistura utilizada nas argamassas industrializadas foi a recomendada pelos fabricantes.

3.3.2 Estudo-piloto para determinação do teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado nas argamassas é influenciado essencialmente pelo teor de aditivo e tempo de mistura, dentre outros fatores, provocando a redução do consumo de água. Foi definido para esta pesquisa que a variável independente teor de ar incorporado seria de aproximadamente 9%, 15%, 21% e 27% nas argamassas com traço, em volume, 1 : 1 : 6. Portanto, houve a necessidade de realizar um estudo-piloto para determinar a quantidade de aditivo e de água com o tempo de mistura fixado em 90 segundos em argamassadeira para obter o teor de ar incorporado definido. O teor de ar incorporado medido na argamassa sem aditivo foi de 3,66%. Realizaram-se, experimentalmente, mais sete dosagens de aditivo com três amostras para cada uma, cujos resultados do teor de ar incorporado e do teor de água estão apresentados na Figura 80 e 81, respectivamente.

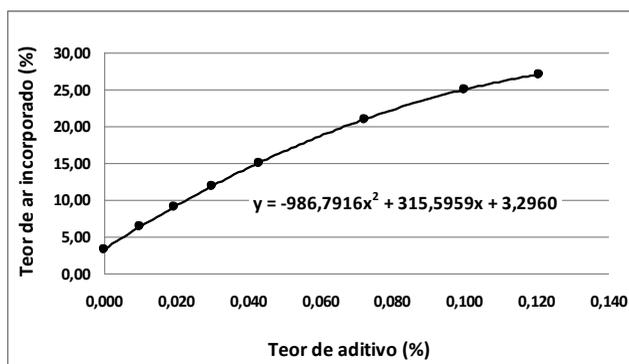


Figura 80 – Teor de ar incorporado no estudo-piloto

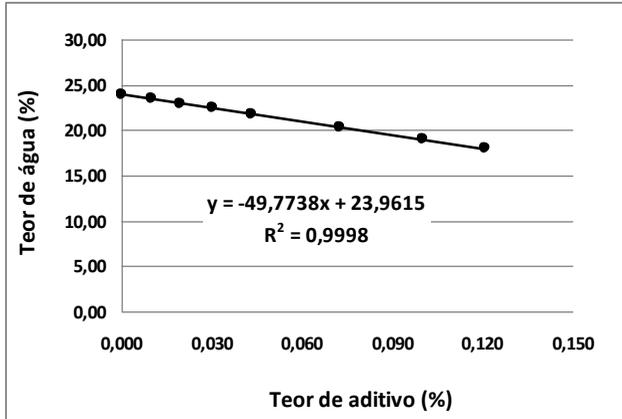


Figura 81 – Teor de água no estudo-piloto

Através da função quadrática ajustada aos pontos apresentados na Figura 80 e da função linear ajustada aos pontos apresentados na Figura 81, determinou-se o teor de aditivo e o teor de água, respectivamente, para o teor de ar incorporado definido. Os resultados obtidos através das funções estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Teor de aditivo incorporador de ar obtido através da regressão

Teor de ar incorporado definido (%)	Teor de aditivo (%)	Teor de água (%)
3,30	0,0000	24,0
9,00	0,0194	23,0
15,00	0,0429	21,8
21,00	0,0723	20,3
27,00	0,1207	18,0

3.3.3 Ensaios realizados

3.3.3.1 Índice de consistência

Utilizando-se 3 kg de material seco foram produzidas em argamassadeira de 5 litros as argamassas para os ensaios de índice de

consistência, teor de ar incorporado e retenção de água em sala climatizada com temperatura (23 ± 1)°C e umidade relativa de (65 ± 5)%.

O índice de consistência foi determinado na mesa de consistência (*flow table*) conforme prescreve a norma NBR 13276 (ABNT, 2005), apresentado na Figura 82, com três repetições para cada argamassa.



Figura 82 – Mesa de consistência (*flow table*)

3.3.3.2 *Squeeze-flow*

O ensaio para avaliação reológica através do *squeeze-flow*, foi realizado na prensa Instron utilizando-se uma célula de carga de 5 kN, com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s, conforme prescreve a norma NBR 15839 (ABNT, 2010). Foi utilizado 3 kg de material seco para produção das argamassas em argamassadeira de 5 litros em sala climatizada com temperatura de (23 ± 1)°C e umidade relativa de (65 ± 5)%. Imediatamente após a mistura, cobriu-se a cuba com pano úmido e deslocou-se para o local de ensaio. Devido à recente instalação da prensa Instron, o ambiente de ensaio ainda não era climatizado. Os ensaios foram realizados com temperatura de (28 ± 1)°C e umidade relativa de (70 ± 5)%. Para cada argamassa foram realizados três ensaios, com tempo estimado de aproximadamente 3 minutos para cada repetição. A Figura 83 ilustra a realização do ensaio.



Figura 83 – Ensaio de *squeeze-flow*

3.3.3.3 Retenção de água

A retenção de água foi determinada utilizando as mesmas argamassas produzidas para determinar o índice de consistência, seguindo os procedimentos da norma NBR 13277 (ABNT, 2005), utilizando o funil de Buchner modificado como mostra a Figura 84, com três repetições para cada argamassa. O ensaio realizou-se em sala climatizada com temperatura de $(23\pm 1)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(65\pm 5)\%$.



Figura 84 – Funil de Buchner modificado

3.3.3.4 Teor de ar incorporado

O ensaio de teor de ar incorporado foi determinado através do método gravimétrico a partir da medida da massa específica dos materiais constituintes e da densidade de massa das argamassas no

estado fresco, conforme procedimentos da norma NBR 13278 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado utilizando as mesmas argamassas produzidas para os ensaios de índice de consistência e retenção de água, em sala climatizada com temperatura de $(23\pm 1)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(65\pm 5)\%$. Foram realizadas três determinações para cada argamassa. A Figura 85 mostra o recipiente utilizado para determinação da densidade de massa no estado fresco.



Figura 85 – Ensaio de densidade de massa no estado fresco

3.3.3.5 Calorimetria de condução isotérmica

O ensaio de calorimetria foi realizado à temperatura de 21°C em um calorímetro isotérmico, modelo TAM Air (TA Instruments) de oito canais com precisão de $\pm 20 \mu\text{W}$, apresentado na Figura 86. Foram utilizadas duas amostras, retiradas das argamassas preparadas para o ensaio de *squeeze-flow*.



Figura 86 – Calorímetro isotérmico

3.3.3.6 Retração por secagem

Foram utilizados três corpos-de-prova prismáticos de 25 x 25 x 285 mm para cada traço da argamassa para o ensaio de retração por secagem e perda de massa, prescrito na norma NBR 15261 (ABNT, 2005). Os corpos-de-prova foram desmoldados após 48 horas e imediatamente realizada a primeira leitura. A cura dos corpos-de-prova e os ensaios foram realizados em sala climatizada com temperatura de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(50\pm 5)\%$. A Figura 87 ilustra a realização do ensaio no relógio comparador.



Figura 87 – Ensaio de retração por secagem

3.3.3.7 Densidade de massa aparente no estado endurecido

A densidade de massa aparente no estado endurecido é a relação entre a massa e o volume total do corpo-de-prova. O ensaio foi realizado na idade de 28 dias, utilizando três corpos-de-prova 40 x 40 x 160 mm para cada argamassa, conforme procedimentos descritos na norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Os corpos-de-prova, moldados segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), foram desmoldados após 24 horas e permaneceram em sala climatizada com temperatura de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(50\pm 5)\%$ até o momento do ensaio.

3.3.3.8 Módulo de elasticidade

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica foi realizado nos mesmos três corpos-de-prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm que foram

utilizados no ensaio de densidade de massa aparente. O ensaio foi realizado na idade de 28 dias de acordo com a norma NBR 15630 (ABNT, 2008), conforme ilustra a Figura 88.



Figura 88 – Ensaio do módulo de elasticidade dinâmica

3.3.3.9 Resistência à compressão e à tração na flexão

As resistências à compressão e à tração na flexão foram determinadas aos 28 dias de idade nos três corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm que foram utilizados para os ensaios de densidade de massa aparente e módulo de elasticidade. Após o ensaio de resistência à tração na flexão, foram utilizadas as metades dos três corpos-de-prova para a realização do ensaio de resistência à compressão, conforme prescreve a norma NBR 13279 (ABNT, 2005). As resistências foram determinadas na prensa Instron utilizando uma célula de carga de 5 kN com velocidade de 50 N/s para tração na flexão e 500 N/s para compressão. A Figura 89 ilustra a realização dos ensaios.



(a)



(b)

Figura 89 – Ensaio de resistências: (a) à tração na flexão e (b) à compressão

3.3.3.10 Capilaridade

O ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade foi realizado em três corpos-de-prova 40 x 40 x 160 mm para cada argamassa. Os corpos-de-prova, moldados segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005), foram desmoldados após 24 horas e permaneceram em sala climatizada com temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 5)\%$ por 28 dias. Nesta idade, as amostras foram colocadas em estufa à 50°C pelo período de 14 dias. Após o resfriamento em dessecador, os corpos-de-prova foram colocados em contato com uma lâmina de água de 5 mm, conforme mostra a Figura 90.



Figura 90 – Ensaio para determinação do coeficiente de capilaridade

O coeficiente de capilaridade, segundo a norma NBR 15259 (ABNT, 2005), é calculado através da Equação:

$$C = \frac{m_{90} - m_{10}}{\sqrt{t_{90}} - \sqrt{t_{10}}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

C = coeficiente de capilaridade ($\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)

m_{90} = absorção de água por capilaridade no tempo de 90 minutos (g/dm^2)

m_{10} = absorção de água por capilaridade no tempo de 10 minutos (g/dm^2)

t_{90} = tempo de 90 minutos

t_{10} = tempo de 10 minutos

O corpo-de-prova ao ser colocado em contato com a lâmina de água ocorre a ascensão capilar da água. A movimentação através dos capilares é determinada pela tensão superficial da água e a altura da penetração está relacionada aos capilares segundo a *Lei de Jurin*, apresentada pela Equação 11.

$$h = \frac{2\gamma}{\rho r} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

h = altura da penetração da água no capilar (m)

γ = tensão superficial da água (N/m)

r = raio dos capilares (m)

ρ = massa específica da água (N/m³)

A altura da penetração da água é inversamente proporcional ao raio dos capilares, conforme mostra a Equação 11, ou seja, quanto menor o raio dos capilares, maior será a altura que a água atingirá no corpo-de-prova.

3.3.3.11 Absorção de água e índice de vazios

O ensaio para determinação da absorção de água e índice de vazios foi realizado nos mesmos três corpos-de-prova utilizados após o ensaio de capilaridade aos 28 dias de idade, utilizando a norma NBR 9778 (ABNT, 1987). Os corpos-de-prova foram imersos em água pelo período de 72 horas para obtenção da absorção de água e índice de vazios. Após fervura dos corpos-de-prova pelo período de 5 horas, novamente foi determinada a absorção de água e índice de vazios. A norma define absorção de água por imersão como sendo o incremento de massa de um corpo sólido poroso devido à penetração de água em seus poros permeáveis, em relação à sua massa em estado seco. Define também índice de vazios como sendo a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. O volume da amostra é determinado através da diferença entre a massa da amostra saturada em água e a massa saturada imersa em água, medidas em balança hidrostática. A norma citada determina que a saturação da amostra deve ser obtida após imersão em água pelo período 72 horas e, também, após imersão seguida de permanência em água em ebulição durante 5 horas (imersão e fervura). A versão mais recente da norma NBR 9778 (ABNT,

2005) passou a apresentar os resultados de absorção de água e índice de vazios utilizando apenas a saturação com imersão em água após fervura.

3.3.3.12 Microscopia eletrônica de varredura

A análise microestrutural foi realizada na argamassa de referência 1 : 1 : 6 e nas argamassas preparadas com aditivo incorporador de ar no laboratório de materiais do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo Philips XL30. O objetivo foi avaliar a interação das microbolhas de ar na microestrutura da argamassa na idade de 28 dias. A preparação das amostras seguiu as seguintes etapas:

- Na idade de 28 dias, foi colocado em estufa à 50°C um corpo-de-prova prismático 40 x 40 x 160 mm de cada argamassa pelo período de 15 dias;
- Após o resfriamento em dessecador, foi retirado do interior de cada corpo-de-prova uma amostra em forma de cubo de aproximadamente 5 x 5 x 5 mm que foram impregnadas com resina epóxi à frio sob vácuo em reservatório cilíndricos de aproximadamente 25 mm de diâmetro por 20 mm de altura;
- Depois de endurecidas as amostras foram cortadas à úmido utilizando disco fino com baixa rotação em cortadeira de precisão de modo a expor a superfície da argamassa. Após o corte, as amostras foram colocadas em estufa à 50°C pelo período de 15 dias;
- Após o resfriamento em dessecador, realizou-se o polimento fino utilizando pó de diamante em politriz até apresentar superfície lisa sem riscos. Em seguida, as amostras receberam uma camada fina de ouro para análise em MEV.

3.3.3.13 Retração livre linear

Muitas técnicas utilizando moldes para a medida da retração livre foram apresentadas nos últimos anos, porém, na sua maioria com espessuras apropriadas para concretos. A relação entre a área e o volume dos revestimentos de argamassas é muito grande, o que favorece a perda de água por evaporação. Sendo assim, os moldes para a medida de

retração devem apresentar pequenas espessuras. A técnica mais utilizada para medida de retração livre em argamassas foi proposta por Détriché (1977), que utiliza captores de deslocamento posicionados nas duas extremidades do molde (bilateral), que possui largura de 150 mm, comprimento de 400 mm e espessura que pode variar de 15 a 25 mm. No Brasil a retração livre linear tem sido medida utilizando o equipamento proposto por Détriché (1977), sendo Bastos (2001) o pioneiro a utilizar esta técnica. A Figura 91 apresenta o molde utilizado por Bastos (2001).

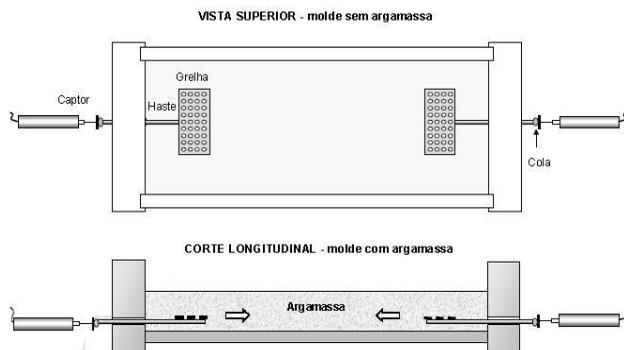


Figura 91 – Equipamento de medida de retração livre linear de argamassa no estado fresco

A argamassa deve estar perfeitamente aderida à grelha, sendo esta dificuldade de moldagem uma das principais causas da elevada dispersão nas repetições dos ensaios.

Foi proposta para esta pesquisa uma técnica com deformação unilateral para medida de retração livre linear utilizando um molde de aço inox com dimensões internas de 100 x 400 mm e espessura de 20 mm, adaptado do dispositivo de Wongtanakitcharoen e Naaman (2007) que avaliaram a influência da adição de fibras no concreto. A Figura 92 apresenta a representação esquemática do molde de retração livre linear com as dimensões em milímetros.

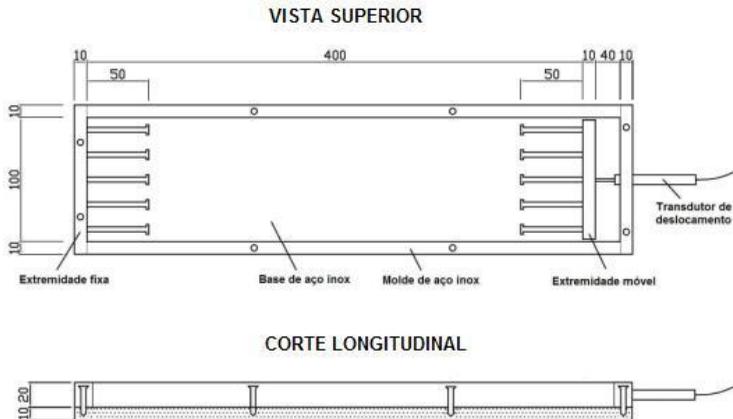


Figura 92 – Representação esquemática do dispositivo para medida de retração livre linear

Nas extremidades a argamassa é ancorada em pinos para manter-se fixa, sendo que numa das extremidades a placa é móvel para permitir o deslocamento no sentido longitudinal. Um transdutor de deslocamento com capacidade máxima de 20 mm foi conectada à placa móvel e através de um sistema de aquisição de dados registrou as medidas da retração a cada 2 minutos, por um período de aproximadamente 20 horas. O molde foi revestido com filme de teflon de modo a minimizar o efeito do atrito e colocado vaselina entre o molde e a extremidade móvel para facilitar o deslizamento e evitar penetração da argamassa. O ensaio foi realizado utilizando fundo não absorvente (placa de aço inox), com três repetições para cada argamassa, em sala climatizada com temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 5)\%$.

A imprimação da argamassa no molde obedeceu à seqüência:

- O molde foi untado com óleo mineral para minimizar o efeito do atrito;
- A primeira camada de argamassa de aproximadamente 1 cm foi aplicada utilizando uma espátula de 40 mm de largura, pressionando a argamassa de forma a eliminar os vazios;
- A aplicação da argamassa nas duas extremidades deu-se pressionando-a de modo a penetrar nos pinos;
- Imediatamente após a aplicação da primeira camada, foi aplicada a segunda camada deixando um pequeno excesso de material;

- Utilizando uma régua metálica, foi arrasada a superfície do molde deixando um acabamento uniforme;
- Após 5 minutos iniciou o ensaio (tempo necessário para configuração do sistema de aquisição de dados).

Com o objetivo de avaliar os resultados e, também, as técnicas de imprimação das argamassas no molde de aço inox (unilateral) e no molde de acrílico (bilateral) proposto por Détriché (1977), foram realizados ensaios simultaneamente com a mesma argamassa.

Em cada molde, a argamassa foi imprimida em duas camadas. A moldagem da argamassa no molde unilateral é mais rápida e fica distribuída mais homogeneamente que a argamassa no molde bilateral, devido a dificuldade de imprimação sob as duas grelha do molde. É possível, também, a existência de vazios devido à dificuldade de imprimação sob as grelhas, o que pode prejudicar a aderência entre estas e a argamassa.

A Figura 93 ilustra os ensaios que foram realizados nas argamassas confeccionadas com aditivo incorporador de ar.



Figura 93 – Ensaio de retração livre linear nos moldes unilateral e bilateral

Observando os resultados apresentados na Figura 94 constata-se semelhança entre as duas curvas, porém, as medidas de retrações são menores no molde unilateral. Isto se deve ao fato de que a superfície exposta à evaporação da água no molde unilateral (10x40 mm) ser menor que a do molde bilateral (15x40 mm), dentre outros fatores. Apesar dos moldes terem sido untados com óleo mineral, o atrito entre as amostras e os moldes é maior no molde bilateral devido a sua área maior. Além disso, no molde bilateral existe o atrito entre as grelhas e o

molde, enquanto que no molde unilateral existe o atrito entre a extremidade móvel e o fundo do molde, apesar da vaselina utilizada.

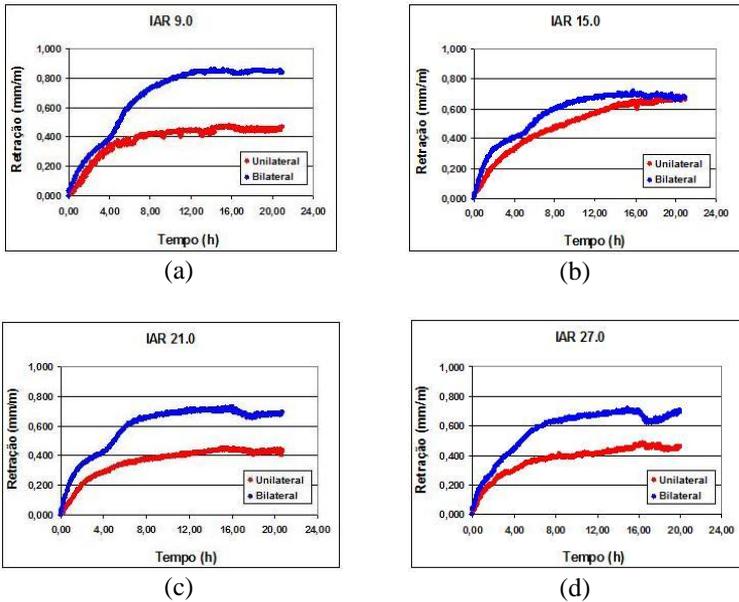


Figura 94 – Resultados de retração livre linear nos moldes unilateral e bilateral

Dividindo a medida da retração linear apresentada na Figura 94 pela área da superfície exposta à evaporação da água obtém-se a retração linear por unidade de área. Conforme pode ser observado nos resultados para a argamassa IAR 27.0 apresentado na Figura 95, há uma tendência à sobreposição das curvas. Estes resultados, excluindo outros fatores intervenientes, indicam que o método unilateral produz medidas de retração linear semelhantes às medidas obtidas pelo método bilateral, proporcionalmente à área da superfície da amostra.

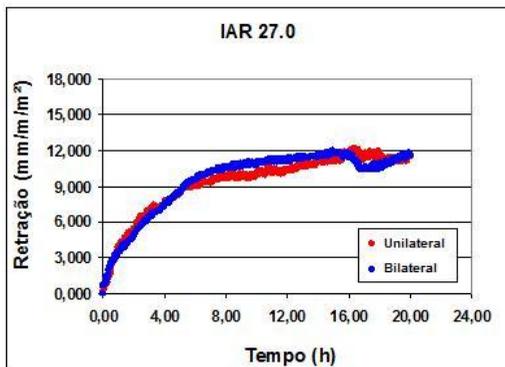


Figura 95 – Retração linear por unidade de área da superfície da amostra da argamassa IAR 27.0

3.3.3.14 Retração restringida linear

O ensaio de retração restringida linear foi realizado em molde de aço inox semelhante ao utilizado para a medida da retração livre linear, com as mesmas dimensões internas, inspirado nos trabalhos de Hammer (2007). A Figura 96 apresenta a representação esquemática do molde de retração restringida linear, com as dimensões em milímetros.

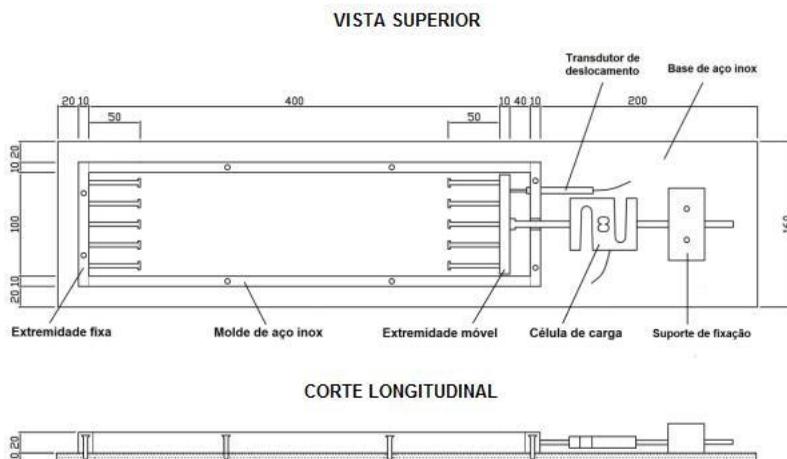


Figura 96 – Representação esquemática do dispositivo para medida de retração restringida linear

A retração da argamassa confinada no molde de aço é restringida por uma célula de carga de 500 N conectada à placa móvel, a qual registra as forças geradas durante a evaporação da água e hidratação do cimento. As forças são registradas através de um sistema de aquisição de dados a cada dois minutos, por um período de 20 horas. O ensaio foi realizado simultaneamente ao ensaio de retração livre linear, com duas repetições para cada argamassa, em sala climatizada com temperatura de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(50\pm 5)\%$. A Figura 97(a) apresenta o molde de retração restringida linear. A Figura 97(b) ilustra a realização dos ensaios para determinação da medida de retração livre linear e da força na retração restringida linear.



Figura 97 – (a) Molde de aço inox utilizado para obter a força com retração restringida pela célula de carga e (b) Vista dos ensaios de retração livre à esquerda e restringida à direita

No mesmo molde de retração restringida, substituindo o suporte de fixação da célula de carga fixou-se um motor de corrente contínua de 3 rpm, 12 V, 3.8 A, com capacidade de torque de 45 kgf.cm que foi conectado à célula de carga de 500 N. Utilizou-se um controlador de velocidade PWM de 12 V e 10 A e um sistema de duas roldanas para redução da velocidade de carga. Exatamente na idade de 20 horas, foi acionado o motor para aplicação de uma carga de tração com velocidade constante de 0,10 mm/minuto, até o rompimento da argamassa. O sistema de aquisição de dados registrou o deslocamento e a força a cada 5 segundos. O ensaio foi realizado simultaneamente ao ensaio de retração livre, com duas repetições para cada argamassa, em sala climatizada com temperatura de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(50\pm 5)\%$. A Figura 98 ilustra a realização dos ensaios.



Figura 98 – Ensaio de retração livre e restringida

Os ensaios de retração restringida foram realizados no molde de aço inox com fundo não absorvente (placa de aço inox). A preparação do molde e os procedimentos de moldagem foram idênticos ao descrito no ensaio de retração livre linear. Devido à sensibilidade do transdutor de deslocamento, nos ensaios de retração livre e restringida não foi utilizado vento.

A avaliação da fissuração de revestimentos de argamassas, através de ensaios utilizando dispositivos para medidas das tensões induzidas por retração restringida, vem sendo desenvolvida por alguns pesquisadores nos últimos anos. O ensaio consiste em impedir a retração da argamassa confinada em moldes prismáticos através de uma célula de carga de modo a medir a força gerada, desde a sua moldagem, obtendo a curva de evolução ao longo do tempo da força gerada na argamassa pela restrição da retração. Numa certa idade, é determinada a resistência à tração através da aplicação de uma força até o rompimento da argamassa. Simultaneamente ao ensaio de retração restringida, em outro molde igual, é determinada a medida da retração livre. Também é possível relacionar a energia de rompimento da argamassa com a tendência à evolução das fissuras ao longo do tempo.

A força gerada na argamassa confinada no molde pela retração restringida também pode ser obtida anulando a deformação devido à retração, impondo deslocamentos iguais e de sentido contrário. Esta técnica normalmente é utilizada em concreto.

Veiga (1997), inspirada nos trabalhos de Tamin (1986) e de outros pesquisadores, utilizou um método quantitativo com ensaios de

retração livre e restringida na avaliação da susceptibilidade à fissuração em revestimento de argamassa em condições próximas às reais.

3.3.3.15 Método para avaliação da fissuração

A avaliação da fissuração das argamassas em laboratório foi realizada utilizando três moldes prismáticos adaptados da norma ASTM C1579 (2006), com dimensões internas de 250 x 400 e espessura de 20 mm, e está apresentado na Figura 99. O fundo dos moldes possui restrições para reduzir a espessura do revestimento e induzir à fissuração. Os interiores dos moldes foram impermeabilizados com esmalte marítimo para não absorver água da amostra.

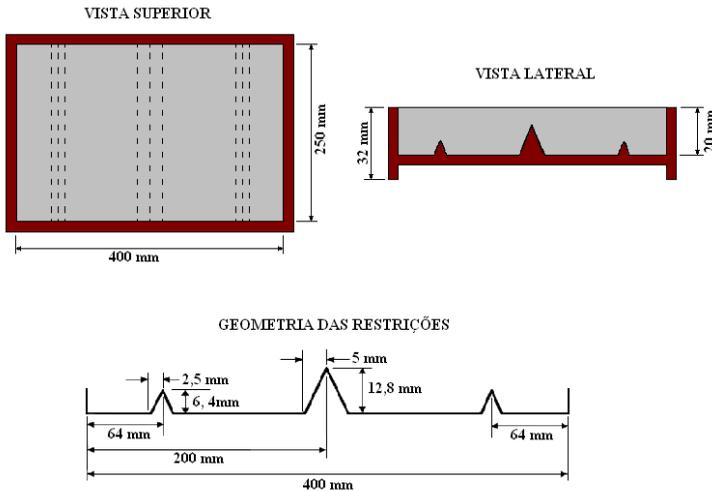


Figura 99 – Molde adaptado da norma ASTM C1579 (2006) para avaliar a fissuração

A imprimação da argamassa nos moldes obedeceu à seqüência:

- Foi aplicada uma camada de argamassa de aproximadamente 1 cm no fundo do molde utilizando uma espátula de 80 mm de largura, pressionando a argamassa de forma a eliminar os vazios;
- Imediatamente após a aplicação da primeira camada, foi aplicada a segunda camada deixando um pequeno excesso de

material;

- Utilizando uma régua metálica, superfície do molde foi regularizada deixando um acabamento uniforme;
- A superfície foi alisada com a espátula para facilitar a visualização das fissuras.

O ensaio foi realizado por um período de aproximadamente 20 horas, dentro de uma caixa de madeira proposta pela norma ASTM C1579 (2006), em sala climatizada com temperatura de $(21\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(50\pm 5)\%$, conforme mostra a Figura 100. O tempo de ocorrência da primeira fissura observada foi registrado. Após 20 horas, a largura média, o comprimento total e a área total das fissuras foram medidos.

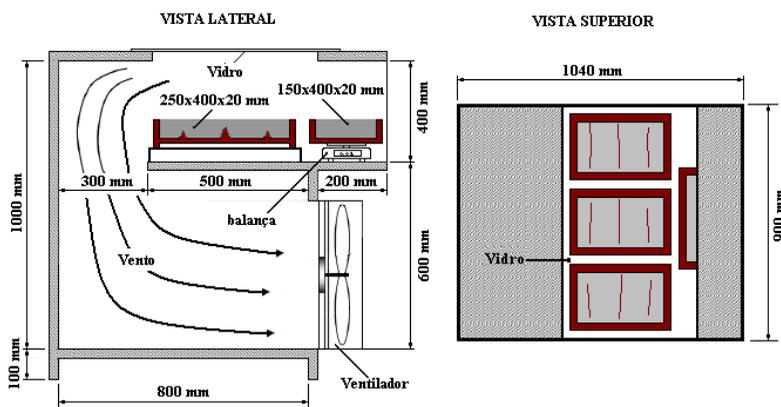


Figura 100 – Ensaio de avaliação da fissuração (ASTM C1579, 2006)

Foi utilizado um ventilador para simular a ação do vento e provocar condições mais severas e desfavoráveis à fissuração, colocado na posição frontal da caixa conforme mostra a Figura 100. A medida da velocidade do vento foi determinada através de um anemômetro digital da marca Airflow, modelo TA35, precisão de 1%, conforme mostra a Figura 101.



Figura 101 – Anemômetro digital utilizado na medição da velocidade do vento

A haste de medição do anemômetro foi posicionada na frente do ventilador, e na superfície do molde central de fissuração localizado no interior da caixa, registrando cinco medidas da velocidade do vento para cada posição. Os resultados da velocidade do vento corrigidos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Medidas da velocidade do vento

Posição da medida	Velocidade do vento corrigido (m/s)						
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Média	DP
Na frente do ventilador	3,55	3,32	4,08	5,10	4,88	4,19	0,79
Na superfície do molde	2,37	1,85	2,08	2,89	2,32	2,30	0,39

3.3.3.16 Perda de massa por evaporação da água

A perda de massa por evaporação da água das argamassas foi medida em molde prismático de madeira, com dimensões internas de 150 x 400 mm e espessura de 20 mm, também impermeabilizado com esmalte marítimo para não absorver água da amostra. O molde foi colocado sobre a balança digital, com precisão de 0,1 g, conectada ao computador, que através de um software registrou os dados por um período de aproximadamente 20 horas. O ensaio foi realizado simultaneamente ao ensaio de avaliação da fissuração dentro da mesma caixa utilizando vento, conforme ilustra a Figura 102. A seqüência de imprimação da argamassa no molde foi idêntica à descrita para

avaliação da fissuração, porém sem fazer o alisamento da superfície.



Figura 102 – Ensaio de perda de massa por evaporação da água

A Figura 103 mostra que o vento influencia significativamente nos resultados da perda de massa por evaporação da água das argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9. Com vento, as argamassas perderam água na taxa média de 247 g/m²h. Sem vento, a taxa média foi de aproximadamente 100 g/m²h.

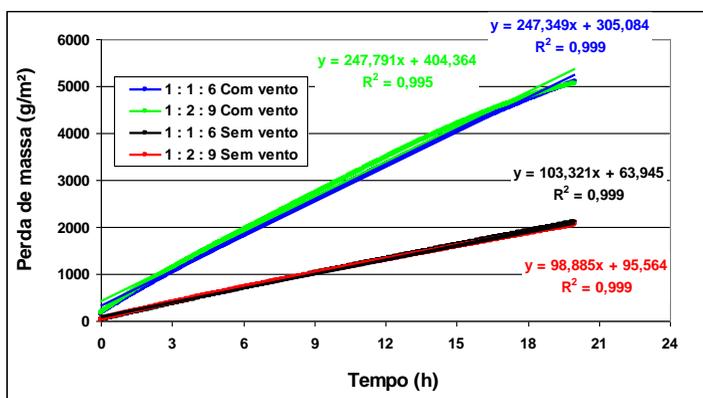


Figura 103 – Perda de massa por evaporação da água com e sem vento

3.3.3.17 Perda de massa por evaporação da água e por sucção do substrato

Realizou-se uma pesquisa experimental para determinar a quantidade de água que é evaporada e a quantidade de água que é absorvida pelo bloco cerâmico para as argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9

utilizadas na parede de alvenaria, através dos seguintes procedimentos:

- A face do bloco cerâmico que recebeu a argamassa do bloco cerâmico foi cortada com disco adiamantado obtendo-se 22 amostras quadradas com 80 mm de lado. As amostras permaneceram em estufa por um período de 24 horas, em seguida, colocadas em dessecador até o momento do ensaio. Os ensaios foram realizados no mesmo ambiente e simultaneamente ao revestimento da parede de alvenaria com temperatura de $(27\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(70\pm 5)\%$.
- Utilizando a mesma argamassa preparada para revestimento dos painéis, moldaram-se cada uma das amostras. Para evitar a evaporação da água pelas laterais da argamassa, as amostras foram revestidas com plástico acrílico, conforme mostra a Figura 104.

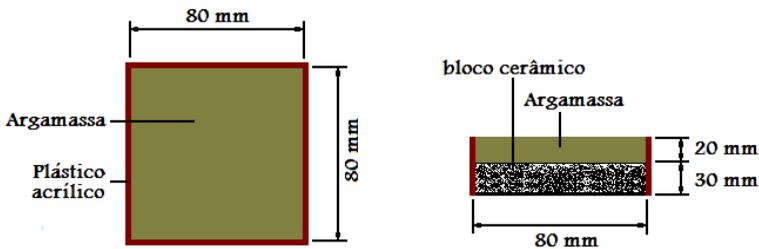


Figura 104 – Amostra de bloco cerâmico para determinação da quantidade de água absorvida da argamassa

- Anotou-se a massa das amostras secas sem argamassa (m_1);
- Imediatamente após a moldagem, foi anotada a massa da amostra com a argamassa (m_2);
- A cada intervalo de tempo de aproximadamente 5 minutos, registrou-se a massa da amostra com a argamassa (m_3) e, também, a massa da amostra do bloco cerâmico após a retirada da argamassa (m_4);
- As amostras de bloco cerâmico após a realização dos ensaios foram colocadas em estufa pelo período de 24 horas, para retirada da água absorvida pelas amostras. Após o resfriamento em dessecador, anotou-se a massa de cada amostra (m_5);
- A massa de argamassa imprimida em cada amostra (m_a), a massa de água evaporada (m_{ev}) e a massa de água absorvida

pela amostra de bloco cerâmico (m_{ab}) no instante de medida t são obtidas através das Equações, respectivamente:

$$m_a = m_2 - m_1 \quad \text{Equação 12}$$

$$m_{ev} = m_3 - m_2 \quad \text{Equação 13}$$

$$m_{ab} = m_4 - m_5 \quad \text{Equação 14}$$

A partir da massa da argamassa imprimida em cada amostra (m_a), determinou-se através da densidade de massa no estado fresco e do consumo de água (Tabela 19) de cada argamassa, a massa de água presente na argamassa de cada amostra. Foi possível, então, determinar o percentual da massa de água absorvida pela amostra e da massa de água evaporada.

O tempo máximo estimado do ensaio foi de 4 horas, pois através de ensaios pilotos realizados concluiu que após aproximadamente 2 horas de ensaio, a amostra já estava quase saturada de água.

A Figura 105 ilustra a realização do ensaio no mesmo ambiente onde se localizava a parede de alvenaria.

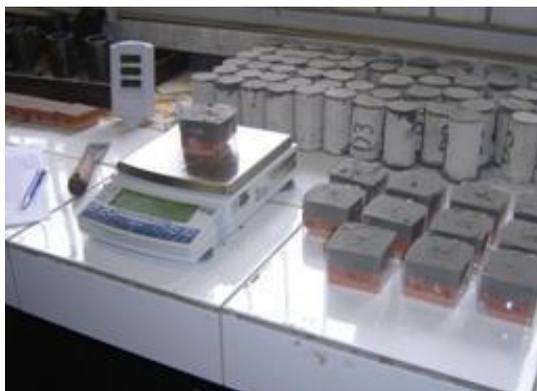


Figura 105 – Ensaio para determinar quantidade de água evaporada e absorvida pelo bloco cerâmico

3.3.3.18 Fissuração dos revestimentos da parede de alvenaria

Foi construída no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) de Florianópolis-SC uma parede de alvenaria para avaliar a fissuração do revestimento. A parede foi confeccionada com blocos cerâmicos assentados com argamassa industrializada, com 220 cm de comprimento e 120 cm de altura, e chapiscada com argamassa de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume. A parede foi dividida em dois painéis de 90 x 100 cm com ripas de madeira com espessura de dois centímetros. Para evitar que as ripas absorvessem a água das argamassas foram impermeabilizadas com esmalte marítimo. Os painéis foram revestidos com argamassa no traço em volume 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9. Foi aguardado por 5 minutos para então realizar-se o sarrafeamento e após 30 minutos realizou-se o desempenho. Adotou-se utilizar blocos cerâmicos por possuírem poros mais refinados que os blocos de concreto, provocando uma maior sucção de água da argamassa, aumentando a possibilidade de fissuração do revestimento. Simultaneamente ao revestimento das paredes, determinou-se a quantidade de água evaporada e absorvida pelo bloco cerâmico.

As Tabelas 17 e 18 apresentam as principais características das argamassas confeccionadas e industrializadas, respectivamente, e a Figura 106 apresenta o diagrama esquemático que resume o programa experimental.

Argamassa	Principais características
1 : 1 : 6	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6
1 : 2 : 9	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 2 : 9
Brita	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia britada de rocha calcária, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6
FPP 0.10	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com 0,10% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento
FPP 0.20	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com 0,20% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento
FPP 0.30	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com 0,30% de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento
IAR 9.0	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com aproximadamente 9,0% de ar incorporado
IAR 15.0	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com aproximadamente 15,0% de ar incorporado
IAR 21.0	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com aproximadamente 21,0% de ar incorporado
IAR 27.0	Argamassa mista de cimento, cal hidratada em pó e areia quartzosa, confeccionada no traço em volume 1 : 1 : 6, com aproximadamente 27,0% de ar incorporado

Tabela 18 – Principais características das argamassas industrializadas

Argamassa	Principais características
Arg A	Fabricada no estado do Paraná utilizando cimento, areia quartzosa, cal hidratada e aditivos químicos
Arg B	Fabricada no estado do Paraná utilizando cimento, areia britada de rocha calcária e aditivos químicos. Não utiliza cal na sua formulação
Arg C	Fabricada no estado de Santa Catarina utilizando cimento, areia quartzosa lavada, cal hidratada e aditivos químicos
Arg D	Fabricada no estado de Santa Catarina utilizando cimento, areia quartzosa lavada, cal hidratada e aditivos químicos
Arg E	Fabricada no estado do Paraná utilizando cimento, areia britada de rocha e aditivos químicos. Não utiliza cal na sua formulação

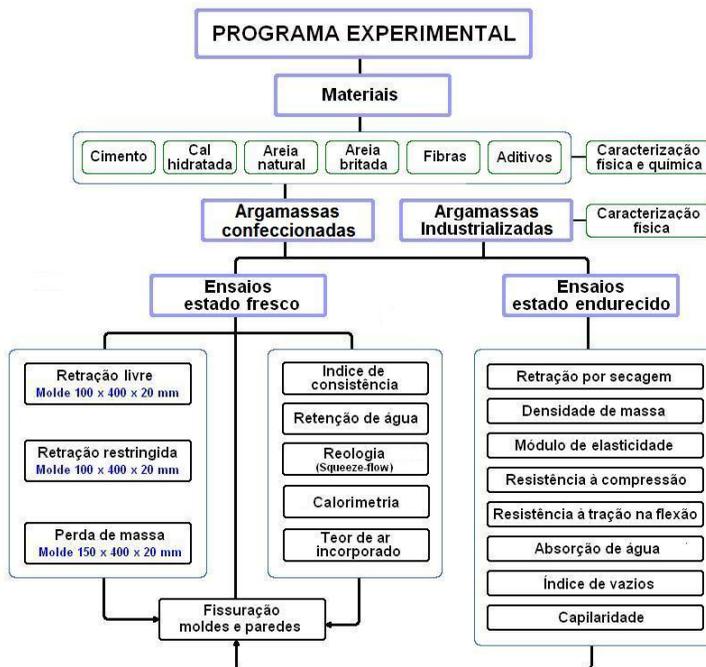


Figura 106 – Diagrama esquemático do programa experimental

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

4.1 INTRODUÇÃO

Inicialmente serão apresentados os resultados e as discussões das argamassas no estado fresco, avaliando a influência das variáveis independentes em cada ensaio. Em seguida, as discussões dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido e, também, as avaliações da susceptibilidade à fissuração do revestimento de argamassa associada às propriedades mecânicas e à retração restringida. A avaliação da fissuração nos moldes será realizada através dos resultados das medidas de perda de massa por evaporação da água e das retrações livre e restringida. Finalmente, serão avaliados os ensaios realizados na argamassa e no revestimento da parede de alvenaria.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Consumo de materiais

A Tabela 19 apresenta o consumo de argamassa anidra e de água das argamassas industrializadas e o consumo dos materiais utilizados para a produção das argamassas.

Tabela 19 – Consumo dos materiais utilizados na produção das argamassas

Arg	Consumo (kg/m ³) (%)						
	Cimento	Cal	Areia	Fibras	Aditivo	Arg. anidra	Água
Arg A	-	-	-	-	-	1534 (83,32%)	307 (16,68%)
Arg B	-	-	-	-	-	1370 (86,22%)	219 (13,78%)
Arg C	-	-	-	-	-	1401 (86,22%)	224 (13,78%)
Arg D	-	-	-	-	-	1698 (83,32%)	340 (16,68%)
Arg E	-	-	-	-	-	1311 (87,69%)	184 (12,31%)
1 : 1 : 6	156 (8,02%)	101 (5,20%)	1311 (67,44%)	-	-	1568 (80,66%)	376 (19,34%)
1 : 2 : 9	104 (5,39%)	135 (7,00%)	1316 (68,26%)	-	-	1555 (80,65%)	373 (19,35%)
Brita	153 (7,76%)	99 (5,02%)	1377 (69,86%)	-	-	1629 (82,65%)	342 (17,35%)
FPP 0.10	155 (8,01%)	100 (5,17%)	1306 (67,46%)	0,155 (0,01%)	-	1561 (80,65%)	375 (19,36%)
FPP 0.20	154 (7,99%)	100 (5,17%)	1300 (67,43%)	0,309 (0,02%)	-	1555 (80,61%)	373 (19,39%)
FPP 0.30	154 (8,00%)	100 (5,17%)	1299 (67,45%)	0,463 (0,02%)	-	1553 (80,64%)	373 (19,36%)
IAR 9.0	149 (8,05%)	97 (5,24%)	1258 (68,00%)	-	0,029 (0,00%)	1504 (81,29%)	346 (18,71%)
IAR 15.0	141 (8,16%)	91 (5,27%)	1187 (68,69%)	-	0,061 (0,00%)	1419 (82,12%)	309 (17,88%)
IAR 21.0	135 (8,28%)	87 (5,33%)	1134 (69,53%)	-	0,097 (0,01%)	1356 (83,14%)	275 (16,86%)
IAR 27.0	130 (8,43%)	84 (5,45%)	1093 (70,86%)	-	0,157 (0,01%)	1307 (84,75%)	235 (15,25%)

Observação: os dados entre parênteses significam a porcentagem de cada material em relação à massa total

4.2.2 Índice de consistência e teor de ar incorporado

O teor de água, os resultados médios de três repetições do índice de consistência e o teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Teor de água, índice de consistência e teor de ar incorporado

Arg	Teor de água (%)	Índice de consistência (mm)		Teor de ar incorporado (%)	
		Resultado médio	Desvio-padrão	Resultado médio	Desvio-padrão
Arg A	20,0	317	26	12,88	0,24
Arg B	16,0	260	18	30,12	0,31
Arg C	16,0	292	19	25,46	0,12
Arg D	20,0	293	26	5,49	0,12
Arg E	14,0	264	13	33,23	0,28
1 : 1 : 6	24,0	288	25	3,66	0,30
1 : 2 : 9	24,0	274	20	4,19	0,65
Brita	21,0	304	11	4,81	1,97
FPP 0.10	24,0	289	20	4,07	0,41
FPP 0.20	24,0	286	24	4,50	0,26
FPP 0.30	24,0	286	20	4,59	0,58
IAR 9.0	23,0	279	23	9,10	0,21
IAR 15.0	21,8	264	24	15,98	0,07
IAR 21.0	20,3	234	27	21,73	0,16
IAR 27.0	18,0	220	13	27,55	0,22

As argamassas industrializadas apresentaram grandes diversidades quanto ao teor de ar incorporado. Os fabricantes das argamassas industrializadas não forneceram a caracterização física e o consumo dos materiais, inclusive dos aditivos, de modo que se torna impossível a discussão dos efeitos do ar incorporado. Constata-se, no entanto, observando os resultados da Tabela 19, a redução significativa do consumo de água com a incorporação de ar. Quanto ao índice de consistência, as argamassas industrializadas apresentaram também grandes variações, influenciadas essencialmente pela natureza dos materiais constituintes, consumo de água, utilização de aditivos químicos e pelo teor de ar incorporado.

As argamassas produzidas sem aditivo incorporador de ar apresentaram baixos teores de ar incorporado, que na realidade são vazios aprisionados no interior da argamassa devido ao processo de mistura. Com a adição de fibras de polipropileno não ocorreu significativa incorporação de ar e, também, não influenciou no índice de consistência, possivelmente devido aos baixos teores de fibras de

polipropileno utilizados. Entretanto, Silva et al. (2003) e Silva (2006), que utilizaram concentrações maiores de fibras de polipropileno nas argamassas de revestimentos, constataram aumentos significativos na incorporação de ar com o aumento do teor de fibras. Segundo Silva (2006), em suas pesquisas, o efeito da adição de fibras de polipropileno no teor de ar incorporado pode ser representado por um perfil muito próximo ao ilustrado na Figura 107.

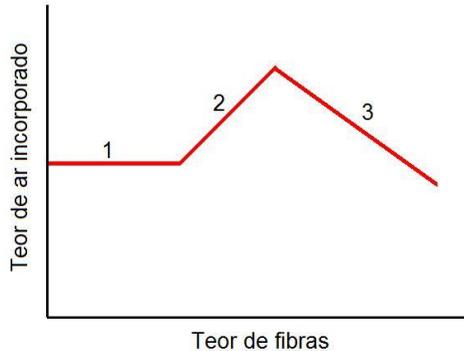


Figura 107 – Perfil da curva devido aos efeitos da adição de fibras no teor de ar incorporado (SILVA, 2006)

A existência e as características de cada região do perfil apresentado na Figura 107 dependem do teor de ar da matriz⁹ e do consumo de água da argamassa. Também dependem do teor, da dispersão e das características das fibras utilizadas. A redução do teor de ar incorporado com o aumento do teor de fibras, observado no estágio 3, seria devido, segundo Silva (2006) à dificuldade crescente de ativação do aditivo presente na matriz da argamassa, em função da redução da energia de mistura.

A argamassa 1 : 2 : 9 apresentou redução no índice de consistência em relação à argamassa 1 : 1 : 6, sendo que as duas argamassas consumiram a mesma quantidade de água. O aumento do consumo de cal, mais fino que o cimento e conseqüentemente com maior área específica, exigiu mais água na mistura para manter a mesma consistência.

⁹ O termo matriz refere-se à fase do compósito relativa à argamassa, sendo as fibras a outra fase do compósito.

A argamassa produzida com areia britada (Brita), apesar do menor consumo de água com relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6, apresentou maior índice de consistência. Neste caso, deve ter sido influenciada pela natureza das areias, já que o consumo dos materiais é praticamente igual, exceto água. Nas pesquisas de Silva et al. (2005), com areia britada e areia natural e com diferentes teores de finos (material passante na peneira de malha 0,075 mm), foi constatado que o fato das partículas da areia britada serem mais angulosas e menos esféricas que as partículas da areia natural é um fator mais relevante que o teor de finos na consistência das argamassas.

As argamassas produzidas com aditivos incorporadores de ar apresentaram-se trabalháveis e com plasticidade apropriada para serem executadas como revestimento, segundo a opinião de um experiente oficial pedreiro. Porém, observando os resultados da Tabela 20 constata-se que as argamassas com maiores teores de ar incorporado apresentaram menores consumos de água e também menores espalhamentos na mesa. Segundo Alves (2002), argamassas com aditivos incorporadores de ar são influenciadas pela introdução de parâmetros relacionados ao princípio ativo do aditivo. Portanto, a mesa de consistência (*flow table*) não é o instrumento adequado para determinar a quantidade de água para obter argamassas trabalháveis, quando se utiliza aditivo incorporador de ar. Fato que já foi alvo de discussão por diversos pesquisadores (CAVANI et al., 1997; BAUER et al., 2005; CASCUDO et al., 2005).

4.2.3 *Squeeze-flow*

As curvas apresentadas de carga (N) *versus* deformação (mm) do ensaio de *squeeze-flow* correspondem à média de três ensaios realizados para cada argamassa. Os resultados, quase na sua totalidade, apresentaram deformações com comportamento predominantemente no estágio plástico.

A Figura 108 apresenta as curvas de carga *versus* deformação obtidas para as argamassas industrializadas. Os resultados demonstram que a utilização de areia fina e de aditivos químicos, principalmente incorporador de ar, foram determinantes para não ocorrer o embricamento das partículas até a deformação máxima de 2,50 mm, sem atingir o limite da célula de carga de 5 kN. As argamassas com elevados teores de ar incorporado apresentam comportamentos essencialmente plástico, ocorrendo grandes deformações com aplicação de pequenas

cargas, praticamente não existindo atrito entre as partículas para deformações até 2,50 mm.

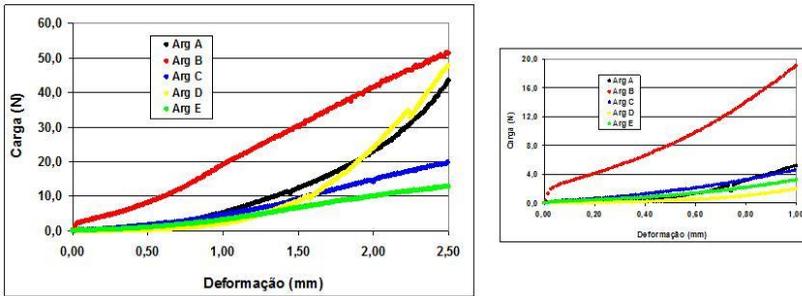


Figura 108 – Avaliação reológica pelo *squeeze-flow* das argamassas industrializadas. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 20,0 N de carga

O elevado teor de ar incorporado das argamassas C e E foram determinantes para a elevada deformação com reduzidas cargas. Segundo Antunes (2005), as bolhas de ar incorporadas estruturam a pasta de cimento, tornando-a mais viscosa, por outro lado, as bolhas de ar também auxiliam na lubrificação dos agregados, reduzindo a viscosidade da argamassa devido à postergação da atuação das forças de atrito.

Os fabricantes das argamassas industrializadas não forneceram o consumo dos materiais constituintes das argamassas avaliadas, nem as características e a concentração dos aditivos utilizados, o que dificulta uma análise mais aprofundada para melhor compreender os resultados dos ensaios realizados.

A Figura 109 apresenta as curvas de carga *versus* deformação, obtidas para as argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 e para a argamassa produzida com areia britada.

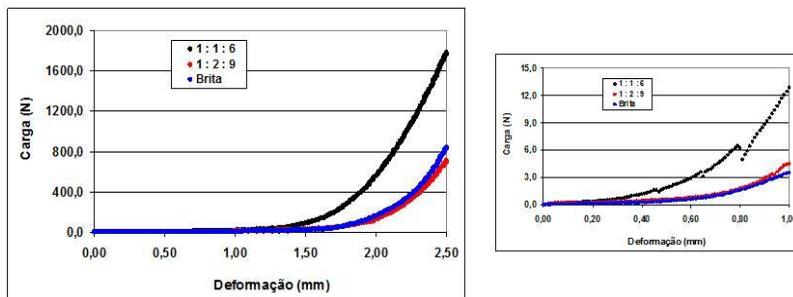


Figura 109 – Avaliação reológica pelo *squeeze-flow* das argamassas mistas com areia natural e britada. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 15,0 N de carga

No início do ensaio, com pequenas cargas aplicadas nas argamassas 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita, as argamassas apresentavam grandes deformações, quando as partículas sólidas ainda estavam em suspensão na presença da água. Após aproximadamente 2,00 mm de deformação, foram necessárias acentuadas cargas para as amostras apresentarem pequenas deformações, devido à aproximação das partículas iniciando o embricamento dos grãos de areia.

A argamassa 1 : 1 : 6 apresentou maior carga que a argamassa 1 : 2 : 9, para um mesmo nível de deformação influenciado possivelmente pelo maior teor de fino e menor teor de ar incorporado, sendo que ambas utilizaram o mesmo teor de água. As características e a natureza da areia britada e o consumo menor de água influenciaram para a obtenção de maior carga que a argamassa 1 : 2 : 9, para uma mesma deformação. Todavia, combinada com o maior teor de ar incorporado, exigiu ligeiramente maior carga para deformação de 2,50 mm. O ensaio foi encerrado com todas as argamassas atingindo a deformação máxima de 2,50 mm, sem atingir o limite da célula de carga de 5 kN.

A Figura 110 apresenta as curvas de carga *versus* deformação, obtidas para as argamassas produzidas com fibras de polipropileno.

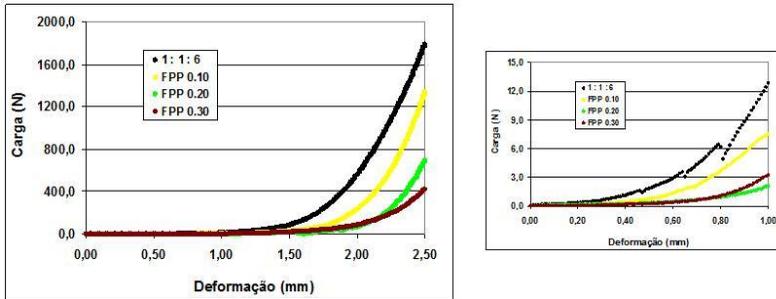


Figura 110 – Avaliação reológica pelo *squeeze-flow* das argamassas com fibras. Ampliação das curvas na região de 1,00 mm de deformação com 15,0 N de carga

As curvas apresentadas na Figura 110 apresentaram perfis semelhantes às curvas apresentadas na Figura 109, ou seja, com pequenas cargas e grandes deformações até 2,00 mm, em seguida com cargas acentuadas e com pequenas deformações.

Com o aumento do consumo de fibras de polipropileno, a carga necessária é menor para um mesmo nível de deformação, o que não foi possível ser observado no ensaio da mesa de consistência (*flow table*) apresentado na Tabela 20. Possivelmente a concentração maior de fibras promove o afastamento das partículas, pois segundo Mesbah e Buyle-Bodin (1999), as fibras dispersam e aumentam o diâmetro e o volume dos poros da argamassa. É possível que o ligeiro aumento do teor de ar incorporado com o aumento do teor de fibras também tenha favorecido para a redução das cargas.

A Figura 111 apresenta a expressiva correlação linear entre o consumo de fibras de polipropileno e a carga necessária para promover a deformação das amostras até 2,50 mm.

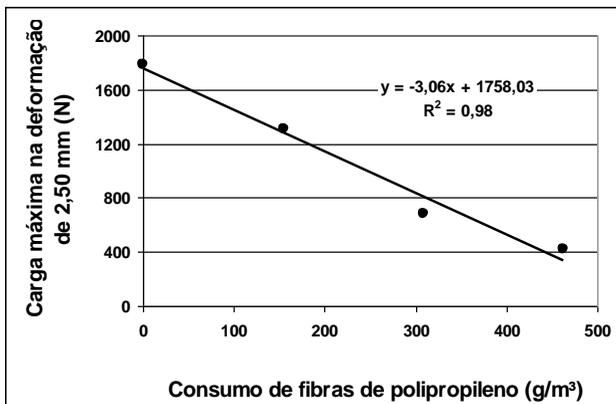


Figura 111 – Correlação entre consumo de fibras de polipropileno e carga máxima para deformar 2,50 mm as amostras das argamassas com fibras no ensaio de *squeeze-flow*

Os resultados obtidos no ensaio de *squeeze-flow* para as argamassas produzidas com ar incorporado estão apresentados na Figura 112.

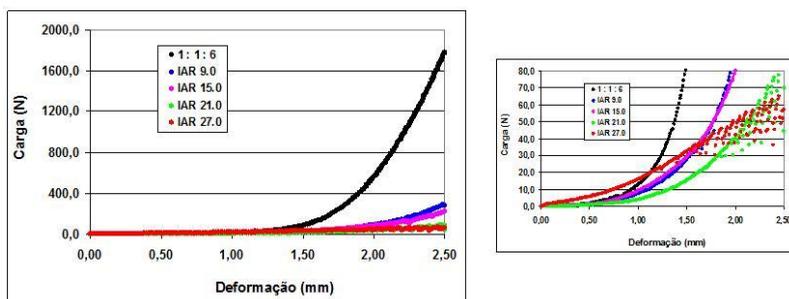


Figura 112 – Avaliação reológica pelo *squeeze-flow* das argamassas com ar incorporado. Ampliação das curvas na região de 2,50 mm de deformação com 80,0 N de carga

As microbolhas promovem o afastamento das partículas evitando o contato entre elas. A deformação depende da quantidade de microbolhas e da medida do seu diâmetro, que por sua vez é função do teor de aditivo e teor de água, dentre outros fatores.

O ensaio nas argamassas com ar incorporado foi estendido até a deformação de 5,00 mm para avaliar o perfil da curva com a redução da distância entre as partículas sólidas. O resultado está apresentado na Figura 113.

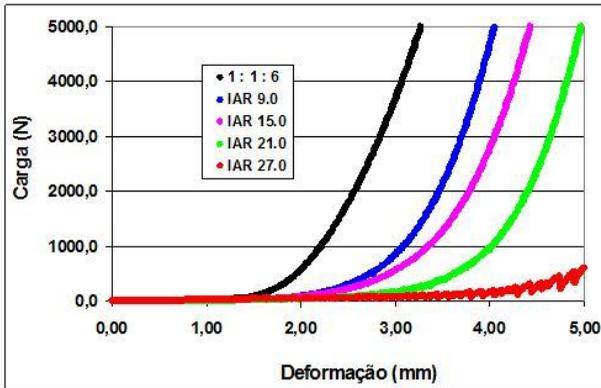


Figura 113 – Avaliação reológica pelo *squeeze-flow* das argamassas com ar incorporado até a deformação de 5,00 mm

A partir da deformação de 2,50 mm e estendendo a deformação até 5,00 mm, observam-se elevadas cargas para pequenas deformações. A redução do teor de ar incorporado provoca a redução dos distanciamentos entre as partículas sólidas, aumentando o atrito e iniciando o embricamento dos grãos. As cargas nas argamassas 1 : 1 : 6, IAR 9.0 e IAR 15.0 atingiram o limite da célula de carga de 5 kN antes da deformação máxima de 5,00 mm. A argamassa IAR 21.0 atingiu a deformação de 5,00 mm com a carga máxima de 5 kN enquanto que a argamassa IAR 27.0 com o maior teor de ar incorporado atingiu a máxima deformação com baixa carga de compressão.

A curva da argamassa IAR 27.0 apresenta um perfil similar à curva da argamassa industrializada B. A argamassa industrializada B, conforme mostra a Figura 108, apresentou cargas superiores às cargas apresentadas pelas argamassas industrializadas A e D para uma mesma deformação até aproximadamente 2,60 mm, enquanto que a argamassa IAR 27.0, para uma mesma deformação, apresentou cargas inferiores às cargas da argamassa de referência 1 : 1 : 6, após 1,15 mm; para as argamassas IAR 9.0 e IAR 15.0, após 1,65 mm; para a argamassa IAR 21.0 após 2,15 mm. A partir da deformação de 2,15 mm, a argamassa IAR 27.0 apresenta cargas inferiores a todas as outras argamassas, para

um mesmo nível de deformação, até a deformação máxima de 5,00 mm quando o ensaio é concluído.

O teor de ar incorporação correlaciona exponencialmente com a carga máxima para deformação de 2,50 mm, com expressivo coeficiente de determinação, conforme mostra a Figura 114, na qual se constata a redução da carga com o aumento do teor de ar incorporado para uma mesma deformação.

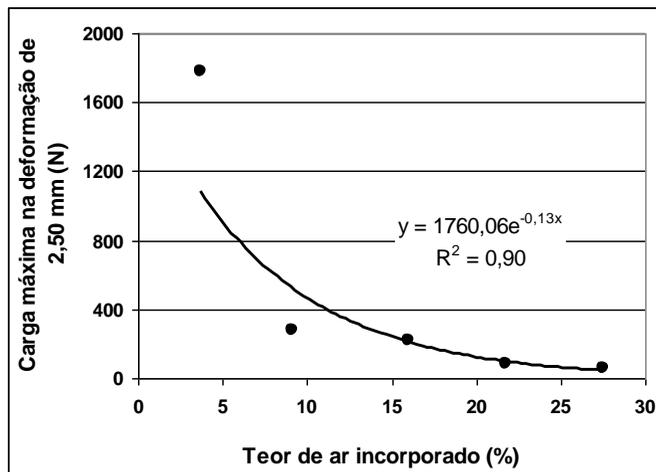
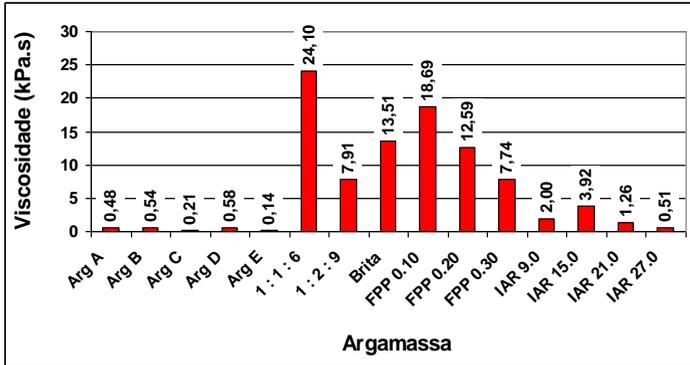
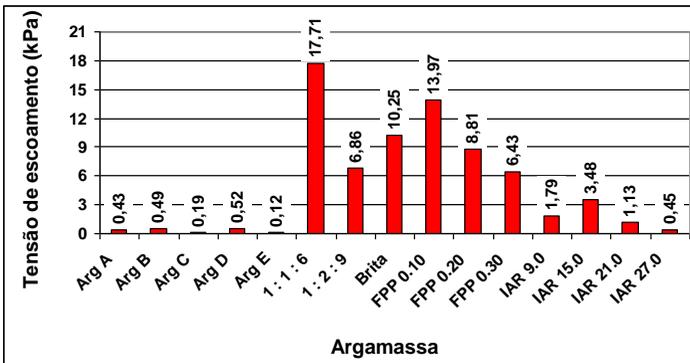


Figura 114 – Correlação entre teor de ar incorporado e carga máxima para deformar 2,50 mm as amostras das argamassas com ar incorporado no ensaio de *squeeze-flow*

Utilizando os resultados do ensaio de *squeeze-flow*, determinou-se a viscosidade plástica e a tensão de escoamento para a deformação de 2,50 mm através das Equações 5 e 6, respectivamente. Os resultados estão apresentados na Figura 115.



(a)



(b)

Figura 115 – Viscosidade plástica (a) e tensão de escoamento (b) para a deformação de 2,50 mm obtidos através das Equações 5 e 6, respectivamente, através do ensaio de *squeeze-flow*

Observando os resultados da viscosidade plástica e da tensão de escoamento apresentados na Figura 115, podem-se dividir as argamassas avaliadas em dois grupos. O grupo das argamassas com reduzida viscosidade plástica e tensão de escoamento devido a presença de ar incorporado e o grupo das argamassas com elevada viscosidade plástica e tensão de escoamento com baixo teor de ar incorporado.

A argamassa 1 : 1 : 6 apresentou maior tensão de escoamento que a argamassa 1 : 2 : 9, ou seja, é mais consistente apresentando menor deformação para um mesmo nível de carga.

As grandes deformações com a aplicação de baixas cargas nas argamassas com ar incorporado reduzem significativamente a viscosidade e a tensão de escoamento reduzindo, assim, a consistência apresentando menor resistência à deformação.

Com o aumento da concentração de fibras, conforme mostra a Figura 115, reduziu sensivelmente a viscosidade e a tensão de escoamento, apresentando ser mais fluida. Assim, com o aumento do volume de fibras a argamassa deforma mais para um mesmo nível de carga.

4.2.4 Retenção de água

A retenção de água foi determinada após 15 minutos de sucção no funil de Buchner modificado, conforme prescreve a norma NBR 13277 (ABNT, 2005). A Figura 116 apresenta os resultados médios de três determinações para cada argamassa.

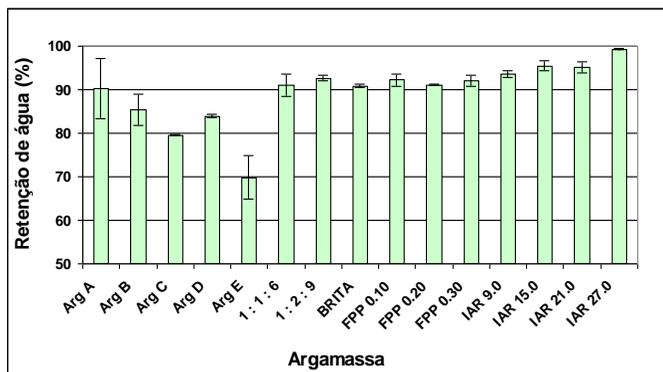


Figura 116 – Retenção de água após 15 minutos de sucção no funil de Buchner modificado

A retenção de água é influenciada pelo teor de partículas finas, seja dos ligantes ou dos inertes. O aumento do teor de finos não só aumenta a área total de contato das partículas sólidas com a água, fazendo com que haja maior quantidade de ligações entre dois componentes da mistura, como também diminui os espaços a serem percorridos pela água, dificultando sua remoção (PEREIRA, 2007).

A retenção de água da argamassa 1 : 2 : 9 foi superior a retenção de água da argamassa 1 : 1 : 6, porém pouco significativa. Conforme mostra a Tabela 14, a argamassa 1 : 2 : 9 apresentou 5,01% de finos (material seco passante pela peneira de malha 0,075), menor que o teor de finos apresentado pela a argamassa 1 : 1 : 6 (7,26%), porém essa diferença não foi suficiente para influenciar nos resultados da retenção de água.

O tipo de areia também não influenciou na retenção de água entre a argamassa Brita e a argamassa de referência 1 : 1 : 6. A argamassa Brita apresentou 12,72% de finos, enquanto que a argamassa 1 : 1 : 6 apresentou 7,26% de finos, favorecendo, então uma maior retenção de água para a argamassa Brita, porém não foi observada. Outros fatores devem ter influenciado como o teor de ar incorporado e o consumo de água.

As fibras de polipropileno não influenciaram significativamente nos resultados de retenção de água, devido, possivelmente ao baixo consumo de fibras. Entretanto, nas pesquisas de Silva (2006), a retenção de água reduziu significativamente quando foi adicionado 500 g/m³ de fibras de polipropileno à argamassa de revestimento.

A retenção de água das argamassas industrializadas não se mostrou influenciada pelo teor de ar incorporado nem pelo teor de finos (Tabela 13). A argamassa A apresentou maior retenção de água de todas as argamassas industrializadas e o menor teor de ar incorporado. A argamassa E, por sua vez, apresentou elevado teor de ar incorporado e baixa retenção de água. O fato da argamassa E não ter cal na sua formulação deve ter contribuído para a reduzida retenção de água.

Porém, as argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar apresentaram retenção de água proporcional ao teor de ar incorporado, inclusive com redução de consumo de aglomerantes. Conforme mostra a Figura 117, existe uma expressiva correlação linear da retenção de água com o teor de ar incorporado e, também, com o consumo de água.

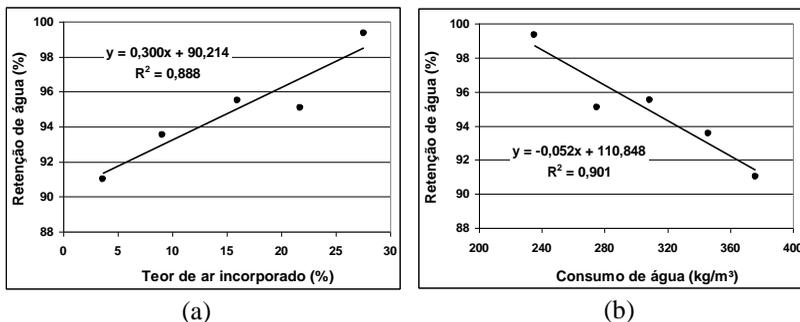


Figura 117 – Correlação linear das argamassas com aditivo da retenção de água: (a) com o teor de ar incorporado e (b) com o consumo de água

A retenção de água é influenciada pela quantidade de água utilizada na produção da argamassa. Conforme mostra a Figura 117(b), quanto menor o consumo de água, maior a retenção de água, ou seja, menor é a quantidade de água retirada por sucção do funil de Buchner.

4.2.5 Calorimetria de condução isotérmica

O ensaio de calorimetria de condução isotérmica consiste na monitoração do fluxo de calor liberado na hidratação do cimento. Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar se as variáveis independentes, especificamente teor de fibras de polipropileno e teor de ar incorporado, influenciam no perfil das curvas de liberação de calor.

As curvas de fluxo de calor liberado *versus* tempo de hidratação permitem obter os seguintes dados: período de indução, taxa de liberação de calor durante o período de aceleração (interpretada pela inclinação da curva de calorimetria) e o pico máximo de calor. A inclinação da curva de aceleração ($\text{tg } \alpha$) é obtida através do ajuste de uma reta na parte linear da curva de fluxo de calor em função do tempo em horas (BETIOLI, 2007). A Figura 118 ilustra a representação esquemática da curva de fluxo de calor de hidratação.

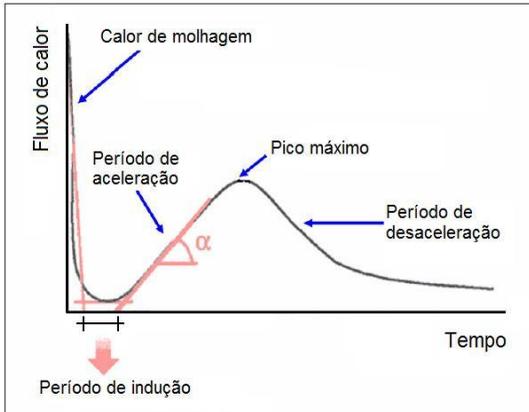


Figura 118 – Representação esquemática de curva de fluxo de calor de hidratação (QUARCIONI, 2008)

Segundo Quarcioni (2008), o período de indução é calculado a partir das intersecções do trecho horizontal com a reta traçada no período de pré-indução (calor de molhagem) e a reta obtida por extrapolação da linha de regressão do período de aceleração. Quanto mais reativa é a espécie química, maior será o valor do coeficiente de inclinação da curva de aceleração (α). É possível, também, através da curva de fluxo de calor determinar os tempos de início e fim de pega, que se dá no decorrer do período de aceleração.

Quarcioni (2008) utilizou em suas pesquisas dois traços de argamassas de cimento-cal nos traços 1 : 1 e 1 : 2 constatando que a presença da cal modifica a velocidade de hidratação do cimento. Os resultados de suas pesquisas demonstraram que o aumento da concentração de cal:

- Aumentou o período de indução;
- Reduziu acentuadamente o período de aceleração;
- Aumentou o período de desaceleração;
- Redução do tempo de pega e de consolidação;
- Reduziu a taxa de liberação de calor durante o período de aceleração.

Segundo o autor, a cal, por ter área específica aproximadamente dez vezes maior que a do cimento, aprisiona maior volume de água; e por um fenômeno de cargas de superfície há aglomeração das partículas, com aumento da viscosidade e conseqüente diminuição do tempo de pega.

As Figuras 119 a 122 apresentam os resultados da média de duas amostras para cada argamassa do ensaio de calorimetria de condução.

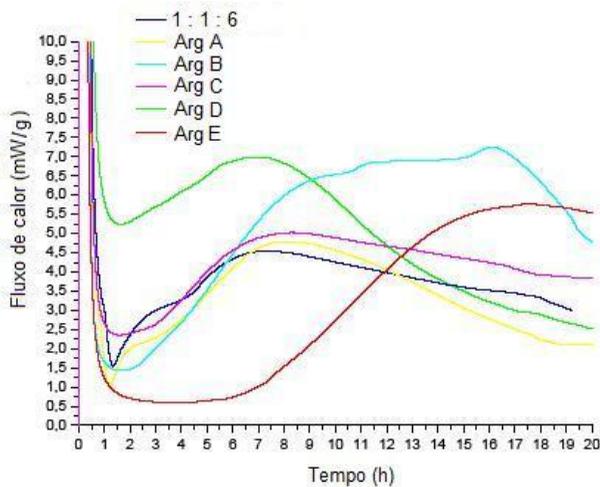


Figura 119 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas industrializadas

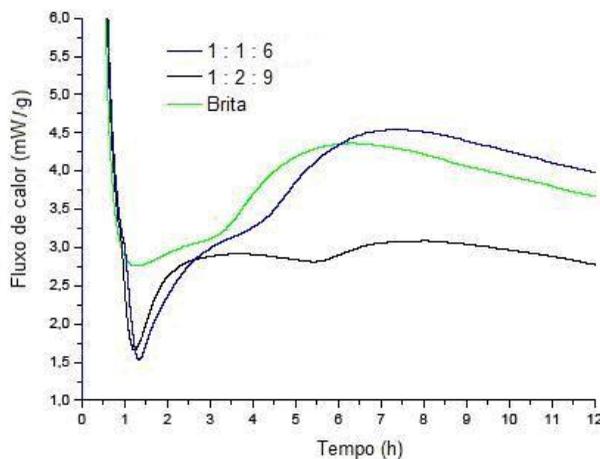


Figura 120 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas 1:1:6, 1:2:9 e Brita

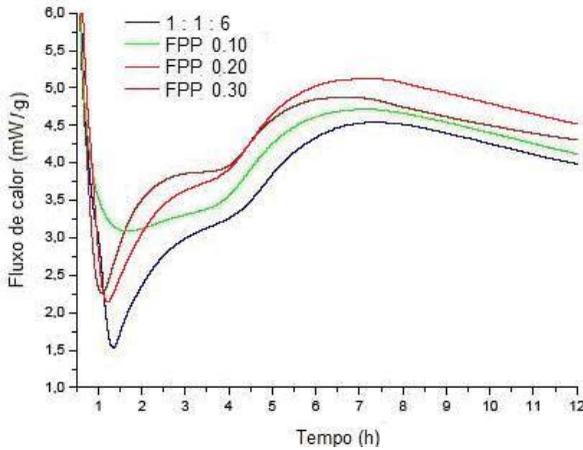


Figura 121 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas com fibras de polipropileno

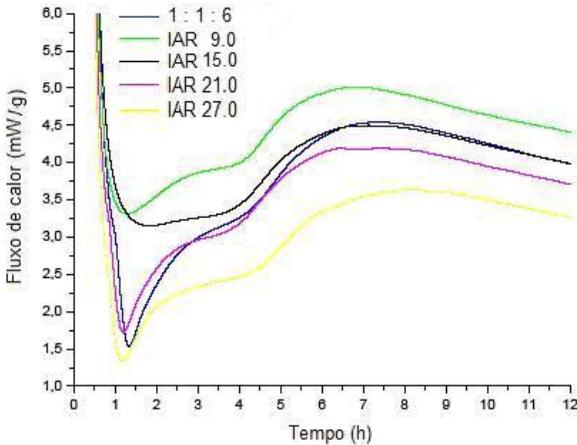


Figura 122 – Curvas de fluxo de calor de hidratação das argamassas com ar incorporado

A argamassa D, conforme mostra a Figura 119, apresentou o menor período de aceleração de todas as argamassas industrializadas, e como consequência, reduzido tempo de pega e, também, apresentou reduzido período de indução e reduzida taxa de liberação de calor, influenciado, possivelmente pelo baixo consumo de cimento e alta concentração de cal. Este fato também deve ter influenciado a argamassa

A que apresentou o menor período de indução de todas as argamassas e reduzido período de aceleração. A falta de cal na composição da argamassa E pode ter refletido nos elevados período de indução e de aceleração.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 120, é possível verificar a influência da cal na curva de fluxo de calor da argamassa 1 : 2 : 9, com reduzido período de aceleração e tempo de pega, em relação à curva da argamassa de referência 1 : 1 : 6. O teor maior de finos da argamassa Brita (Tabela 14) em relação à argamassa 1 : 1 : 6, deve ser um dos fatores que influenciou a redução do período de aceleração observada.

A presença de fibras de polipropileno nas argamassas não provocou modificações significativas na hidratação do cimento em relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6, exceto para a argamassa com 0,10% de fibras, conforme mostra a Figura 121. A curva de fluxo de calor da argamassa FPP 0.10 não apresentou coerência em relação à argamassa de referência nem com as demais curvas das amostras com fibras, possivelmente devido a erro na execução do ensaio.

As microbolhas de ar na matriz cimentícia provoca a separação das partículas do cimento, demandando um tempo maior para o embricamento dos cristais de etringita e do C-S-H para o enrijecimento, aumentando assim o período de aceleração (QUARCIONI, 2008).

Conforme mostra a Figura 122, o teor de ar incorporado influenciou no calor de hidratação do cimento. Com a incorporação de ar nas argamassas, verificou-se um aumento do período de dormência e redução do período de aceleração e da taxa de fluxo de calor em relação à argamassa de referência, mais evidenciado nas argamassas com menores teores de ar incorporado (IAR 9.0 e IAR 15.0) que nas argamassas com maiores teores de ar (IAR 21.0 e IAR 27.0). O ar incorporado produz dois efeitos acumulativos na argamassa: a separação das partículas do cimento pela presença das microbolhas de ar e redução do consumo de cimento, de cal e de água. A incorporação de ar favorece o aumento do período de aceleração, porém o menor consumo de cal induz ao aumento do período de aceleração. A redução do consumo de cimento e de cal é maior nas argamassas IAR 21,0 e IAR 27.0 que nas argamassas IAR 9.0 e IAR 15.0. Portanto, ao que parece, a influência nos resultados de fluxo de calor observados se deve mais ao consumo maior de cimento e cal das argamassas IAR 9.0 e IAR 15.0 em relação às argamassas IAR 21,0 e IAR 27.0 do que ao efeito provocado pela incorporação de ar.

4.3 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Retração por secagem

A retração por secagem acontece depois do fim de pega do cimento e ocorre devido à redução dimensional causada pela variação da tensão capilar (HUA et al., 1995; BENTZ, 2008), da pressão de desligamento e da variação da tensão superficial com a evaporação da água do poro da mistura cimentícia para o ambiente (MELO NETO, 2008). Portanto, no planejamento do programa experimental decidiu-se avaliar a retração por secagem conjuntamente com a perda de massa por evaporação da água. Os corpos-de-prova são desmoldados após 48 horas da mistura e imediatamente é anotada a primeira medida. Devido à grande variação dimensional e perda de água por evaporação nos instantes iniciais, as medidas são registradas de 10 em 10 minutos, aproximadamente, nas primeiras 24 horas. Devido ao número excessivo de registros, este ensaio não se estendeu para as argamassas industrializadas. Os resultados da retração por secagem e perda de massa estão apresentados nas Figuras 123 a 125.

Observando os resultados da retração por secagem, constata-se que nos primeiros dias, com a exposição brusca das amostras ao ambiente após a desmoldagem, a água presente nos poros esteve sujeita às pressões capilares, induzindo retrações elevadas. Após alguns dias, com o esvaziamento dos poros, as pressões capilares reduziram e ocorreu a estabilização da retração, ou em alguns casos, pode ter ocorrido expansão devida principalmente à carbonatação.

O resultado de perda de massa por evaporação da água em porcentagem representou a massa de água perdida em relação à massa inicial dos corpos-de-prova.

A perda de massa por evaporação da água foi acentuada nos primeiros dias após a desmoldagem das amostras devido à grande quantidade de água livre no interior dos poros e dos capilares. Com o decorrer da hidratação do cimento e a consolidação da porosidade das amostras, iniciou-se a redução da perda de massa até a estabilização.

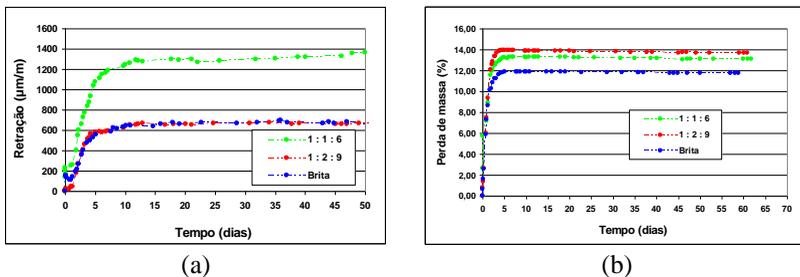


Figura 123 – Resultados médios das argamassas 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita da: (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água

A retração por secagem foi significativamente maior na argamassa 1 : 1 : 6 que nas argamassas 1 : 2 : 9 e Brita. As argamassas 1 : 1 : 6 e Brita apresentaram um consumo de cimento mais expressivo em relação a argamassa 1 : 2 : 9, conforme mostra a Tabela 19. Segundo Détriché et al. (1984), o aumento do consumo de cimento provoca aumento da proporção de capilares de menores dimensões em relação ao volume total de vazios, influenciando principalmente a retração por secagem. Acrescenta-se o fato de que as amostras ficaram confinadas e seladas para evitar a evaporação da água dentro de moldes de aço inox pelo período de 48 horas, induzindo a uma cura com maior quantidade de água. A argamassa Brita apresentou retração por secagem menor que a argamassa 1 : 1 : 6, sendo que ambas apresentaram praticamente o mesmo consumo de cimento. Isto se deve, possivelmente, ao menor consumo de água da argamassa Brita (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Porém, os resultados apresentados na Figura 123 mostram retração maior na argamassa 1 : 1 : 6 e perda de massa por evaporação da água menor em relação a argamassa 1 : 2 : 9, contrariamente ao que se esperava. Possivelmente a redução dos diâmetros dos capilares fez com que se houvesse maior dificuldade para a saída da água da argamassa endurecida, incorrendo em uma maior tensão capilar, tendo como consequência uma retração maior com menor perda de massa.

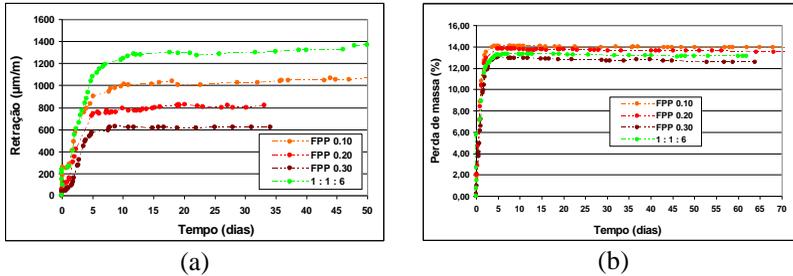


Figura 124 – Resultados médios das argamassas com fibras da: (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água

Ocorreu redução significativa da retração por secagem com o aumento do consumo de fibras de polipropileno, conforme mostra a Figura 124(a). O mesmo aconteceu com a perda de massa por evaporação da água, porém menos significativa. Mesbah e Buyle-Bodin (1999) conseguiram redução de 6% na retração por secagem com adição de 0,25% de fibras de polipropileno, sendo que para outros consumos de fibras, apresentaram efeitos desfavoráveis. Segundo os autores, as fibras dispersam e aumentam o diâmetro e o volume dos poros da argamassa, reduzindo a tensão capilar, conseqüentemente reduzindo a retração. Vale salientar que as pesquisas de Mesbah e Buyle-Bodin (1999) foram com fibras de polipropileno de 10 mm de comprimento em argamassas de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume. Grochoski et al. (2003) obtiveram redução da retração por secagem na faixa de 17% aos 120 dias de idade, também em argamassas de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume, com o teor de fibras de polipropileno de 600 g/m³.

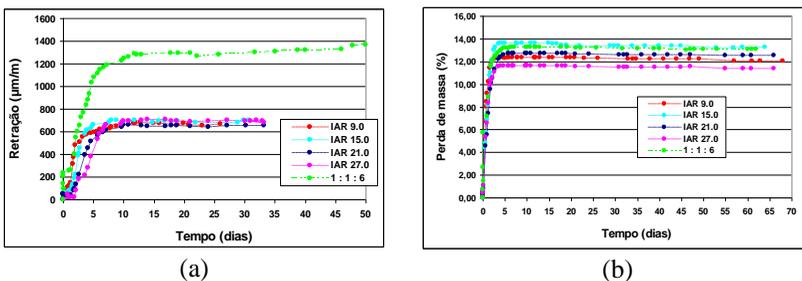


Figura 125 – Resultados médios das argamassas com ar incorporado da (a) retração por secagem e (b) perda de massa por evaporação da água

Analisando os resultados apresentados na Figura 125(a), constata-se que a incorporação de ar apresentou uma redução significativa na retração por secagem em relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6. Porém, o aumento do teor de ar incorporado a partir de 9,0% provocou pequenas alterações nos resultados da retração por secagem. Foram observadas, também, reduções na perda de massa por evaporação da água com o aumento do teor de ar incorporado, conforme mostram os resultados apresentados na Figura 125(b). Possivelmente o consumo menor de cimento e, principalmente, de água são os fatores determinantes na redução da retração por secagem e da perda de massa (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A estabilidade da retração por secagem nas argamassas com ar incorporado iniciou-se com aproximadamente 7 dias, enquanto que nas demais argamassas a estabilidade foi alcançada após 10 dias.

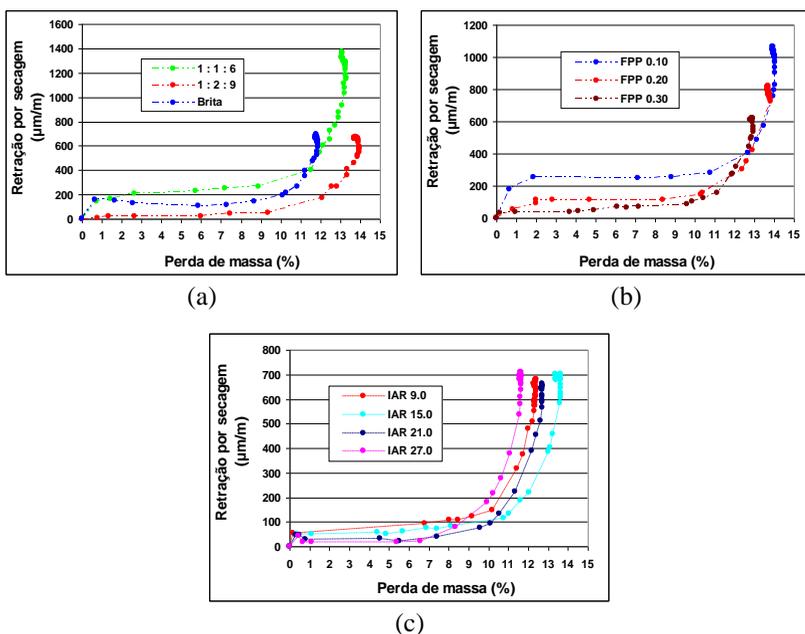


Figura 126 – Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração por secagem das argamassas: (a) 1 : 1 : 6, 1 : 2 : 9 e Brita; (b) com fibras de polipropileno e (c) com ar incorporado

Analisando as curvas de correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração por secagem apresentada na Figura 126,

percebe-se que existe um perfil característico que indica que o fenômeno de retração por secagem que ocorre em três fases distintas, conforme mostra a Figura 127.

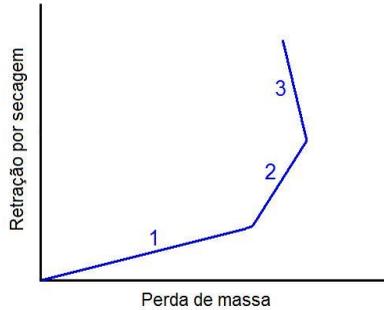


Figura 127 – Curva característica da correlação entre perda de massa e retração por secagem

Segundo Mesbah e Buyle-Bodin (1999), a fase 1 é caracterizada pela retração por secagem devido à perda de água dos poros da argamassa; a fase 2 corresponde a retração por secagem devido à saída de água dos capilares e a fase 3 corresponde a um ganho de massa ou estabilidade da perda de massa. Este fenômeno de ganho de massa pode estar associado à carbonatação devido à maior porosidade da matriz que facilita a penetração do gás carbônico.

4.3.2 Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido foi realizado na idade de 28 dias com seis corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm, sendo que três corpos-de-prova foram destinados para a determinação do módulo de elasticidade dinâmica e das resistências mecânicas. Os outros três corpos-de-prova foram colocados em estufa à 50°C pelo período de 15 dias para novamente determinar a densidade de massa e realizar os ensaios de capilaridade, absorção de água e índice de vazios. Os resultados médios de três determinações da densidade de massa antes e depois da estufa estão apresentados na Figura 128.

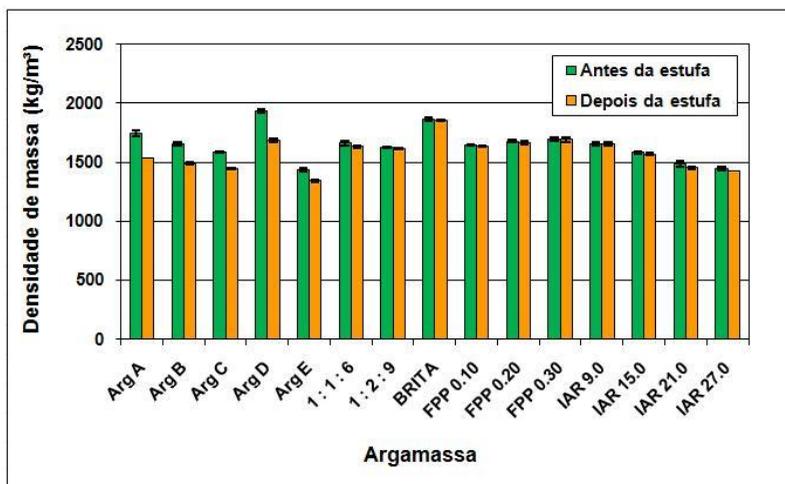


Figura 128 – Densidade de massa aparente no estado endurecido

A argamassa produzida com areia britada apresentou densidade de massa significativamente maior que a argamassa de referência 1 : 1 : 6, produzida com areia natural, devido ao baixo teor de ar incorporado e, também, pela maior massa específica da areia em relação à areia natural. Outro fator determinante na diferença da densidade de massa entre as argamassas 1 : 1 : 6 e Brita é o consumo de água. A primeira consumiu mais água que a segunda, conseqüentemente com maior índice de vazios no estado endurecido, reduzindo assim a densidade de massa.

As argamassas industrializadas apresentaram resultados diversificados para a densidade de massa no estado endurecido devido, principalmente, às grandes variações no consumo de água e de ar incorporado.

As argamassas produzidas com fibras apresentaram discreto aumento da densidade de massa com o aumento de concentração de fibras, devido principalmente ao baixo teor de fibras.

Não houve diferença significativa na densidade de massa da argamassa 1 : 1 : 6 e da argamassa 1 : 2 : 9, devido principalmente ao mesmo consumo de água.

Com a incorporação de ar, houve redução do consumo de materiais conforme mostra a Tabela 19, e também redução da densidade de massa no estado endurecido.

4.3.3 Resistências à compressão e à tração na flexão

A Figura 129 apresenta os resultados médios de três determinações para a resistência à tração na flexão e de seis determinações para a resistência à compressão determinados na idade de 28 dias.

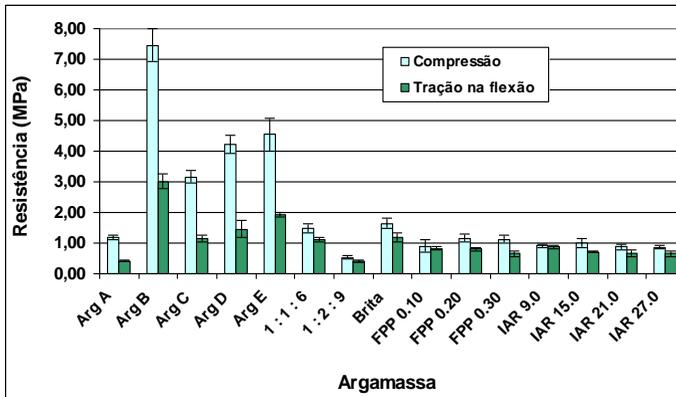


Figura 129 – Resultados médios das resistências à compressão e à tração na flexão

A capacidade da argamassa de resistir a esforços de compressão é uma propriedade mais exigida para argamassas de assentamento do que para argamassas de revestimento. Porém, a capacidade de resistir aos esforços de tração, tanto de aderência quanto de flexão, já é um requisito fundamental para argamassas de revestimento. Muitas vezes, a baixa resistência à tração na flexão não permite ao revestimento suportar os esforços de tensões, provocando assim as patologias. A areia britada é uma variável importante quando se trata de melhorar as resistências mecânicas, pois conforme pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 129, a argamassa produzida com areia britada apresentou maiores resistências à compressão e à tração na flexão que todas as outras argamassas, exceto as argamassas industrializadas, fato também comprovado por Silva e Campiteli (2008).

Os resultados das resistências à compressão e à tração na flexão como mostram a Figura 129 têm perfis similares, sendo que as argamassas industrializadas apresentaram maiores diferenças entre estas duas resistências que possivelmente foram influenciadas, principalmente, pelo consumo de água e de cimento.

O teor de finos das argamassas industrializadas (material passante pela peneira de malha 0,075 mm) é um fator indicativo do consumo de cimento. As resistências mecânicas das argamassas estão diretamente associadas ao consumo de água e de cimento e, também, com o teor de ar incorporado. Analisando os resultados das resistências das argamassas industrializadas, apresentadas na Figura 129, com o teor de finos apresentado na Tabela 13 e com o teor de água e de ar incorporado apresentado na Tabela 20, é possível constatar que há uma compensação do elevado teor de ar incorporado com um consumo maior de cimento e consumo menor de água, o que explica uma resistência à compressão superior a 7,0 MPa apresentada pela argamassa B. Em compensação, a argamassa A, com baixa resistência mecânica, foi uma das duas argamassas industrializadas que apresentou maior consumo de água.

A redução das resistências mecânicas da argamassa 1 : 2 : 9 com relação à argamassa 1 : 1 : 6 pode ser atribuída ao consumo maior de cal e à redução do consumo de cimento.

A adição de fibras de polipropileno não influenciou significativamente as resistências à compressão e à tração na flexão, devido possivelmente ao baixo consumo de fibras. Porém Segundo Veiga (1997), em argamassa de revestimento não se consegue aumento efetivo da resistência à tração na flexão com adição de fibras inferior a 1% do volume total da argamassa. Grochoski et al. (2003) também não constataram influência nas resistências à compressão e à tração na flexão com adição de 300 g/m³, 600 g/m³ e 900 g/m³ de fibras de polipropileno em argamassa de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume, fato atribuído ao baixo consumo de fibras. Nas pesquisas de Silva (2006) com argamassas de revestimento no traço em volume 1 : 1 : 6, onde foram utilizados consumos de 500 g/m³, 1000 g/m³ e 1500 g/m³ com diferentes teores de água, foi concluído que as fibras influenciaram no comportamento mecânico quando estas passam a alterar o comportamento reológico da argamassa com o acréscimo de água. Segundo a autora, nas argamassas com teor de água ideal, as fibras não influenciaram significativamente nas resistências mecânicas. Bauer e Cortez (2001) utilizaram fibras de polipropileno em argamassa de revestimento com consumo de 500 g/m³, 1500 g/m³ e 3000 g/m³. Os autores constataram pequena influência das fibras na resistência à compressão e melhoria significativa na resistência à tração na flexão, sendo mais evidente para o consumo de 1500 g/m³.

Consumo de água e de cimento são fatores relevantes na resistência à compressão de materiais cimentícios. A Lei de Abrams é muito utilizada como função entre a resistência à compressão e a relação

água/cimento em concretos e, segundo Silva e Campiteli (2008) é possível correlacionar exponencialmente também relação água/cimento com resistências mecânicas em argamassas de cimento, cal e areia.

A correlação exponencial entre relação água/cimento e as resistências à compressão e à tração na flexão das argamassas produzidas com ar incorporado estão apresentadas na Figura 130.

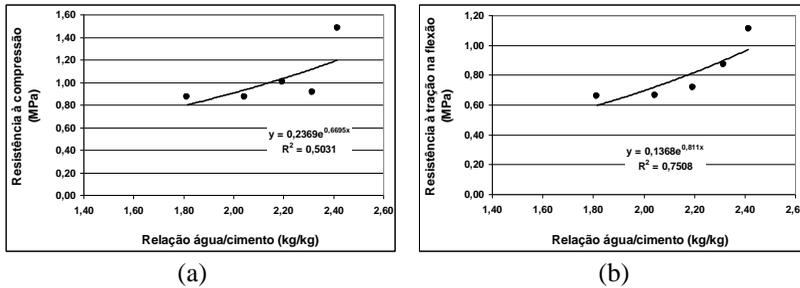


Figura 130 – Correlação exponencial da relação água/cimento das argamassas com aditivo incorporador de ar (a) com resistência à compressão e (b) com resistência à tração na flexão

Os resultados da Figura 130 demonstram que com consumo maior de água, as argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar apresentaram resistências de compressão e de tração na flexão também maiores, contrariamente ao que era esperado. Logo, a redução das resistências se deve à incorporação de ar e não à redução do consumo de água.

A Figura 131 apresenta a correlação linear entre o teor de ar incorporado e as resistências à compressão e à tração na flexão, demonstrando apesar da baixa correlação linear observada na Figura 131(a) que existe influência do ar incorporado nas resistências mecânicas das argamassas.

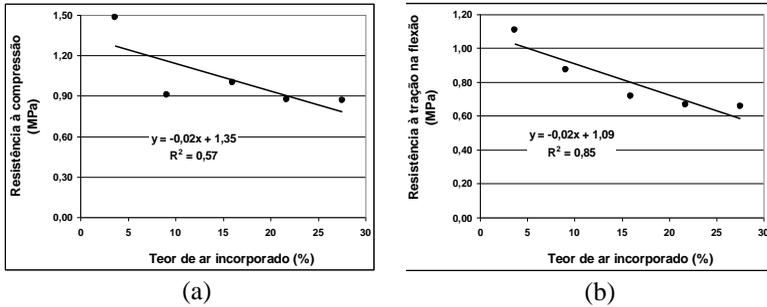


Figura 131 – Correlação linear do teor de ar incorporado das argamassas com aditivo incorporador de ar (a) com resistência à compressão e (b) com resistência à tração na flexão

4.3.4 Módulo de elasticidade

A Figura 132 apresenta os resultados médios do módulo de elasticidade realizados em três corpos-de-prova prismáticos para cada argamassa utilizando ondas ultra-sônicas. Não foi determinado o módulo de elasticidade para as argamassas industrializadas, devido ao grande número de ensaios que foram realizados simultaneamente.

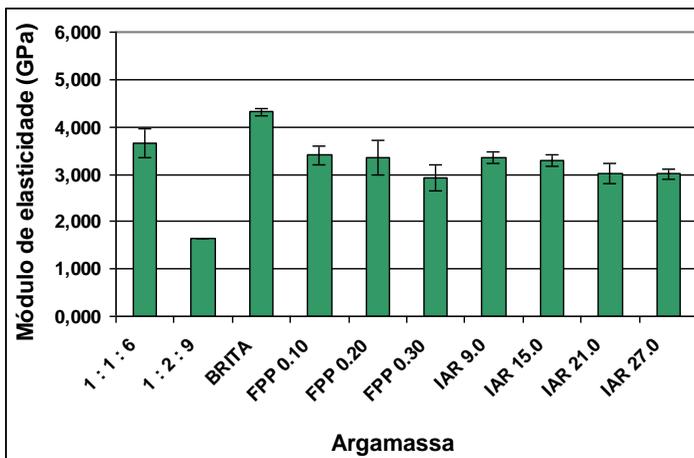


Figura 132 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmica

Os revestimentos devem apresentar capacidade de deformação de modo a absorver as contrações e expansões quando da saída da água devido à sucção do substrato ou por evaporação, sem fissurar. A capacidade de deformação do revestimento está associada ao módulo de elasticidade da argamassa. Argamassas com menor módulo de elasticidade apresentam maior capacidade de deformação.

Conforme mostra a Figura 132, a argamassa 1 : 2 : 9 apresentou o menor módulo de elasticidade que todas as outras argamassas, sendo o aumento do consumo de cal e a redução do consumo de cimento os fatores determinantes. Ocorreu redução do módulo de elasticidade com a adição de fibras de polipropileno, sendo mais acentuada na argamassa FPP 0.30, e com a incorporação de ar influenciado essencialmente pela redução do consumo de água e de cimento.

O tipo de areia e a redução do consumo de água influenciaram no resultado maior do módulo de elasticidade da argamassa Brita em comparação com argamassa de referência 1 : 1 : 6, fato constatado também por Silva e Campiteli (2008). Ainda segundo os autores, existe uma expressiva correlação exponencial entre o módulo de elasticidade dinâmica e as resistências à compressão e à tração na flexão conforme pode ser observada nos resultados apresentados na Figura 133.

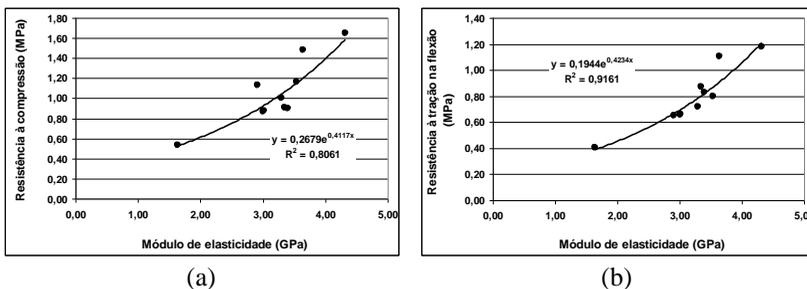


Figura 133 – Correlação exponencial do módulo de elasticidade com (a) resistência à compressão e (b) resistência à tração na flexão

A Figura 134 mostra que existe uma correlação linear entre fibras de polipropileno e ar incorporado com o módulo de elasticidade.

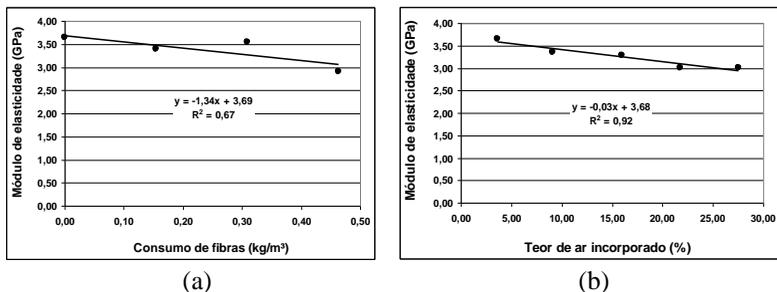


Figura 134 – Correlação linear do módulo de elasticidade: (a) com teor de fibras e (b) com teor de ar incorporado

4.3.5 Capilaridade

Os revestimentos de argamassa têm como função primordial numa edificação, entre outras, a proteção contra a água, principalmente se forem revestimentos de fachadas. A permeabilidade pode ser compreendida através da movimentação da água pelos capilares do revestimento de argamassa utilizando o coeficiente de capilaridade. A Figura 135 apresenta os resultados médios de três determinações para cada argamassa realizada na idade de 28 dias. Não foram determinados os coeficientes da capilaridade das argamassas industrializadas.

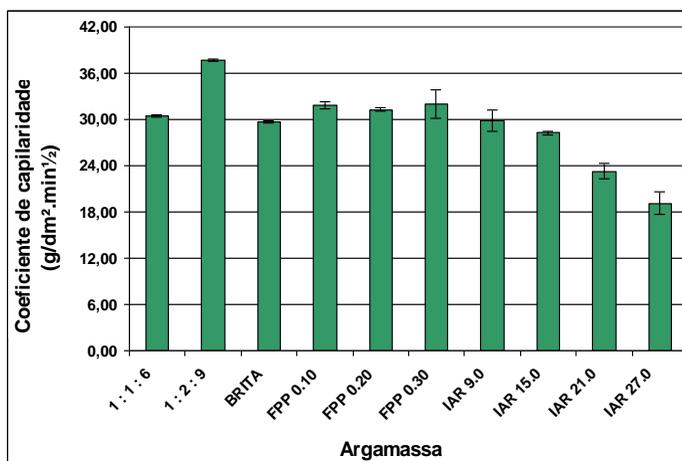
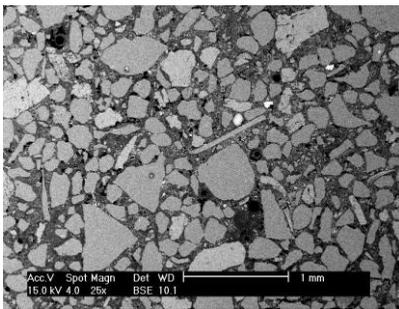


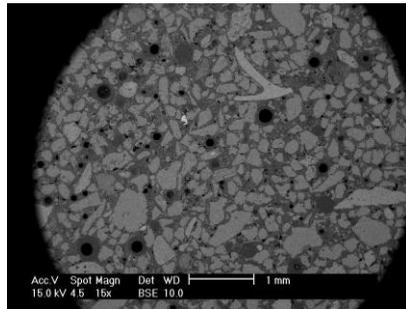
Figura 135 – Resultados médios do coeficiente de capilaridade

A argamassa 1 : 2 : 9 apresentou o maior coeficiente de capilaridade de todas as argamassas avaliadas, possivelmente devido ao maior consumo de cal, que aumenta a proporção de capilares de menores diâmetros (SILVA et al., 2007). O tipo de areia da argamassa Brita não influenciou no coeficiente de capilaridade quando comparada com a argamassa de referência 1 : 1 : 6 e, a adição de fibras de polipropileno também não mostrou influência na ascensão capilar da água, possivelmente devido ao reduzido teor de fibras nas argamassas.

A ascensão capilar da água nos corpos-de-prova foi influenciada pelas microbolhas de ar incorporadas nas argamassas pela ação do aditivo incorporador de ar. A Figura 136 apresenta as micrografias obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) na argamassa de referência 1 : 1 : 6 e nas argamassas preparadas com aditivo incorporador de ar. As microbolhas de ar nas imagens estão representadas pelas regiões preenchidas com resina, conforme mostra a Figura 136(c). Possivelmente as áreas mais escuras no interior de algumas bolhas de ar são regiões onde a resina não conseguiu penetrar, ou não houve tempo suficiente para isso acontecer antes do endurecimento.



(a)



(b)

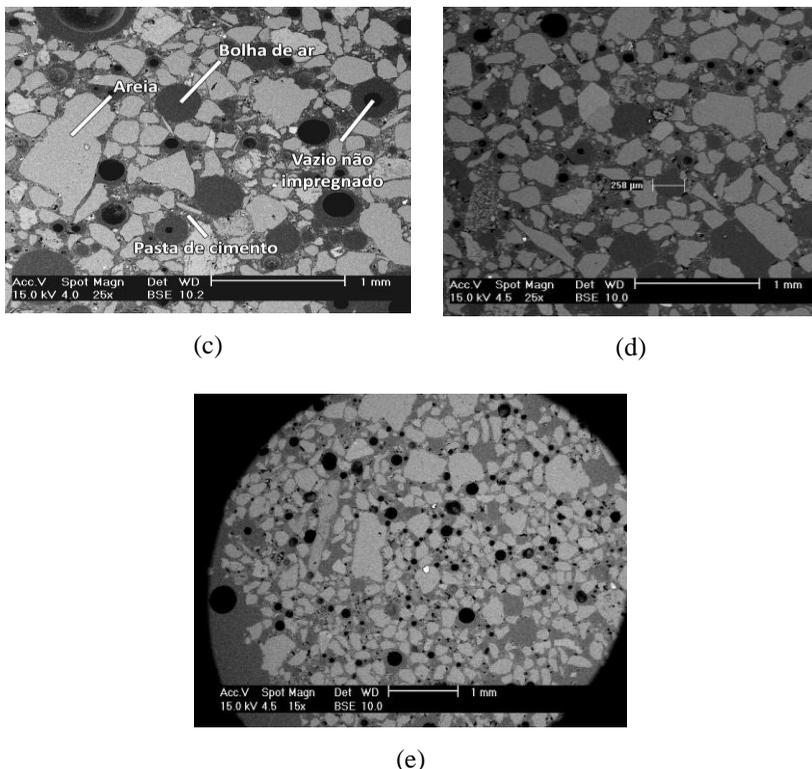


Figura 136 – Micrografia das argamassas com ar incorporado. (a) 1 : 1 : 6; (b) IAR 9.0; (c) IAR 15.0; (d) IAR 21.0; (e) IAR 27.0

Na amostra da argamassa de referência 1 : 1 : 6, sem aditivo incorporador de ar, também é possível observar a ocorrência de microbolhas arredondadas, que correspondem ao ar aprisionado devido ao processo de mistura para produção da argamassa. Ao se analisar a imagem da argamassa IAR 9.0 é possível observar uma quantidade expressivamente maior de microbolhas de ar em relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6, sendo que essa quantidade cresce com o aumento de teor de aditivo.

As dimensões das partículas observadas sobre a superfície plana da amostra não são representativas, visto que a secção visualizada pode não interceptar as partículas pelo seu diâmetro. Apesar disso, acredita-se que as bolhas de ar incorporado apresentam dimensões distintas dentro de uma mesma amostra.

Observando as micrografias apresentadas na Figura 136 pode-se notar que as microbolhas de ar interrompem a conectividade entre os poros capilares, reduzindo a ascensão capilar da água com o aumento de aditivo incorporador de ar (HANZIC e ILIC, 2003).

4.3.6 Absorção de água e índice de vazios

As Figuras 137 e 138 apresentam os resultados médios de três determinações da absorção de água e índice de vazios, respectivamente, após imersão em água e após imersão e fervura para cada argamassa, exceto para as argamassas industrializadas.

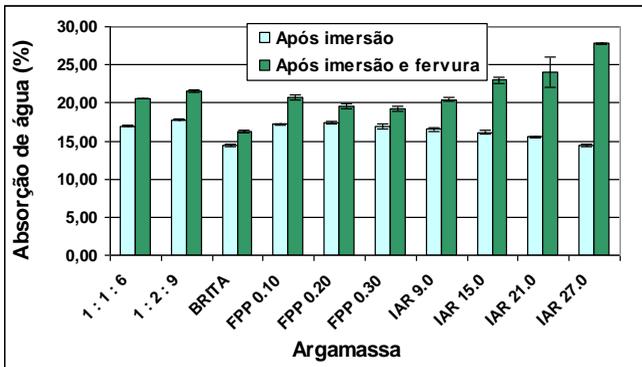


Figura 137 – Absorção de água após imersão e após imersão e fervura

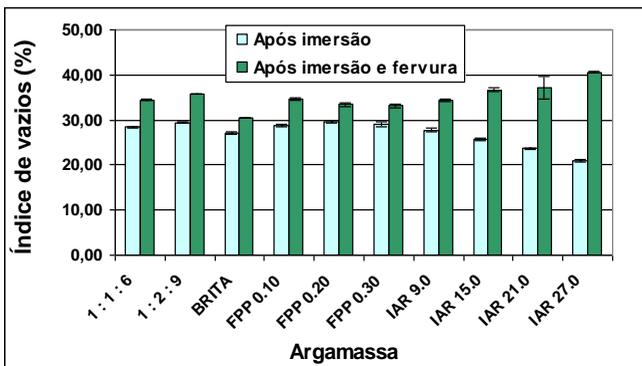


Figura 138 – Índice de vazios após imersão e após imersão e fervura

Os resultados de absorção de água e de índice de vazios apresentaram baixa dispersão, antes e depois da fervura, exceto para a argamassa IAR 21.0 devido à perda de massa após a fervura de um dos corpos-de-prova.

Observando os resultados apresentados nas Figuras 137 e 138, constata-se que a absorção de água e o índice de vazios na argamassa de referência 1 : 1 : 6 apresentaram maiores resultados que nas argamassas preparadas com aditivo incorporador de ar, nos ensaios em que os corpos-de-prova apenas foram imersos em água. Inclusive, a absorção de água e o índice de vazios nas argamassas com ar incorporado aumentam com o aumento do teor de ar incorporado. Porém, após a fervura por 5 horas, ocorreu o que seria esperado, ou seja, argamassas com maior quantidade de ar incorporado apresentaram maior absorção de água e índice de vazios. Conclui-se então que apenas submergindo a imersão dos corpos-de-prova em água não é suficiente para que ocorra a penetração da água no interior das microbolhas de ar, havendo necessidade de utilização de uma técnica mais incisiva, como vácuo ou fervura (SILVA et al., 2009).

A redução da densidade de massa aparente no estado endurecido das argamassas com maiores teores de ar incorporado pode ser confirmada pelo aumento no volume de vazios após imersão e fervura.

Argamassas de revestimentos exigem quantidades de água maiores do que a necessária para a hidratação do cimento, principalmente para conferir a plasticidade ideal para a aplicação. A saída desta água livre da argamassa que não foi utilizada na hidratação do cimento é responsável, em parte, pela formação dos vazios da argamassa à medida que se inicia o endurecimento. Porém, conforme mostra a Figura 139, a formação dos vazios nas argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar foi mais influenciada pelas microbolhas de ar do que pelo consumo de água.

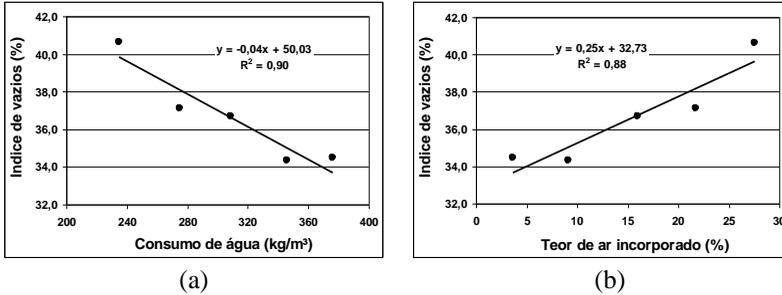


Figura 139 – Correlação das argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar entre índice de vazios e (a) consumo de água; (b) teor de ar incorporado

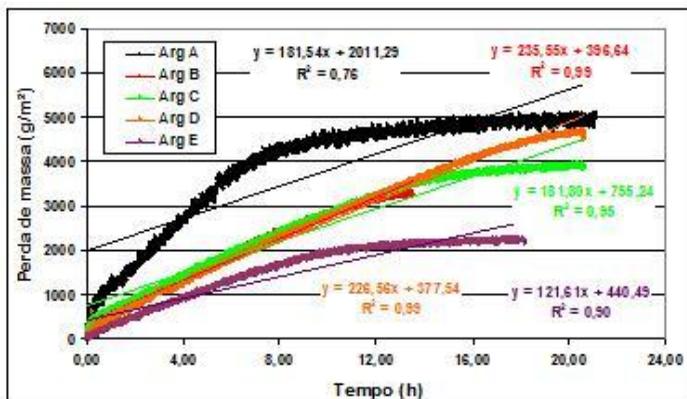
4.4 PERDA DE MASSA POR EVAPORAÇÃO DA ÁGUA

A perda de massa por evaporação da água foi determinada através da imprimação da argamassa em molde colocado sobre balança digital, com utilização de vento com velocidade de 2,30 m/s na superfície do molde. O ensaio foi realizado simultaneamente ao ensaio de avaliação da fissuração.

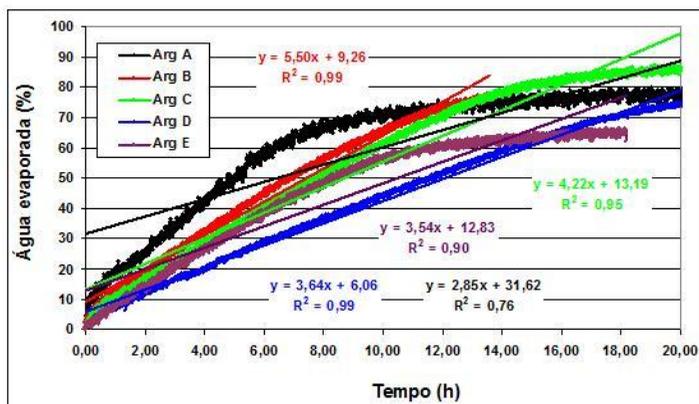
A perda de massa apresentou acentuada correlação linear com o tempo para todas as argamassas, demonstrado pela tendência linear nas primeiras 24 horas. O coeficiente angular da função linear ajustada corresponde à taxa média de evaporação da água por hora.

A Figura 140(a) apresenta os resultados da perda de massa expressa pela quantidade de água evaporada por área da superfície da amostra em função do tempo das argamassas industrializadas.

A evaporação da água depende de vários fatores: inerentes aos materiais, das condições ambientais, e também do consumo de água da mistura, dentre outros. Através da massa da argamassa utilizada no molde, do consumo de água (Tabela 19) e da densidade de massa no estado fresco foi possível estimar a quantidade de água de cada argamassa. A Figura 140(b) apresenta a porcentagem de água evaporada obtida a partir da quantidade total de água da argamassa.



(a)



(b)

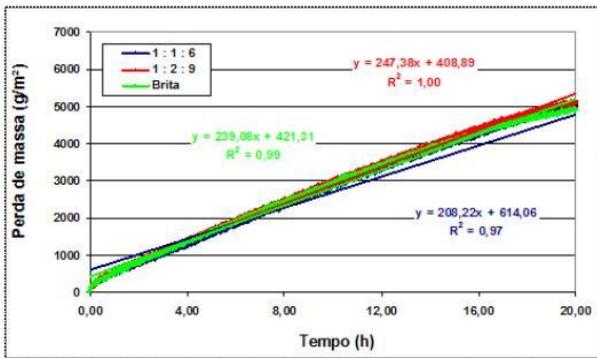
Figura 140 – (a) Perda de massa por evaporação da água das argamassas industrializadas e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água

As argamassas industrializadas apresentaram diferentes comportamentos quanto à perda de massa por evaporação da água, devido principalmente às características e concentração dos aditivos químicos utilizados na sua formulação. As argamassas apresentaram uma acentuada evaporação de água influenciada, principalmente, pelo vento.

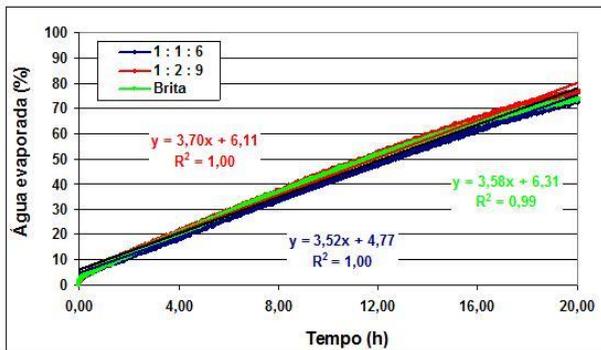
A argamassa industrializada B apresentou a maior taxa de perda de massa ($235,55 \text{ g/m}^2/\text{h}$) e o maior percentual de água evaporada

(5,50%/h) de todas as argamassas industrializadas e a argamassa E apresentou a menor perda de massa (121,61 g/m²/h) e baixo percentual de água evaporada (3,54%/h). A argamassa C perdeu aproximadamente 85% da água utilizada na mistura com 20 horas de ensaio. As argamassas B e E apresentaram baixo consumo de água e alto teor de ar incorporado. Conclui-se, então, que estas variáveis não influenciaram na evaporação de água.

Os resultados da perda de massa por evaporação da água e a porcentagem de água evaporada das argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 e da argamassa produzida com areia britada estão apresentados na Figura 141.



(a)



(b)

Figura 141 – (a) Perda de massa por evaporação da água da argamassa mista com areia natural e areia britada e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água

A Tabela 14 apresenta os teores de finos das argamassas 1 : 1 : 6 (7,26%), 1 : 2 : 9 (5,01%) e Brita (12,72%), que correspondem ao material seco passante pela peneira de malha 0,075 mm. Esse material fino que corresponde ao pulverulento da areia, cimento e cal, tem a propriedade de aumentar a capacidade de retenção de água devido à elevada área específica. Portanto, a maior perda de massa por evaporação da argamassa 1 : 2 : 9 (247,38 g/m².h) com relação a argamassa 1 : 1 : 6 (208,22 g/m².h) deve ser devido ao menor teor de finos. Outro fator que também favorece o aumento da perda de massa da argamassa 1 : 2 : 9 é o consumo menor de cimento, produzindo assim maior número de capilares, o que facilita a saída da água.

A argamassa Brita com que tem maior teor de finos (12,72%) deveria apresentar maior retenção de água, ou seja, menor taxa de água evaporada, porém não foi o que aconteceu. A areia britada, conforme mostra a Tabela 10, tem massa específica de 2789 kg/m³, enquanto que a massa específica da areia natural é 2669 kg/m³. A argamassa com teor de finos maior produz mais pasta na matriz, e com massa específica maior provoca um adensamento com a acomodação das partículas, deslocando a água para a superfície do revestimento (exsudação). Esta água livre evapora com maior facilidade e, após a secagem, ficam manchas na superfície da argamassa. Este fenômeno com a areia britada foi observado no início da realização dos ensaios, no molde do ensaio de perda de massa por evaporação da água e nos três moldes do ensaio de fissuração, porém não ocorreu nas argamassas produzidas com areia natural, conforme mostra a Figura 142. Outro fator que induz ao melhor empacotamento dos agregados britados, segundo Silva et al. (2005), é a forma menos arredondada e mais angulosa das partículas da areia britada em relação às partículas da areia natural.

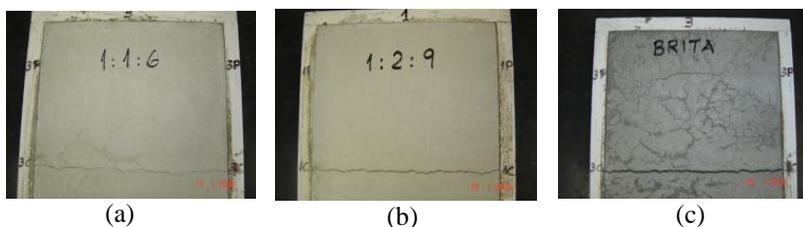
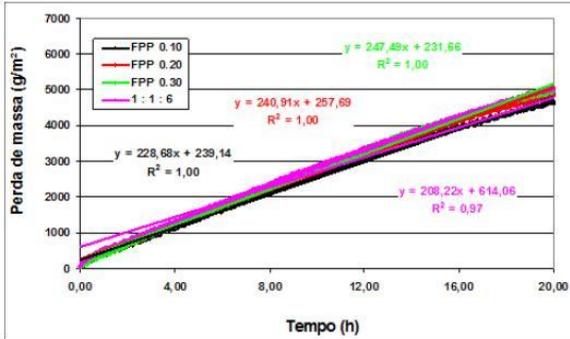
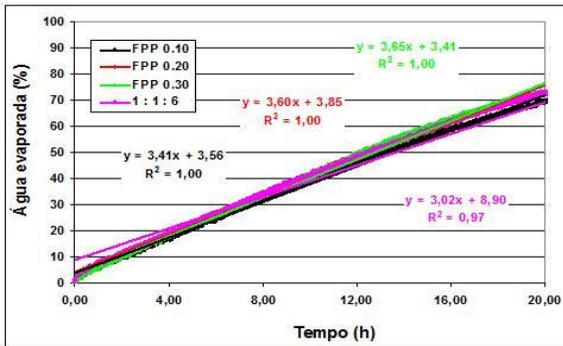


Figura 142 – Detalhes das aparências das superfícies das argamassas após 20 horas de exposição

A Figura 143 apresenta os resultados de perda de massa por evaporação da água e a porcentagem de água evaporada das argamassas produzidas com fibras de polipropileno.



(a)



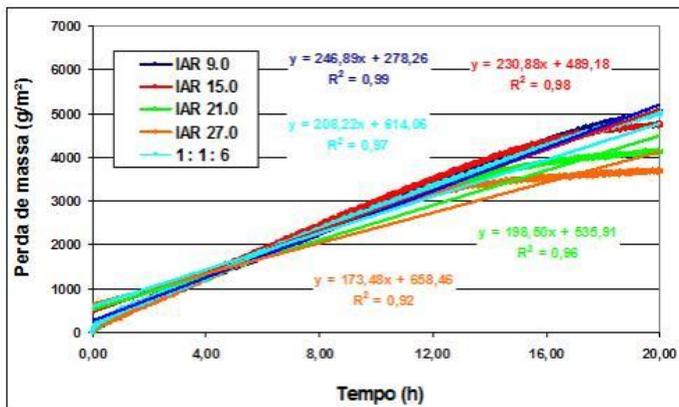
(b)

Figura 143 – (a) Perda de massa por evaporação da água da argamassa com fibras e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água

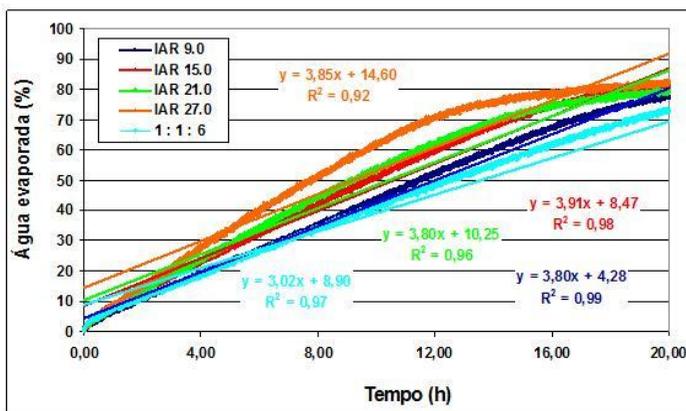
O aumento da concentração de fibras não reduziu significativamente a taxa de água evaporada, fato constatado também por Wongtanakitcharoen e Naaman (2007) com adição de 0,1% a 0,4% do volume total do concreto. Os autores não observaram efeitos na perda de massa por evaporação da água, atribuindo estes resultados à baixa concentração de fibras. Salientam, ainda, que de algum modo a exsudação é reduzida, sem, porém afetar a perda de massa.

Possivelmente, as fibras induzem um aumento das dimensões capilares (MESBAH e BUYLE-BODIN, 1999), facilitando a saída da água do interior da argamassa.

A Figura 144 apresenta os resultados de perda de massa por evaporação da água e a porcentagem de água evaporada das argamassas produzidas com ar incorporado.



(a)



(b)

Figura 144 – Perda de massa por evaporação da água da argamassa com ar incorporado e (b) porcentagem de água evaporada em função da massa total de água

Nas primeiras horas o efeito do ar incorporado na perda de massa não é observado, porém, após aproximadamente 15 horas do início do ensaio, as argamassas com maior teor de ar incorporado apresentaram redução da taxa de evaporação da água. A argamassa IAR 9.0 apresentou a maior taxa de evaporação de água ($246,89 \text{ g/m}^2\text{h}$) enquanto que a argamassa IAR 27.0 apresentou a menor taxa ($173,48 \text{ g/m}^2\text{h}$). Porém, esta tendência se inverte quando se considera a quantidade de água perdida por evaporação em relação à quantidade total de água na argamassa, devido à redução do consumo de água com a incorporação de ar. Com 20 horas de ensaio, a argamassa IAR 9.0 perdeu aproximadamente 77,7 % da água enquanto que a argamassa IAR 27.0 perdeu aproximadamente 81,7% da água total.

4.5 RETRAÇÃO LIVRE E RESTRINGIDA

4.5.1 Retração livre linear

As curvas de retração livre linear na maioria das argamassas avaliadas assemelham-se à curva apresentada na Figura 145, onde é possível identificar três fases distintas.

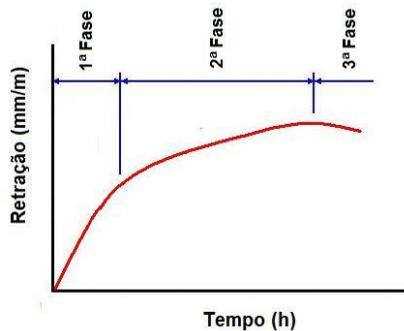


Figura 145 – Perfil da curva de retração livre linear das argamassas avaliadas

A 1ª Fase é caracterizada pela elevada taxa de retração, ocorre antes ou durante a pega do cimento e dura no máximo 4 horas. A água presente no interior dos poros e capilares evapora provocando intensas pressões capilares e, simultaneamente, ocorre as reações de hidratação

do cimento. A retração nesta fase é acompanhada de perda de massa por evaporação da água constante.

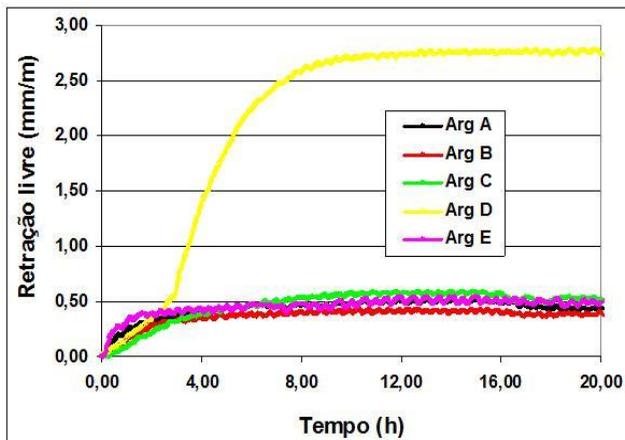
Na 2ª Fase as deformações são menores com a argamassa já enrijecida. Com a porosidade da mistura já praticamente consolidada, as pressões capilares não são fortes o suficiente para provocar grandes deformações (RADOCEA, 1994). Nesta fase a taxa de evaporação de água ainda é constante.

A 3ª Fase se caracteriza pela estabilização das deformações ou por pequena expansão da amostra, que pode ter ocorrido devido ao relaxamento da amostra. Nesta fase ocorre sensível redução da taxa de evaporação da água.

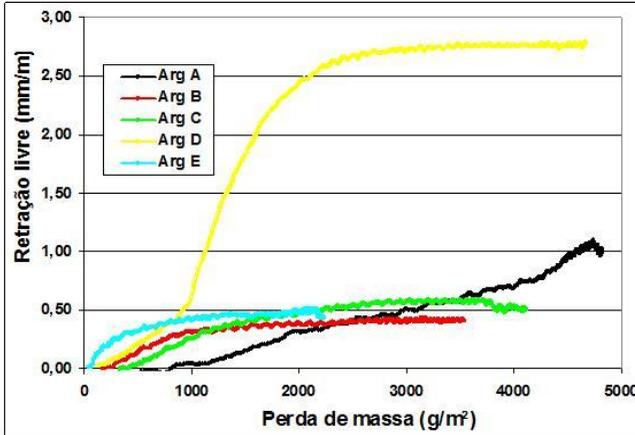
A duração de cada fase depende do consumo dos materiais constituintes da argamassa, da relação água/cimento e das adições, bem como dos aditivos utilizados.

Os resultados de retração livre linear de algumas argamassas apresentaram dispersões elevadas, possivelmente, devido à heterogeneidade dos materiais, às variações associadas ao preparo da argamassa e à moldagem das amostras no dispositivo e também ao atrito que pode existir entre a amostra e o molde.

A Figura 146 apresenta os resultados médios de três medidas da retração livre linear e a correlação entre perda de massa por evaporação da água medida logo após a moldagem e retração livre linear das argamassas industrializadas.



(a)



(b)

Figura 146 – Argamassas Industrializadas: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear

A distribuição granulométrica da argamassa D, com quase 60% do material com diâmetros entre 0,15 mm e 0,30 mm, é muito semelhante à distribuição granulométrica da argamassa E, que apresentou aproximadamente 70% do material com diâmetros entre 0,15 mm e 0,30 mm (Figura 77). A trabalhabilidade da argamassa D somente foi possível dispersando estas partículas finas com adição de água na mistura (consumo de água de 340 kg/m³ e 5,5% de ar incorporado) enquanto que a trabalhabilidade da argamassa E foi obtida através da incorporação de ar (consumo de água de 184 kg/m³ e 33,2% de ar incorporado). O teor de finos (material passante na peneira de malha 0,075 mm) da argamassa D, que possui cal na sua formulação é quase o dobro do teor de fino da argamassa E, sem cal (Tabela 13). A combinação destes fatores, fração de finos maior, maior consumo de água e baixo teor de ar incorporado, são as prováveis causa da retração elevada da argamassa D. O consumo maior de água na argamassa D refletiu em exsudação nas primeiras horas após a moldagem, o que não ocorreu com a argamassa E, o que determinou uma retração maior na argamassa E em relação à argamassa D nas primeiras 2,5 horas, conforme mostra o detalhe até 4 horas de ensaio em escala reduzida na Figura 147.

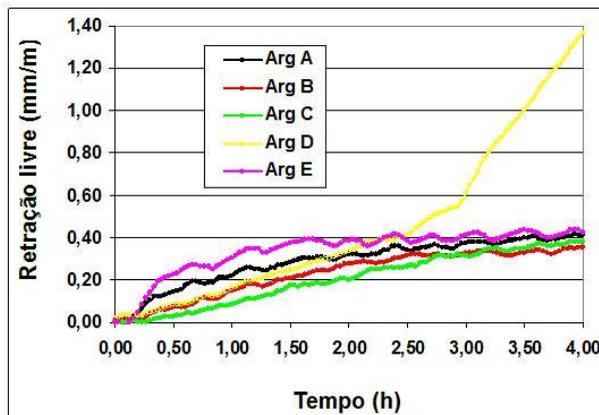
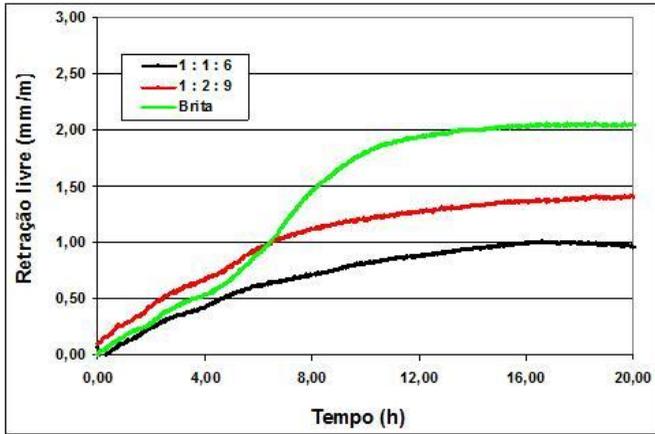


Figura 147 – Detalhes das curvas de retração livre das argamassas industrializadas com 4 horas de ensaio

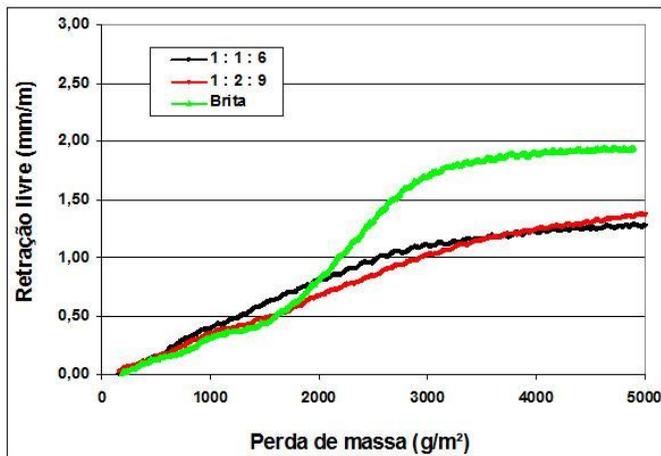
A reduzida retração livre linear das argamassas industrializadas, exceto da argamassa D, com estabilização após aproximadamente 6 horas de ensaio pode ser atribuída ao ar incorporado. A incorporação de ar nas argamassas provoca o aumento das dimensões dos poros e capilares e, conseqüentemente, induz a redução da retração livre devido à redução das pressões capilares (TURCRY, 2004; WITTMANN, 1976; KRONLÖF et al., 1995; HOLT e LEIVO, 2004).

As correlações entre perda de massa por evaporação de água e retração livre das argamassas industrializadas, como mostra a Figura 146(b), apresentaram curvas diferenciadas de difícil interpretação, pois as características, que não são conhecidas, dos diferentes tipos de aditivos químicos interferem na cinética da retração associada à taxa de evaporação da água.

A Figura 148 apresenta as curvas da retração livre linear e a correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre das argamassas produzidas com areia natural e com areia britada. A análise de variância mostrou que existe diferença significativa ao nível de confiança de 95% entre as médias da retração livre linear registrada no tempo de 20 horas. Os resultados da ANOVA encontram-se no anexo.



(a)



(b)

Figura 148 – Argamassas mistas com areia natural e com areia britada: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear

As argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 apresentaram curvas com perfis semelhantes, com retração livre mais acentuada até aproximadamente 6 horas após a moldagem, passando a reduzir a deformação, sendo que a argamassa 1 : 1 : 6 estabiliza a retração com 16 horas de ensaio e passa a

apresentar uma pequena expansão, enquanto que a argamassa 1 : 2 : 9 estabiliza a retração com 14 horas de ensaio. A argamassa 1 : 2 : 9 apresentou retração livre maior que a argamassa 1 : 1 : 6 desde o início do ensaio devido à maior taxa de água evaporada que a argamassa 1 : 1 : 6, influenciada pelo teor de finos. A retração maior na argamassa com maior teor de cal foi constatada também nos resultados de Bastos (2001), porém com redução de perda de massa por evaporação. O autor atribuiu a esta contradição o fato do maior teor de cal determinar maior capacidade de deformação e ocasionar também a diminuição dos espaços entre as partículas sólidas da mistura, pela presença de material mais fino, de modo que a perda de água se dá com o aumento de tensão capilar. O autor conclui que estes dois efeitos associados superam, em termos de efeito, a retenção de água da cal, resultando no aumento da retração livre.

Cabe salientar que a retração por secagem (Figura 123) foi maior para a argamassa 1 : 1 : 6 (1,30 mm/m aos 28 dias) e menor para a argamassa 1 : 2 : 9 (0,67 mm/m aos 28 dias). Neste caso, as amostras permaneceram confinadas no molde de aço inox de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5 mm pelo período de 48 horas protegido contra a evaporação da água, sendo a primeira medida registrada já no estado endurecido. Os dois ensaios de retrações livres lineares foram realizados nas mesmas argamassas, porém em amostras com curas completamente diferentes.

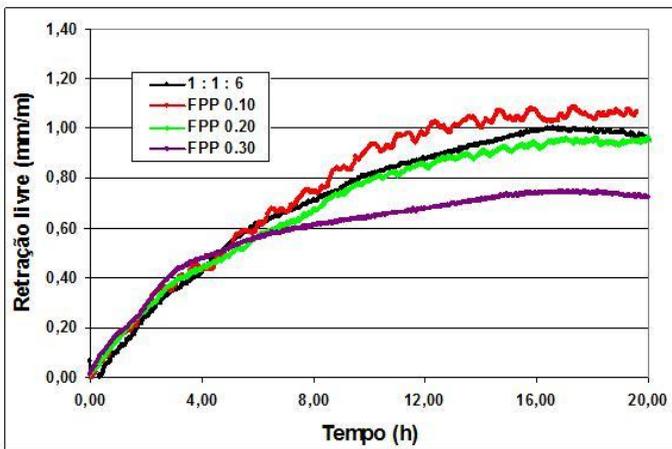
A curva de retração livre da argamassa Brita apresentou perfil similar ao perfil da curva de retração da argamassa industrializada D. Entre o tempo de 4 a 15 horas apresentou uma velocidade de encolhimento maior que no período inicial, diferentemente dos resultados das outras duas argamassas. Após 15 horas, estabilizou a retração livre. A velocidade menor da retração livre nas primeiras horas, possivelmente se deve à água exsudada devido ao efeito descrito no ensaio de perda de massa por evaporação da água. Argamassas produzidas com areia britada exigem maior quantidade de pasta para obter a trabalhabilidade necessária para manuseio devido às características físicas dos grãos (METHA e MONTEIRO, 1994). Com a maior quantidade de pasta da argamassa Brita devido ao maior teor de finos ligantes e inertes e, ocorreu melhor empacotamento da areia britada, implicando no refinamento dos poros reduzindo, assim, as dimensões capilares. Após 4 horas do início do ensaio, com a estrutura em enrijecimento devido à pega do cimento já ter iniciado, as pressões capilares se elevaram induzindo o aumento da retração livre linear.

A retração livre da argamassa Brita foi influenciada pela perda de água por evaporação até aproximadamente 6,5 horas devido à

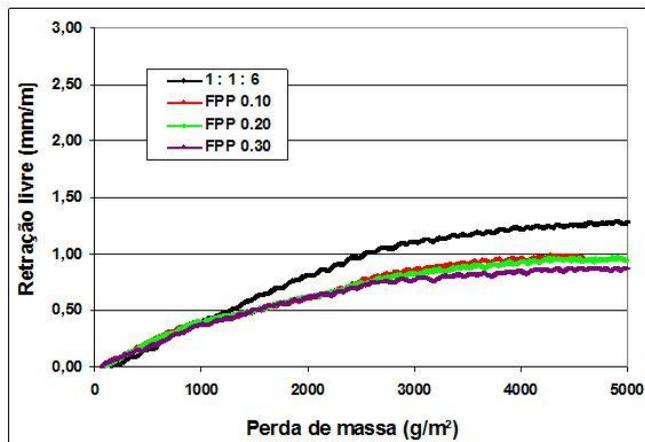
quantidade maior de água exsudada, com perda de massa de 2000 g/m^2 , como mostra a Figura 148(b), sendo que a evaporação da água após este tempo deixou de ser a principal responsável pela retração livre linear.

As correlações entre perda de massa por evaporação da água e retração livre, apresentadas na Figura 148(b), das argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 são similares e aproximam-se da linearidade. Isto demonstra que a cinética da retração, tanto na fase da argamassa fresca como na fase endurecida, ocorre com a taxa constante de água evaporada durante todo o período do ensaio.

A Figura 149 apresenta as curvas da retração livre linear e a correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre das argamassas produzidas com fibras de polipropileno.



(a)



(b)

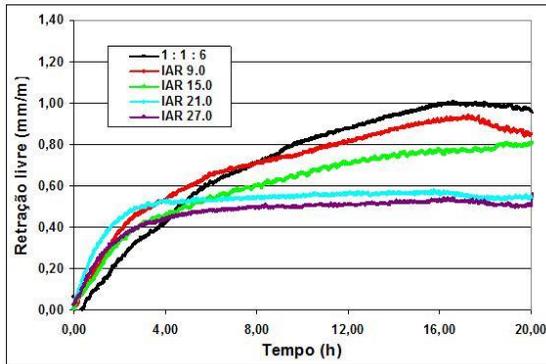
Figura 149 – Argamassas com fibras de polipropileno: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear

As argamassas produzidas com fibras apresentaram retrações similares até aproximadamente 6 horas de ensaio (1ª Fase) com retração mais acentuada, sendo que a argamassa com 0,30% de fibras apresentou redução na retração livre a partir de 6 horas. Possivelmente se deve ao mesmo fenômeno ocorrido na retração por secagem (Figura 124), ou seja, o volume maior de fibras dispersa e aumenta o diâmetro e o volume dos poros da argamassa, reduzindo a tensão capilar, conseqüentemente reduzindo a retração (MESBAH e BUYLE-BODIN, 1999). Kronlöf et al. (1995), utilizando a técnica proposta por Radocea (1992) mediram a pressão capilar nas argamassas de cimento e areia no traço 1 : 3, em volume. Verificou a redução da pressão capilar nas argamassas com fibras de polipropileno e, conseqüentemente, a redução na faixa de 30% da retração linear horizontal com relação à argamassa de referência sem fibras. Wongtanakitcharoen e Naaman (2007) conseguiram redução da retração plástica no concreto em torno de 32,5% adicionando fibras de polipropileno com concentração de 0,1% em relação ao volume total do concreto. Os autores relataram que aumentando a concentração de fibras de 0,1% para 0,4% não conduz a reduções significativas da retração plástica. Sanjuán e Moragues (1994) constataram reduções da retração plástica em argamassas de cimento e areia com adição de 0,10% e 0,20% do volume total da argamassa,

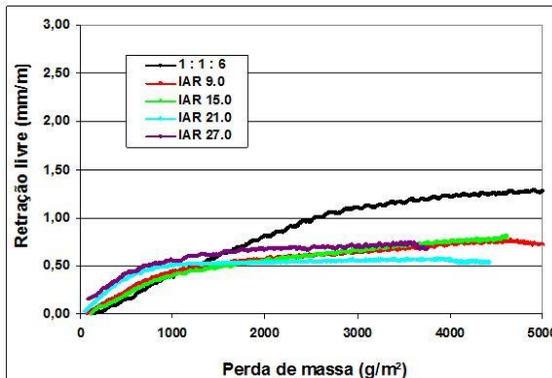
sendo que as maiores retrações ocorreram nas argamassas com maior consumo de cimento e menor relação água/cimento.

A correlação entre perda de massa e retração livre das argamassas produzidas com adição de fibras mostram o aumento da retração livre até a perda de água de aproximadamente 4000 g/m^2 e quase estabilizam após esta taxa.

As curvas da retração livre linear e a correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre das argamassas produzidas com ar incorporado estão apresentadas na Figura 150



(a)



(b)

Figura 150 – Argamassas com ar incorporado: (a) Curvas de retração livre linear; (b) Correlação entre perda de massa por evaporação da água e retração livre linear

Avaliando os resultados da retração livre das argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar apresentados na Figura 150, observam-se elevadas retrações nas primeiras horas e uma redução sensível do término da 1ª Fase com aproximadamente 3 horas. A partir do início da 2ª Fase, conforme se aumenta o teor de ar incorporado, ocorrem reduções significativas na medida da retração livre, sendo que as argamassas IAR 21.0 e IAR 27.0 com pouco mais de três horas praticamente já estabilizam a retração, entrando na 3ª Fase.

Com o aumento de aditivo incorporador de ar, aumenta-se também a quantidade de microbolhas de ar que dispersam a fração fina com redução de consumo de água e, conforme já foi discutido nos resultados da retração livre das argamassas industrializadas, ocorre o aumento das dimensões dos poros e capilares, com redução das pressões capilares (TURCRY, 2004; WITTMANN, 1976; KRONLÖF et al., 1995; HOLT e LEIVO, 2004).

As argamassas produzidas com ar incorporado apresentaram retrações livres superiores às da argamassa de referência, até a perda de água de aproximadamente 1500 g/m^2 . Nos instantes iniciais, após a moldagem, as argamassas com maiores teores de ar incorporado (IAR 21.0 e IAR 27.0) apresentaram maior retração que aquelas com menores teores de ar incorporado (IAR 9.0 e IAR 15.0), e passaram a estabilizar a retração com menor perda de massa, o que ocorre com aproximadamente 2000 g/m^2 .

A Tabela 21 apresenta os resultados individuais, a média e o coeficiente de variação de três repetições da máxima retração livre, quando ocorreu, ou a medida da retração livre na idade de 20 horas após a moldagem. O ensaio realizado na amostra 3 da argamassa D foi perdido devido à queda da energia elétrica.

Tabela 21 – Máxima retração livre linear ou retração livre linear obtida na idade de 20 horas

Arg	Máxima retração livre linear (mm/m)				CV (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	
Arg A	1,377	1,053	1,175	1,202	13,6
Arg B	0,470	0,557	0,447	0,491	11,9
Arg C	0,597	0,484	0,706	0,596	18,6
Arg D	2,260	3,309	-	2,785	26,6
Arg E	0,542	0,502	0,654	0,566	13,9
1 : 1 : 6	0,866	1,010	1,186	1,021	15,7
1 : 2 : 9	1,439	1,465	1,351	1,418	4,2
Brita	2,066	2,159	1,961	2,062	4,8
FPP 0.10	1,071	1,252	1,000	1,108	11,7
FPP 0.20	1,076	0,937	0,896	0,970	9,7
FPP 0.30	0,949	0,527	0,802	0,759	28,2
IAR 9.0	1,000	0,894	0,929	0,941	5,7
IAR 15.0	0,953	0,802	0,679	0,811	16,9
IAR 21.0	0,454	0,673	0,625	0,584	19,7
IAR 27.0	0,463	0,486	0,683	0,544	22,2

4.5.2 Retração restringida linear

4.5.2.1 Força na retração restringida linear

Os fenômenos que provocam as fissuras nos revestimentos de argamassa são complexos e muito variados, mas de um modo geral, estão associados à ocorrência de tensão de tração que incidem já nos instantes iniciais, logo após a aplicação da argamassa. Estas tensões geradas na argamassa ainda no estado fresco são provocadas por deformações devidas, essencialmente, à perda de água, seja por sucção do substrato ou por evaporação. Assim, por diversos motivos, o revestimento fica sujeito às tensões geradas pela restrição da retração, muitas vezes impostas pela aderência ao substrato.

Nesta pesquisa, através do molde de aço inox com fundo não absorvente foram registradas as forças de tração devido à restrição da

retração da argamassa pela célula de carga, provocada essencialmente pela evaporação da água. Este modelo não corresponde exatamente à situação real a qual o revestimento de argamassa está sujeito, porém, esta análise permite avaliar a capacidade das argamassas de resistir à fissuração influenciada pelo consumo de cimento, cal, teor de fibras, teor de ar incorporado, entre outros.

A argamassa foi imprimida no molde de aço inox, ancorada nos pinos da extremidade fixa e, também, nos pinos da extremidade móvel onde se fixou-se uma célula de carga. Inicialmente, 10 minutos após a moldagem, a célula de carga iniciou os registros das forças na retração restringida pelo período de 20 horas. Na idade de 20 horas aplicou-se a carga para determinar a força de ruptura e avaliar a tenacidade da argamassa. Foi definida a idade de 20 horas para que diariamente um ensaio pudesse ser realizado. Quando a curva de retração restringida não apresentava coerência devido a erro de calibragem ou falha de moldagem, o ensaio era descartado e novamente refeito.

A Figura 151 apresenta os resultados médios de duas determinações das forças registradas pela célula de carga no molde com retração restringida no período de 20 horas das argamassas industrializadas e a ampliação do resultado do mesmo ensaio em escala reduzida com 4 horas de ensaio.

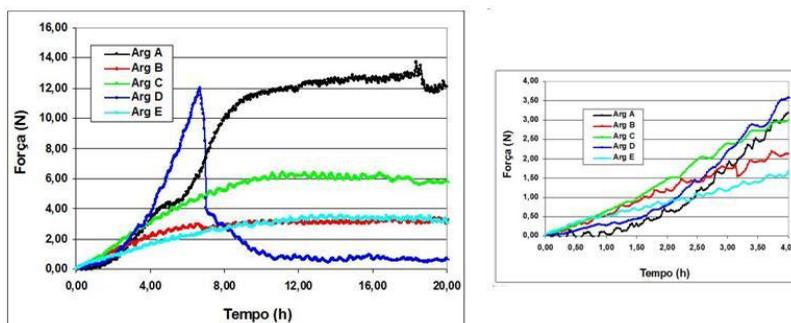


Figura 151 – Forças na retração restringida das argamassas industrializadas. Ampliação até 4 horas de ensaio com forças de até 4 N

As argamassas industrializadas B e E apresentaram curvas similares com menores forças estabilizando com aproximadamente 12 horas de ensaio. Até aproximadamente 2,5 horas de ensaio todas as argamassas apresentaram forças similares, conforme mostra a ampliação na Figura 151. A partir de 2,5 horas as argamassas B e E passaram a

apresentar menores forças que as demais argamassas. A célula de carga passa a registrar uma pequena expansão da argamassa E após 14 horas de ensaio. A argamassa apresentou forças constantes até 10 horas, estabilizando as forças até 16 horas, quando passa a registrar uma pequena expansão. A argamassa industrializada A apresentou elevadas forças até aproximadamente 10 horas, reduzindo até aproximadamente 18 horas, quando passa a registrar expansão, que pode ser um rompimento da argamassa que ocorreu quase no final do ensaio. O alto teor de ar incorporado das argamassas favoreceu a redução das forças.

A ruptura da amostra 1 da argamassa D apresentou elevadas forças até 5,53 horas quando ocorreu o rompimento da argamassa, e a amostra 2 rompeu com 6,67 horas de ensaio. No molde de retração livre linear a amostra rompeu na extremidade fixa no final do ensaio e no molde de retração restringida rompeu nas duas extremidades, conforme mostra a Figura 152.



Figura 152 – Detalhe da ruptura da argamassa D no ensaio de retração livre e de retração restringida

A Figura 153 apresenta os resultados das forças registradas pela célula de carga no molde com retração restringida no período de 20 horas e, também, em escala reduzida até 8 horas de ensaios, das argamassas mistas e da argamassa produzida com areia britada.

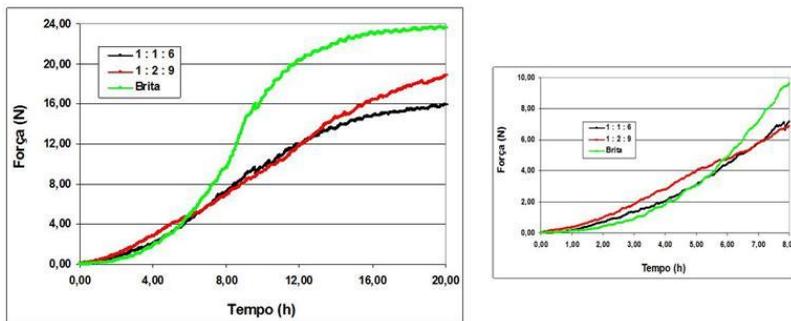


Figura 153 – Forças na retração restringida das argamassas mistas com areia natural e areia britada. Ampliação até 8 horas de ensaio com forças de até 10 N

Inicialmente, a argamassa de referência 1 : 1 : 6 e as argamassas 1 : 2 : 9 e Brita apresentaram curvas semelhantes, com reduzidas forças até aproximadamente 6 horas, a partir deste tempo a força na retração da argamassa produzida com areia britada passou a elevar-se consideravelmente. As argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 apresentaram curvas similares e muito próximas da linearidade até aproximadamente 12 horas, quando as forças na retração da argamassa 1 : 2 : 9 superou as forças registradas para a argamassa 1 : 1 : 6.

A Figura 154 apresenta os resultados das forças registradas pela célula de carga no molde com retração restringida no período de 20 horas das argamassas produzidas com fibras de polipropileno e a ampliação até 6 horas de ensaio.

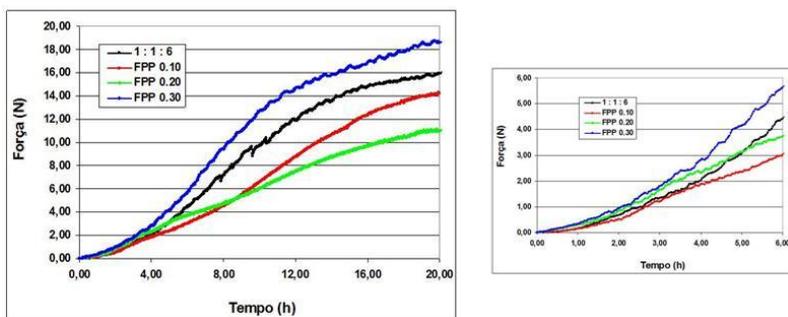


Figura 154 – Forças na retração restringida das argamassas com fibras de polipropileno. Ampliação até 6 horas de ensaio com forças de até 6 N

As forças registradas na célula de carga, conforme mostra a ampliação da Figura 154, foram similares às forças geradas nas argamassas produzidas com fibras e para a argamassa de referência 1 : 1 : 6 até aproximadamente 2 horas de ensaio. As argamassas FPP 0.10 e FPP 0.20 registraram forças menores e a argamassa FPP 0.30 apresentou forças maiores que a argamassa de referência 1 : 1 : 6. Porém as forças na retração restringida no tempo de 20 horas não apresentaram diferenças significativas ao nível de confiança de 95%, conforme mostra o resultado da análise de variância apresentado no anexo, o que demonstra que as fibras de polipropileno não influenciaram nas forças na retração restringida linear.

A Figura 155 apresenta os resultados das forças registradas pela célula de carga no molde com retração restringida no período de 20 horas e a ampliação com 5 horas de ensaio das argamassas produzidas com aditivo incorporador de ar.

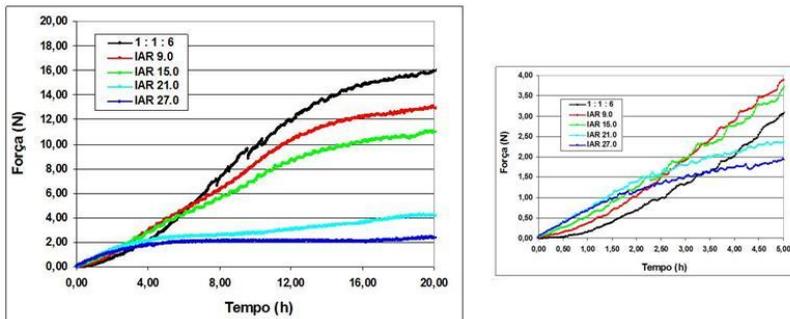


Figura 155 – Forças na retração restringida das argamassas com ar incorporado. Ampliação até 5 horas de ensaio com forças de até 4 N

Inicialmente, até aproximadamente 4 horas de ensaio as argamassas com maior quantidade de ar incorporado apresentaram forças maiores que as demais argamassas quando, ainda, havia grande quantidade de água livre. A partir do enrijecimento da argamassa, com quantidade de água adsorvida menor, as curvas se inverteram com as argamassas com maior teor de ar incorporado apresentando menores forças. Assim como ocorreu na retração livre linear, o ar incorporado mostrou ser variável determinante na redução das forças na retração restringida, devido à redução das pressões capilares induzido pelo aumento das dimensões capilares.

A Tabela 22 apresenta os resultados individuais, a média e o coeficiente de variação de duas repetições da máxima força obtida no ensaio com retração restringida, quando ocorreu, ou a medida da máxima força na idade de 20 horas após a moldagem.

Tabela 22 – Máxima força na retração restringida ou força obtida na idade de 20 horas

Arg	Máxima força na retração restringida (N)			CV (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Média	
Arg A	15,73	12,17	13,95	18,05
Arg B	3,92	3,07	3,50	17,20
Arg C	7,80	5,30	6,55	26,99
Arg D	-	-	-	-
Arg E	3,44	3,98	3,71	10,29
1 : 1 : 6	13,00	13,04	13,02	0,22
1 : 2 : 9	13,77	15,14	14,46	6,70
Brita	26,63	21,03	23,83	16,62
FPP 0.10	14,82	13,73	14,28	5,40
FPP 0.20	12,18	10,05	11,12	13,55
FPP 0.30	13,85	14,61	14,23	3,78
IAR 9.0	10,48	11,48	10,98	6,44
IAR 15.0	12,63	9,55	11,09	19,64
IAR 21.0	2,13	2,25	2,19	3,87
IAR 27.0	2,45	2,08	2,27	11,55

As deformações nas argamassas originadas pela perda de água por evaporação são proporcionais às tensões de trações geradas. Ou seja, quanto maior a retração livre linear maior será a força de tração imposta. A Figura 156 mostra a expressiva correlação linear entre a máxima retração livre linear e a máxima força na retração restringida, apresentadas nas Tabelas 21 e 22.

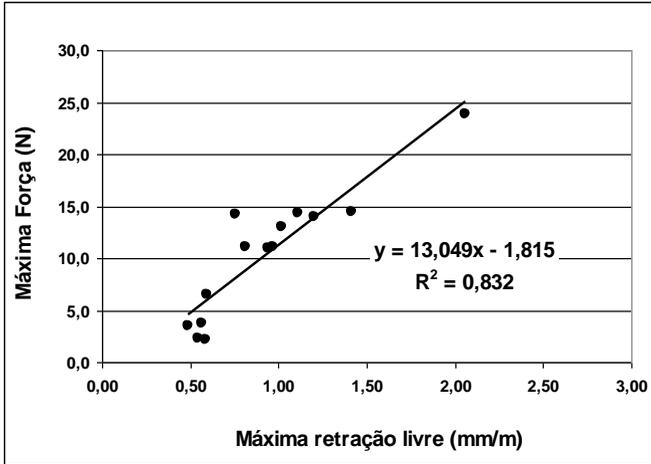


Figura 156 – Correlação linear entre a máxima retração livre e a máxima força na retração restringida

4.5.2.2 Força de ruptura na retração restringida linear

Na idade de 20 horas, depois de encerrado o ensaio para determinação das forças na retração restringida, imediatamente aplicou-se uma carga de tração na amostra com velocidade constante até o rompimento, com duas repetições para cada argamassa. Um sistema de aquisição de dados através da célula de carga registrou as forças e um transdutor de deslocamento registrou a deformação em intervalos de 5 segundos. Com os resultados obteve-se a curva força de tração *versus* deformação, para cada argamassa. Não foi possível aplicar a força de tração na argamassa D na idade de 20 horas, pois as amostras romperam nas duas extremidades durante o ensaio para determinação da força na retração restringida.

O rompimento das amostras ocorreu com maior frequência nas extremidades dos pinos de fixação da extremidade móvel do molde, pois é a região de maior fragilidade da amostra devido à redução da secção. Uma amostra da argamassa de referência 1 : 1 : 6, uma da argamassa 1 : 2 : 9, uma da argamassa IAR 15.0 e as duas amostras da argamassa Brita, romperam na extremidade dos pinos de fixação, porém da extremidade fixa do molde. Apenas as duas amostras da argamassa

industrializada B romperam na região central do molde. A Figura 157 mostra o detalhe do rompimento da amostra no final do ensaio.

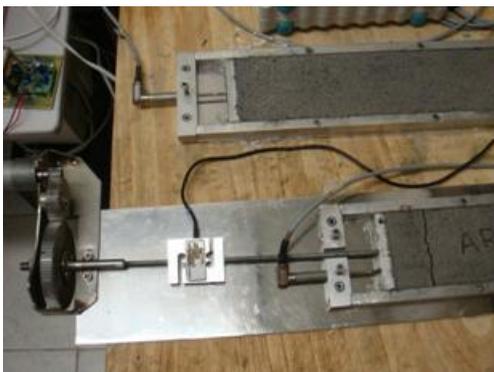


Figura 157 – Ensaio para determinação da força de ruptura na retração restringida

Os resultados médios de duas repetições das curvas de força de tração *versus* deformação estão apresentadas nas Figuras 158 a 161.

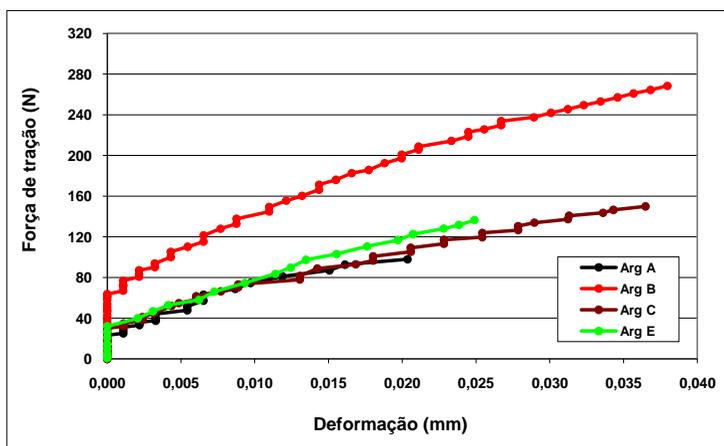


Figura 158 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas industrializadas *versus* deformação

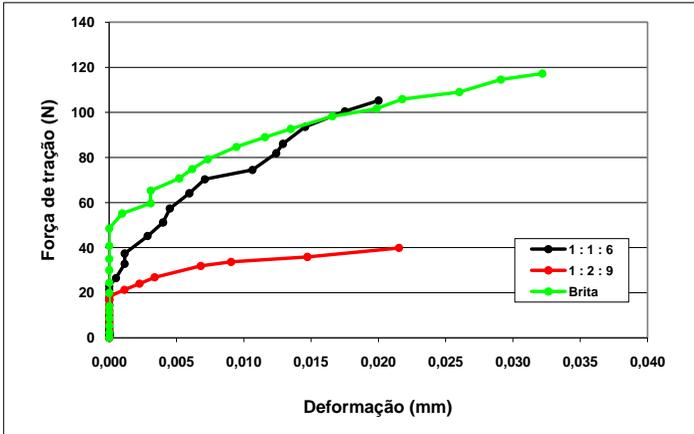


Figura 159 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas mistas com areia natural e areia britada *versus* deformação

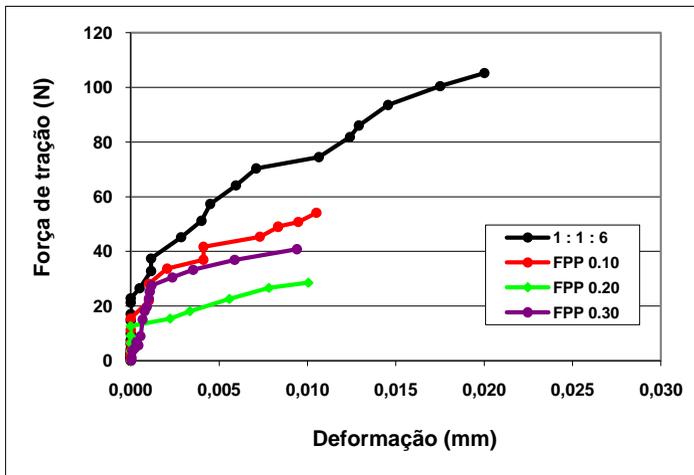


Figura 160 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas com fibras *versus* deformação

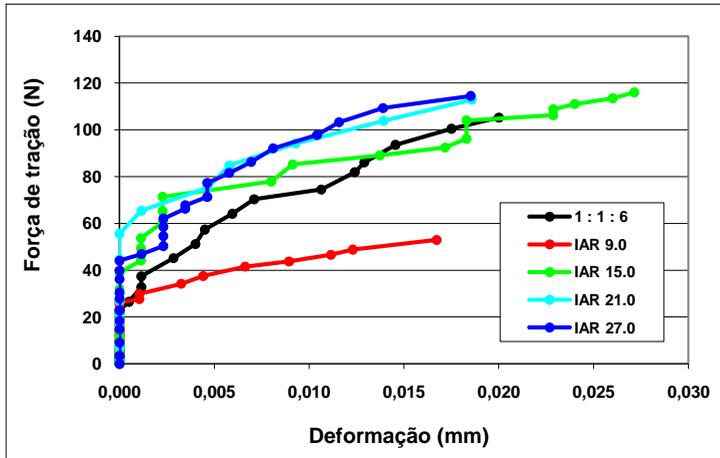


Figura 161 – Força de tração aplicada pelo motor nas argamassas com ar incorporado *versus* deformação

Após o início do ensaio, por alguns instantes, a célula de carga registrou as forças, porém o transdutor não registrou deslocamento, devido ao atrito existente entre a amostra e o molde explicada pela lei da inércia. Este fenômeno ocorreu em todas as amostras ensaiadas.

A área abaixo da curva de força de tração *versus* deformação corresponde à energia de ruptura à tração E (N.mm) da argamassa, também denominada tenacidade. A tenacidade está normalmente relacionada com a ductibilidade, que é a capacidade da argamassa se deformar após o regime elástico, antes da ruptura.

A Tabela 23 apresenta os resultados individuais da força de tração de ruptura e a energia de ruptura à tração para cada argamassa. A elevada dispersão dos resultados se deve ao fato das argamassas de revestimentos apresentarem baixas resistências mecânicas, principalmente à tração, devido ao baixo consumo de cimento, presença de cal e elevado consumo de água.

Tabela 23 – Força de ruptura e energia de ruptura à tração

Arg	Força de ruptura à tração (N)				Energia de ruptura à tração (N.mm)			
	Amostra 1	Amostra 2	Média	DP	Amostra 1	Amostra 2	Média	DP
Arg A	104,17	118,52	111,35	10,15	1,66	2,90	2,28	0,88
Arg B	218,86	421,16	320,01	143,05	6,28	15,97	11,12	6,85
Arg C	124,14	188,64	156,39	45,61	2,81	5,85	4,33	2,15
Arg D	-	-	-	-	-	-	-	-
Arg E	172,06	233,83	202,95	43,68	4,46	7,04	5,75	1,82
1 : 1 : 6	124,07	94,00	109,04	21,26	2,83	1,41	2,12	1,00
1 : 2 : 9	33,57	46,19	39,88	8,92	0,79	0,55	0,67	0,17
Brita	105,69	135,87	120,78	21,34	2,79	4,05	3,42	0,89
FPP 0.10	50,73	125,80	88,27	53,08	0,71	2,41	1,56	1,20
FPP 0.20	44,50	128,28	86,39	59,24	0,73	4,37	2,55	2,58
FPP 0.30	58,45	62,48	60,47	2,85	0,19	0,96	0,58	0,55
IAR 9.0	43,62	66,17	54,90	15,95	0,57	1,10	0,84	0,37
IAR 15.0	111,10	138,66	124,88	19,49	2,34	3,50	2,92	0,82
IAR 21.0	121,21	138,40	129,81	12,16	3,79	2,80	3,29	0,70
IAR 27.0	123,40	146,41	134,91	16,27	2,85	3,22	3,03	0,26

O maior consumo de cimento da argamassa industrializada B deve ter contribuído para a elevada energia de ruptura apresentada.

A adição de fibras de polipropileno nas argamassas não contribuiu significativamente para melhoria das resistências à compressão e à tração na flexão, porém para as argamassas FPP 0.10 e FPP 0.20 apresentaram um aumento significativo da tenacidade com relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6. A redução da resistência à tração na flexão e do módulo de elasticidade da argamassa FPP 0.30 possivelmente refletiu na redução da tenacidade e da ductibilidade.

4.6 FISSURAÇÃO

A avaliação da fissuração foi realizada em três moldes prismáticos com restrições colocados no fundo para restringir a retração e induzir a fissuração. Foi utilizado vento com velocidade de 2,30 m/s

na superfície dos moldes para acelerar a perda de água por evaporação e induzir a retração.

A fissura em algumas amostras tornou-se visível alguns minutos após o início do ensaio, porém não acentuou as suas dimensões. As fissuras apresentaram ao longo do seu comprimento diversas larguras. Portanto, o parâmetro mais adequado para avaliar o potencial de fissuração do revestimento é a área total das fissuras. A Figura 162(a) ilustra a execução dos ensaios de fissuração e de perda de massa por evaporação da água. A Figura 162(b) apresenta o molde número 2 da argamassa D após 20 horas de ensaio, destacando as fissuras que surgiram sobre as restrições colocadas do fundo.



Figura 162 – (a) Ensaio de fissuração e perda de massa nos moldes dentro da caixa e (b) Fissuração do molde número 2 da argamassa D

A Figura 163 apresenta o tempo médio de ocorrência da primeira fissura observada, o comprimento total e a área total das fissuras das amostras, após 20 horas da moldagem.

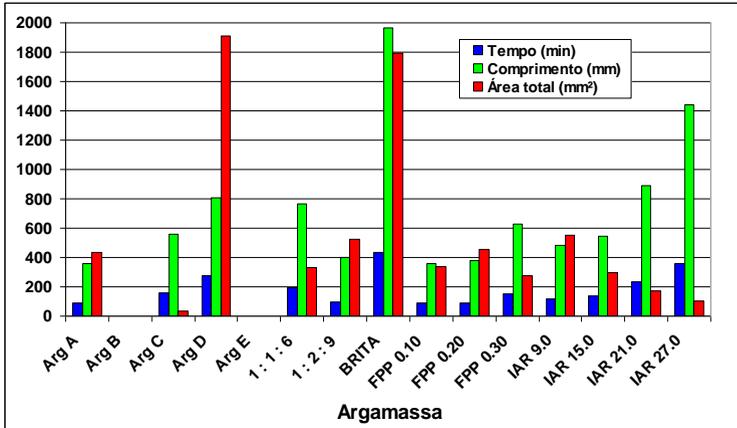


Figura 163 – Resultados do tempo, comprimento e área total das fissuras

A fissuração das amostras da argamassa produzida com areia britada foi elevada. Nos revestimentos de argamassas de cimento, cal e areia britada nas pesquisas de Silva et al. (2007) a incidência de fissuras foi acentuada. Os autores creditaram a elevada fissuração à retração plástica e à majoração do módulo de elasticidade e das resistências mecânicas. Silva e Campiteli (2008) avaliando os mesmos revestimentos com areia britada atribuíram o aumento da fissuração à redução da relação areia/aglomerante, destacando que um maior consumo de cimento provoca o aumento do módulo de elasticidade.

A fissuração elevada na argamassa industrializada D e na argamassa Brita, de fato, se deve à elevada retração livre e como consequência gerou elevadas forças na retração restringida, tendo como causa o aumento das pressões capilares provocadas pelas reduzidas dimensões dos capilares, conforme foi discutido nos itens 4.4 e 4.5.1. Contudo, a redução das dimensões capilares devido a maior quantidade de pasta, melhor empacotamento da areia e com menor consumo de água tem como resultado a elevação da densidade de massa no estado endurecido (Figura 128), aumento das resistências mecânicas (Figura 129) e do módulo de elasticidade (Figura 132).

A fissuração maior da argamassa 1 : 2 : 9 em relação à argamassa 1 : 1 : 6, também se deve a maior retração livre linear devido a maior perda de água por evaporação. A retração da argamassa 1 : 2 : 9, na idade de 20 horas, foi quase 50% maior que a retração da argamassa 1 : 1 : 6. Nas pesquisas de Bastos (2001) e Tristão (2005) a retração

plástica foi maior nas argamassas com maior teor de cal. Os autores creditam o aumento da retração plástica, devido, possivelmente, ao aumento da tensão capilar da mistura (WITTMANN, 1976; KRONLÖF et al., 1995; HAMMER, 1999; HOLT e LEIVO, 2004, TURCRY, 2004).

Nas argamassas com fibras de polipropileno ocorreu aumento da fissuração com os teores de 0,10% e 0,20% e redução sensível da fissuração na argamassa com adição de 0,30% de fibras em relação à argamassa de referência 1 : 1 : 6, fato já comprovado por alguns pesquisadores (MA et al., 2004; QI et al., 2005). Porém, tanto o aumento como a redução da fissuração não foram significativos, possivelmente devido à baixa concentração de adição de fibras.

Os resultados apresentados na Figura 163 mostram que o aumento do teor de ar incorporado retarda o início do surgimento da primeira fissura, que ocorreu em todos os moldes na restrição central, e, também reduz a largura das fissuras. Este fato explica porque o aumento do teor de ar incorporado aumenta o comprimento total das fissuras, porém reduz a área total.

As microbolhas de ar, presentes no interior das argamassas preparadas com aditivo incorporador de ar (IAR), interrompem a conectividade entre os poros e dispersam os agregados, como pode ser observado nas micrografias apresentadas na Figura 136. Possivelmente, este fato provoca uma redução das pressões capilares (KRONLÖF et al., 1995), reduzindo a retração nas primeiras horas, o que explica também a redução das forças na retração restringida e da fissuração nas amostras. Portanto, a ausência de fissuração nas argamassas industrializadas B e E e a redução da fissuração nas argamassas com ar incorporado se deve, principalmente ao teor de ar incorporado.

A Figura 164 apresenta a correlação entre a média da perda de água por hora e a área total das fissuras nos moldes. A falta de correlação indica que a fissuração das argamassas avaliadas não depende somente da quantidade de água evaporada, nas condições de temperatura de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 5)\%$, mas também das outras variáveis envolvidas.

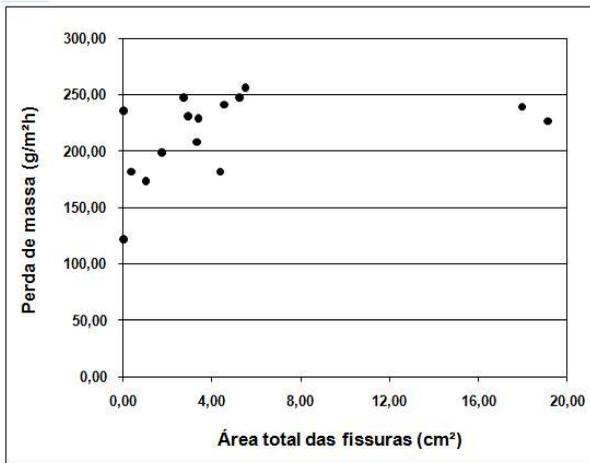
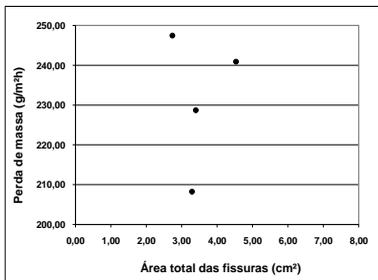
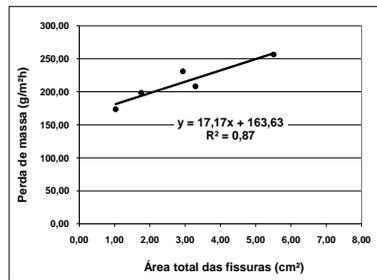


Figura 164 – Área total das fissuras em função da perda de massa por evaporação da água

A perda de massa por evaporação da água não influenciou a fissuração das argamassas com fibras de polipropileno, conforme mostra a Figura 165(a), porém a quantidade de água evaporada influenciou na fissuração das argamassas com ar incorporado, conforme pode ser observado pelo expressivo coeficiente de correlação linear apresentado na Figura 165(b).



(a)



(b)

Figura 165 – Área total das fissuras em função da perda de massa por evaporação da água nas argamassas: (a) com fibras de polipropileno; (b) com ar incorporado

As Figuras 166(a) e 166(b) apresentam a correlação linear entre a área total das fissuras e a máxima retração livre linear e a máxima força na retração restringida, respectivamente, com expressivos coeficientes de determinação.

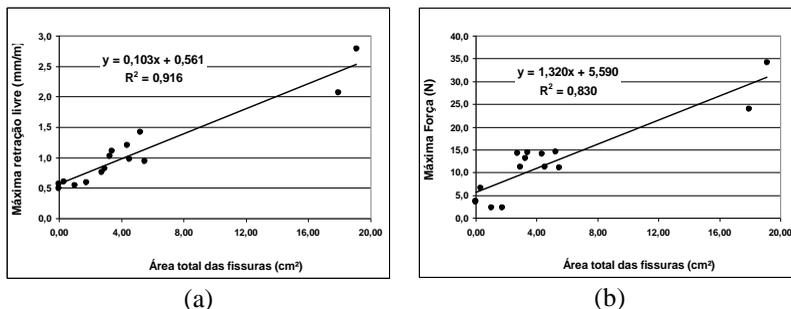


Figura 166 – Correlação linear entre a área total das fissuras: (a) e máxima retração livre; (b) e máxima força na retração restringida

As correlações apresentadas na Figura 166 demonstram que a fissuração do revestimento de argamassa foi influenciada pela retração livre linear e pelas tensões de tração originadas pelas deformações. Portanto, a fissuração em revestimento de argamassa está diretamente associada à retração da argamassa que ocorre já nas primeiras horas após a adição da água na mistura. Esta retração, por sua vez, é devida às tensões nos capilares geradas pela perda de água, cujas intensidades são inversamente proporcionais às dimensões dos capilares. Ou seja, quanto menores os diâmetros dos capilares, maiores as pressões capilares regidas pelas Leis de Laplace e Kelvin, e maiores as retrações e, conseqüentemente, maior a fissuração.

Conclui-se, então, que para reduzir ou até mesmo eliminar a fissuração nos revestimentos é necessário aumentar as dimensões dos capilares da argamassa. Uma das formas de se conseguir isto seria a redução do teor de finos e a incorporação de ar na mistura, reduzindo assim, o consumo de água e melhorando a trabalhabilidade da argamassa.

4.7 SUSCEPTIBILIDADE À FISSURAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

4.7.1 Associada às propriedades mecânicas

A resistência de um revestimento à fissuração depende, por um lado, da capacidade da argamassa de resistir às tensões de tração nela induzidas pelo efeito da restrição da retração, devido principalmente, pela aderência ao substrato, e por outro lado, da intensidade dessas tensões.

Um método foi desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982) para avaliar a susceptibilidade à fissuração de revestimentos de argamassa. Este método baseia-se no princípio de que a tendência à fissuração aumenta com o aumento da retração de secagem e, também, quanto maior for a resistência de tração na flexão desenvolvida na argamassa devido à retração restringida. Ou seja, quanto maior for a retração e o módulo de elasticidade, maior será a resistência de tração induzida e quanto maior for a resistência à tração, maior será a capacidade do revestimento se deformar sem fissurar. A Tabela 24 descreve os critérios de classificação quanto à susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa.

Tabela 24 – Critérios de avaliação de susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa (CSTB, 1982)

Características (aos 28 dias)	Critérios de classificação quanto à fissuração		
	Baixa susceptibilidade	Média susceptibilidade	Alta susceptibilidade
Retração por secagem - $\Delta l/l$ (mm/m)	$\Delta l/l \leq 0,7$	$0,7 < \Delta l/l < 1,2$	$\Delta l/l \geq 1,2$
Módulo de elasticidade - E (MPa)	$E \leq 7000$	$7000 < E < 12000$	$E \geq 12000$
Módulo de elasticidade/resistência à tração na flexão - E/R_t	$E/R_t \leq 2500$	$2500 < E/R_t < 3500$	$E/R_t \geq 3500$

É importante salientar que os limites apresentados na Tabela 24 não levam em conta diversos fatores que influenciam a fissuração, tais como a relaxação durante a retração restringida, o fato da restrição não ser total, condições climáticas, provavelmente não tão severas como as impostas em laboratório, dentre outros.

A Tabela 25 apresenta os resultados da retração por secagem, módulo de elasticidade e resistências à compressão e à tração na flexão, determinados na idade de 28 dias, conforme descritos nos itens 3.3.3.6, 3.3.3.8 e 3.3.3.9, respectivamente. Os ensaios de retração por secagem e módulo de elasticidade não foram realizados para as argamassas industrializadas.

Tabela 25 – Resultados da retração por secagem, módulo de elasticidade e resistências mecânicas

Arg	Retração por secagem Δ/l (mm/m)	Módulo de elasticidade E (MPa)	Resistência à compressão R_c (MPa)	Resistência à tração na flexão R_t (MPa)	R_t/R_c	E/R_t
Arg A	-	-	1,20	0,42	0,35	-
Arg B	-	-	7,45	3,01	0,40	-
Arg C	-	-	3,16	1,15	0,36	-
Arg D	-	-	4,22	1,46	0,35	-
Arg E	-	-	4,54	1,94	0,43	-
1 : 1 : 6	1,2	3646	1,48	1,11	0,75	3292
1 : 2 : 9	0,7	1642	0,53	0,41	0,76	4050
Brita	0,7	4319	1,65	1,18	0,72	3658
FPP 0.10	1,0	3403	0,90	0,83	0,92	4114
FPP 0.20	0,8	3544	1,16	0,80	0,69	4435
FPP 0.30	0,6	2911	1,13	0,65	0,58	4473
IAR 9.0	0,6	3352	0,91	0,87	0,96	3839
IAR 15.0	0,6	3293	1,00	0,72	0,71	4603
IAR 21.0	0,7	3015	0,87	0,67	0,76	4532
IAR 27.0	0,7	3006	0,87	0,66	0,76	4579

O critério da Tabela 24 considera baixa susceptibilidade à fissuração para argamassa com retração não superior a 0,7 mm/m. De fato, a argamassa FPP 0.30 e as argamassas com ar incorporado, exceto

IAR 9.0, apresentaram as menores taxas de fissuração com retração por secagem menor ou igual à 0,7 mm/m. Porém a argamassa Brita apresentou elevada fissuração com retração por secagem igual a 0,7 mm/m. No critério que analisa a relação entre módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão não houve correspondência entre os limites dos intervalos apresentados na Tabela 24 com a área total das fissuras apresentadas na Figura 163. Quanto ao módulo de elasticidade, o maior valor apresentado foi da argamassa produzida com areia britada de 4319 MPa, sendo que a Tabela 24 classifica como baixa susceptibilidade à fissuração argamassas com módulo de elasticidade não superior a 7000 MPa.

Ao que parece, os limites dos critérios de classificação quanto à fissuração desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982) estão associados às argamassas produzidas na França, com características próprias adaptadas para a realidade daquele país. Em argamassas de revestimentos as características apresentadas na Tabela 24, muitas vezes uma não depende das outras e, além disso, outros fatores também influenciam na fissuração, o que dificulta a avaliação.

É comum atribuírem a fissuração ao elevado módulo de elasticidade da argamassa, pois não permitiu o revestimento absorver as deformações. Muitas vezes, a elevada fissuração do revestimento devido à retração da argamassa pode ser atribuída ao elevado módulo de elasticidade. Porém, não se pode concluir que o baixo módulo de elasticidade implica em revestimentos sem fissuração. O módulo de elasticidade da argamassa 1 : 2 : 9 foi de 1642 MPa, o mais baixo de todas as argamassas avaliadas e apresentou a terceira posição nas amostras, com maior índice de fissuração entre as argamassas avaliadas, excluindo-se as industrializadas. A Figura 167 mostra que não existe correlação significativa entre a área total das fissuras e módulo de elasticidade das argamassas produzidas nesta pesquisa. O módulo de elasticidade é uma propriedade importante que pode ser utilizado para avaliar a fissuração de revestimento de argamassa em idade mais avançada.

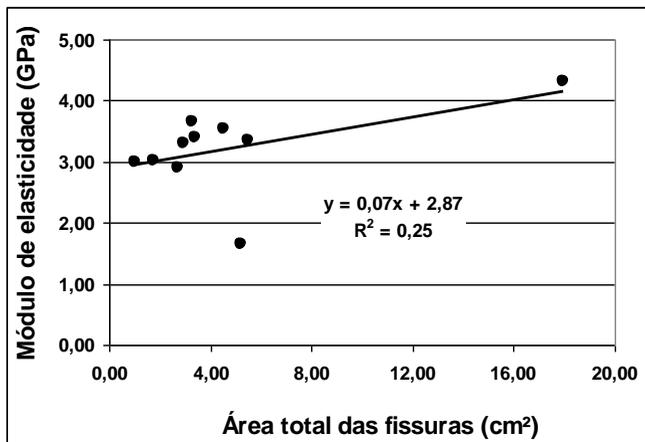


Figura 167 – Correlação entre área total das fissuras e módulo de elasticidade

Utilizando os resultados da máxima retração livre linear da Tabela 21 no lugar da retração por secagem aos 28 dias de idade, nos critérios de classificação quanto à fissuração, desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982) da Tabela 24, a classificação da fissuração obtidas nos moldes se ajustaria perfeitamente, conforme mostra a Tabela 26.

Tabela 26 - Critérios de avaliação de susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassa (CSTB, 1982) utilizando a máxima retração livre linear

Arg	Máxima retração livre Δ/l (mm/m)	Área total das fissuras (mm ²)	Critério de classificação	Classificação quanto à fissuração
Arg B	0,49	0	$\Delta/l \leq 0,70$	Baixa susceptibilidade
Arg C	0,60	35		
Arg E	0,57	0		
IAR 21.0	0,58	176		
IAR 27.0	0,54	103		
1 : 1 : 6	1,02	329	$0,70 < \Delta/l < 1,20$	Média susceptibilidade
FPP 0.10	1,11	340		
FPP 0.20	0,97	454		
FPP 0.30	0,76	274		
IAR 9.0	0,94	551		
IAR 15.0	0,81	294		
Arg A	1,20	438	$\Delta/l \geq 1,20$	Alta susceptibilidade
Arg D	2,78	1913		
1 : 2 : 9	1,42	524		
Brita	2,06	1797		

4.7.2 Associada à retração restringida

A avaliação da susceptibilidade à fissuração foi realizada através dos resultados dos ensaios de retração livre e restringida, utilizando o método adaptado dos trabalhos de Veiga (1997) através dos procedimentos:

- Medida das forças com retração restringida: cinco minutos após a moldagem, a retração da argamassa confinada no molde de aço é restringida pela célula de carga conectada à extremidade móvel do molde que registra as forças geradas. O gráfico de força (N) *versus* tempo (hora) é plotado com um valor máximo da força identificado como F_m .
- Medida das forças de tração: na idade de 20 horas, após o ensaio de medida das forças com retração restringida, o motor

com velocidade baixa e controlada é acionado para submeter à argamassa confinada no molde de aço a uma força constante de tração até a ruptura, registrada pela célula de carga. O gráfico de força (N) *versus* deslocamento (mm) é plotado, com um valor máximo F_r identificado como a força de ruptura à tração. A área abaixo do gráfico corresponde à tenacidade ou energia de ruptura à tração E (N.mm) da argamassa.

- A tendência à fissuração é avaliada através dos coeficientes S e R obtidos de acordo com as Equações:

$$S = \frac{F_r}{F_m} \quad \text{Equação 15}$$

$$R = \frac{E}{F_m} \quad \text{Equação 16}$$

A primeira fissura ocorrerá se $S < 1$. O coeficiente R verifica a resistência à evolução de abertura da fissura. A energia de ruptura à tração (E) mede a capacidade de deformação da argamassa antes da ruptura. Quanto maior o valor de R , maior é a energia necessária para a evolução das microfissuras (produzidas após a não verificação do primeiro critério) até que o ponto de instabilidade é alcançado; então é baixa a probabilidade da evolução da fissura. Um valor elevado de R está relacionado com alguma deformação antes da completa ruptura, assim, neste sentido, significa que a argamassa apresenta alguma ductilidade.

A tendência à fissuração utilizando os coeficientes das Equações 15 e 16 é verificada através da classificação da Tabela 27.

Tabela 27 – Classificação da tendência à fissuração

Classes de susceptibilidade à fissuração	S	R (mm)
Baixa susceptibilidade à fissuras ^a	$S \geq 1$	$R \geq 1$
Média susceptibilidade à fissuras ^a	$S \geq 1$	$0,6 \leq R < 1$
Alta susceptibilidade à fissuras ^b	$S < 1$	$R < 0,6$

^aDeve verificar as duas condições

^bDeve verificar uma das condições

A susceptibilidade à fissuração utilizando os coeficientes das Equações 15 e 16 depende apenas das características das argamassas. A

sucção de água pelo substrato apesar de ser considerado um fator importante que influencia a retração, não foi considerada, porque o objetivo principal é comparar as argamassas entre si, independentemente da influência do substrato.

A Tabela 28 apresenta as forças na retração restringida, as forças de ruptura à tração, as energias de ruptura à tração e os coeficientes definidos pelas Equações 15 e 16 das argamassas avaliadas.

Tabela 28 – Resultados médios dos parâmetros obtidos na retração restringida linear

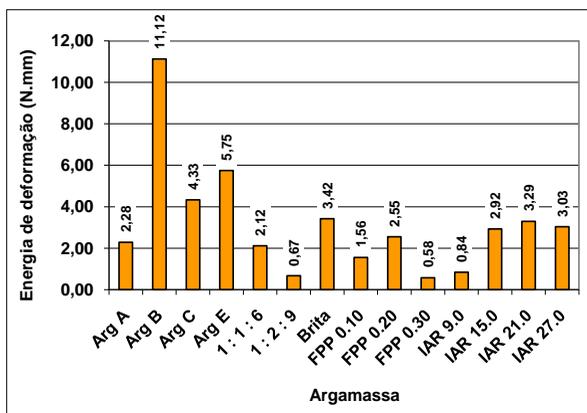
Arg	Resultados médios			$S = F_r/F_m$	$R = E/F_m$ (mm)
	Força na retração restringida F_m (N)	Força de ruptura à tração F_r (N)	Energia de ruptura à tração E (N.mm)		
Arg A	13,95	111,34	2,28	8,0	0,2
Arg B	3,50	320,01	11,12	91,6	3,2
Arg C	6,55	156,39	4,33	23,9	0,7
Arg D	-	-	-	-	-
Arg E	3,71	202,95	5,75	54,7	1,5
1 : 1 : 6	13,02	109,04	2,12	6,2	0,2
1 : 2 : 9	14,46	39,88	0,67	2,8	0,0
BRITA	23,83	120,78	3,42	5,1	0,1
FPP 0.10	14,28	88,27	1,56	6,2	0,1
FPP 0.20	11,12	86,39	2,55	7,8	0,2
FPP 0.30	14,23	60,46	0,58	4,2	0,0
IAR 9.0	10,98	54,89	0,84	5,0	0,1
IAR 15.0	11,09	124,88	2,92	11,3	0,3
IAR 21.0	2,19	129,81	3,29	59,3	1,5
IAR 27.0	2,27	134,91	3,03	59,6	1,3

Segundo o critério de Veiga (1997), quanto maiores os valores dos coeficientes S e R menos susceptível à fissuração estará o revestimento de argamassa. De fato, as argamassas industrializadas B e E que não apresentaram fissuras e as argamassas IAR 21.0 e IAR 27.0 com menores fissurações, apresentaram elevados valores para o coeficiente S e valores do coeficiente R superior a 1.

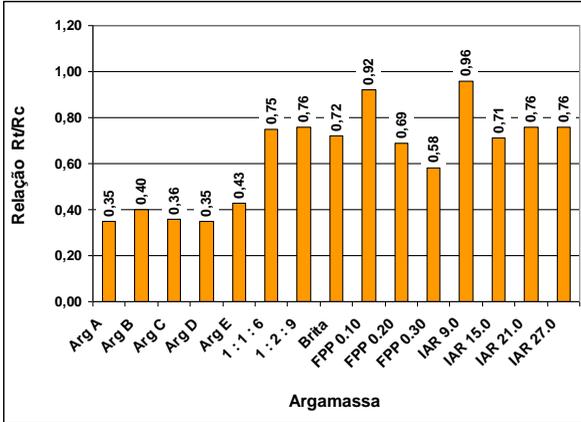
Nenhuma das argamassas avaliadas apresentou coeficiente S menor que 1 e apenas a argamassa industrializada C apresentou o coeficiente R compreendido entre 0,6 e 1, classificada com média susceptibilidade à fissuração. As demais argamassas com coeficiente R inferior a 0,6 são classificadas como alta susceptibilidade à fissuração.

O *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) de Portugal utilizou em diversas pesquisas um critério para avaliar a susceptibilidade à fissuração de revestimentos de argamassa, através da relação entre resistência à tração na flexão e a resistência à compressão (R_t/R_c). Esta relação é um indicador da ductibilidade da argamassa, pois a variação entre a ruptura por tração na flexão e a ruptura por compressão se deve, principalmente, à fragilidade. Como a resistência à tração é muito inferior à resistência à compressão para argamassas de revestimento, quanto mais próximo de 1 esta relação, mais dúctil é a argamassa. A ductibilidade é uma medida da capacidade de deformação da argamassa antes da ruptura e a tenacidade é a capacidade de um material absorver energia devido à deformação até a ruptura, ou seja, é a energia mecânica capaz de levar o material à ruptura.

Com base nestes critérios, observando os resultados da energia de ruptura à tração ou tenacidade apresentados na Figura 168(a), as argamassas industrializadas B e E possuem as maiores tenacidades, ou seja, maior capacidade de absorver a energia da deformação. Quanto a ductibilidade, observando os resultados de R_t/R_c da Figura 168(b), as argamassa FPP 0.10 e a IAR 9.0 são as argamassas com maior ductibilidade e as argamassas industrializadas A e D são as mais frágeis.



(a)



(b)

Figura 168 – (a) Energia de ruptura (tenacidade); (b) Relação R_v/R_c

4.8 REVESTIMENTOS DA PAREDE

4.8.1 Avaliação da perda de massa por evaporação da água e por sucção do substrato

As Figuras 169 e 170 apresentam os resultados do percentual de água absorvida pelo bloco cerâmico e evaporada em relação à massa total de água utilizada na produção das argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9, respectivamente, utilizando os procedimentos descritos no item 3.3.3.17.

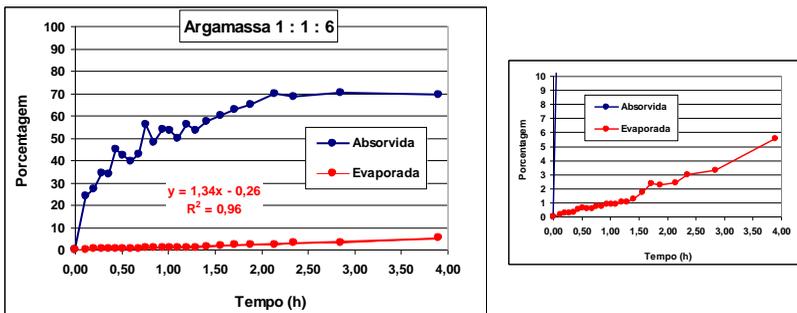


Figura 169 – Percentagem de água absorvida pelo bloco cerâmico e evaporada em relação à massa total de água da argamassa 1 : 1 : 6.

Ampliação até o nível de 10%

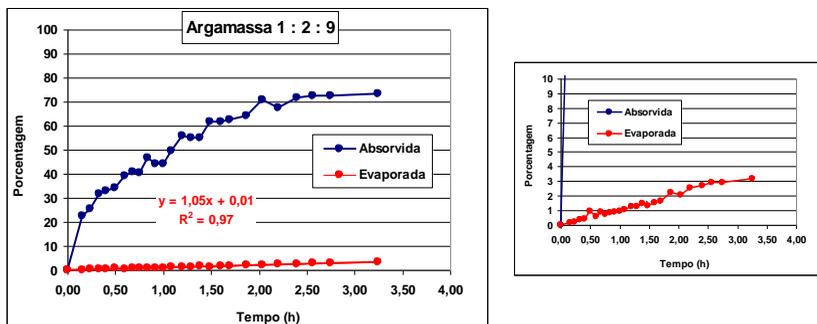


Figura 170 – Porcentagem de água absorvida pelo bloco cerâmico e evaporada em relação à massa total de água da argamassa 1 : 2 : 9. Ampliação até o nível de 10%

No início do ensaio, com os capilares da amostra do bloco cerâmico ainda vazios, a taxa de água absorvida é acentuada e à medida que vai saturando, a absorção tende a se estabilizar. A evaporação da água, apesar da temperatura de 27°C, é baixa devido à elevada umidade relativa do ar. A taxa de água evaporada tem uma tendência linear nas primeiras horas, conforme pode ser observado pelos coeficientes de determinação apresentados nas Figuras 169 e 170.

A capacidade de sucção da água pelo bloco cerâmico é muito superior que a capacidade de retenção de água das argamassas. Portanto, a quantidade de água transferida da argamassa para o substrato é expressivamente maior que a quantidade de água evaporada.

Ao final do ensaio com quase 4 horas, aproximadamente 70% da água inicialmente utilizada na mistura da argamassa 1 : 1 : 6 transferiu-se para o bloco cerâmico, e aproximadamente 5,5% evaporou, restando 24,5% ainda presente na argamassa. Enquanto que com a argamassa 1 : 2 : 9, ao final do ensaio com 3,25 horas, 73,2% da água da argamassa transferiu-se para o bloco cerâmico e 3,2% evaporou, sobrando 23,6% de água na argamassa. A taxa de evaporação da água da argamassa 1 : 2 : 9 com 1,05% por hora foi menor que a taxa de evaporação da argamassa 1 : 1 : 6 com 1,34% por hora. Esse resultado não confirma os resultados de perda de massa por evaporação da água apresentado na Figura 141, pois naquele ensaio a temperatura e umidade foram menores e com utilização de vento.

A diferença entre a massa da amostra saturada com água e a massa da amostra seca em estufa à 105°C representa a quantidade total

de água que a amostra consegue absorver. O resultado médio de três determinações após submersão em água por 48 horas foi de 24,38 g. Com o tempo de 2,15 horas, a massa de água absorvida da argamassa 1 : 1 : 6 pela amostra de bloco cerâmico foi de 24,17 g, ou seja, com pouco mais de duas horas de contato da argamassa com a amostra, já havia atingido 96,84% da capacidade de saturação da amostra. A estabilidade da absorção da água após aproximadamente 2 horas do início do ensaio pode ser verificada nas Figuras 169 e 170, pois praticamente já ocorreu a saturação da amostra.

A água que permaneceu na argamassa ao final do ensaio, continua hidratando o cimento, porém, segundo Détriché e Maso (1986), quando a sucção de água pelo substrato é excessiva, combinado com elevada evaporação pode ocorrer retardamento das reações de hidratação, podendo comprometer o desempenho da argamassa em idades mais avançadas.

4.8.2 Avaliação da fissuração dos revestimentos da parede de alvenaria

Os dois painéis da parede de blocos cerâmicos de 90 x 100 cm cada, foram chapiscados com argamassa de cimento e areia no traço 1 : 3 em volume. A Figura 171 ilustra a parede antes e depois do chapisco.



(a)



(b)

Figura 171 – (a) Parede dividida em dois painéis preparadas para o chapisco e (b) Painéis após o chapisco preparados para o recebimento da argamassa

Após sete dias da execução do chapisco, os painéis foram revestidos com argamassa no traço em volume 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 e após 5 minutos realizou-se o sarrafeamento. Aguardou-se 30 minutos para

executar o desempenho com desempenadeira de madeira, aspergindo água. A parede de alvenaria se encontrava em local protegido de insolação e de ventos fortes, com temperatura de $(27\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $(70\pm 5)\%$. A Figura 172 ilustra o tempo de espera para o sarrafeamento da argamassa 1 : 1 : 6.



Figura 172 – Revestimento da argamassa 1 : 1 : 6 após lançamento aguardando o sarrafeamento

Observando os revestimentos das argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9, antes e depois do sarrafeamento e antes do desempenho, aparentemente não foi verificada nenhuma fissura. Os revestimentos foram monitorados quanto à fissuração, porém decorridos 35 dias nenhuma fissura foi observada nos dois revestimentos, conforme mostra a Figura 173.



Figura 173 – Vista dos revestimentos de argamassa 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 com 35 dias de idade

Vários fatores podem ter influenciado para não ter ocorrido a fissuração dos revestimentos, como falta de vento, umidade relativa do ar elevada, baixa restrição do substrato à retração da argamassa, dentre outros fatores.

A fissuração das argamassas avaliadas através dos moldes foi elevada, pois estão sujeitas a maiores tensões que provocam maiores retrações, cujos fatores intervenientes são: as restrições colocadas no fundo do molde que reduz consideravelmente a espessura da amostra, o vento produzido através do ventilador e a baixa umidade relativa do ar.

Capítulo 5 – Considerações Finais

5.1 CONCLUSÕES

Avaliar a fissuração em revestimentos assume importância ímpar quando se deseja produzir argamassas com desempenho adequado e com um mínimo de patologias possíveis. No entanto, para que isto ocorra, há necessidade de estudos científicos que dêem suporte ao desenvolvimento de metodologias que permitam compreender as principais causas da fissuração, quais os fatores influentes para sua ocorrência, e que mecanismos podem ser adotados para que sejam senão eliminadas, ao menos minimizadas.

O objetivo principal desta pesquisa foi alcançado, pois permitiu avançar no conhecimento das causas da fissuração a partir das medidas de retração livre e restringida, nas primeiras idades, provocadas principalmente pela perda de água por evaporação.

Os objetivos específicos foram determinantes para nortear as pesquisas, pois foi possível delimitar a área de atuação e detalhar os procedimentos para o desenvolvimento das metodologias propostas, de modo a se extrair um contingente de informações para se observar, mensurar e por fim compreender e interpretar os ensaios realizados.

Foram propostas metodologias para a avaliação da fissuração, retração livre e restringida com ensaios realizados em laboratório, em condições ambientais controladas. Para avaliar as metodologias foram produzidas argamassas no traço em volume 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 (cimento : cal : areia) com dois tipos de areia, com adição de fibras de polipropileno e aditivo incorporador de ar.

Constatou-se que a perda de massa das argamassas por evaporação de água, nas primeiras idades, como ocorre em concretos, não é um parâmetro adequado para avaliar a fissuração dos revestimentos de argamassas, pois sofre influência das adições, dos materiais constituintes e, também, do proporcionamento dos mesmos.

Uma das principais constatações desta pesquisa são as evidências que aspectos como o proporcionamento dos materiais, a adição de fibras e de aditivo incorporador de ar, se utilizados de forma adequada, influenciam beneficentemente na redução da retração livre, conseqüentemente, na redução da fissuração das argamassas, principalmente nas primeiras idades.

5.2 QUANTO ÀS METODOLOGIAS

O ensaio para determinação da retração livre de argamassas desde a sua moldagem por muitas décadas vem sendo realizado em moldes com transdutores de deslocamentos posicionados nas duas extremidades, denominado como método bilateral. Nesta pesquisa foi proposto um molde para medida de retração livre com deslocamento livre em apenas uma extremidade (método unilateral). Ensaios realizados com as mesmas argamassas utilizando os dois métodos mostraram que existem correlações entre os resultados.

A técnica para medida das tensões, utilizando célula de carga fixada em uma das extremidades do molde, mostrou-se sensível na obtenção das forças provocadas pela deformação das amostras, constatando-se baixa dispersão quando da reprodutibilidade dos ensaios. O mesmo molde foi utilizado para determinar a força de ruptura à tração (tenacidade) comprovando que existe correlações entre tenacidade das argamassas com as diversas variáveis envolvidas.

Os moldes propostos mostraram-se apropriados para medidas de retração livre e restringida, comprovados pela sensibilidade, praticidade e reprodutibilidade dos ensaios, com baixa dispersão, em condições ambientais controladas.

A utilização de moldes com restrições adaptados do método da norma ASTM C1579 (2006) mostrou-se eficiente para a avaliação da fissuração dos revestimentos das argamassas, pois permitiu avaliar além do proporcionamento de materiais e adições, outros fatores intervenientes que influenciam a fissuração, como temperatura, umidade relativa e velocidade de vento.

Simultaneamente ao ensaio de fissuração foi determinada a perda de massa por evaporação da água através de balança conectada ao computador com presença de vento produzido por um ventilador. Os resultados demonstraram que a presença de vento é fator preponderante na evaporação da água e, conseqüentemente, na fissuração dos revestimentos.

5.3 QUANTO À INFLUÊNCIA DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO

As fibras de polipropileno são muito utilizadas para redução da fissuração provocada pela retração plástica em concretos. Nos últimos anos algumas pesquisas foram desenvolvidas para avaliar a influência de

fibras de polipropileno nas propriedades do estado fresco e endurecido das argamassas de revestimento, com resultados que favorecem a redução da retração e da fissuração, porém com consumos superiores a $1,0 \text{ kg/m}^3$.

Nesta pesquisa utilizou-se baixo consumo de fibras de polipropileno, sendo a que a maior concentração foi de aproximadamente $0,46 \text{ kg/m}^3$ (FPP 0.30). Apesar disto, com a adição de fibras na argamassa ocorreram reduções significativas na retração por secagem e na retração livre e, também, na perda de massa por evaporação da água nas primeiras 24 horas após a moldagem. A adição de fibras de polipropileno não influenciou nos resultados de resistências mecânicas, na idade de 28 dias, porém na idade de 20 horas influenciou favoravelmente a tenacidade.

Os resultados demonstraram que as argamassas com menores consumos de fibras de polipropileno não reduziram a fissuração dos revestimentos nas primeiras horas após a moldagem. Porém, os resultados demonstraram que a argamassa produzida com maior consumo de fibras (FPP 0.30) apresentou significativa redução da retração livre com reduzida evaporação de água nas primeiras 24 horas após a mistura. Estes fatores foram determinantes na redução da fissuração dos revestimentos na argamassa com maior consumo de fibras.

5.4 QUANTO À INFLUÊNCIA DO AR INCORPORADO

A incorporação de ar nas argamassas avaliadas nesta pesquisa influenciou os resultados de diversas propriedades no estado fresco e, também, no estado endurecido.

A redução da retração por secagem nas argamassas foi proporcional ao teor de ar incorporado. Nas primeiras horas após a moldagem, não se observou redução da taxa de evaporação de água nas argamassas, porém, após o enrijecimento ocorreram reduções significativas. Este fenômeno propiciou a redução da retração livre nas primeiras 24 horas, favorecendo a redução da fissuração dos revestimentos, devido, principalmente aos efeitos das microbolhas de ar que dispersam e interrompem a conectividade dos poros capilares, reduzindo assim as tensões capilares.

Com a incorporação de ar, as argamassas avaliadas nesta pesquisa apresentaram uma redução da força registrada na célula de carga devido à retração imposta pela perda de água. Porém, a energia de ruptura

(tenacidade) aumentou com a incorporação de ar, devido, principalmente à capacidade maior de deformação verificado pela redução do módulo de elasticidade.

A incorporação de ar influenciou desfavoravelmente quanto às resistências de compressão e de tração na flexão.

5.5 QUANTO À INFLUÊNCIA DO TIPO DE AREIA

As características físicas das partículas da areia britada de rocha calcária são fatores que influenciam significativamente nas propriedades das argamassas. Argamassas com areia britada exigem maior quantidade de pasta para obter trabalhabilidade somado ao fato de apresentar maior teor de finos ligantes e inertes conduzem ao refinamento dos poros com redução das dimensões capilares o que confere elevada rigidez demonstrada pelo módulo de elasticidade. Conseqüentemente apresentam maiores tensões capilares provocando, assim, maior retração. Estes fenômenos são responsáveis pela ocorrência excessiva de fissuras nos revestimentos das argamassas.

5.6 QUANTO À INFLUÊNCIA DO TRAÇO

Avaliou-se a influencia do traço de duas argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 de cimento, cal e areia. A primeira, com maior consumo de cimento, é utilizada comumente para revestimento de fachadas enquanto que a segunda, com maior consumo de cal é aplicada em revestimentos internos.

O maior consumo de cimento e menor consumo de cal da argamassa 1 : 1 : 6 foram o fatores preponderante para o aumento das resistências mecânicas e do módulo de elasticidade e, também, para a maior tenacidade com relação à argamassa 1 : 2 : 9. Porém, a argamassa 1 : 2 : 9 apresentou retração por secagem e retração livre maiores que a argamassa 1 : 1 : 6 devido, possivelmente, à maior taxa de água evaporada que a argamassa 1 : 1 : 6, influenciada pelo maior teor de finos.

A fissuração maior da argamassa 1 : 2 : 9 em relação à argamassa 1 : 1 : 6, se deve a maior retração livre devido a maior perda de água por evaporação.

As paredes de alvenaria revestidas com as argamassas 1 : 1 : 6 e 1 : 2 : 9 não apresentaram fissuras, antes e após o sarrafeamento, até a idade de 35 dias. Ensaios de monitoração da evaporação da água foram

realizados simultaneamente ao revestimento nas primeiras horas, constatando baixa taxa de evaporação devida, possivelmente à elevada umidade relativa do ar. Este fato, aliado à falta de vento e a baixa restrição do substrato à retração, devem ser alguns dos fatores que influenciaram para a não fissuração dos revestimentos.

5.7 QUANTO AOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA FISSURAÇÃO

Através do dispositivo de medida de retração restringida, foi possível determinar a força de ruptura à tração aplicando uma carga na amostra com velocidade constante, obtendo assim a energia de ruptura (tenacidade). Sendo que, a susceptibilidade à fissuração de um revestimento de argamassa está estreitamente relacionada às forças registradas induzidas pela retração e pela tenacidade.

A metodologia apresentada para avaliação da fissuração do revestimento é uma ferramenta útil que permite avaliar de modo previsível o desempenho da argamassa quanto às variáveis preponderantes como perda de água, retração livre e retração restringida. A metodologia de medida de retração livre e restringida concomitantemente com a metodologia de avaliação da fissuração propostas, foram capazes de avaliar com certo grau de confiabilidade e delinear as evidências responsáveis pela fissuração do revestimento de argamassa.

Na avaliação da susceptibilidade à fissuração de revestimentos de argamassa foram apresentados três métodos. O método desenvolvido pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982), que utiliza a medida de retração por secagem, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão, não se mostrou eficiente para os resultados dos ensaios apresentados nesta pesquisa. Porém, substituindo a retração por secagem por retração livre linear, medida nas primeiras 24 horas, os critérios do método do CSTB podem ser utilizados com grande confiabilidade para avaliar a tendência à fissuração dos revestimentos nas primeiras idades. O método apresentado por Veiga (1997), que utiliza os resultados de medida de retração livre e restringida, também se mostrou eficiente. Enquanto que o terceiro método desenvolvido pelo *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) de Portugal, que utiliza as propriedades mecânicas com indicador de ductibilidade, parece ser mais apropriado para avaliação da susceptibilidade de fissuração de revestimentos em idades mais avançadas.

5.8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar adição de fibras de polipropileno com consumo acima de 500 g/m³ para avaliar a influência na fissuração provocada pela retração livre e restringida;
- Avaliar a influência de outros tipos de fibras na fissuração de revestimentos de argamassa;
- Verificar a influência de diferentes temperaturas, umidades relativas e velocidades de ventos na retração livre e restringida;
- Avaliar o desempenho das argamassas, combinando adição de fibras de polipropileno com aditivos incorporador de ar;
- Determinar o teor ideal de ar incorporado e consumo de água para argamassas de modo a obter revestimentos sem fissuração e com resistências mecânicas adequadas;
- Determinar a energia de ruptura em diferentes idades;
- Desenvolver critérios para avaliação da susceptibilidade à fissuração de revestimento de argamassas através da medida de retração livre utilizando com referência a técnica desenvolvida pelo *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (CSTB, 1982).

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 305R**: Hot weather concreting. Farmington Hills, USA, 1999.

ANDRADE, L. B. **Análise da influência da substituição do agregado miúdo natural por materiais granulares porosos residuais na fase plástica de concretos**. Florianópolis, 2008, 227 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

AÏTCIN, P. -C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4-5, p. 409-420, 2003.

AL-AMOUDI, O. S. B.; MASLEHUDDIN, M.; ABIOLA, T. O. Effect of type and dosage of silica fume on plastic shrinkage in concrete exposed to hot weather. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 10, 737-743, 2004.

AL-AMOUDI, O. S. B.; ABIOLA, T. O.; MASLEHUDDIN, M. Effect of superplasticizer on plastic shrinkage of plain and silica fume cement concretes. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, 642-647, 2006.

ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M.; ABDUL-WARIS, M.; KHAN, M. M. Effect of mix proportions on plastic shrinkage cracking of concrete in hot environments. **Construction and Building Materials**, v. 12, n. 6, p. 353-358, 1998.

ALMUSALLAM, A. A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 4, p. 353-361, 2001.

ALTOUBAT, S. A. **Early age stresses and creep-shrinkage interaction of restrained concrete**. Estados Unidos da América, 2000, 221 p. Tese (Doutorado) – University of Illinois at Urbana-Champaign.

ALTOUBAT, S. A.; LANGE, D. A. Tensile basic creep: measurements and behavior at early age. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 5, p. 386-393, 2001.

ALTOUBAT, S. A.; LANGE, D. A. Creep, shrinkage, and cracking of early age concrete discussion. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 3, p. 326-357, 2002.

ALTOUBAT, S. A.; LANGE, D. A. A new look at tensile creep of fiber reinforced concrete. Innovations in Fiber Reinforced Concrete for Value. **ACI Special Publication**, v. 216, p. 143-159, 2003.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Brasília, 2002, 175 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G. Factors contributing to early age shrinkage cracking of slag concretes subjected to 7-days moist curing. **Materials and Structures**, Article in Press, 2007.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, Article in Press, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **ASTM C67**: Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. Philadelphia, USA, 2009.

_____. **ASTM C157/C157M**: Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete. Philadelphia, USA, 2006.

_____. **ASTM C270**: Mortar for unit masonry. Philadelphia, USA, 1999.

_____. **ASTM C780**: Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. Philadelphia, USA, 2009.

____. **ASTM C1579:** Standard test method for evaluating plastic shrinkage cracking of restrained fiber reinforced concrete (using a steel form insert). Philadelphia, USA, 2006.

____. **ASTM C1581:** Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage. Philadelphia, USA, 2004.

____. **ASTM D4648:** Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil. Philadelphia, USA, 2005.

ANDRIAMANANTSILAVO, N. R. **Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage: expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation.** França, 2003, 128 p. Tese (Doutorado) – Université de Bretagne Sud.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** São Paulo, 2005, 162 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23:** Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

____. **NBR 6136:** Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. Rio de Janeiro, 2007.

____. **NBR 7211:** Concreto Endurecido – Determinação da Fluência. Rio de Janeiro, 1983.

____. **NBR 7215:** Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

____. **NBR 7219:** Determinação do teor de materiais pulverulentos nos agregados. Rio de Janeiro, 1982.

____. **NBR 7251:** Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

____. **NBR 8224:** Concreto Endurecido – Determinação da Fluência. Rio de Janeiro, 1983.

____. **NBR 8490:** Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. Rio de Janeiro, 1984.

____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 1987.

____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 11579:** Cimento Portland – Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – preparo da mistura e determinação de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

____. **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, 2005.

____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

____. **NBR 13530:** Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.

____. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro, 1996.

____. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações – Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (Parte 3). Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15258:** Argamassa para revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

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

____. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15270:** Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.

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

ATRUSH, D. S. **Tensile and compressive creep of early age concrete: Testing and modeling.** Trondheim. Noruega, 2003, 248 p. Tese (Doutorado) – Norwegian University of Science and Technology.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1263-1267, 2006.

BARCELO, L.; BOIVIN, S.; RIGAUD, S.; ACKER, P.; CLAVAUD, B.; BOULAY, C. Linear vs. volumetric autogenous shrinkage measurement: material behaviour or experimental artefact? In: International Research Seminar in Lund, 2th, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1999, p.109-125.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à hautes performances**. França, 1994, 468 p. Tese (Doutorado) – École Nationale des Ponts et Chaussées.

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

BAUER, E.; CORTEZ, I. M. M. Compósitos à base de fibras sintéticas em argamassas para revestimento na prevenção da fissuração. . In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, IV, Brasília-DF. **Anais...** ANTAC, 2001, p. 89-100.

BAUER, E.; SANTOS, C. C. N.; MORAIS, D. M.; PEREIRA, C. H. A. F. Avaliação da consistência das argamassas industrializadas projetadas utilizando o método vane. **e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, v. 2, n. 1, p. 54-63, 2005.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G. ; GUIMARÃES, E. A. Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, Florianópolis-SC. **Anais...** ANTAC, 2005, p. 95-105.

BAYASI, Z.; MACINTYRE, M. Application of brillated polypropylene bers for restraint of shrinkage cracking in silica fume concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 4, p. 337-344, 2002.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 1. ed. Inglaterra: Elsevier Science Publishers Ltd, 1990. 449 p.

BENTUR, A.; KOVLER, K. Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems. **Materials and Structures**, v. 36, n. 3, p. 183-190, 2003.

BENTZ, D. P.; GEIKER, M. R.; HANSEN, K. K. Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 7, p. 1075-1085, 2001.

BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Composites**. v. 26, n. 6, p. 677-685, 2004.

BENTZ, D. P. A review of early-age properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 196-204, 2008.

BENTZ, D. P.; AİTCIN, P. -C. The hidden meaning of water-to-cement ratio. **Concrete International**, v. 30, n. 5, p. 51-54, 2008.
Disponível em <http://ciks.cbt.nist.gov/~bentz/ci3005bentzreadonly.pdf>
(Acessado em 23/05/08).

BISSONNETTE, B.; PIGEON, M. Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25. n. 5, p. 1075-1085, 1995.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1655-1662, 1999.

BJØNTEGAARD, Ø.; SELLEVOLD, E. J.; HAMMER, T. A. High performance concrete (HPC) at early ages: self-generated stresses due to autogenous shrinkage and temperature. In: International Research Seminar in Lund, 1th, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1997, p. 1-7.

BJØNTEGAARD, Ø. **Thermal dilatation and autogenous deformation as driving forces to self-induced stresses in high**

performance concrete. Noruega, 1999, 256 p. Tese (Doutorado) – Norwegian University of Science and Technology.

BJØNTEGAARD, Ø.; HAMMER, T. A.; SELLEVOLD, E. J. On the measurement of free deformation of early age cement past and concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 427-435, 2004.

BLOOM, R.; BENTUR, A. Free and restrained shrinkage of normal and high strength concretes. **ACI Materials Journal**, v. 92, n. 2, p. 211-217, 1995.

BRANCH, J.; RAWLING, A.; HANNANT, D. J.; MULHERON, M. The effects of fibres on the plastic shrinkage cracking of high strength concrete. **Materials and Structures**, v. 35, n. 3, p. 189-194, 2002.

BRESSON, A. **Influence de la minéralogie sur le comportement des mortiers de ciment au jeune âge.** França, 2006, 150 p. Dissertação (Mestrado) – Université Laval.

BREUGEL, K. van. **Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials.** Holanda, 1991, 295 p. Tese (Doutorado) – Delft University of Technology.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 4887:** Mortar admixtures. Specification for air-entraining (plasticizing) admixtures. London, 1986.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS 4551:** Mortar. Methods of tests for mortar. Chemical and analysis and physical testing. London, 2005.

BUFFO-LACARRIERE, L. **Prevision et evaluation de la fissuration precoce des ouvrages en beton.** França, 2007, 214 p. Tese (Doutorado) – Institut National de Sciences Appliquées.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, IV, Brasília-DF. **Anais...** ANTAC, 2001, p. 43-67.

CARLSWÄRD, J. **Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self compacting concrete overlays - Test methods and theoretical**

modeling. Suécia, 2006, 234 p. Tese (Doutorado) – Luleå Tekniska Universitet.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, Florianópolis-SC. **Anais...** ANTAC, 2005, p. 83-94.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** São Paulo, 2007, 302 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Carlos.

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

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT (CSTB). **Note d'information sur les caractéristiques et le comportement des enduits extérieurs d'imperméabilisation de murs à base de liants hydrauliques.** Cahiers du CSTB, Paris, Livraison 230, n. 1778, juin, 1982.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim Técnico n. 68.

COHEN, M. D.; OLEK, J.; DOLCH, W. L. Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland-cement and portland cement-silica fume past and mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 1, p. 103-199, 1990.

CUSSON, D.; HOOGEVEEN, T. Measuring early-age coefficient of thermal expansion in high-performance concrete. In: International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Dinamarca. **Proceedings...** 2006, 10 p.

D'AMBROSIA, M. D.; ALTOUBAT, S. A.; PARK, C.; LANGE, D. A. **Early age tensile creep and shrinkage of concrete with shrinkage reducing admixtures.** In: Creep, Shrinkage and Durability Mechanics

of Concrete and other Quasi-Brittle Materials, Edited by F. Ulm, Z. Bazant, F. H. Wittmann, Boston, 2001, p. 685-690.

D'AMBROSIA, M. D.; LANGE, D. A.; GRASLEY, Z. C. Measurement and modeling of creep and shrinkage of concrete under stress from shrinkage at early ages. Autogenous Deformation of Concrete. **ACI Special Publication**, v. 220, p. 99-112, 2004.

DENARIÉ, E. **Etude expérimentale des couplages viscoélasticité-croissance des fissures dans les bétons de ciment**. França, 2000, 178 p. Tese (Doutorado) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

DÉTRICHÉ, C. H. **Contribution à l'étude des déformations des couches minces de mortiers de liants hydrauliques**. Toulouse, 1977, 247 p. Tese (Doutorado) – Université Paul Sebatier de Toulouse.

DÉTRICHÉ, C. H.; GALLIAS, J. L.; GRANDET, J.; MASO, J. C. Mouvement d'eau, hydratation et comportement mécanique des mortiers d'enduit. **Matériaux et Constructions**, v. 17, n. 100, p. 297-302, 1984.

DÉTRICHÉ, C. H.; GALLIAS, J. L.; GRANDET, J.; MASO, J. C. Influence des paramètres de mise en oeuvre et de composition sur le comportement des mortiers d'enduit. **Matériaux et Constructions**, v. 18, n. 105, p. 193-200, 1985.

DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J. C. Differential hydration in rendering mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 16, n. 3, p. 429-439, 1986.

DIAMOND, S. Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 10, p. 1517-1525, 2000.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete - effects of fine aggregate and limestone filler**. Suécia, 2007, 204 p. Tese (Doutorado) – Chalmers University of Technology.

FERNANDES, C. P. **Caracterização morfológica de espaços porosos: reconstrução multiescala e simulação de processos de invasão de fluidos não-molhantes**. Florianópolis, 1994. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FERON, C. C. **Étude des mécanismes de génération de contraintes et de fissuration par retrait gêné dans les structures à base de matériaux cimentaires.** França, 2002, 357 p. Tese (Doutorado) – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

FERRARIS, C. F. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, v. 104, n. 5, 1999, p.461-478.

Disponível em <http://nvl.nist.gov/pub/nistpubs/jres/104/5/j45fer.pdf> (Acessado em 30/06/08).

FERRARIS, C. F.; LARRARD, F. Testing and modeling of fresh concrete rheology. National Institute of Standards and Technology. **NISTIR 6094**, 1998.

Disponível em <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build98/PDF/b98023.pdf> (Acessado em 30/06/08).

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa.** 2. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

FOURDRIN, E.; GUIGOU, C.; CHAPPUIS, J. Early age shrinkage of mortars: conception of a new device and detailed analysis of a typical experimental curve. In: **Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000.** Canes, France: Edited by Baroghel-Bouny, V. and Aïtcin, P. -C., 2001, p. 387-400.

GAGNÉ, R.; AOUAD, I.; SHEN, J.; POULIN, C. Development of a new experimental technique for the study of the autogenous shrinkage of cement paste. **Materials and Structures**, v. 32, n. 9, p. 635-642, 1999.

GALLIAS, J. L. **Mouvements d'eau et hydratation du liant dans une couche mince de mortier. Application aux enduits extérieurs.** França, 1982, 147 p. Tese (Doutorado) – Université Paul Sabatier de Toulouse.

GARCI, M. C. **Quantifying microstructural variations in cement pastes: Implications on drying shrinkage.** Estados Unidos da América, 1999, 195 p. Tese (Doutorado) – Northwestern University.

GRASLEY, Z. C.; LANGE, D. A. Modeling drying shrinkage stress gradients in concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, v. 26, n. 2, p. 115-122, 2004.

GROCHOSKI, M.; GRULLÓN, M.; FIGUEIREDO, A. D.; HELENE, P. Influência da fibra de polipropileno na retração de argamassas. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45, Vitória-ES. **Anais... IBRACON**, 2003, 13 p.

HAMMER, T. A. Test methods for linear measurement of autogenous shrinkage before setting. In: Japan Concrete Institute. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Hiroshima, Japan: Edited by Eiichi Tazawa, 1999, p. 143-154.

HAMMER, T. A. Effect of silica fume on the plastic shrinkage and pore water pressure of high-strength concretes. **Materials and Structures**, v. 34, n.5, p. 273-278, 2001.

HAMMER, T. A. **Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases**. Noruega, 2007, 160 p. Tese (Doutorado) – Norwegian University of Science and Technology.

HAMMER, T. A.; K. T. FOSSA, Influence of entrained air voids on pore water pressure and volume change of concrete before and during setting. **Materials and Structures**, v. 39, n. 9, p. 801-808, 2006.

HANSEN, K. K.; JENSEN, O. M. Equipment for measuring autogenous RH-change and autogenous deformation in cement paste and concrete. In: International Research Seminar in Lund, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1997, p. 27-30.

HANZIC, L.; ILIC, R. Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1385-1388, 2003.

HOLT, E. E. **Early age autogenous shrinkage of concrete**. Helsinki, VTT Publications 446 – Technical Research Centre of Finland, 2001.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. Autogenous shrinkage at very early ages. In: Japan Concrete Institute. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Hiroshima, Japan: Edited by Eiichi Tazawa, 1999, p. 135-142.

HOLT, E. E.; LEIVO, M. Cracking risks associated with early age shrinkage. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 521-530, 2004.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. São Paulo, 2008, 247 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HOSSAIN, A. B.; PEASE, B.; WEISS, W. J. Quantifying early-age stress development and cracking in low w/c concrete using the restrained ring test with acoustic emission. **Transportation Research Record, Concrete Materials and Construction**, v. 1834, p. 24-33, 2003.

HOSSAIN, A. B.; WEISS, W. J. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, p. 531-540, 2004.

HOSSAIN, A. B.; WEISS, W. J. The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 189-199, 2006.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste, I. Modelling at macroscopic scale. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1457-1468, 1995.

IGARASHI, S.; WATANABE, A.; KAWAMURA, M. Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 513-519, 2005.

IUPAC – INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Compendium of chemical terminology**, 2th ed., compiled by Alan D. McNaught and Andrew Wilkinson, 1997. Disponível em www.iupac.org/publications/compendium/ (Acessado em 21/04/08).

ISMAIL, M. **Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour Prolonger la duree de service dès Infrastructures (ponts, centrales nucleaires)**. Toulouse, França, 2006, 234 p. Tese (Doutorado) – Institut National des Sciences Appliquées.

JASICZAK, J.; SZYMANSKI, P. The influence of melamine based superplasticizer on early concrete shrinkage. **Foundations of Civil and Environmental Engineering**, v. 15, n. 4, p. 5-14, 2004.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening Portland cement paste. **Materials and Structures**, v. 28, n. 7, p. 406-409, 1995.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Autogenous deformation and RH-change in perspective. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1859-1865, 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials II. Experimental observations. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 973-978, 2002.

JOHN, V. M; RAGO, F.; CINCOTTO, M. A.; GUIMARÃES, J. E. P. Desempenho de argamassas de revestimento mistas e aditivadas – metodologia de avaliação. In: International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, 5th, Florianópolis. **Anais...** 1994, p. 71-83.

KAMEN, A. **Comportement au jeune age et différé d'un béton écrouissant sous les effets thermomécaniques**. Suiça, 2007, 246 p. Tese (Doutorado) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

KOENDERS, E. A. B. Simulation of volume changes in hardening cement-based materials. Holanda, 1997, 171 p. Tese (Doutorado) – Delft Universty of Tecnology.

KOVLER, K. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. **Materials and Structures**, v. 27, n. 6, p. 324-330, 1994.

KOVLER, K.; IGARASHI, S.; BENTUR, A. Tensile creep behavior of high strength concretes at early ages. **Materials and Structures**, v. 32, n. 5, p. 383-387, 1999.

KOVLER, K.; ZHUTOVSKY, S. A. Overview and future trends of shrinkage research. **Materials and Structures**, v. 39, n. 9, p.827-847, 2006.

KRONLÖF, A.; LEIVO M.; SIPARI, P. Experimental study on basic phenomena of shrinkage and cracking of fresh mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1747-1754, 1995.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). Portugal.

Disponível em <http://www.lnec.pt> (Acessado em 01/02/2009).

LAM, H. **Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability**. Canadá, 2005, 119 p. Tese (Doutorado) – University of Toronto.

LAPLANTE, P.; BOULAY, C. Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers ages. **Materials and Structures**, v. 27, n. 10, p. 596-605, 1994.

LARRARD, F.; SEDRAN, T. Mixture-proportioning of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 32, n. 11, p. 1699-1704, 2002.

LAURENCE, O. **La fissuration due au retrait restreint dans les reparations minces en béton: apports combines de l'expérimentation et de la modélisation**. França, 2001, 320 p. Tese (Doutorado) – École Nationale des Ponts et Chaussées.

LIM, Y. M.; WU, H.; LI, V. C. Development of flexural composite properties and dry shrinkage behavior of high-performance fiber reinforced cementitious composites at early ages. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 1, p. 20-26, 1999.

LOSER, R.; LEEMANN, A. Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete. **Materials and Structures**, Article in Press, 2008.

LOUKILI, A.; CHOPIN, D.; KHELIDJ, A.; TOUZO, J. Y. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 6, p. 915-922, 2000.

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. Holanda, 2003, 169 p. Tese (Doutorado) – Technische Universiteit Delft.

LURA, P.; BREUGEL, K. van; MARUYAMA, I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1867-1872, 2001.

LURA, P.; JENSEN, O. M.; BREUGEL, K. van. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 2, p. 223-232, 2003.

LURA, P.; JENSEN, O. M. On the measurement of free deformation of early age cement paste and concrete [Bjøntegaard, Ø., Hammer, T. A., Sellevold, E. J. *Cement and Concrete Composites* v. 26 p. 427-435, 2004]. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7-8, p. 854-856, 2005.

LURA, P.; JENSEN, O. M. Measuring techniques for autogenous strain of cement paste. **Materials and Structures**, v. 40, n. 4, p. 431-440, 2007.

LURA, P.; MAZZOTTA, G. B.; RAJABIPOUR, F.; WEIS, J. Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures. In: International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments, Dead Sea, Israel. **Proceedings...** Edited by Kovler, K., 2006, p. 203-213.

LURA, P.; PEASE, B.; MAZZOTTA, G.; RAJABIPOUR, F.; WEISS, W. J. Influence of shrinkage-reducing admixtures on evaporation, settlement, and plastic shrinkage cracking. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 2, p. 187-194, 2007.

MA, Y.; ZHU, B.; TAN, M.; WU, K. Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar. **Materials and Structures**, v. 37, n. 2, p. 92-95, 2004.

MALTESE, C.; PISTOLESI, C.; LOLLI, A.; BRAVO, A.; CERULLI, T.; SALVIONI, D. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 12, p. 2244-2251, 2005.

MASSAZA, F. Pozzolanic cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 15, n. 4, p. 185-214, 1993.

MEETEN, G. H. Yield stress of structured fluids measured by squeeze flow. **Rheologica Acta**, v. 39, n. 4, p. 399-408, 2000.

MELO NETO, A. A. **Estudo da influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória**. São Paulo, 2008, 253 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MESBAH, H. A.; BUYLE-BODIN, F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 13, n. 8, p. 439-447, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MIHASHI, H.; LEITE, J. P. B. State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 2, n. 2, p. 141-154, 2004.

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

MITANI, H. **Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges: approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux**. França, 2003, 182 p. Tese (Doutorado) – École Nationale des Ponts et Chaussées.

MIYAZAWA, S.; TAZAWA, E. Shrinkage of high-strength concrete at different ambient humidities. In: International Research Seminar in Lund, 2th, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1999, p. 15-24.

MOHAMED, A. R.; HANSEN, W. Prediction of stresses in concrete pavements subjected to non-linear gradients. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, n. 6, p. 381-387, 1996.

MOKAREM, D. W. **Development of concrete shrinkage performance specifications**. Estados Unidos da América, 2002, 112 p. Tese (Doutorado) – Virginia Polytechnic Institute and State University.

MOMAYEZ, A; EHSANI, M. R.; RAJAIE, H.; RAMEZANIANPOUR, A. Cylindrical specimen for measuring shrinkage in repaired concrete members. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 107-116, 2005.

MORENCY, M.; VAYSBURD, A.; FAY, K. von; BISSONNETTE, B. **Development of a test method to evaluate cracking tendency of repair materials, Phase I**. Denver, Colorado: Concrete Repair Engineering Experimental Program, 2005. 45 p. Research Report.

MORIOKA, M.; HORI, A.; HAGIWARA, H.; SAKAI, E.; DAIMON, M. Measurement of autogenous length changes by laser sensors equipped with digital computer systems. In: Japan Concrete Institute. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Hiroshima, Japan: Edited by Eiichi Tazawa, 1999, p. 203-210.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 1. ed. Rio de Janeiro: PINI, tradução de Salvador E. Giammusso, 1982. 738 p.

NICOT, P.; RUOT, B.; DEVÈS, O.; BALAYSSAC, J.P.; DÉTRICHÉ, C. H. Restrained shrinkage of polymer-modified mortar layers applied on adhesive substrate: measurement device and results. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 2., Lisboa, Portugal. **Anais...** APFAC, 2007, 12 p.

NICOT, P. **Interactions mortier-support: éléments déterminants des performances et de l'adhérence d'un mortier**. Toulouse, 2008, 207 p. Tese (Doutorado) – Université Paul Sebatier de Toulouse.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas. Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. 18. ed. São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

OLIVEIRA, M. L. L.; GLEIZE, P. J. P.; ROMAN, H. R. Influência da adição de fibras de polipropileno em argamassas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V, São Paulo. **Anais... ANTAC**, 2003, p. 479-491.

ØSTERGAARD, L.; LANGE, D. A.; ALTOUBAT, S. A.; S. HENRIK. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1895-1899, 2001.

ØSTERGAARD, L. **Early-age fracture mechanics and cracking of concrete – experiments and modelling**. Dinamarca, 2003, 218 p. Tese (Doutorado) – Technical University of Denmark.

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. Brasília, 2004, 242 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília.

PAILLÈRE, A. M.; BUIL, M.; SERRANO, J. J. Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume concrete. **ACI Materials Journal**, v. 86, n. 2, p. 139-144, 1989.

PIGEON, M.; TOMA, G.; DELAGRAVE, A.; MARCHAND, J.; BISSONNETTE, B.; PRINCE, J. C. Equipment for the analysis of the behaviour of concrete under restrained shrinkage at early ages. **Magazine of Concrete Research**, v. 52, n. 4, p. 297-302, 2000.

PIGEON, M.; TOMA, G. MARCHAND, J.; BISSONNETTE, B. Étude expérimentale du retrait endogène restraint au jeune âge. **Materials and Structures**, v. 36, n. 10, p. 666-672, 2003.

PRINCIGALLO, A.; LURA, P.; BREUGEL, K. van; LEVITA, G. Early development of properties in a cement paste: A numerical and

experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 1013-1020, 2003.

QI, C. **Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement**. Estados Unidos da América, 2003, 139 p. Tese (Doutorado) – Purdue University.

QI, C.; WEISS, W. J.; OLEK, J. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function. **Materials and Structures**, v. 36, n. 6, p. 386-395, 2003.

QI, C.; WEISS, W. J.; OLEK, J. Statistical significance of the restrained slab test for quantifying plastic cracking in fiber reinforced concrete. **Journal of ASTM International**, v. 2, n. 7, 18 p., 2005.

QUARCIONI, V. A. **Influência da Matéria Prima e dos Fornos de Calcinção nas Características da Cal Virgem**. São Paulo, 2008, 180p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

RADOCEA, A. **A study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials**. Suécia, 1992, 125 p. Tese (Doutorado) – Chalmers University of Technology.

RADOCEA, A. A model of plastic shrinkage. **Magazine of Concrete Research**, v. 46, n. 167, p. 125-132, 1994.

RADOCEA, A. Autogenous volume change of concrete at very early age: model and experimental data. In: International Research Seminar in Lund, 1th, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1997, p. 56-71.

RAJABIPOUR, F.; SANT, G.; WEISS, W. J. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 606-615, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science and Technology**. Ottawa, Noyes Publications, 1984.

RAVINA, D. Early longitudinal dimensional changes of fresh fly ash mortar exposed to drying conditions. **Cement and Concrete Research**, v. 16, n. 6, p. 902-910, 1986.

RONGBING, B.; JIAN, S. Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 3, p. 445-448, 2005.

SANJUÁN, M. A.; MORAGUES, A. Model for predicting plastic shrinkage of polypropylene reinforced mortars. **Journal of Materials Science**, v. 29, n. 11, p. 2821-2825, 1994.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas à avaliação de suas durabilidades**. São Paulo, 1998, 163 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios**. São Paulo, 1989. 227 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SHAH, S. P.; WEISS, W. J.; YANG, W. Shrinkage cracking – can it be prevented? **ACI Concrete International**, v. 20, n. 4, p. 51-55, 1998.

SHAH, S. P.; WEISS, W. J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. **Materials and Structures**, v. 39, n. 9, p. 887-899, 2006.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento portland**. Florianópolis, 2001, 209 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, A. S. R.; AZEVEDO, M. T.; MOTA, R. M.; D'ALMEIDA, C. R. Avaliação do desempenho de argamassa de revestimento com uso de fibra de polipropileno na cidade de Salvador/BA. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, V, São Paulo. **Anais... ANTAC**, 2003, p. 469-479.

SILVA, N. G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V. C. Argamassas com areia britada: influência dos finos e da forma das partículas. In: Simpósio

Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, Florianópolis-SC. **Anais...** ANTAC, 2005, p. 12-22.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas. In: Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, XI, Florianópolis-SC. **Anais...** ANTAC, 2006, p. 4349-4358.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C.; GLEIZE, P. J. P. Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VII, Recife-PE. **Anais...** ANTAC, 2007, 12 p.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Revista Ambiente Construído**, v. 8, n. 4, p. 21-35, 2008.

SILVA, N. G.; COLLODETTI, G.; PICHETTI, D. Z. C. M.; GLEIZE, P. H. P. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 51, Curitiba-PR. **Anais...** IBRACON, 2009, 14 p.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico**. São Paulo, 2006, 175 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SIQUEIRA, JOSÉ EDUARDO LOBATO. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho**. Florianópolis, 2006, 217 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. **Cement and concrete composites**, v. 29, n. 7, p. 575-581, 2007.

SOROUSHIAN, P.; RAVANBAKSH, S. Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibers. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 429-435, 1998.

SPRINGENSCHMID, R.; GIERLINGER, E.; KERNOZYCKI, W. Thermal stress in mass concrete: a new testing method and the influence of different cements. In: International Congress for Large Dams, 15th, Lausanne. **Proceedings...** 1985, p. 57-72.

TAKADA, K.; BREUGEL, K. van; KOENDERS, A. A. B.; KAPTJIN, N. Experimental evaluation of autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete. In: Japan Concrete Institute. **Autogenous Shrinkage of Concrete**. Hiroshima, Japan: Edited by Eiichi Tazawa, 1999, p. 229-238.

TAMIN, P. F. **Étude du comportement mécanique des revêtements de façade. Enduits**. França, 1986. Tese (Doutorado). École Nationale des Ponts et Chaussées.

TAO, Z.; WEIZU, Q. Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 584-591, 2006.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Experimental study on mechanism of autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1633-1638, 1995.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S.; KASAI, T. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 2, p. 288-292, 1995.

TOLEDO FILHO, R.; SANJUAN, M. A. Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 10, p. 1597-1604, 1999.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; SANJUAN, M. A.; ENGLAND, G. L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 537-546, 2005.

TOMA, G. **Comportement des bétons au jeune age**. Canadá, 1999, 264 p. Tese (Doutorado) – Faculté des Sciences et de Génie Université Laval.

TOMA, G.; PIGEON, M.; MARCHAND, J.; BISSONNETTE, B.; BARCELO, L. Early age autogeneous restrained shrinkage: Stress build up and relaxation. In: International Research Seminar in Lund, 2th, Lund, Sweden. **Proceedings...** Edited by Persson, B. and Fagerlund, G., 1999, p. 61-72.

TOPÇU, I. B.; ELGUN, V. B. Influence of concrete properties on bleeding and evaporation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 275-281, 2004.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. Florianópolis, 2005, 167 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

TURCRY, P. **Retrait et fissuration des betons autoplaçants. Influence de la formulation**. França, 2004, 220 p. Tese (Doutorado) – École Centrale de Nantes.

TURCRY, P.; LOUKILI, A. Evaluation of plastic shrinkage cracking of self-consolidating concrete. **ACI Materials Journal**, v. 103, n. 4, p. 272-279, 2006.

UNO, P. J. Plastic shrinkage cracking and evaporation – Formulas. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 365-375, 1998.

VAYSBURD, A. M.; CARINO, N. J.; BISSOUNETTE, B. **Predicting the Performance of Concrete Repair Materials**. Durham, New Hampshire: National Institute of Standards and Technology, 1999. 28 p., Summary of Workshop.

VAYSBURD, A. M.; EMMONS, P. H.; BISSOUNETTE, B.; PIGEON, M. Some aspects of evaluating cracking sensitivity of repair materials. In: International RILEM Conference, Haifa, Israel. **Proceedings...** Edited by Kovler, K. and Bentur, A., 2002, p. 169-185.

VEIGA, M. R. S. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes – contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação**. Portugal, 1997, 458 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

VEIGA, M. R. S.; SOUZA, R. H. F. Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem. **Engenharia Civil UM (Universidade do Minho)**, v. 1, n. 20, p. 45-56, 2004.

VEIGA, M. R. S.; VELOSA, A. L.; MAGALHÃES, A. C. Evaluation of mechanical compatibility of renders to apply on old walls base don a restrained shrinkage test. **Materials and Structures**, v. 40, n. 10, p. 1115-1126, 2007.

WANG, Y.; LI, V. C.; BACKER, S. Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 12, n. 1, p. 29-40, 1990.

WEISS, W. J. **Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete**. Estados Unidos da América, 1999, 258 p. Tese (Doutorado) – Northwestern University.

WITTMANN, F. H. On the action of capillary pressure in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 1, p. 49-56, 1976.

WONGTANAKITCHAROEN, T.; NAAMAN, A. F. Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. **Materials and Structures**, v. 40, n. 3, p. 289-300, 2007.

YOOL, A.; LEES, T. P. The potential shrinkage of mortars: effects of sand characteristics. **Masonry International**, v. 11, n. 3, p. 89-96, 1998.

Anexos

Anexo 1 – Resultados individuais do teor de ar incorporado e índice de consistência

Tabela 29 – Massa de materiais utilizados na produção das argamassas

Arg	Cimento (g)	Cal (g)	Areia seca (g)	Aditivo (g)	Fibras (g)	Água (g)	Total (g)	A/C	Teor de água (%)
Arg A			2950,0			590,0	3540,0		20,0
Arg B			3000,0			480,0	3480,0		16,0
Arg C			3000,0			480,0	3480,0		16,0
Arg D			3000,0			600,0	3600,0		20,0
Arg E			3588,5			502,4	4090,9		14,0
1 : 1 : 6	300,0	194,0	2527,5	-	-	725,2	3746,7	2,42	24,0
1 : 2 : 9	205,0	265,1	2590,7	-	-	734,6	3795,4	3,58	24,0
BRITA	285,0	184,3	2565,4	-	-	637,3	3672,0	2,24	21,0
FPP 0.10	300,0	194,0	2527,5	-	0,30	725,2	3747,0	2,42	24,0
FPP 0.20	300,0	194,0	2527,5	-	0,60	725,2	3747,3	2,42	24,0
FPP 0.30	300,0	194,0	2527,5	-	0,90	725,2	3747,6	2,42	24,0
IAR 9.0	300,0	194,0	2527,5	0,058	-	695,0	3716,5	2,32	23,0
IAR 15.0	300,0	194,0	2527,5	0,129	-	658,7	3680,4	2,20	21,8
IAR 21.0	300,0	194,0	2527,5	0,217	-	613,4	3635,1	2,04	20,3
IAR 27.0	300,0	194,0	2527,5	0,362	-	543,9	3565,8	1,81	18,0

Tabela 30 – Densidade de massa no estado fresco calculada

Argamassa	Volume da argamassa (cm³)	Massa da argamassa (g)	Densidade de massa (kg/m³)
Arg A	1675	3540	2113
Arg B	1531	3480	2273
Arg C	1596	3480	2180
Arg D	1669	3600	2157
Arg E	1828	4091	2238
1 : 1 : 6	1856	3747	2018
1 : 2 : 9	1886	3795	2012
BRITA	1774	3672	2070
FPP 0.10	1856	3747	2018
FPP 0.20	1856	3747	2019
FPP 0.30	1856	3748	2019
IAR 9.0	1826	3717	2035
IAR 15.0	1790	3680	2056
IAR 21.0	1745	3635	2084
IAR 27.0	1675	3566	2129

Tabela 31 – Densidade de massa no estado fresco medida – NBR 13278 (ABNT, 2005)

Arg	Densidade de massa medida (kg/m ³)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
Arg A	1847	1840	1837	1841	5,08
Arg B	1582	1589	1596	1589	7,02
Arg C	1627	1627	1622	1625	2,51
Arg D	2037	2041	2037	2038	2,48
Arg E	1490	1492	1502	1495	6,24
1 : 1 : 6	1949	1946	1938	1944	6,09
1 : 2 : 9	1927	1941	1915	1928	13,04
BRITA	2007	1978	1927	1971	40,76
FPP 0.10	1933	1946	1930	1936	8,21
FPP 0.20	1924	1934	1926	1928	5,35
FPP 0.30	1920	1940	1919	1926	11,64
IAR 9.0	1855	1849	1846	1850	4,18
IAR 15.0	1727	1726	1729	1728	1,34
IAR 21.0	1631	1627	1634	1631	3,34
IAR 27.0	1542	1547	1538	1542	4,71

Tabela 32 – Teor de ar incorporado – NBR 13278 (ABNT, 2005)

Arg	Teor de ar incorporado (%)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
Arg A	12,61	12,94	13,08	12,88	0,24
Arg B	30,43	30,12	29,81	30,12	0,31
Arg C	25,39	25,40	25,59	25,46	0,12
Arg D	5,53	5,36	5,58	5,49	0,12
Arg E	33,43	33,35	32,91	33,23	0,28
1 : 1 : 6	3,41	3,58	4,00	3,66	0,30
1 : 2 : 9	4,21	3,53	4,83	4,19	0,65
BRITA	3,06	4,44	6,94	4,81	1,97
FPP 0.10	4,24	3,61	4,37	4,07	0,41
FPP 0.20	4,70	4,20	4,61	4,50	0,26
FPP 0.30	4,91	3,92	4,92	4,59	0,58
IAR 9.0	8,88	9,14	9,28	9,10	0,21
IAR 15.0	15,98	16,04	15,91	15,98	0,07
IAR 21.0	21,72	21,89	21,57	21,73	0,16
IAR 27.0	27,58	27,31	27,75	27,55	0,22

Tabela 33 – Índice de consistência – NBR 13276 (ABNT, 2005)

Arg	Índice de consistência (mm)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
Arg A	290	320	341	317	26
Arg B	240	273	267	260	18
Arg C	270	300	306	292	19
Arg D	265	298	316	293	26
Arg E	250	275	267	264	13
1 : 1 : 6	307	260	297	288	25
1 : 2 : 9	280	251	290	274	20
BRITA	300	295	316	304	11
FPP 0.10	290	269	309	289	20
FPP 0.20	285	263	311	286	24
FPP 0.30	294	264	301	286	20
IAR 9.0	290	253	295	279	23
IAR 15.0	286	238	268	264	24
IAR 21.0	260	207	235	234	27
IAR 27.0	230	206	224	220	13

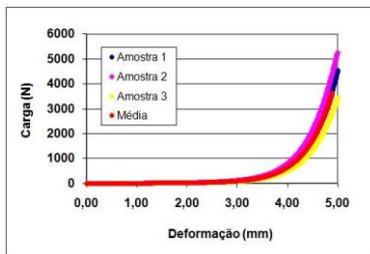
Tabela 34 – Análise de variância para o teor de ar incorporado ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crit	Resultado
Arg industr.	Entre	1674,76	4	418,69	8135,31	3,48	significativo
	Dentro	0,51	10	0,05			
	Total	1675,28	14	-			
Tipo de areia	Entre	1,99	1	1,99	1,00	7,71	não significativo
	Dentro	7,93	4	1,98			
	Total	9,92	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	1,64	3	0,55	3,31	4,07	não significativo
	Dentro	1,32	8	0,16			
	Total	2,96	11	-			
Ar incorp.	Entre	1095,79	4	273,95	6456,84	3,48	significativo
	Dentro	0,42	10	0,04			
	Total	1096,21	14	-			

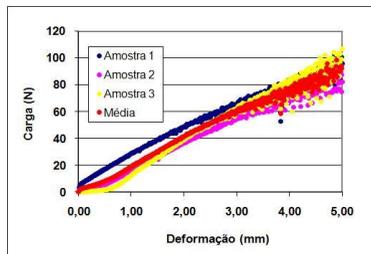
Tabela 35 – Análise de variância para o índice de consistência ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	6608,40	4	1652,10	3,81	3,48	significativo
	Dentro	4340,00	10	434,00			
	Total	10948,40	14	-			
Tipo de areia	Entre	368,17	1	368,17	1,00	7,71	não significativo
	Dentro	1466,67	4	366,67			
	Total	1834,83	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	19,00	3	6,33	0,01	4,07	não significativo
	Dentro	3954,00	8	494,25			
	Total	3973,00	11	-			
Ar incorp.	Entre	10220,27	4	2555,07	4,94	3,48	significativo
	Dentro	5172,67	10	517,27			
	Total	15392,93	14	-			

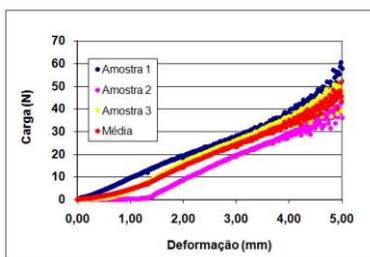
Anexo 2 – Resultados individuais do ensaio de *squeeze-flow*



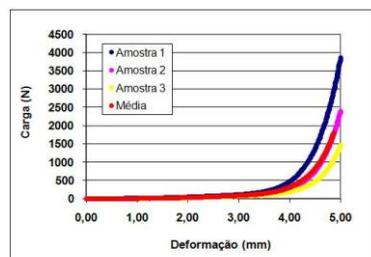
(a)



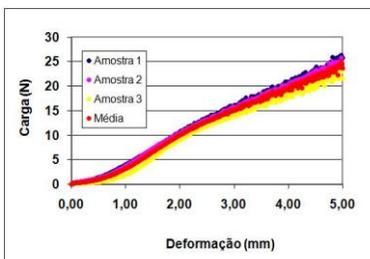
(b)



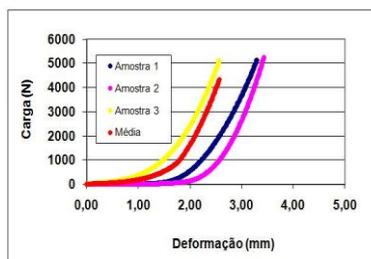
(c)



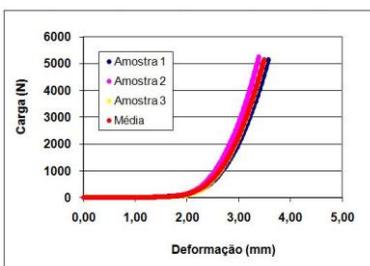
(d)



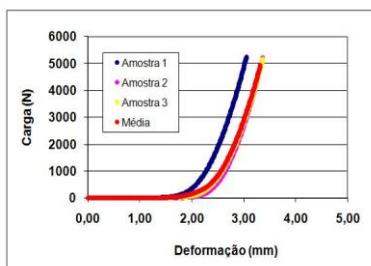
(e)



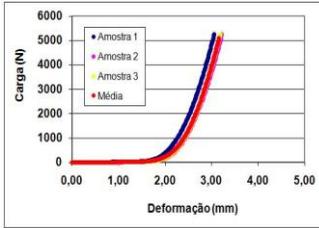
(f)



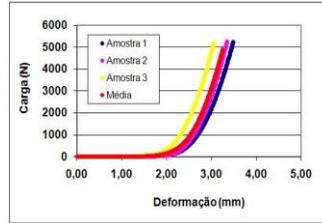
(g)



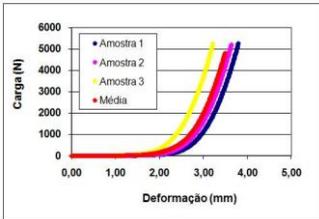
(h)



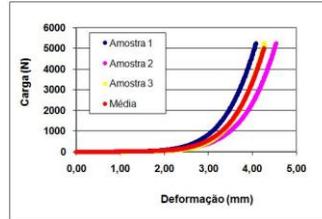
(i)



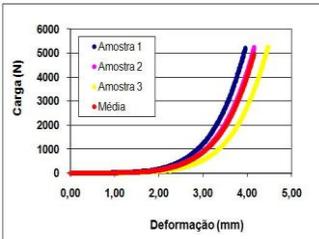
(j)



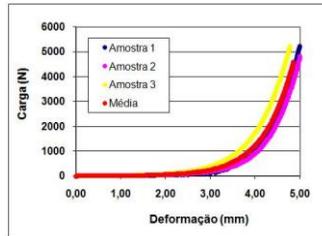
(k)



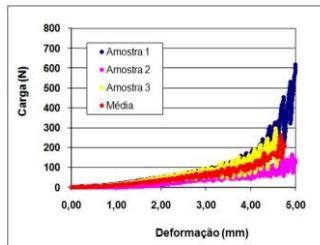
(l)



(m)



(n)



(o)

Figura 174 – Curvas de carga *versus* deformação do ensaio de *squeeze-flow* – NBR 15839 (ABNT, 2010): (a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6; (g) 1 : 2 : 9; (h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30; (l) IAR 9.0; (m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0

Tabela 36 – Carga máxima para deformação de 2,5 mm no ensaio *squeeze-flow*

Arg	Carga máxima para deformação de 2,5 mm (N)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
Arg A	43,35	54,86	37,78	45,33	8,71
Arg B	55,73	45,76	52,04	51,18	5,04
Arg C	23,60	14,30	21,51	19,80	4,88
Arg D	79,90	47,73	44,33	57,32	19,63
Arg E	13,64	13,13	11,83	12,87	0,93
1 : 1 : 6	1770,24	4695,96	3914,92	3460,37	1514,90
1 : 2 : 9	605,57	875,77	646,88	709,41	145,55
BRITA	1873,49	572,30	721,29	1055,69	712,14
FPP 0.10	1853,59	1199,36	1246,13	1433,03	364,97
FPP 0.20	535,94	679,05	1703,26	972,75	636,67
FPP 0.30	250,53	419,79	1324,89	665,07	577,65
IAR 9.0	281,64	154,60	127,06	187,77	82,45
IAR 15.0	503,66	372,85	217,43	364,65	143,29
IAR 21.0	85,22	88,96	179,63	117,94	53,46
IAR 27.0	56,96	27,33	58,52	47,60	17,57

Tabela 37 – Análise de variância para a carga máxima para deformação de 2,5 mm no ensaio de *squeeze-flow* ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	4682,89	4	1170,72	11,45	3,48	significativo
	Dentro	1022,48	10	102,25			
	Total	5705,38	14	-			
Tipo de areia	Entre	8673716,83	1	8673716,83	6,19	7,71	não significativo
	Dentro	5604119,31	4	1401029,83			
	Total	14277836,14	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	14256284,81	3	4752094,94	6,00	4,07	significativo
	Dentro	6334312,86	8	791789,11			
	Total	20590597,67	11	-			
Ar incorp.	Entre	26000672,27	4	6500168,07	13,98	3,48	significativo
	Dentro	4650829,32	10	465082,93			
	Total	30651501,60	14	-			

Anexo 3 – Resultados individuais da retenção de água

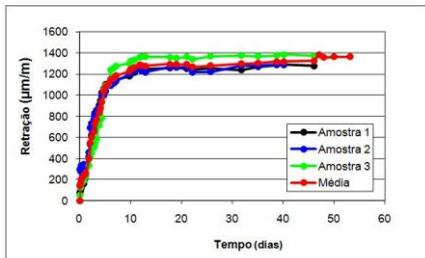
Tabela 38 – Retenção de água – NBR 13277 (ABNT, 2005)

Arg	m _w (g)	Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3			
		m _v (g)	m _a (g)	m _s (g)	Ra (%)	m _v (g)	m _a (g)	m _s (g)	Ra (%)	m _v (g)	m _a (g)	m _s (g)	Ra (%)
Arg A	0,167	644,1	1777,6	1744,2	82,4	644,5	1794,1	1783,2	94,3	644,1	1780,4	1769,4	94,2
Arg B	0,138	643,3	1645,8	1631,4	89,6	643,6	1662,5	1638,7	83,1	644,4	1666,5	1643,1	83,4
Arg C	0,138	645,4	1684,3	1655,0	79,6	644,3	1696,2	1666,4	79,5	645,4	1683,9	1655,0	79,8
Arg D	0,167	643,2	1848,6	1816,7	84,2	644,7	1836,7	1803,8	83,5	644,0	1841,0	1809,2	84,1
Arg E	0,123	644,4	1554,4	1520,6	69,9	644,2	1569,3	1535,7	70,4	643,9	1560,2	1525,5	69,2
1 : 1 : 6	0,194	619,8	1779,3	1752,4	88,0	619,2	1752,4	1735,1	92,1	620,5	1757,6	1742,0	92,9
1 : 2 : 9	0,194	620,0	1700,7	1686,7	93,3	619,6	1735,7	1719,6	92,5	620,3	1730,0	1713,1	92,1
BRITA	0,174	620,5	1768,6	1749,5	90,4	619,7	1758,6	1741,1	91,1	619,9	1756,5	1738,7	91,0
FPP 0.10	0,194	619,9	1761,2	1740,6	90,7	619,7	1761,0	1746,5	93,4	621,3	1771,1	1754,4	92,5
FPP 0.20	0,194	619,9	1693,0	1674,7	91,2	619,6	1722,2	1703,3	91,1	619,8	1773,0	1753,1	91,1
FPP 0.30	0,194	620,9	1741,8	1727,4	93,4	619,7	1732,0	1714,3	91,8	620,5	1717,3	1698,1	91,0
IAR 9.0	0,187	620,5	1713,2	1701,6	94,3	619,7	1677,9	1663,5	92,7	620,7	1691,8	1679,0	93,6
IAR 15.0	0,179	620,9	1618,8	1610,1	95,1	619,7	1633,2	1623,5	94,7	621,4	1608,4	1602,6	96,7
IAR 21.0	0,169	620,8	1578,2	1572,4	96,4	619,8	1628,1	1619,6	95,0	620,0	1596,8	1586,7	93,9
IAR 27.0	0,643	620,9	1520,3	1516,7	99,4	619,6	1540,4	1536,1	99,3	620,3	1541,1	1537,5	99,4

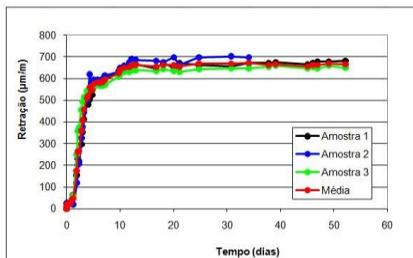
Tabela 39 – Análise de variância para a retenção de água ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	712,41	4	178,10	14,53	3,48	significativo
	Dentro	122,55	10	12,26			
	Total	834,97	14	-			
Tipo de areia	Entre	0,04	1	0,04	0,01	7,71	não significativo
	Dentro	14,10	4	3,53			
	Total	14,15	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	3,32	3	1,11	0,43	4,07	não significativo
	Dentro	20,75	8	2,59			
	Total	24,07	11	-			
Ar incorp.	Entre	111,32	4	27,83	13,46	3,48	significativo
	Dentro	20,67	10	2,07			
	Total	131,99	14	-			

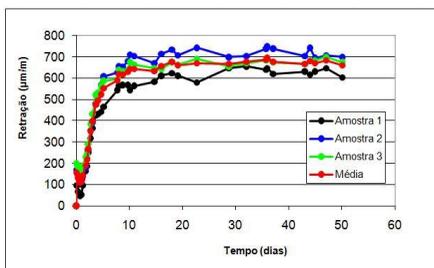
Anexo 4 – Resultados individuais da retração por secagem



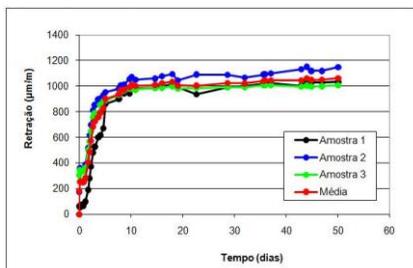
(a)



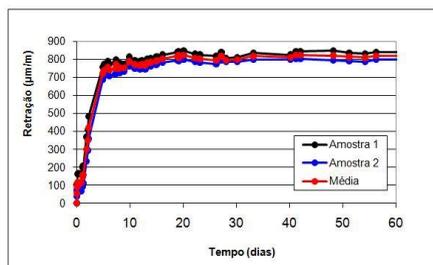
(b)



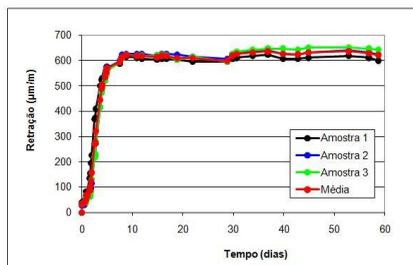
(c)



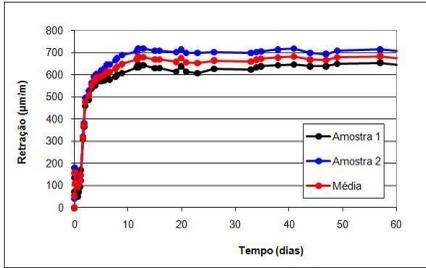
(d)



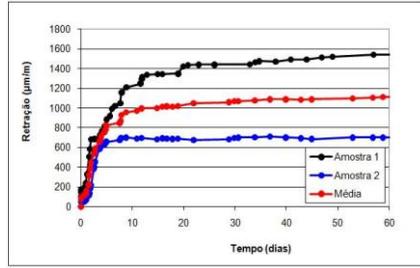
(e)



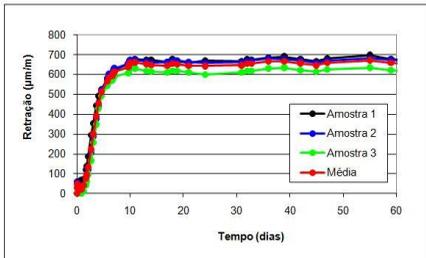
(f)



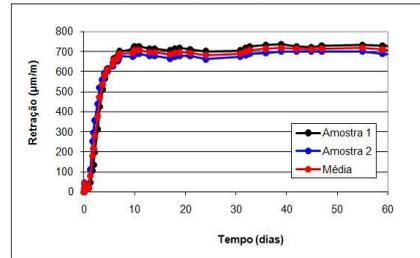
(g)



(h)

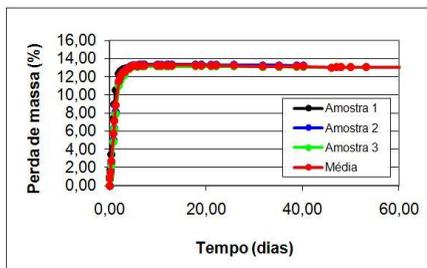


(i)

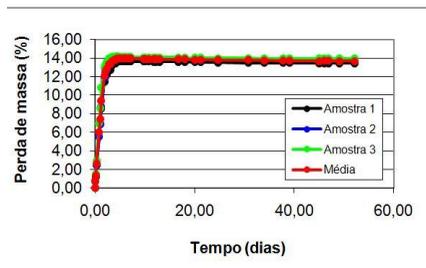


(j)

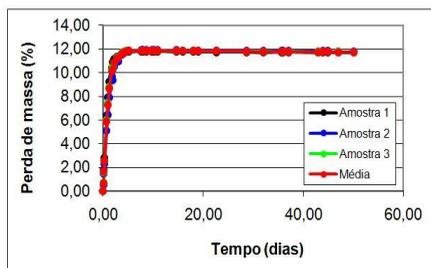
Figura 175 – Retração por secagem – NBR 15261 (ABNT, 2005):
 (a) 1 : 1 : 6; (b) 1 : 2 : 9; (c) BRITA; (d) FPP 0.10; (e) FPP 0.20;
 (f) FPP 0.30; (g) IAR 9.0; (h) IAR 15.0; (i) IAR 21.0; (j) IAR 27.0



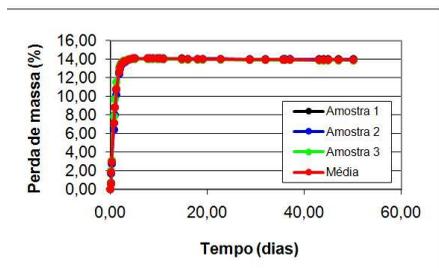
(a)



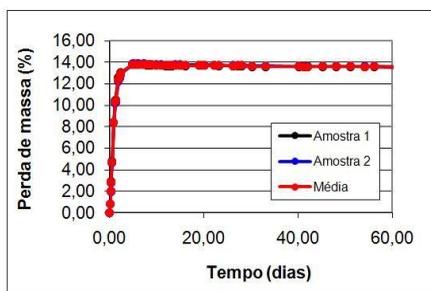
(b)



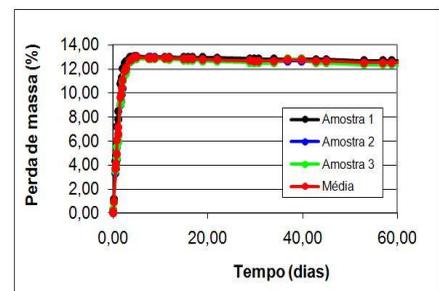
(c)



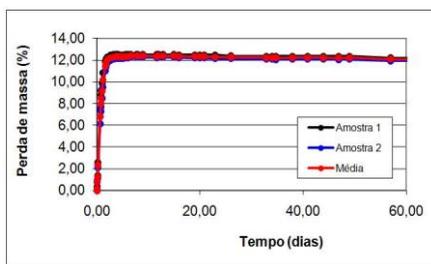
(d)



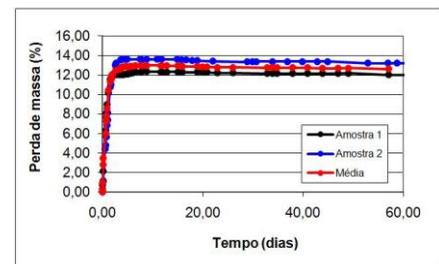
(e)



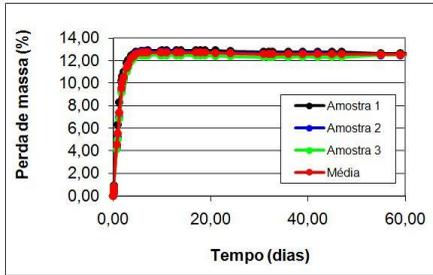
(f)



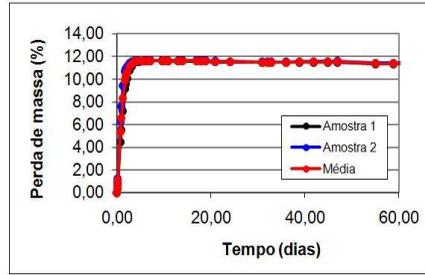
(g)



(h)



(i)



(j)

Figura 176 – Perda de massa dos corpos-de-prova utilizados no ensaio da retração por secagem – NBR 15261 (ABNT, 2005): (a) 1 : 1 : 6; (b) 1 : 2 : 9; (c) BRITA; (d) FPP 0.10; (e) FPP 0.20; (f) FPP 0.30; (g) IAR 9.0; (h) IAR 15.0; (i) IAR 21.0; (j) IAR 27.0

Tabela 40 – Medida da retração por secagem na idade de 28 dias

Arg	Retração por secagem na idade de 28 dias ($\mu\text{m}/\text{m}$)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	1238,10	1281,75	1376,98	1298,94	71,02
1 : 2 : 9	654,76	702,38	646,83	667,99	30,05
BRITA	646,83	698,41	654,76	666,67	27,78
FPP 0.10	992,06	1087,30	992,06	1023,81	54,99
FPP 0.20	805,56	785,71	-	795,63	14,03
FPP 0.30	595,24	607,14	595,24	599,21	6,87
IAR 9.0	626,98	702,38	-	664,68	53,31
IAR 15.0	1444,44	702,38	-	1073,41	524,71
IAR 21.0	666,67	662,70	611,11	646,83	30,99
IAR 27.0	706,35	674,60	-	690,48	22,45

Tabela 41 – Perda de massa da retração por secagem na idade de 28 dias

Arg	Perda de massa na idade de 28 dias (%)				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	13,11	13,26	13,10	13,16	0,09
1 : 2 : 9	13,49	13,89	14,00	13,79	0,27
BRITA	11,76	11,86	11,82	11,82	0,05
FPP 0.10	13,97	13,96	13,90	13,95	0,04
FPP 0.20	13,65	13,72	-	13,69	0,05
FPP 0.30	12,87	12,70	12,53	12,70	0,17
IAR 9.0	12,39	12,14	-	12,26	0,17
IAR 15.0	12,22	13,35	-	12,79	0,80
IAR 21.0	12,79	12,60	12,32	12,57	0,24
IAR 27.0	11,47	11,52	-	11,50	0,04

Tabela 42 – Análise de variância para a retração por secagem ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	599657,76	1	599657,76	206,21	7,71	significativo
	Dentro	11631,81	4	2907,95			
	Total	611289,58	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	797666,53	3	265888,84	113,30	4,35	significativo
	Dentro	16426,79	7	2346,68			
	Total	814093,31	10	-			
Ar incorp.	Entre	927518,69	4	231879,67	5,58	4,12	significativo
	Dentro	290681,80	7	41525,97			
	Total	1218200,50	11	-			

Tabela 43 – Análise de variância para a perda de massa da retração por secagem ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	2,69	1	2,69	545,95	7,71	significativo
	Dentro	0,02	4	0,01			
	Total	2,71	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	2,66	3	0,89	80,85	4,35	significativo
	Dentro	0,08	7	0,01			
	Total	2,74	10	-			
Ar incorp.	Entre	3,60	4	0,90	7,87	4,12	significativo
	Dentro	0,80	7	0,11			
	Total	4,40	11	-			

Anexo 5 – Resultados individuais da densidade de massa aparente no estado endurecido

Tabela 44 – Dimensões dos corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm

Arg	Amostra	Altura (mm)			Largura (mm)			Comprimento (mm)
		H ₁	H ₂	H ₃	L ₁	L ₂	L ₃	
Arg A	1	40,75	41,00	41,85	41,20	40,95	41,15	160,20
	2	40,55	41,05	41,25	40,87	41,00	41,73	160,45
	3	41,34	40,80	40,86	40,80	41,05	41,00	160,40
Arg B	1	40,88	41,00	41,12	40,25	41,00	40,25	160,50
	2	40,90	41,05	41,29	39,90	40,00	40,76	160,25
	3	40,85	41,05	41,25	40,04	40,40	40,61	160,35
Arg C	1	40,90	40,88	41,37	41,10	40,93	41,27	160,44
	2	41,02	41,05	40,69	40,96	41,04	40,70	160,50
	3	41,00	40,97	41,27	40,88	41,25	40,93	160,25
Arg D	1	41,02	40,88	40,86	40,89	41,03	40,78	160,30
	2	40,95	40,85	41,44	40,90	41,07	41,09	160,05
	3	40,99	41,02	40,39	41,05	40,97	40,65	160,20
Arg E	1	41,02	40,92	41,06	40,89	41,00	40,96	160,21
	2	40,95	41,08	40,91	40,92	41,02	40,64	160,05
	3	41,06	40,96	40,83	41,03	40,98	40,87	160,15
1 : 1 : 6	1	39,71	39,76	39,73	40,12	40,11	40,10	160,43
	2	40,09	40,03	40,37	40,16	40,21	40,26	160,00
	3	40,64	40,38	40,25	40,05	40,08	40,14	160,16
1 : 2 : 9	1	39,91	40,02	39,71	40,28	40,22	40,23	159,84
	2	39,41	39,59	39,63	40,22	40,26	40,24	160,37
	3	40,00	40,05	39,51	40,23	40,16	40,04	160,24
BRITA	1	39,13	39,29	39,17	40,10	40,12	40,16	160,01
	2	39,68	39,40	39,38	40,28	40,16	40,15	160,30
	3	39,56	39,47	40,17	40,08	40,08	40,05	160,16
FPP 0.10	1	39,98	39,74	39,00	40,25	40,29	40,25	160,36
	2	39,68	39,49	39,63	40,25	40,17	40,10	160,18
	3	39,76	39,72	39,74	40,06	40,07	40,06	160,22
FPP 0.20	1	40,43	40,22	39,74	40,17	40,21	40,24	160,15
	2	39,39	39,36	40,07	39,97	40,03	40,13	160,50
	3	39,47	39,42	39,90	40,10	40,11	40,10	160,13
FPP 0.30	1	39,95	39,65	39,66	40,23	40,20	40,23	160,40
	2	39,10	38,73	38,83	40,09	40,07	40,03	160,10
	3	38,96	38,94	39,10	40,08	40,09	40,14	159,85

IAR 9.0	1	38,56	38,98	39,38	40,18	40,21	40,20	160,51
	2	39,73	39,86	39,95	40,06	40,09	40,08	160,20
	3	39,07	39,88	39,97	40,14	40,15	40,20	160,13
IAR 15.0	1	39,14	39,65	39,86	40,13	40,15	40,19	160,05
	2	39,54	39,23	39,78	40,13	40,12	40,16	160,14
	3	39,86	39,73	39,71	40,24	40,23	40,10	160,31
IAR 21.0	1	39,57	39,61	39,71	40,05	40,03	40,06	160,30
	2	40,05	39,45	39,71	40,01	40,00	40,18	160,16
	3	39,99	39,78	39,92	40,13	40,04	40,05	160,32
IAR 27.0	1	39,79	39,96	40,24	40,10	40,04	40,00	160,12
	2	39,95	40,06	40,21	40,12	40,11	40,11	160,26
	3	40,08	40,01	40,20	40,00	40,17	40,19	160,22

Tabela 45 – Densidade de massa aparente no estado endurecido – NBR 13280 (ABNT, 2005)

Arg	Amostra	Dimensões médias (mm)			Massa (g)	Densidade de massa (kg/m ³)		
		H	L	C		Result.	Média	D.Padrão
Arg A	1	41,20	41,10	160,20	419,41	1546	1551	6,24
	2	40,95	41,20	160,45	419,12	1548		
	3	41,00	40,95	160,40	419,53	1558		
Arg B	1	41,00	40,50	160,50	396,51	1488	1493	14,80
	2	41,08	40,22	160,25	399,82	1510		
	3	41,05	40,35	160,35	393,63	1482		
Arg C	1	41,05	41,10	160,44	394,11	1456	1456	1,17
	2	40,92	40,90	160,50	391,40	1457		
	3	41,08	41,02	160,25	392,84	1455		
Arg D	1	40,92	40,90	160,30	462,25	1723	1710	12,53
	2	41,08	41,02	160,05	460,94	1709		
	3	40,80	40,89	160,20	453,81	1698		
Arg E	1	41,00	40,95	160,21	367,30	1366	1361	10,58
	2	40,98	40,86	160,05	366,71	1368		
	3	40,95	40,96	160,15	362,32	1349		
1 : 1 : 6	1	39,73	40,11	160,43	427,42	1672	1650	21,13
	2	40,16	40,21	160,00	425,66	1647		
	3	40,42	40,09	160,16	422,97	1630		
1 : 2 : 9	1	39,88	40,24	159,84	415,75	1621	1619	5,85
	2	39,54	40,24	160,37	414,18	1623		
	3	39,85	40,14	160,24	413,24	1612		
BRITA	1	39,20	40,13	160,01	465,79	1851	1853	2,36
	2	39,49	40,20	160,30	472,11	1856		
	3	39,73	40,07	160,16	472,53	1853		
FPP 0.10	1	39,57	40,26	160,36	418,81	1639	1643	5,42
	2	39,60	40,17	160,18	420,18	1649		
	3	39,74	40,06	160,22	418,34	1640		
FPP 0.20	1	40,13	40,21	160,15	429,72	1663	1673	10,78
	2	39,61	40,04	160,50	425,48	1671		
	3	39,60	40,10	160,13	428,31	1684		

FPP 0.30	1	39,75	40,22	160,40	430,64	1679	1700	20,82
	2	38,89	40,06	160,10	429,21	1721		
	3	39,00	40,10	159,85	425,15	1701		
IAR 9.0	1	38,97	40,20	160,51	415,30	1652	1659	14,33
	2	39,85	40,08	160,20	421,98	1649		
	3	39,64	40,16	160,13	427,10	1675		
IAR 15.0	1	39,55	40,16	160,05	403,47	1587	1574	12,24
	2	39,52	40,14	160,14	398,78	1570		
	3	39,77	40,19	160,31	400,61	1564		
IAR 21.0	1	39,63	40,05	160,30	372,63	1465	1488	24,13
	2	39,74	40,06	160,16	385,74	1513		
	3	39,90	40,07	160,32	380,91	1486		
IAR 27.0	1	40,00	40,05	160,12	366,63	1430	1428	1,59
	2	40,07	40,11	160,26	367,45	1426		
	3	40,10	40,12	160,22	367,98	1428		

Tabela 46 – Análise de variância para a densidade de massa ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	201083,82	4	50270,95	475,75	3,48	significativo
	Dentro	1056,66	10	105,67			
	Total	202140,48	14	-			
Tipo de areia	Entre	62177,31	1	62177,31	275,01	7,71	significativo
	Dentro	904,38	4	226,09			
	Total	63081,69	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	6091,72	3	2030,57	7,92	4,07	significativo
	Dentro	2051,11	8	256,39			
	Total	8142,83	11	-			
Ar incorp.	Entre	121877,53	4	30469,38	109,87	3,48	significativo
	Dentro	2773,17	10	277,32			
	Total	124650,69	14	-			

Anexo 6 – Resultados individuais das resistências à compressão e à tração na flexão

Tabela 47 – Resistência à compressão na idade de 28 dias – NBR 13279 (ABNT, 2005)

Arg	Resistência à compressão (MPa)							Média	D.Padrão
	1	2	3	4	5	6			
Arg A	1,20	1,08	1,30	1,23	1,22	1,17	1,20	0,07	
Arg B	8,20	7,50	7,50	7,67	6,55	7,29	7,45	0,54	
Arg C	3,07	3,08	3,08	2,96	3,51	3,26	3,16	0,19	
Arg D	3,79	3,91	4,46	4,48	4,34	4,31	4,22	0,29	
Arg E	4,89	4,08	4,91	4,88	3,63	4,83	4,54	0,55	
1 : 1 : 6	1,57	1,38	1,49	-	-	-	1,48	0,10	
1 : 2 : 9	0,60	0,50	0,51	-	-	-	0,53	0,06	
BRITA	1,51	1,84	1,73	1,50	-	-	1,65	0,17	
FPP 0.10	0,63	1,23	0,77	0,83	0,90	1,03	0,90	0,21	
FPP 0.20	1,23	1,20	1,34	1,10	0,98	1,10	1,16	0,13	
FPP 0.30	1,21	1,21	1,06	1,17	0,92	1,21	1,13	0,12	
IAR 9.0	1,00	0,84	0,91	0,91	0,82	0,98	0,91	0,07	
IAR 15.0	1,05	1,21	0,90	0,84	1,08	0,93	1,00	0,14	
IAR 21.0	0,86	0,85	0,84	0,75	1,01	0,94	0,87	0,09	
IAR 27.0	0,97	0,82	0,81	0,87	0,85	0,89	0,87	0,06	

Tabela 48 – Resistência à tração na flexão na idade de 28 dias – NBR 13279 (ABNT, 2005)

Arg	Dimensões (mm)									Resistência à tração na flexão (MPa)				
	Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			1	2	3	Média	D.Padrão
	L	H	C	L	H	C	L	H	C					
Arg A	40,1	39,8	160,1	39,7	40,1	160,1	40,2	40,1	160,2	0,44	0,40	0,42	0,42	0,02
Arg B	40,0	39,9	160,0	39,8	39,9	160,2	40,2	40,2	160,4	3,20	3,08	2,74	3,01	0,23
Arg C	40,3	40,0	160,2	40,0	40,2	160,4	39,7	39,8	160,1	1,28	1,04	1,12	1,15	0,12
Arg D	40,2	39,7	160,4	39,9	40,1	160,4	39,9	40,2	160,3	1,28	1,77	1,33	1,46	0,27
Arg E	40,1	39,8	160,1	39,8	40,0	160,0	40,1	40,2	160,0	1,98	1,86	1,98	1,94	0,07
I : 1 : 6	40,2	39,6	160,2	39,4	39,8	160,0	40,3	39,9	160,3	1,04	1,19	1,10	1,11	0,08
I : 2 : 9	40,2	39,9	160,0	40,0	39,6	159,8	40,1	39,6	160,1	0,44	0,40	0,38	0,41	0,03
Brita	40,1	40,2	160,1	40,2	40,1	160,1	40,1	39,9	160,1	1,33	1,16	1,05	1,18	0,14
FPP 0.10	40,2	39,7	160,7	40,0	39,9	160,4	40,0	39,5	160,3	0,89	0,82	0,77	0,83	0,06
FPP 0.20	40,2	39,5	160,3	40,1	39,7	160,9	40,3	39,9	160,0	-	0,85	0,75	0,80	0,07
FPP 0.30	40,2	39,6	160,4	40,1	49,5	160,3	40,1	39,1	159,9	0,76	0,61	0,59	0,65	0,09
IAR 9.0	40,2	39,3	160,4	40,0	38,5	160,2	40,3	36,6	160,1	0,82	0,90	0,90	0,87	0,05
IAR 15.0	40,0	39,4	160,5	40,2	39,6	160,7	40,2	39,4	160,3	0,72	0,73	0,70	0,72	0,01
IAR 21.0	40,1	39,9	160,3	40,1	39,7	160,2	40,1	39,9	160,3	0,63	0,59	0,78	0,67	0,10
IAR 27.0	40,1	40,2	159,9	40,0	40,3	160,3	40,3	40,1	160,2	0,74	0,56	0,67	0,66	0,09

Tabela 49 – Análise de variância para a resistência à compressão ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	0,78	4	0,20	0,04	2,62	não significativo
	Dentro	127,28	25	5,09			
	Total	128,06	29	-			
Tipo de areia	Entre	0,05	1	0,05	2,25	6,61	não significativo
	Dentro	0,10	5	0,02			
	Total	0,15	6	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,70	3	0,23	10,21	3,20	significativo
	Dentro	0,39	17	0,02			
	Total	1,08	20	-			
Ar incorp.	Entre	0,93	4	0,23	25,44	2,82	significativo
	Dentro	0,20	22	0,01			
	Total	1,13	26	-			

Tabela 50 – Análise de variância para a resistência à tração na flexão ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	11,12	4	2,78	93,93	3,48	significativo
	Dentro	0,30	10	0,03			
	Total	11,42	14	-			
Tipo de areia	Entre	0,01	1	0,01	0,62	7,71	não significativo
	Dentro	0,05	5	0,01			
	Total	0,06	6	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,32	3	0,11	18,44	4,35	significativo
	Dentro	0,04	7	0,01			
	Total	0,37	10	-			
Ar incorp.	Entre	0,44	4	0,11	20,72	3,48	significativo
	Dentro	0,05	10	0,01			
	Total	0,49	14	-			

Anexo 7 – Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico

Tabela 51 – Módulo de elasticidade dinâmico na idade de 28 dias utilizando a densidade de massa aparente no estado endurecido da Tabela 45 – NBR 15630 (ABNT, 2008)

Arg	Tempo de propagação da onda ultra-sônica (μs)			Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)				
	1	2	3	1	2	3	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	107,4	103,6	98,7	3,35	3,62	3,96	3,65	0,31
1 : 2 : 9	151,0	150,7	150,9	1,64	1,64	1,65	1,64	0,01
BRITA	99,0	97,8	99,7	4,30	4,40	4,25	4,32	0,08
FPP 0.10	102,8	108,4	106,9	3,62	3,25	3,34	3,40	0,19
FPP 0.20	115,2	103,6	106,0	2,94	3,66	3,43	3,34	0,37
FPP 0.30	112,6	109,5	113,1	3,08	2,59	3,06	2,91	0,28
IAR 9.0	107,9	107,8	108,7	3,27	3,28	3,51	3,35	0,13
IAR 15.0	107,2	106,6	103,7	3,20	3,26	3,42	3,29	0,11
IAR 21.0	106,9	110,4	102,2	2,94	2,85	3,25	3,01	0,21
IAR 27.0	106,7	106,9	103,6	2,94	2,95	3,13	3,01	0,11

Tabela 52 – Análise de variância para o módulo de elasticidade dinâmico ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	0,68	1	0,68	13,56	7,71	significativo
	Dentro	0,20	4	0,050			
	Total	0,88	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,84	3	0,28	3,30	4,07	não significativo
	Dentro	0,68	8	0,09			
	Total	1,53	11	-			
Ar incorp.	Entre	0,85	4	0,21	5,90	3,48	significativo
	Dentro	0,36	10	0,04			
	Total	1,21	14	-			

Anexo 8 – Resultados individuais do coeficiente de capilaridade

Tabela 53 – Coeficiente de capilaridade – NBR 13279 (ABNT, 2005)

Arg	Amostra	Massa (g)			Absorção de água (g/dm ²)		Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})		
		0'	10'	90'	10'	90'	Result.	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	1	424,04	440,77	470,33	104,56	289,31	29,21	30,48	1,80
	2	421,53	439,02	471,15	109,31	310,13	31,75		
1 : 2 : 9	1	414,39	435,74	474,68	133,44	376,81	38,48	37,75	1,41
	2	412,85	434,68	473,78	136,44	380,81	38,64		
	3	411,55	432,37	468,93	130,13	358,63	36,13		
BRITA	1	465,79	483,79	513,60	112,50	298,81	29,46	29,69	0,23
	2	472,11	489,55	519,60	109,00	296,81	29,70		
	3	472,53	487,93	518,20	96,25	285,44	29,91		
FPP 0.10	1	417,24	435,17	466,59	112,06	308,44	31,05	31,86	0,98
	2	418,34	436,37	469,72	112,69	321,13	32,96		
	3	416,63	435,50	467,46	117,94	317,69	31,58		
FPP 0.20	1	427,23	444,86	475,61	110,19	302,38	30,39	31,24	1,50
	2	423,27	444,39	475,11	132,00	324,00	30,36		
	3	426,31	446,17	479,53	124,13	332,63	32,97		
FPP 0.30	1	428,99	447,82	482,57	117,69	334,88	34,34	32,02	2,12
	2	427,61	445,40	477,34	111,19	310,81	31,56		
	3	423,56	441,11	471,64	109,69	300,50	30,17		
IAR 9.0	1	413,82	431,13	461,40	108,19	297,38	29,91	29,89	1,26
	2	420,41	438,95	470,46	115,88	312,81	31,14		
	3	425,68	442,93	471,89	107,81	288,81	28,62		
IAR 15.0	1	402,00	418,99	447,98	106,50	287,69	28,65	28,26	0,98
	2	397,30	414,20	443,53	105,44	288,75	28,98		
	3	399,20	416,22	443,68	106,31	277,94	27,14		
IAR 21.0	1	368,17	383,78	407,20	97,56	243,94	23,14	23,30	0,56
	2	372,34	389,02	413,23	104,25	255,56	23,92		
	3	371,01	386,69	409,79	98,00	242,38	22,83		
IAR 27.0	1	365,30	378,22	396,82	80,50	196,75	18,38	19,15	0,71
	2	366,20	379,36	398,86	82,44	204,31	19,27		
	3	366,70	379,34	399,37	79,12	204,31	19,79		

Tabela 54 – Análise de variância para o coeficiente de capilaridade ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	0,75	1	0,75	0,68	10,13	não significativo
	Dentro	3,33	3	1,109			
	Total	4,08	4	-			
Fibras de polipr.	Entre	3,50	3	1,17	0,44	4,35	não significativo
	Dentro	18,68	7	2,67			
	Total	22,18	10	-			
Ar incorp.	Entre	263,53	4	65,88	59,45	3,63	significativo
	Dentro	9,97	9	1,11			
	Total	273,50	13	-			

Anexo 9 – Resultados individuais da absorção de água e índice de vazios

Tabela 55 – Massas dos corpos-de-prova para o ensaio de absorção de água e índice de vazios

Arg	Amostra	Massa (g)				
		m ₁	m ₂	m ₃	m ₄	m ₅
1 : 1 : 6	1	424,04	495,54	243,30	511,10	258,30
	2	421,53	493,16	242,50	508,00	257,30
1 : 2 : 9	1	414,39	487,86	238,80	503,10	254,00
	2	412,85	486,19	236,10	502,00	252,50
	3	411,55	485,16	235,10	500,80	251,20
BRITA	1	465,79	532,40	284,60	542,10	292,70
	2	472,11	541,00	289,20	548,60	296,90
	3	472,53	541,20	289,60	549,00	297,30
FPP 0.10	1	417,24	488,96	239,10	504,40	254,60
	2	418,34	490,58	241,30	503,30	254,90
	3	416,63	487,83	238,60	503,30	254,30
FPP 0.20	1	427,23	500,40	250,10	509,60	260,40
	2	423,27	497,41	248,50	506,10	258,00
	3	426,31	500,80	250,70	511,00	261,00
FPP 0.30	1	428,99	503,00	252,80	513,30	263,00
	2	427,61	499,15	251,90	509,40	262,00
	3	423,56	493,75	248,50	503,90	258,80
IAR 9.0	1	413,82	482,45	236,10	498,80	252,00
	2	420,41	490,79	239,50	507,20	255,90
	3	425,68	494,64	242,50	511,60	259,10
IAR 15.0	1	401,95	467,08	214,80	494,50	242,50
	2	397,33	461,99	211,80	489,30	239,70
	3	399,21	462,45	211,80	490,35	240,40
IAR 21.0	1	368,17	425,52	182,50	448,65	213,70
	2	372,34	430,58	184,10	467,61	222,50
	3	371,01	428,46	187,30	463,09	222,40
IAR 27.0	1	365,34	417,37	167,30	467,31	217,40
	2	366,17	419,47	168,40	467,27	217,40
	3	366,68	419,35	167,70	468,56	217,60

Legenda:

m₁ = massa do corpo-de-prova após estufa à 50°C por 13 dias

m₂ = massa do corpo-de-prova após imersão em água por 72 horas

m₃ = massa do corpo-de-prova em balança hidrostática

m₄ = massa do corpo-de-prova após imerso em água fervente por 5 horas

m₅ = massa do corpo-de-prova em balança hidrostática após fervura

Tabela 56 – Absorção de água após imersão em água e após imersão e fervura – NBR 9778 (ABNT, 1987)

Arg	Amostra	Absorção de água após imersão (%)			Absorção de água após imersão e fervura (%)		
		Resultado	Média	D.Padrão	Resultado	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	1	16,86	16,93	0,09	20,53	20,52	0,01
	2	16,99			20,51		
1 : 2 : 9	1	17,73	17,79	0,08	21,41	21,56	0,14
	2	17,76			21,59		
	3	17,89			21,69		
BRITA	1	14,30	14,47	0,15	16,38	16,26	0,11
	2	14,59			16,20		
	3	14,53			16,18		
FPP 0.10	1	17,19	17,18	0,09	20,89	20,67	0,31
	2	17,27			20,31		
	3	17,09			20,80		
FPP 0.20	1	17,13	17,37	0,21	19,28	19,57	0,29
	2	17,52			19,57		
	3	17,47			19,87		
FPP 0.30	1	17,25	16,85	0,36	19,65	19,25	0,36
	2	16,73			19,13		
	3	16,57			18,97		
IAR 9.0	1	16,58	16,51	0,28	20,54	20,45	0,24
	2	16,74			20,64		
	3	16,20			20,18		
IAR 15.0	1	16,20	16,11	0,23	23,03	23,00	0,16
	2	16,27			23,15		
	3	15,84			22,83		
IAR 21.0	1	15,58	15,57	0,08	21,86	24,09	1,97
	2	15,64			25,59		
	3	15,48			24,82		
IAR 27.0	1	14,24	14,39	0,16	27,91	27,77	0,15
	2	14,56			27,61		
	3	14,36			27,78		

Tabela 57 – Índice de vazios após imersão em água e após imersão e fervura
– NBR 9778 (ABNT, 1987)

Arg	Amostra	Índice de vazios após imersão (%)			Índice de vazios após imersão e fervura (%)		
		Resultado	Média	D.Padrão	Resultado	Média	D.Padrão
1 : 1 : 6	1	28,35	28,46	0,16	34,44	34,46	0,04
	2	28,58			34,49		
1 : 2 : 9	1	29,50	29,42	0,09	35,61	35,70	0,08
	2	29,33			35,73		
	3	29,44			35,76		
BRITA	1	26,88	27,18	0,26	30,60	30,46	0,12
	2	27,36			30,39		
	3	27,29			30,38		
FPP 0.10	1	28,70	28,75	0,21	34,89	34,63	0,38
	2	28,98			34,20		
	3	28,57			34,81		
FPP 0.20	1	29,23	29,60	0,32	33,05	33,44	0,41
	2	29,79			33,39		
	3	29,78			33,88		
FPP 0.30	1	29,58	29,04	0,49	33,68	33,17	0,46
	2	28,93			33,06		
	3	28,62			32,78		
IAR 9.0	1	27,86	27,74	0,34	34,43	34,33	0,27
	2	28,01			34,54		
	3	27,35			34,03		
IAR 15.0	1	25,82	25,63	0,35	36,73	36,68	0,20
	2	25,84			36,85		
	3	25,23			36,46		
IAR 21.0	1	23,60	23,68	0,12	34,25	37,13	2,51
	2	23,63			38,87		
	3	23,82			38,26		
IAR 27.0	1	20,81	20,99	0,22	40,80	40,62	0,17
	2	21,23			40,46		
	3	20,93			40,60		

Tabela 58 – Análise de variância para a absorção de água após imersão ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	7,22	1	7,22	386,22	10,13	significativo
	Dentro	0,06	3	0,019			
	Total	7,27	4	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,49	3	0,16	3,08	4,35	não significativo
	Dentro	0,37	7	0,05			
	Total	0,86	10	-			
Ar incorp.	Entre	10,47	4	2,62	70,53	3,63	significativo
	Dentro	0,33	9	0,04			
	Total	10,80	13	-			

Tabela 59 – Análise de variância para a absorção de água após imersão e fervura ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	21,84	1	21,84	2671,78	10,13	significativo
	Dentro	0,02	3	0,008			
	Total	21,87	4	-			
Fibras de polipr.	Entre	4,10	3	1,37	15,30	4,35	significativo
	Dentro	0,63	7	0,09			
	Total	4,72	10	-			
Ar incorp.	Entre	101,71	4	25,43	27,69	3,63	significativo
	Dentro	8,27	9	0,92			
	Total	109,98	13	-			

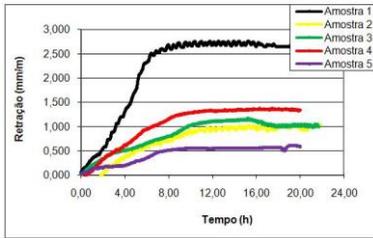
Tabela 60 – Análise de variância para o índice de vazios após imersão ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	1,98	1	1,98	36,82	10,13	significativo
	Dentro	0,16	3	0,054			
	Total	2,14	4	-			
Fibras de polipr.	Entre	1,86	3	0,62	5,43	4,35	significativo
	Dentro	0,80	7	0,11			
	Total	2,65	10	-			
Ar incorp.	Entre	101,06	4	25,26	361,57	3,63	significativo
	Dentro	0,63	9	0,07			
	Total	101,69	13	-			

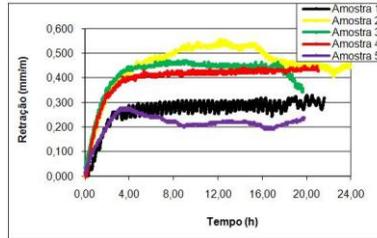
Tabela 61 – Análise de variância para o índice de vazios após imersão e fervura ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Tipo de areia	Entre	19,28	1	19,28	1841,23	10,13	significativo
	Dentro	0,03	3	0,010			
	Total	19,32	4	-			
Fibras de polipr.	Entre	4,47	3	1,49	9,88	4,35	significativo
	Dentro	1,06	7	0,15			
	Total	5,53	10	-			
Ar incorp.	Entre	73,31	4	18,33	12,51	3,63	significativo
	Dentro	13,19	9	1,47			
	Total	86,51	13	-			

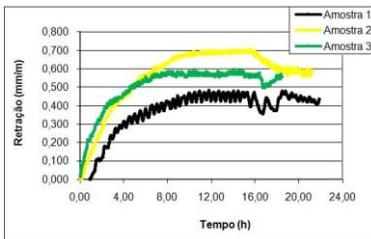
Anexo 10 – Resultados individuais das retrações livre e restringida



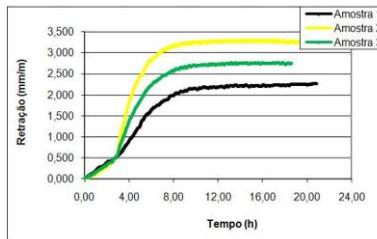
(a)



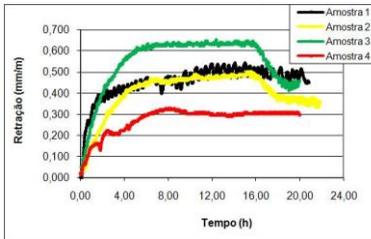
(b)



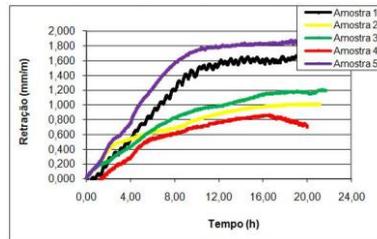
(c)



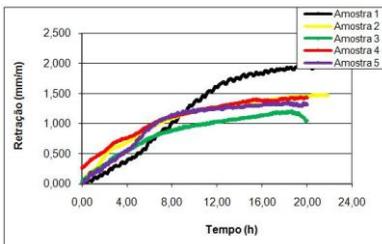
(d)



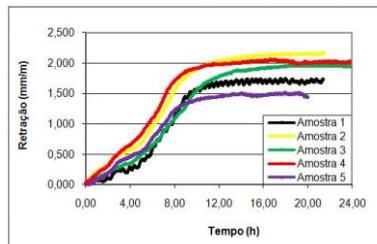
(e)



(f)



(g)



(h)

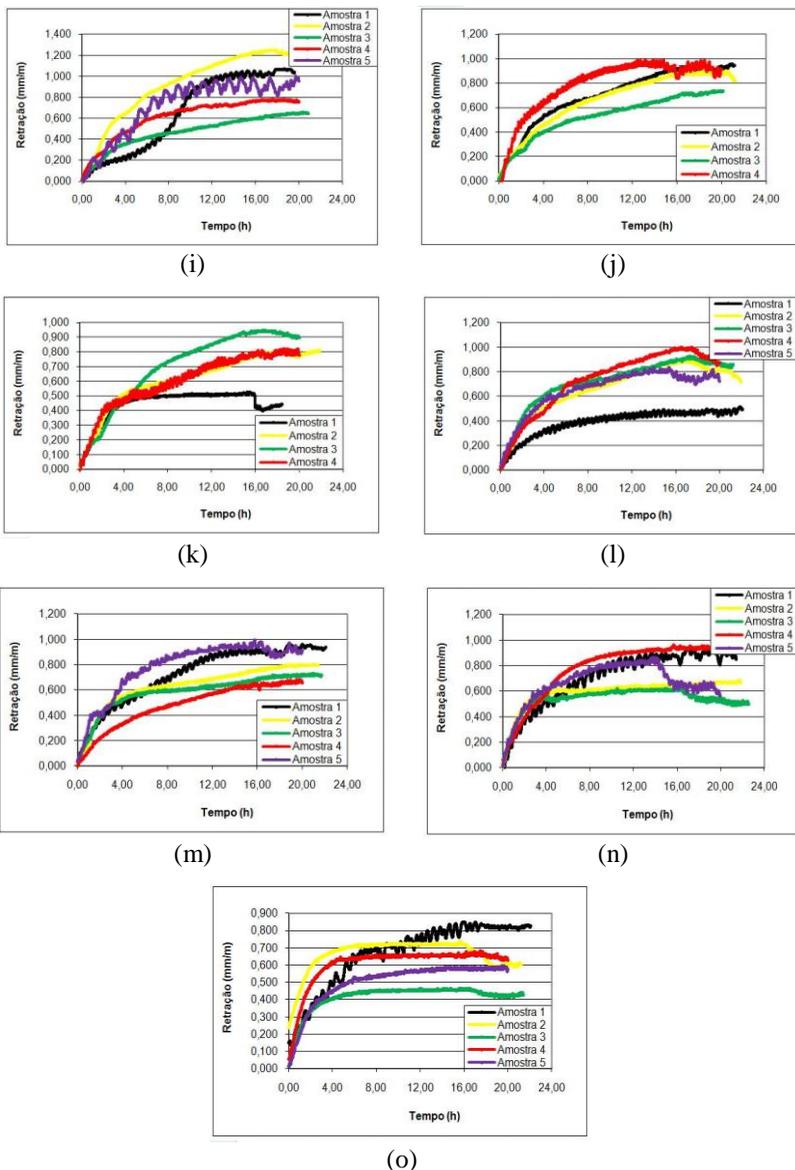
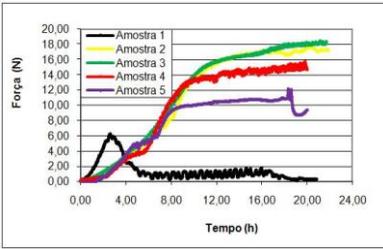
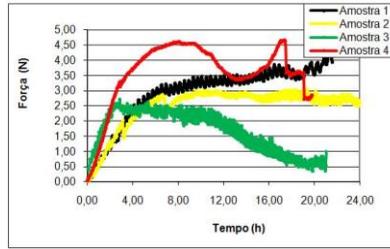


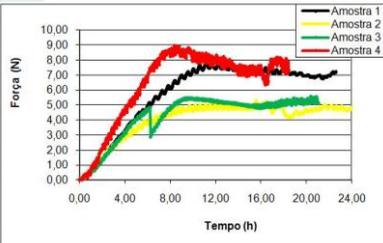
Figura 177 – Curvas de retração livre linear: (a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6; (g) 1 : 2 : 9; (h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30; (l) IAR 9.0; (m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0



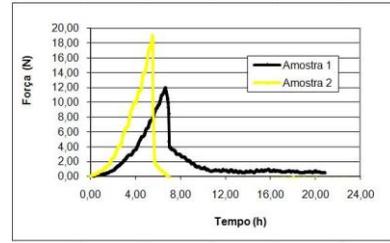
(a)



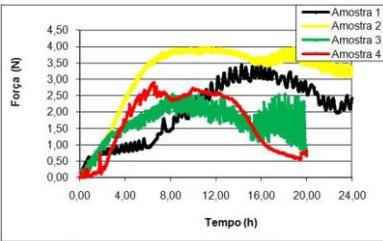
(b)



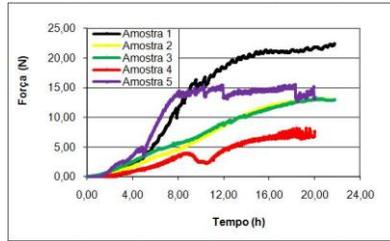
(c)



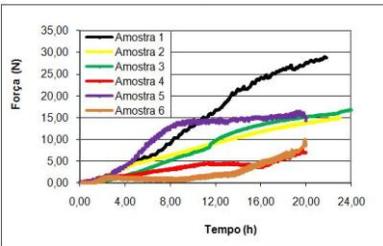
(d)



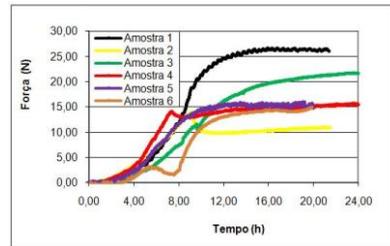
(e)



(f)



(g)



(h)

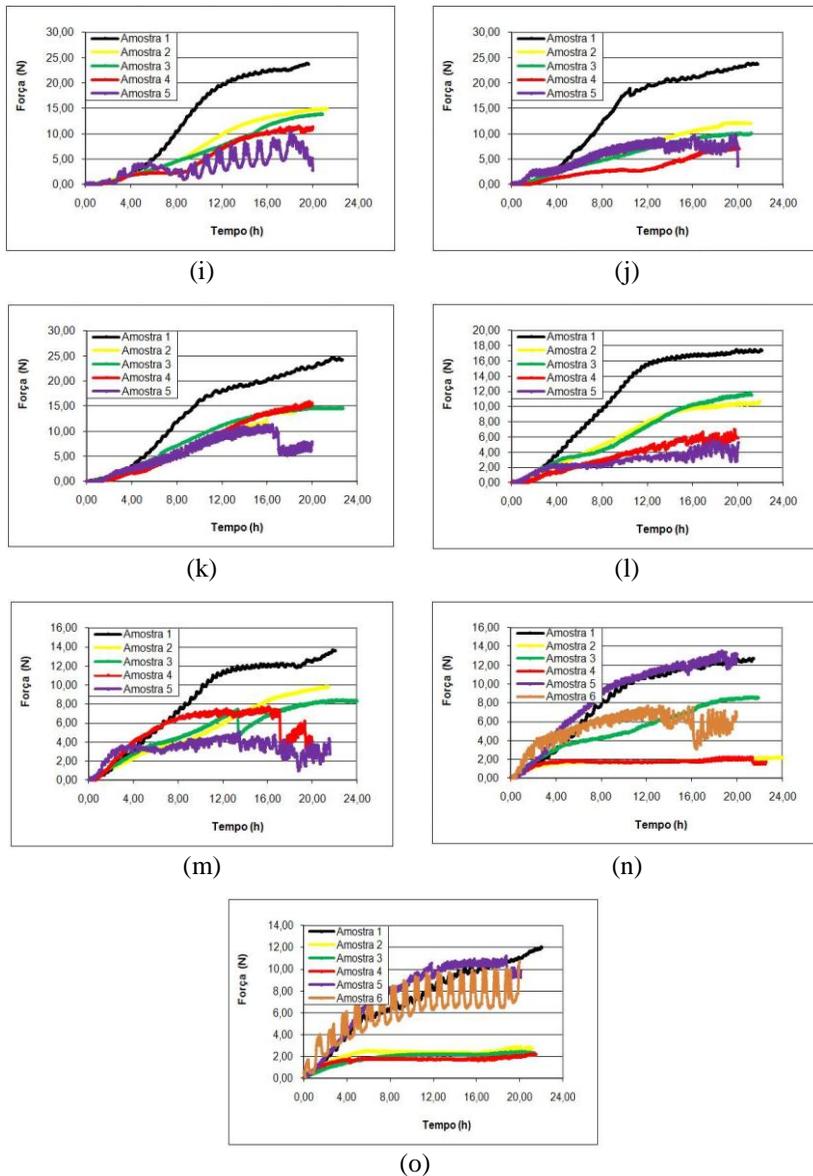
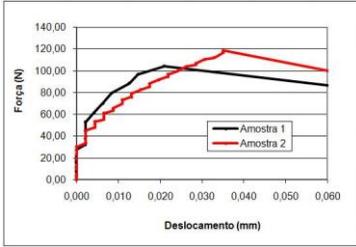
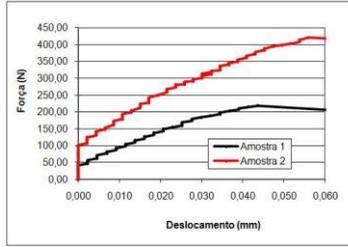


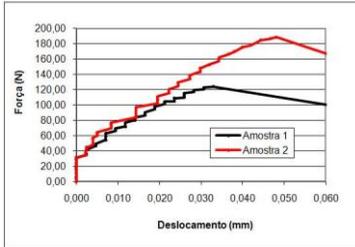
Figura 178 – Curvas das forças na retração restringida linear: (a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg D; (e) Arg E; (f) 1 : 1 : 6; (g) 1 : 2 : 9; (h) BRITA; (i) FPP 0.10; (j) FPP 0.20; (k) FPP 0.30; (l) IAR 9.0; (m) IAR 15.0; (n) IAR 21.0; (o) IAR 27.0



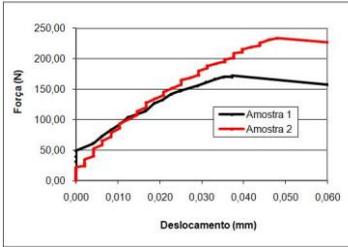
(a)



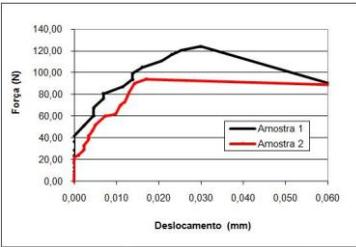
(b)



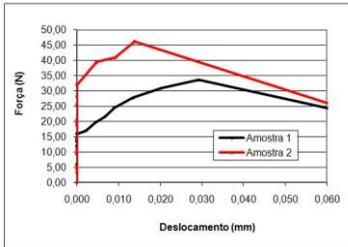
(c)



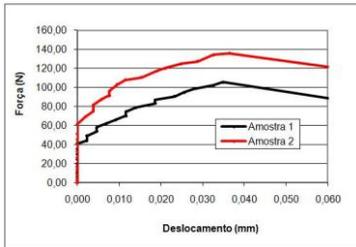
(d)



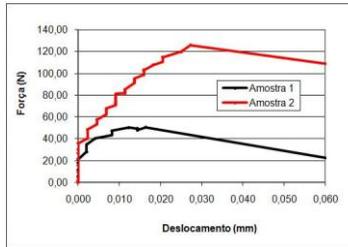
(e)



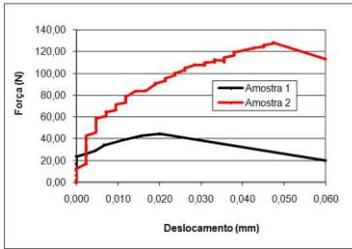
(f)



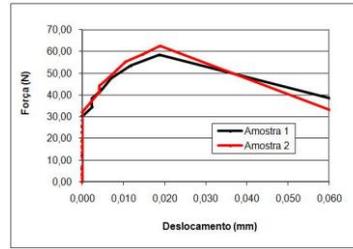
(g)



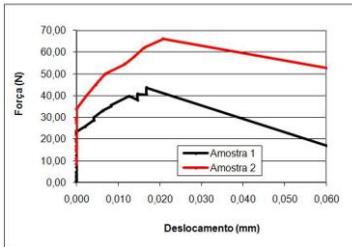
(h)



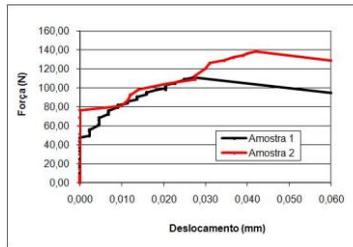
(i)



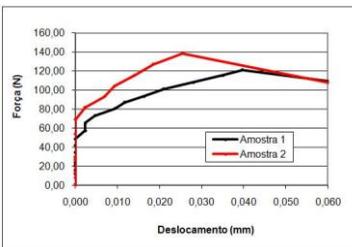
(j)



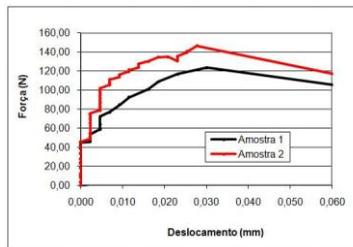
(k)



(l)



(m)



(n)

Figura 179 – Curvas das forças de tração até a ruptura da amostra:
 (a) Arg A; (b) Arg B; (c) Arg C; (d) Arg E; (e) 1 : 1 : 6; (f) 1 : 2 : 9;
 (g) BRITA; (h) FPP 0.10; (i) FPP 0.20; (j) FPP 0.30; (k) IAR 9.0;
 (l) IAR 15.0; (m) IAR 21.0; (n) IAR 27.0

Tabela 62 – Análise de variância para a medida da retração livre linear na idade de 20 horas ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	8,32	4	2,08	28,91	3,63	significativo
	Dentro	0,65	9	0,07			
	Total	8,97	13	-			
Tipo de areia	Entre	1,63	1	1,63	91,64	7,71	significativo
	Dentro	0,07	4	0,02			
	Total	1,70	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,20	3	0,07	2,70	4,07	não significativo
	Dentro	0,19	8	0,02			
	Total	0,39	11	-			
Ar incorp.	Entre	0,54	4	0,13	8,91	3,48	significativo
	Dentro	0,15	10	0,02			
	Total	0,69	14	-			

Tabela 63 – Análise de variância para as forças na retração restringida linear na idade de 20 horas ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	1318,13	4	329,53	138,81	5,19	significativo
	Dentro	11,87	5	2,37			
	Total	1330,00	9	-			
Tipo de areia	Entre	116,86	1	116,86	14,90	18,51	não significativo
	Dentro	15,68	2	7,84			
	Total	132,54	3	-			
Fibras de polipr.	Entre	13,18	3	4,39	5,57	6,59	não significativo
	Dentro	3,15	4	0,79			
	Total	16,33	7	-			
Ar incorp.	Entre	220,47	4	55,12	51,81	5,19	significativo
	Dentro	5,32	5	1,06			
	Total	225,79	9	-			

Tabela 64 – Análise de variância para as forças de ruptura ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	48301,89	3	16100,63	2,62	6,59	não significativo
	Dentro	24553,50	4	6138,37			
	Total	72855,39	7	-			
Tipo de areia	Entre	137,95	1	137,95	0,30	18,51	não significativo
	Dentro	907,52	2	453,76			
	Total	1045,46	3	-			
Fibras de polipr.	Entre	2375,85	3	791,95	0,47	6,59	não significativo
	Dentro	6787,52	4	1696,88			
	Total	9163,37	7	-			
Ar incorp.	Entre	8537,85	4	2134,46	7,12	5,19	significativo
	Dentro	1498,61	5	299,72			
	Total	10036,46	9	-			

Anexo 11 – Resultados individuais da fissuração

Tabela 65 – Tempo de ocorrência da primeira fissura após a moldagem

Arg	Tempo de ocorrência da primeira fissura após a moldagem (minutos)				
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Média	D.Padrão
Arg A	90	90	90	90	0,00
Arg B	-	-	-	-	-
Arg C	240	-	240	160	0,00
Arg D	370	315	140	275	120,10
Arg E	-	-	-	-	-
1 : 1 : 6	200	200	180	193	11,55
1 : 2 : 9	100	95	105	100	5,00
BRITA	220	235	855	437	362,36
FPP 0.10	90	90	90	90	0,00
FPP 0.20	78	92	105	92	13,50
FPP 0.30	130	175	150	152	22,55
IAR 9.0	120	120	120	120	0,00
IAR 15.0	140	130	140	137	5,77
IAR 21.0	275	230	195	233	40,10
IAR 27.0	360	360	360	360	0,00

Tabela 66 – Comprimento total das fissuras medidas após 20 horas da moldagem

Arg	Comprimento total das fissuras (mm)				
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Média	D.Padrão
Arg A	250	250	250	250	0,00
Arg B	0	0	0	0	0,00
Arg C	210	-	135	115	53,03
Arg D	450	500	250	400	132,29
Arg E	0	0	0	0	0,00
1 : 1 : 6	250	250	250	250	0,00
1 : 2 : 9	250	250	250	250	0,00
BRITA	250	250	575	358	187,64
FPP 0.10	250	250	250	250	0,00
FPP 0.20	250	250	250	250	0,00
FPP 0.30	250	250	250	250	0,00
IAR 9.0	250	250	250	250	0,00
IAR 15.0	250	250	250	250	0,00
IAR 21.0	250	250	250	250	0,00
IAR 27.0	250	250	250	250	0,00

Tabela 67 – Área total das fissuras medidas após 20 horas da moldagem

Arg	Área total das fissuras (mm ²)				
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Média	D.Padrão
Arg A	125	126	187	146	35,22
Arg B	0	0	0	0	0,00
Arg C	21	-	14	12	5,30
Arg D	520	835	458	604	202,15
Arg E	0	0	0	0	0,00
1 : 1 : 6	50	129	150	110	52,67
1 : 2 : 9	213	164	147	175	34,27
BRITA	600	490	707	599	108,50
FPP 0.10	150	100	90	113	32,33
FPP 0.20	196	141	117	151	40,71
FPP 0.30	108	121	45	91	40,47
IAR 9.0	175	200	176	184	14,15
IAR 15.0	82	118	94	98	18,39
IAR 21.0	62	39	75	59	18,19
IAR 27.0	40	25	32	32	7,51

Tabela 68 – Análise de variância para o tempo de ocorrência da primeira fissura ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	93425,00	4	23356,25	3,94	3,48	significativo
	Dentro	59250,00	10	5925,00			
	Total	152675,00	14	-			
Tipo de areia	Entre	88816,67	1	88816,67	1,35	7,71	não significativo
	Dentro	262883,33	4	65720,83			
	Total	351700,00	5	-			
Fibras de polípr.	Entre	22616,67	3	7538,89	36,60	4,07	significativo
	Dentro	1648,00	8	206,00			
	Total	24264,67	11	-			
Ar incorp.	Entre	110373,33	4	27593,33	77,73	3,48	significativo
	Dentro	3550,00	10	355,00			
	Total	113923,33	14	-			

Tabela 69 – Análise de variância para o comprimento das fissuras após 20 horas da moldagem ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	214142,00	4	53535,50	15,00	3,48	significativo
	Dentro	35685,00	10	3568,50			
	Total	249827,00	14	-			
Tipo de areia	Entre	17604,17	1	17604,17	1,00	7,71	não significativo
	Dentro	70416,67	4	17604,17			
	Total	88020,83	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	0,00	3	0,00	0,00	4,07	não significativo
	Dentro	0,00	8	0,00			
	Total	0,00	11	-			
Ar incorp.	Entre	0,00	4	0,00	0,00	3,48	não significativo
	Dentro	0,00	10	0,00			
	Total	0,00	14	-			

Tabela 70 – Análise de variância para a área das fissuras após 20 horas da moldagem ao nível de significância de 5%

Variável	Fonte de variação	Soma dos quadrados	GL	Quadrado médio	F calc	F crít	Resultado
Arg industr.	Entre	652706,81	4	163176,70	20,13	3,48	significativo
	Dentro	81068,92	10	8106,89			
	Total	733775,72	14	-			
Tipo de areia	Entre	359121,74	1	359121,74	49,37	7,71	significativo
	Dentro	29094,74	4	7273,69			
	Total	388216,48	5	-			
Fibras de polipr.	Entre	5702,24	3	1900,75	1,07	4,07	não significativo
	Dentro	14229,24	8	1778,66			
	Total	19931,48	11	-			
Ar incorp.	Entre	40006,09	4	10001,52	13,52	3,48	significativo
	Dentro	7399,74	10	739,97			
	Total	47405,83	14	-			