



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana

PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS

**RETRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.**

São Paulo

2001

PEDRO KOPSCHITZ XAVIER BASTOS

**RETRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.**

**Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana**

**Orientadora:
Maria Alba Cincotto**

2001

Bastos, Pedro Kopschitz Xavier

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. Departamento de Engenharia de Construção Civi e Urbana.

1. Argamassa 2. Revestimento 3. Retração I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana II. t.

Aos meus pais, Cesar e Maria Luiza, por tudo,
mais uma vez.

À minha avó Aurora, que partiu logo no início
deste trabalho, com saudade.

...

Necessária é a ciência, abençoada a imaginação,
e mais ainda, na quietude, a experiência,
e a união à Criação.

Raïssa Maritain

AGRADECIMENTOS

As dificuldades encontradas na realização deste trabalho foram infinitamente pequenas diante de tudo o que Deus proporcionou para que chegasse ao fim. A Ele, obrigado.

Prof^ª. Dr^ª. Maria Alba Cincotto, pela orientação, dedicação, incentivo, confiança, amizade, conduta ética, e por ter propiciado a oportunidade de realização de estágio na França, coordenando o convênio EPUSP/*Institut National de Sciences Appliquées* - INSA de Toulouse.

Prof. Dr. Charles-Henri Détriché, pela orientação no INSA de Toulouse e por suas publicações sobre argamassas de revestimento, fontes ricas e seguras de consulta.

Prof. Dr. Jean-Paul Balayssac, co-orientador no INSA de Toulouse, pela recepção, profissionalismo, apoio na pesquisa e amizade.

Prof. Dr. Jean-Pierre Ollivier, do INSA, diretor do *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions* – LMDC, pela recepção em Toulouse e por coordenar e acreditar no convênio com a EPUSP.

Prof^ª Dr^ª Ginette Arliguie, diretora do LMDC/INSA de Toulouse.

Escola Politécnica da USP – professores e funcionários, especialmente: Vanderley John, Vahan Agopyan, Sílvia Selmo, Mércia Barros, Antônio Figueiredo, Racine Prado, Jefferson Liborio (USP/S. Carlos), Fátima Regina G. Sanches Domingues (pela atenção e cordialidade), Reginaldo Mariano (pela dedicação na organização do CPqDCC), Dorval, Mário, Patrícia, Rogério, Edson, Adilson, Renata, João, Alcione, Cristina, Paulinho, Engrácia, Ivan, Fátima (biblioteca), Léo, Rosana (Importação), Regina (CPG), Raimundo (Elétrica).

Institut National de Sciences Appliquées - INSA de Toulouse/Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions – LMDC: Manuel Caubet, Bernard Attard, Mr. Capelle, Jérôme Verdier, Simone Julien, Fred Reau, Juan Orellan, Arnaud Castel, Arnaud Dubosc, Nathalie Ruscassier, Patrice Rivard, Ranera, Claire Tognazzi, Maral Sarkis, Isabelle, Granju, Toumi, Manu, Michel, Michele, Michel Lorrain, Myriam Carcasses, Eric Ringot, Eric Massias, Analet Turatsinze, Richard Gagné (Univ. de Sherbrooke, Quebec, Canadá), Martin Cyr, "Zizou", "Double Metre", Fourcade, Marie France. Merci à tous.

Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP: Elza Nakakura, Arnaldo Battagin, Yushiro Kihara, Cláudio, Sérgio, Pecchio, Luisinho, Chiquinho, Caio, Rose, Rosa, Helena, Celina, Alice, Evandro, Juliano, Alex, Macedo, Cláudio "Bigode", Miguel, Adilson.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT: Valdecir Quarcioni, Gilberto Cavani, Ernan Silva, Pedro Bileski, Fabiano, Marly.

Colegas da Pós-Graduação e pesquisadores da EPUSP, especialmente: Cláudia Oliveira, Paulo Francinete, Marcos Ceccato, Nelson Lúcio Nunes, Luís Carlos Bonin, Arnaldo Carneiro, Vanessa G. Silva, Maristela G. Silva, Carlos Eduardo Regattieri, Fabíola Rago, Rubiane Antunes, Artemária Andrade, Neide Sato, Antônio Acácio de Melo Neto (pela organização de dados), Leonardo Miranda, Guilherme Parsekian, Ernesto Zangelmi, Carlus Fabrício.

Estagiários: Alexandre Nakahodo, Eduardo Queiroz.

Faculdade de Engenharia e Departamento de Construção Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, especialmente os professores Mario Nalon de Queiroz, Antônio E. Polisseni e Afonso Celso de Castro Lemonge (consultoria na área de estruturas).

Pró-Reitoria de Pesquisa da UFJF, especialmente: Júnior

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de doutorado no Brasil e na França.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela concessão de recursos de auxílio à pesquisa.

Ical Indústria de Cal Ltda. e Cobrascal Indústria de Cal Ltda., pelo fornecimento de cal e pelo apoio à pesquisa.

SELECTA Blocos Cerâmicos, pelo fornecimento de blocos cerâmicos.

Agradecimentos especiais: Eliana Cristina, Lúcia e Beatriz Kopschitz, Renato Miranda, Júlio C Teixeira, Marcelo Lima (*Eugênio MFL*), Eliana Sheiner (Aliança Francesa de Campinas), Rogério Gerheim, Paulo Bittar, Victor Ducatti e família, Lolo Verdier, Nasser, Renato, Max e Nancy Junqueira.

A toda a minha família, pela força.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa da escolha do tema.....	1
1.2	Proposição do tema	3
1.3	Objetivo.....	4
1.4	Descrição do conteúdo dos capítulos.....	5
2.	O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.....	7
2.1	Introdução.....	7
2.2	O que é e por que ocorre a retração	8
2.3	Tipos de retração – classificação, termos empregados e definições	9
2.3.1	Quanto ao estado físico do material	9
2.3.2	Quanto à natureza do fenômeno.....	10
2.3.3	Quanto ao grau de restrição.....	14
2.3.4	Quanto à permanência do fenômeno	15
2.4	Ocorrência simultânea dos diferentes tipos de retração	17
2.5	Mecanismos de retração de sistemas cimentícios	21
2.5.1	Mecanismo de depressão capilar.....	21
2.5.2	Mecanismo de variação da pressão de desligamento	26
2.5.3	Mecanismo de variação de tensão superficial	27
3.	O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO.....	30
3.1	Fatores extrínsecos e intrínsecos que afetam o desempenho do revestimento	30
3.2	Perda de água da argamassa	31
3.2.1	Perda de água por evaporação.....	33
3.2.2	Perda de água por sucção do substrato.....	38
3.2.3	Ação conjunta evaporação-sucção	
3.3	Retração	
3.3.1	Relação Retração x Perda de Água	42
3.3.2	Influência da composição da argamassa	45
3.3.3	Aspecto típico de curvas de retração de argamassa aplicada em camada única.....	46
3.4	Efeitos da retração no revestimento	50
3.4.1	Retração e fissuração do revestimento	50
4.	METODOLOGIA	52

4.1	Introdução.....	52
4.2	Panorama geral dos ensaios realizados	57
4.3	Ensaio de retração	59
4.3.1	Retração no estado fresco.....	59
4.3.2	Retração no estado endurecido.....	70
4.3.3	Retração impedida.....	73
4.4	Ensaio de propriedades mecânicas.....	77
4.4.1	Molde	78
4.4.2	Produção de corpos-de-prova prismáticos de argamassa, de dimensões 200 x 75 x 15 (mm) e 200 x 75 x 25 (mm).	80
4.4.3	Tração na flexão.....	84
4.4.4	Módulo de deformação	85
4.5	Ensaio de porosimetria	89
5 .	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	90
5.1	Materiais	90
5.2	Proporções de mistura	92
5.3	Nomenclatura das argamassas	94
5.4	Consistência	101
5.5	Condições de cura.....	102
5.6	Retração no estado fresco	103
5.7	Retração no estado endurecido	106
5.8	Retração impedida	107
5.9	Tração na flexão e módulo de deformação.....	108
5.10	Porosimetria.....	109
6 .	RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	111
6.1	Retração no estado fresco	111
6.2	Retração no estado endurecido	134
6.3	Retração impedida	135
6.4	Propriedades mecânicas.....	138
6.4.1	Tração na Flexão	138

6.4.2	Módulo de deformação	141
6.5	Porosimetria.....	142
7.	CONCLUSÕES	145
ANEXOS	150
ANEXO A.....	151
ANEXO B.....	153
ANEXO C.....	154
ANEXO D.....	161
ANEXO E.....	162
ANEXO F.....	164
ANEXO G.....	167
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	168

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Modelo simplificado de Feldman e Sereda da estrutura da pasta de cimento hidratada (adaptado de FELDMAN; SEREDA, 1968).....	11
Figura 2.2 - Representação esquemática da distribuição volumétrica (volume absoluto) dos componentes da pasta de cimento na retração química ou Contração Le Chatelier.....	12
Figura 2.3 - Representação esquemática do processo de hidratação e auto-secagem da pasta de cimento endurecida (GAGNÉ et al., 1999).....	13
Figura 2.4 - Curva típica de retração autógena medida unidimensionalmente em pasta de cimento (BUIL; BARON, 1980).....	13
Figura 2.5 - Primeira secagem, primeiro molhamento e retração irreversível de pastas de cimento Portland de várias porosidades a 47% de umidade relativa (HELMUTH; TURK, 1967).....	16
Figura 2.6 - Saída de água de uma cavidade em forma de tubo capilar da estrutura da pasta de cimento, com formação de menisco de raio “r”.....	22
Figura 2.7 - Água capilar remanescente entre duas partículas de cimento muito próximas, após algumas horas de secagem de um concreto (WITTMANN, 1976).....	24
Figura 2.8 - Relações entre pressão capilar crítica (p_c), tempo em que ela ocorre (t_c), retração volumétrica e relação água/cimento do concreto (WITTMANN, 1976). Em (a) encontra-se a unidade de pressão <i>mbar</i> , originária do texto da referência bibliográfica citada; 1 mbar = 10^5 Pa (Sistema Internacional).....	25
Figura 2.9 - Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas do C-S-H no modelo de estrutura da pasta de cimento hidratada proposto por FELDMAN; SEREDA (1968, 1970) – ilustração baseada em FELDMAN; SEREDA (1968).....	27
Figura 2.10 - Representação esquemática do Modelo de Munich de três diferentes estágios da estrutura interna da pasta de cimento endurecida. Em (a) a pasta encontra-se no estado seco, onde todas as partículas estão sob compressão por tensão superficial. Em (b) a tensão superficial é reduzida pela adsorção de moléculas de água e o sistema tem expansão igual a Δl_0 . A uma umidade relativa elevada (c), uma expansão adicional Δl_1 é causada por pressão de desligamento e alguns pontos de ligação entre as partículas sólidas são afastados (WITTMANN, 1985).....	29
Figura 3.1 - Influência de fatores extrínsecos e intrínsecos sobre a retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas da argamassa de revestimento de camada única.....	31
Figura 3.2 - Influência das condições iniciais de cura sobre a perda de água por evaporação de pastas de cimento - adaptado de DÉTRICHÉ (1983).....	34
Figura 3.3 - Variação de massa de argamassas mistas – adaptado de KOPSCHITZ et al. (1997). Porcentagem calculada pela relação entre a massa dos corpos-de-prova em determinada idade e a massa logo após a desforma. Os valores positivos no eixo Variação de Massa representam perda de massa.....	35
Figura 3.4 - Perda de água em função da umidade relativa (L'HERMITE, 1962).....	36
Figura 3.5 - Influência da composição da argamassa na perda de água por evaporação – comparação de misturas de mesma consistência e relação <i>aglomerante/agregado</i> diferente (adaptado de DÉTRICHÉ, 1983).....	37
Figura 3.6 - Influência da espessura da camada de argamassa na perda de água por evaporação - adaptado de DÉTRICHÉ (1983).....	38
Figura 3.7 - Retração em função da perda de massa – gráfico adaptado de VERBECK (1968) apud BARON; SAUTEREY (1982). Pastas de cimento de 7 dias de idade, relação <i>água/cimento</i> = 0,5. 43	
Figura 3.8 - Variação da retração total (Estágio A + Estágio B) em função da idade da pasta de cimento para três valores de <i>a/c</i> . A retração aumenta com a idade (curvas crescentes) e com a relação <i>a/c</i> ..44	

Figura 3.9 - Retração de argamassa de cimento:cal:areia, proporções 1:1:6 em volume, consistência 260 mm (mesa ABNT) - curvas (a) e (b). Retração de argamassa de cimento e areia, proporções 1:3 em volume, consistência 260 mm - curva (C). Ensaio realizado em corpos-de-prova prismáticos de dimensões 25 x 25 x 285 (mm), aplicados sobre base não-porosa, curados em ambiente de temperatura 24 °C e umidade relativa de 50%. As argamassas foram protegidas contra evaporação até 48 horas após a moldagem, quando se deu a desforma e foram realizadas as primeiras medidas de retração e de massa (KOPPSCHITZ et al., 1997).....	45
Figura 3.10 - Evolução das velocidades de retração e de perda de massa durante as primeiras 24 horas após a moldagem (DÉTRICHÉ, 1977), de pasta de cimento de relação a/c 0,32.	47
Figura 3.11 - Fases da retração de pasta de cimento (DÉTRICHÉ, 1977).	48
Figura 3.12 - Deformação observada de retração e de expansão (DÉTRICHÉ, 1977).....	49
Figura 3.13 - Influência da relaxação de tensões na fissuração do concreto (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 1994).	51
Figura 4.1 - Métodos de ensaio para estudo da retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas de revestimento.	54
Figura 4.2 - Corpo-de-prova de argamassa usado em medida de retração livre no estado endurecido - barra moldada com pinos metálicos nas extremidades para leitura da retração com relógio comparador (NBR 8490/84 da ABNT).	54
Figura 4.3 - Formas metálicas para moldagem de argamassa em forma de placa de 90 mm x 450 mm – desenho esquemático de corte transversal. a) Sistema com fundo não absorvente e grelha metálica entre a argamassa e o fundo para simulação de aderência e restrição da retração. b) Sistema que permite o contato da argamassa com um material absorvente. O papel-filtro entre a base e a grelha metálica permite a sucção de água e a desmoldagem da argamassa.	55
Figura 4.4 - Placa de argamassa para medida da “retração impedida” pela variação da distância "d" entre duas pastilhas metálicas coladas.	55
Figura 4.5 - Aparelho de medida de tensão de retração - desenho esquemático (LEJEUNE, 1995).	56
Figura 4.6 - Casos de aplicação de argamassa estudados em ensaios de retração e mecânicos.....	58
Figura 4.7 - Grelha metálica usada no fundo das formas para obter o efeito de aderência da argamassa à base.	59
Figura 4.8 - Molde utilizado nos ensaios de retração até 24 horas, constituído de fundo, duas extremidades e duas laterais que são montadas por sistema de encaixe e parafusos - desenho esquemático.....	60
Figura 4.9 - Conjunto grelha/haste metálica colados.	61
Figura 4.10 - Extremidade do molde de aço inoxidável , conjunto <i>haste-grelha metálica</i> e captor de deformações – desenho esquemático.	62
Figura 4.11 - Fotografia de um captor de deformação tipo digital, de curso máximo 2,5 mm e precisão 0,001 mm.	63
Figura 4.12 - Molde posicionado sobre bloco cerâmico para realização de ensaio de retração em argamassa de 25 mm de espessura, com grelha metálica posicionada a 5 mm da face superior da camada – desenho esquemático (vista parcial de corte longitudinal).....	63
Figura 4.13 - Vista superior do molde para ensaio de retração de argamassa – desenho esquemático. A distância entre as grelhas metálicas, de centro a centro, é de 320 mm.	65
Figura 4.14 - Controle da altura da argamassa no molde de ensaio de retração, por meio de pequeno gabarito confeccionado em PVC – desenho esquemático.	66
Figura 4.15 - Fotografia da extremidade do molde de aço para ensaio de retração.	66
Figura 4.16 - Molde metálico para ensaio de retração com grelha metálica posicionada sobre o fundo de aço (CASO II) – desenho esquemático.	67

Figura 4.17 - Ensaio de retração de argamassa no estado fresco – desenho esquemático de moldagem sobre bloco cerâmico.	68
Figura 4.18 - Equipamento do ensaio de retração de argamassa no estado fresco (até 24 horas) - detalhe da extremidade e dois moldes com bloco cerâmico como fundo, um deles preenchido com argamassa.	69
Figura 4.19 - Panorama geral da sala de realização dos ensaios de retração, com o conjunto moldes – computador.	70
Figura 4.20 - Corpo-de-prova de argamassa para ensaio de retração no estado endurecido.	70
Figura 4.21 - Equipamento para medida de retração de argamassa em forma de placa, no estado endurecido, e corpo-de-prova preparado para o ensaio, com pinos metálicos colados nas extremidades – desenho esquemático.	72
Figura 4.22 - Fotografias do ensaio de retração de placa de argamassa no estado endurecido - posicionamento da barra-padrão para obtenção da leitura inicial "zero" no relógio comparador e leitura do comprimento da placa.	73
Figura 4.23 – Medida da retração em corpo-de-prova com pastilhas metálicas e grelha metálica, por meio de retratômetro com relógio comparador – desenho esquemático.	75
Figura 4.24 - Fotografia de bloco cerâmico com papel-filtro e grelhas metálicas, conjunto preparado para moldagem de corpos-de-prova para ensaio de retração impedida.	75
Figura 4.25 - a) Corpo-de-prova após a desforma, com a grelha metálica aderida; b) corpo-de-prova com as pastilhas coladas e retratômetro; c) medição da distância entre as pastilhas.	76
Figura 4.26 - Projeto do molde construído em PVC para a realização dos ensaios mecânicos em argamassa.	79
Figura 4.27 - Fotografia de molde em PVC para fabricação de corpos-de-prova de argamassa para ensaios mecânicos. O fundo removível do molde serve como base não-absorvente para as moldagens do Caso I.	80
Figura 4.28 - Moldes de PVC preenchidos com argamassa para a produção de corpos-de-prova para ensaios mecânicos.	81
Figura 4.29 - Moldagem de argamassa sobre base porosa – desenho esquemático da retirada da folha plástica que permite o contato da argamassa fresca dos 4 corpos-de-prova do molde simultaneamente com a base - CasoIII.	82
Figura 4.30 - Fotografia do conjunto <i>molde-bloco cerâmico</i> preenchido com argamassa.	83
Figura 4.31 - Fotografia da operação de desmoldagem dos corpos-de-prova de argamassa do conjunto <i>molde-bloco cerâmico</i> do Caso III.	83
Figura 4.32 - Fotografia dos corpos-de-prova de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico e papel-filtro, após a retirada da forma.	84
Figura 4.33 - Ensaio de tração na flexão de corpo-de-prova de argamassa (200 mm x 75 mm x 15 mm) - desenho esquemático e fotografia.	85
Figura 4.34 - Ensaio de flexão, com dispositivo para medida do deslocamento do corpo-de-prova de argamassa no meio do vão entre os apoios – desenho esquemático.	86
Figura 4.35 - Curvas <i>Carga x Deslocamento (flecha)</i> obtidas no ensaio de flexão, com medida da flecha no meio do vão entre os apoios dos corpos-de-prova de 200 x 75 x 15 (mm). Resultado do corpo-de-prova nº 5, de 14 dias de idade – argamassa 1:1:6, aplicada sobre base não-absorvente e sobre bloco cerâmico seco em estufa por 24 horas.	87
Figura 4.36 - Curva <i>tensão x deformação longitudinal de tração no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra</i> , com traçado da reta que passa nos pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura. A declividade α corresponde ao Módulo Corda.	88
Figura 5.1- Granulometria das areias IPT e INSA – porcentagem retida.	91

Figura 5.2 - Granulometria das areias IPT e INSA – porcentagem retida acumulada	91
Figura 5.3 - Variação da composição das argamassas a partir do proporção de referência 1:1:6. Grupo de argamassas de relação <i>água/aglomerantes</i> constante.....	93
Figura 5.4 - Composição das argamassas – esquema do critério de variação dos teores de cal e pasta das misturas, adotado a partir da proporção de referência 1:1:6 em volume, mostrando a relação <i>cal/aglomerante</i> e <i>pasta/massa total</i> das proporções de relação <i>água/aglomerantes</i> igual e consistências diferentes	94
Figura 5.5 - Nomenclatura das argamassas de relação <i>água/aglomerantes</i> constante e consistência variável.....	95
Figura 5.6 - Esquema da nomenclatura das argamassas, baseado na variação dos teores de cal e pasta das proporções de relação <i>água/aglomerantes</i> constante e consistência variável.	95
Figura 5.7 - Esquema da nomenclatura das argamassas, baseado na variação dos teores de cal e pasta das proporções corrigidas, isto é, de relação <i>água/aglomerantes</i> variável e consistência constante.....	96
Figura 5.8 - Composição das argamassas de relação <i>água/aglomerantes</i> constante e consistência variável.	98
Figura 5.9 - Bloco cerâmico usado como substrato nos ensaios de retração de argamassa no estado fresco – desenho esquemático.....	103
Figura 5.10 - Curva de ganho de massa por imersão em água (média de 6 corpos-de-prova) do bloco cerâmico usado como substrato nos ensaios de retração de argamassa no estado fresco. Quando foi necessário obter a umidade de 50% para a realização de determinados ensaios, foi estabelecido que os blocos seriam imergidos em água por 5 minutos (tempo extraído da curva).....	104
Figura 5.11 - Corpo-de-prova de argamassa, com indicação da posição de retirada da amostra para o ensaio de porosimetria.	109
Figura 6.1 - Curva de retração no estado fresco, até 24 horas, de argamassa mista de cimento, cal e areia, proporções 1:1:6 em volume.	111
Figura 6.2 - Curva de retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base não absorvente, com indicação dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento e cal de mesma consistência	114
Figura 6.3 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	114
Figura 6.4 - Perda de massa por evaporação de argamassas cimento/areia e cimento/cal/areia - placas (200 x 175) mm e 15 mm de espessura, mantidas a 24 °C e 50% U.R. (ensaio EPUSP).....	115
Figura 6.5 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 30 e Pasta 35, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	116
Figura 6.6 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 45 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	117
Figura 6.7 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 60 e Cal 60 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	117
Figura 6.8 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 30 e Pasta 30 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	118
Figura 6.9 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 35 e Pasta 35 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).....	118
Figura 6.10 - Retração impedida – ensaio de retração da argamassa 1:1:6 no estado fresco, até 24 horas, aplicada sobre base não-absorvente com grelha metálica (INSA).....	119
Figura 6.11 - Retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada sobre o fundo de aço do molde, com grelha metálica, e sobre bloco cerâmico seco em estufa (INSA).....	120

Figura 6.12 - Retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada sobre o fundo de aço do molde, com grelha metálica, e sobre bloco cerâmico seco em estufa (INSA).	121
Figura 6.13 - Retenção de água (porcentagem da massa de água retida na argamassa em relação à massa de água original da mistura antes da sucção) em argamassas de cimento e areia e de cimento, cal e areia, moldadas sobre bloco cerâmico (bloco furado, absorção inicial - IRA - 14,65 g/ 30 pol ² , ensaio realizado na face lisa do bloco onde se aplica normalmente o revestimento) – ensaio EPUSP.	123
Figura 6.14 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico com teor de umidade 0% (ensaio realizado na EPUSP).	123
Figura 6.15 - Retração, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 15 mm sobre bloco cerâmico com diferentes teores de umidade (INSA).	125
Figura 6.16 - Retração, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 15 mm sobre bloco cerâmico com diferentes teores de umidade (INSA).	126
Figura 6.17 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm, sobre bloco cerâmico seco (INSA).	127
Figura 6.18 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre bloco cerâmico com teor de umidade 50% (INSA).	128
Figura 6.19 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre bloco cerâmico saturado (INSA).	129
Figura 6.20 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre base não-absorvente e grelha metálica (INSA).	130
Figura 6.21 - Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico seco (INSA).	131
Figura 6.22 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico seco e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.	131
Figura 6.23 - Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico com teor de umidade 50% (INSA).	132
Figura 6.24 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico com 50% de umidade e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.	132
Figura 6.25 - Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico saturado (INSA).	133
Figura 6.26 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico saturado e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.	134
Figura 6.27 - Variação de massa de placas de argamassa de 400 x 150 (mm) e 15 mm de espessura, medida a partir de 24 horas após a moldagem, até 28 dias de idade (cada ponto da curva representa a média das leituras em três corpos-de-prova) – ensaio EPUSP.	134
Figura 6.28 - Retração de placas de argamassa de 400 x 150 (mm) e 15 mm de espessura, medida a partir de 24 horas após a moldagem (cada ponto da curva representa a média das leituras em três corpos-de-prova) - ensaio EPUSP.	135
Figura 6.29 - Curvas de retração na face livre e na face impedida, com retirada da grelha metálica aos 3, 7, 14 e 28 dias após a moldagem – ensaio realizado com pastilhas coladas sobre a argamassa. Argamassa 1:1:6, espessura 25 mm, aplicada sobre bloco cerâmico furado com 0% de umidade (EPUSP).	137

Figura 6.30 - Curvas de retração na face livre e na face impedida - argamassa 1:1:6, espessura 25 mm , aplicada sobre bloco cerâmico furado com 0% de umidade (EPUSP).....	137
Figura 6.31 - Resultados do ensaio de tração na flexão de argamassa 1:1:6 aplicada sobre base em três condições de umidade, com espessuras 15 e 25 mm – tensão de ruptura aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade (EPUSP).....	139
Figura 6.32 - Comparação entre os resultados do ensaio de tração na flexão dos corpos-de-prova de 15 mm e 25 mm de espessura – argamassa 1:1:6 (EPUSP).....	140
Figura 6.33 - Resultados do cálculo do módulo de deformação da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base absorvente com três teores de umidade. Cálculo realizado para as idades 3, 7, 14 e 28 dias (EPUSP).....	141
Figura 6.34 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassas 1:1:6 e Cal 60 (EPUSP).....	143
Figura 6.35 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassas 1:1:6 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico seco (EPUSP).....	143
Figura 6.36 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassa 1:1:6 aplicada sobre base não absorvente e sobre bloco cerâmico seco e com teor de umidade 50% (EPUSP).....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de retração.....	17
Tabela 2.2 - Possibilidades de ocorrência simultânea de diferentes tipos de retração.....	19
Tabela 4.1 - Exemplo de seqüência de cálculos para obtenção do Módulo Corda de cada corpo-de-prova de argamassa.....	89
Tabela 5.1 - Composição granulométrica da areia utilizada no INSA (norma EN 196-1).....	90
Tabela 5.2 - Composição granulométrica da areia utilizada na EPUSP.....	91
Tabela 5.3 - Composição das misturas INSA.....	99
Tabela 5.4 - Composição das misturas EPUSP.....	100
Tabela 5.5 - Composição da argamassa cimento:areia EPUSP.....	101
Tabela 5.6 - Consistência das argamassas INSA (NF P 18 452 e NF P 15 437).....	102
Tabela 5.7 - Consistência das argamassas EPUSP (ABNT NBR 7215/96).....	102
Tabela 5.8 - Ensaio de retração no estado fresco (até 24 horas) - INSA.....	105
Tabela 5.9 - Parâmetros adotados nos ensaios de flexão.....	108
Tabela 5.10 - Casos de aplicação de argamassa para análise em ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio.....	109
Tabela 6.1 - Análise dos aspectos possíveis da curva de retração da argamassa no estado fresco, até 24 horas, aplicada sobre base absorvente, em função da intensidade da sucção de água e da pega da pasta.....	124
Tabela 6.2 - Resistência à tração na flexão da argamassa 1:1:6 aos 28 dias (EPUSP).....	141

RESUMO

A presente pesquisa aborda a retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas de revestimento. A composição de cimento, cal e areia de proporção 1:1:6 em volume, variando-se os teores de cal e de pasta, foi estudada, procurando-se inovar a tecnologia que aproxima os experimentos de laboratório das condições reais do revestimento em obra, com ensaios realizados em corpos-de-prova em forma de placa, com espessuras 15 e 25 mm. Considerou-se a influência, sobre o fenômeno de retração e sobre as propriedades resistência à tração na flexão e módulo de deformação, dos fatores: composição da argamassa, sucção de água pelo substrato, aderência argamassa/substrato, e espessura da camada de argamassa.

Apresenta-se aqui o método de medida da retração no estado fresco, desenvolvido no *Institut National des Sciences Appliquées* – INSA/Toulouse, e as condições de ensaio ampliadas na EPUSP para aplicação da argamassa sobre substrato poroso e para a comparação da retração na interface argamassa/base e na superfície do corpo-de-prova exposta ao ar. Foram também realizados ensaios de retração no estado endurecido, ensaios de retração impedida, medindo-se a deformação dos corpos-de-prova após cessada a restrição promovida por uma grelha metálica, e observou-se a porosimetria das argamassas com a técnica de intrusão de mercúrio. Os ensaios mecânicos de flexão foram realizados em placas de dimensões (200 x 75) mm, espessuras 15 e 25 mm, medindo-se o deslocamento no meio do corpo-de-prova, durante o carregamento, para o cálculo do módulo de deformação.

Os resultados de retração no estado fresco, até 24 horas, ressaltaram a existência de três estágios de deformações: Primeira Retração, Período de Estabilização e Segunda Retração. As maiores alterações no perfil da curva de retração livre, por conta das variações na composição das argamassas, ocorreram no valor atingido pela Segunda Retração, que aumentou com o teor de cal e com o teor de pasta. A aderência à base provocou o impedimento da Segunda Retração.

Além disso, a sucção de água ocorrida na argamassa aplicada sobre bloco cerâmico fez aumentar a retração no estado fresco e os valores atingidos pela tensão de tração na flexão, na ruptura, e pelo módulo de deformação em diferentes idades.

Foi possível ainda observar que a medida da retração ao longo da espessura da camada de argamassa mostrou uma condição de perda de água por evaporação e por sucção segundo a qual a retração ocorre de maneira uniforme na interface argamassa/base e na superfície exposta. A retração impedida foi registrada, após cessada a restrição pela grelha metálica, até o vigésimo oitavo dia de idade dos corpos-de-prova. Com a técnica de intrusão de mercúrio foi possível observar os efeitos da sucção de água pela base e da adição de cal, ambos no sentido de diminuir a porosidade total das argamassas.

O conjunto de ensaios da pesquisa mostrou a importância da simulação, em laboratório, de condições de aplicação da argamassa de revestimento em obra.

ABSTRACT

This research discusses shrinkage and the development of mechanical properties in mortars made of cement, lime and sand - 1:1:6, with varying contents of lime and paste. Technology innovation was sought for in what concerns laboratory tests similar to real rendering conditions. Thus, the tests have been carried out in plaque specimens 15 and 25 mm thick. Besides, factors such as mortar composition, water absorption through the basis, mortar/basis adherence, as well as the thickness of the mortar layer, have been taken into account when analyzing shrinkage and the properties flexural strength and elasticity modulus.

The method for measuring shrinkage in fresh state has been developed at the *Institut National des Sciences Appliquées* - INSA/Toulouse; testing conditions have been developed at EPUSP. They concern mortar application on a porous basis and the comparison between shrinkage on mortar/basis and on specimens surface exposed to the environment conditions. Other tests were also carried out, such as testing of the mortar in its hardened state and on restrained shrinkage. The strain of the specimens has been measured after the restraint caused by a metal grid, and the porosity of mortars has been observed through the technique of mercury intrusion. The mechanical tests has been carried out in plaques (200 x 75) mm and 15 and 25 mm thick. The displacement in the center of the specimen, during loading has been measured, for calculating the elasticity modulus.

The results of shrinkage in fresh state, up to 24 hours, pointed out the existence of three stages of deformations: *first shrinkage*, *non-deformation phase*, *second shrinkage*. The major alterations in the profile of the curve of fresh state, due to variations in mortar composition, occurred in the value reached by *second shrinkage*, which increased with lime content and with paste content. Adherence to the basis was responsible for the restraining of Second Shrinkage. Water absorption in mortar applied to bricks caused the increasing of shrinkage in fresh state and the values reached by flexural stress and by elasticity modulus.

Measuring shrinkage throughout the mortar layer showed loss of water through evaporation and absorption according to which shrinkage occurs evenly in the interface mortar/basis and on the exposed surface. Restrained shrinkage has been recorded up to the 28th day of tests, after restraining by the metal grid ceased. With the mercury intrusion porosimetry it was possible to observe the effects of water absorption through basis and of lime addition, both for minimizing the total porosity of mortars.

The set of testing in the research showed the importance of laboratory simulation of real rendering conditions.

1 . INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa da escolha do tema

Este trabalho insere-se na linha de pesquisa "Pastas e Argamassas" do Grupo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Materiais e Componentes de Construção Civil, GEPE-MAT, do Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana da Escola Politécnica da USP - PCC. Aborda o tema revestimento de fachada de edificações em argamassa, estudando especificamente o fenômeno da retração de argamassas inorgânicas mistas e o desenvolvimento de algumas propriedades mecânicas que influenciam a durabilidade, especialmente as relacionadas com a ocorrência de fissuração: resistência à tração e módulo de deformação.

A incidência de fenômenos patológicos de diversas naturezas no revestimento das edificações é freqüente, acarretando prejuízos, acidentes e mesmo uma situação estética desagradável para os usuários. A presente pesquisa assume importância no contexto do estudo de um problema nas nossas construções: a fissuração do revestimento de fachadas externas ocasionada, muitas vezes, pela retração. Retração e fissuração são fenômenos que estão geralmente associados - o primeiro sempre ocorre, em maior ou menor intensidade, mas o segundo pode ocorrer ou não ao longo do tempo. Ao executar-se o revestimento de uma parede espera-se, entre outros requisitos de qualidade, que ele não venha a apresentar fissuração que comprometa o seu desempenho, principalmente quanto à permeabilidade e aderência à base.

O sistema de revestimento das paredes internas e externas tem grande importância no que se refere aos aspectos estético, de proteção e de durabilidade das edificações. A execução desta etapa da obra também representa um alto consumo de materiais e de mão-de-obra. Mesmo assim, a velocidade do desenvolvimento tecnológico e científico neste setor tem sido muito lenta ao longo das últimas décadas no Brasil. Tem prevalecido, na execução das obras, a transferência do conhecimento prático de uma geração para outra de mestres-de-obra, técnicos e engenheiros sem, no entanto, uma abordagem sistematizada e científica dos verdadeiros parâmetros que possam medir e avaliar o desempenho dos revestimentos.

A fissuração dos revestimentos de argamassa na fachada dos nossos edifícios pode ser facilmente observada. Este alto índice de incidência representa também risco de acidentes por descolamento seguido de queda de placas do revestimento externo e penetração de umidade, com danos conseqüentes no revestimento interno das paredes e desenvolvimento de microorganismos alergênicos. Os reparos em fachada são de custo muito alto e representam desconforto para todas as partes envolvidas: tanto para as construtoras, por causa do deslocamento de equipes de trabalho e a paralisação de outros serviços, como para os usuários dos edifícios. Neste quadro insere-se a necessidade de se pesquisar a retração das argamassas de revestimento.

Nota-se, dentro do panorama das pesquisas em argamassa no Brasil, que o tema retração é pouco estudado. Além disso, a metodologia freqüentemente utilizada em nosso meio não simula uma condição próxima da realidade, isto é, da argamassa aplicada sobre um substrato poroso. Em alguns países desenvolvidos, como a França, as argamassas de revestimento são cientificamente estudadas há décadas através de metodologia mais adequada. Como resultado, chegou-se a um estágio de conhecimento que permite a disponibilidade de numerosos tipos de argamassas industrializadas no mercado de materiais de construção, para as quais é especificada uma previsão de desempenho em condições de uso diferenciadas. Em nosso País o mercado de argamassas industrializadas vem se desenvolvendo em grande velocidade, carecendo, no entanto, de pesquisa dirigida não só para as suas propriedades, como também para o sistema de vedação como um todo dos edifícios, considerando diferentes componentes empregados na construção de alvenarias, e sua interação com os diferentes climas regionais.

Assim, são apresentadas algumas inovações na exploração do assunto. Procurou-se adotar em laboratório situações próximas das condições reais de aplicação e exposição do revestimento, buscando a melhor forma de reproduzir as condições a que estão sujeitas as argamassas em termos de solicitações, deformações, sucção e evaporação da água de amassamento e desenvolvimento de propriedades mecânicas, tão logo sejam aplicadas sobre uma base e em idades subseqüentes. As inovações em método de ensaio dizem respeito, por exemplo, ao formato dos corpos-de-prova e ao modo de medir as propriedades mecânicas. Forma similar de explorar o tema foi

adotada por pesquisadores do *Institut National des Sciences Appliquées* – INSA e da *Université Paul Sabatier* de Toulouse, França, atualmente divulgando suas pesquisas através do LMDC - *Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions*.

Os experimentos de laboratório desta pesquisa foram realizados em duas etapas. A primeira desenvolveu-se no INSA/LMDC de Toulouse e, nesta fase, foram utilizados materiais correntemente empregados na França em laboratório (areia normalizada) e em canteiro de obras (cimento e cal). Procurou-se, contudo, trabalhar com materiais de características o mais possível próximas às dos encontrados no Brasil. A segunda etapa experimental foi realizada no laboratório da Escola Politécnica da USP, com materiais do nosso País. Acredita-se não ter havido prejuízo quanto aos principais objetivos que se pretendeu alcançar, uma vez que se procurou trabalhar com materiais de características semelhantes nas duas etapas e foram mantidas as proporções em volume das argamassas.

A presente pesquisa faz parte do projeto temático "Argamassas inorgânicas de revestimento" desenvolvido na pós-graduação do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP (mestrado e doutorado), cujos resultados são divulgados através do GTA - Grupo de Trabalho em Argamassas da ANTAC - Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - e na Comissão de Estudos CE-02:102.17 - Argamassa de Assentamento e Revestimento, do COBRACON - Comitê Brasileiro de Construção Civil, da Associação Brasileira de Normas Técnicas. O GTA é responsável pela realização do Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, que acontece a cada dois anos desde 1995.

1.2 Proposição do tema

A compreensão do fenômeno da retração requer uma abordagem ampla, das características da argamassa à interação com o meio ambiente e o edifício. A proposta foi estudar o tema com a metodologia desenvolvida no LMDC e no INSA de Toulouse para a retração nos estados fresco e endurecido do material, adaptando-a quanto ao tipo de argamassa e condições de aplicação, e desenvolver método de ensaio para medir propriedades mecânicas.

Sejam as seguintes considerações:

a) *quanto à retração e propriedades mecânicas:*

- a intensidade do fenômeno de retração e o desenvolvimento das propriedades mecânicas de argamassas de revestimento dependem de fatores relacionados com a sua composição, condições de aplicação e condições de exposição como, por exemplo, tipo e teor de aglomerante usado, capacidade de absorção de água dos blocos da alvenaria, e condições climáticas do meio em que se encontra a obra, respectivamente. Em outras palavras, a forma como determinada argamassa perde água (velocidade e quantidade total) e, conseqüentemente, a quantidade de água presente na argamassa em cada instante após a aplicação condicionam o seu desempenho.

b) *quanto à metodologia de ensaio:*

- a avaliação do desempenho do revestimento quanto à retração e propriedades mecânicas é feita, na maioria dos ensaios normalizados, de forma não condizente com a realidade em obra. Os corpos-de-prova, por exemplo, têm formato inadequado e as condições de aplicação (moldagem) da argamassa não levam em conta a importância do substrato.

Um avanço em tecnologia de argamassas deve, pois, levar em conta esses parâmetros apontados como influentes no desempenho do revestimento, quanto ao fenômeno da retração e a propriedades mecânicas.

1.3 Objetivo

Face ao exposto, o objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno da retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassa mistas de cimento, cal e areia, aplicada como revestimento de camada única de paredes de alvenaria em edifícios, através do uso de métodos que simulem, em laboratório, as condições de aplicação encontradas em obra. O enfoque está voltado para o revestimento externo, onde as condições de exposição, em geral, são mais severas. Este tipo de argamassa é amplamente utilizado nas principais regiões metropolitanas do Brasil e geralmente

preparado no próprio canteiro de obras. Não fez parte desta pesquisa a abordagem de aspectos do processo produtivo adotado na execução do revestimento mas, sim, o estudo do desempenho do material em laboratório, a partir de padronização de procedimentos de produção e de aplicação.

Resumem-se a seguir os objetivos desta pesquisa:

- avaliar a influência, sobre o fenômeno de retração e sobre o desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de cimento cal e areia, de fatores relacionados com a sua composição e condições de aplicação como revestimento de camada única em alvenaria de edificações. Os fatores estudados são: teor de cal e de pasta da argamassa, restrição por aderência à base, sucção de água pela base, espessura da camada de argamassa e posição do plano paralelo à interface argamassa/base onde é medida a retração.
- estudar tanto a retração nos estados fresco e endurecido, como as propriedades mecânicas resistência à tração na flexão e módulo de deformação, em corpos-de-prova de argamassa em formato de placa.

1.4 Descrição do conteúdo dos capítulos

O *Capítulo 1 - Introdução* apresenta a justificativa da escolha do tema, bem como a abordagem proposta e os seus objetivos.

No *Capítulo 2 – O Fenômeno da Retração em Materiais Cimentícios* são apresentados uma revisão bibliográfica com definições importantes relacionadas ao tema, os principais tipos de retração, e a possibilidade de sua ocorrência simultânea em um compósito à base de cimento, além dos mecanismos de retração encontrados na literatura.

No *Capítulo 3 - O Fenômeno da Retração em Argamassas de Revestimento* são discutidos fatores extrínsecos e intrínsecos que afetam o desempenho da argamassa, aplicada como revestimento, quanto ao fenômeno de retração.

Uma abordagem sobre a evolução de métodos de ensaio de laboratório voltados para o estudo da retração e de propriedades mecânicas é feita no *Capítulo 4 – Metodologia*, que contém também a descrição detalhada dos métodos adotados e desenvolvidos nesta pesquisa. Estão eles relacionados aos ensaios de retração no estado fresco, retração no estado endurecido, retração impedida, propriedades mecânicas resistência à tração na flexão e módulo de deformação, e porosimetria.

Os materiais utilizados nos experimentos, a composição das misturas, as diferentes condições de aplicação das argamassas estudadas e os parâmetros de ensaio adotados encontram-se no *Capítulo 5 - Planejamento Experimental*, seguido do *Capítulo 6 – Resultados e Análise dos Resultados*.

No *Capítulo 7* encontram-se as *Conclusões* da pesquisa realizada, assim como sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema retração e propriedades mecânicas de argamassas de revestimento.

2. O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS

Este capítulo tem o objetivo de sistematizar a terminologia e os conceitos básicos relativos à retração. A maioria dos trabalhos publicados refere-se aos materiais cimentícios pastas e argamassas de cimento e concretos, mas os termos empregados podem ser aplicados às argamassas mistas cimento/cal, embora a cal tenha características distintas dos aglomerantes hidráulicos.

2.1 Introdução

A ocorrência de fenômenos patológicos em diversas partes das construções pode estar diretamente relacionada à retração dos compósitos à base de cimento. Inerente às condições de interação de um compósito recém-fabricado com o meio a que está exposto na obra e à própria hidratação do cimento, a retração, no entanto, pode ser controlada. Para o concreto de um elemento estrutural, por exemplo, a retração deve ser compatível com a resistência mecânica em determinada idade. Busca-se sempre evitar a fissuração, causada pela retração, que comprometa a aparência e a durabilidade das obras e, para que este objetivo seja alcançado, é preciso entender por que ocorre a retração. Os trabalhos publicados sobre o tema por inúmeros pesquisadores apresentam uma grande variedade de termos técnicos e enfoques, conforme estejam voltados para pastas, argamassas ou concretos e sua interação com outros materiais, conforme abordem naturezas diferentes da retração e conforme considerem estados físicos diferentes (fresco ou endurecido) da mistura ou compósito. Por isso, um dos objetivos deste capítulo é oferecer uma organização didática para esta terminologia.

2.2 O que é e por que ocorre a retração

O efeito físico de retração está sempre associado a uma deformação¹ na estrutura da pasta hidratada, decorrente de fenômenos de diferentes naturezas, contribuindo, cada um, com parcela diferente para a deformação total externa do compósito de cimento. A retração total de um corpo-de-prova de concreto, por exemplo, é resultado de vários tipos de retração que podem ocorrer ao mesmo tempo. A retração total corresponde a uma contração volumétrica, mas tornou-se usual medi-la linearmente na maioria dos métodos de ensaio em laboratório.

A perda de água da pasta de cimento é a principal causa da retração, se não for considerado o efeito de contração térmica. No estado saturado após a mistura, as argamassas de cimento ou elementos estruturais de concreto normalmente são expostos, logo depois da aplicação ou concretagem, a um ambiente de umidade relativa abaixo de 100%. Uma argamassa de revestimento de alvenaria, por exemplo, tem superfície muito extensa na fachada dos edifícios em relação ao volume de material aplicado, situação também de um revestimento de piso e de lajes extensas. Desta forma, com a ação do sol e do vento, a argamassa e o concreto estão sujeitos à perda de água intensa por evaporação. Estes materiais podem estar sujeitos também à perda de água por sucção, quando aplicados diretamente sobre substrato poroso (bases como bloco cerâmico e bloco de concreto, no caso da argamassa em fachadas, e o solo, no caso do concreto).

Além da perda de água, a retração de compósitos à base de cimento pode ter outras causas, como retração térmica, retração por carbonatação (reação do dióxido de carbono do ar com compostos da pasta de cimento hidratada), retração por hidratação do cimento e retração autógena (AÏTCIN et al., 1997; BUIL et al., 1980; TAYLOR, 1997).

¹ Os termos **retração**, **deformação** e **variação dimensional** misturam-se na literatura sobre o tema. A *retração*, em si, é um fenômeno acompanhado de uma contração volumétrica do material. *Deformação* é a expressão da medida da *variação dimensional* relacionada a este fenômeno (em mm/mm - deformação específica - por exemplo, quando tomada linearmente), termo que pode ser usado também para variações de sentido contrário ao da retração, quando ocorre aumento de volume do material.

2.3 Tipos de retração – classificação, termos empregados e definições

A retração pode ser de diversas naturezas e pode ocorrer, no tempo, em mais de uma fase da existência do compósito de cimento. Além disso, conforme a ligação existente entre o compósito e outro componente ou elemento da construção, a retração pode ser impedida de ocorrer livremente. Estas e outras considerações levam a uma classificação dos vários tipos de retração por grupos, identificando o fenômeno quanto:

- ao **estado físico** da mistura, fresco ou endurecido;
- à **natureza**;
- ao **grau de restrição**;
- à **permanência**.

Empregando termos consagrados da literatura sobre o assunto, apresentam-se a seguir tipos de retração que podem ocorrer, reunidos dentro dos quatro grupos da classificação mencionada.

2.3.1 Quanto ao estado físico do material

Retração plástica - é a retração por perda de água da pasta, argamassa ou concreto no estado fresco, que ocorre antes da pega do cimento, quando a fração sólida da mistura dispõe de mobilidade, de umas partículas em relação às outras. A diminuição de volume do sistema corresponde ao volume de água perdido.

Retração no estado endurecido - retração em pasta, argamassa ou concreto após a pega do cimento. Quando, neste estado, é feita referência à retração causada pela perda de água, o termo freqüentemente empregado é *retração por secagem*. A retração no estado endurecido depende do tamanho e do tipo de vazios que perde água, e da forma como a água está ligada às superfícies sólidas da pasta endurecida: se livre, se adsorvida nas paredes internas de sua estrutura, se entre as camadas do C-S-H ou se combinada quimicamente. Considera-se que a magnitude da retração total da pasta endurecida depende diretamente do grau de dificuldade encontrado para a remoção da água e das propriedades mecânicas do compósito. A formação do esqueleto rígido e o

aumento de sua resistência mecânica com o tempo fazem, no entanto, com que a diminuição de volume do sistema não corresponda ao volume de água perdido para o meio.

2.3.2 Quanto à natureza do fenômeno

*Retração por perda de água*² - pode ocorrer na pasta, argamassa ou concreto, tanto no estado fresco como no endurecido. Quando a pasta de cimento saturada é exposta a um ambiente com umidade relativa do ar menor que 100%, começa a perder água e a retrair-se. A perda de água de amassamento de uma mistura fresca é a principal causa de retração plástica e pode ser diminuída pelo ajuste de dosagem que evite exsudação, pela proteção da peça concretada contra a evaporação e pelo uso de aditivos retentores de água. Na pasta endurecida, a água pode estar presente de várias formas. Dependendo do espaço de onde se dá sua saída, a retração ocorre com maior ou menor intensidade. A *água capilar* está nos vazios maiores da pasta, os vazios capilares, não preenchidos pelos componentes sólidos da hidratação do cimento, e sua remoção não causa variação de volume. A perda de *água adsorvida*, retida na superfície dos componentes sólidos da pasta, é considerada a principal causa de retração na secagem. A *água interlamelar*, contida nas camadas internas do principal produto da hidratação do cimento, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado), somente é perdida em ambiente de umidade relativa da ordem de 11 % (MEHTA; MONTEIRO, 1994) ou abaixo. A estrutura do C-S-H retrai-se quando perde essa água interlamelar, responsável também pela deformação lenta. Parte da água de amassamento é retida nos produtos de hidratação do cimento, designada *água combinada*. Esta só é perdida a temperaturas acima de 100 °C, em incêndios, por exemplo. A reação de desidratação é irreversível e o sistema perde as suas propriedades. O conhecido modelo de estrutura da pasta de cimento hidratada proposto por FELDMAN; SEREDA (1968, 1970) para o C-S-H ilustra os diferentes modos como a água pode estar presente na pasta (**Figura 2.1**).

² O termos **retração por secagem** e **retração por perda de água** referem-se ao mesmo fenômeno físico, o de retração causada por saída de água. Convencionou-se, pelo que foi observado na literatura, adotar *retração por secagem* na referência à retração de compósitos cimentícios no estado endurecido de uma forma geral. No entanto, a retração no estado endurecido pode ter origens diferentes à da perda de água simplesmente. *Retração por perda de água*, por outro lado, não é propriamente um termo técnico; desta forma apenas se descreve a natureza de um determinado tipo de retração, tanto para compósitos no estado plástico como no estado endurecido. A definição destes dois tipos de retração, portanto, pertence a grupos diferentes na classificação apresentada neste texto.

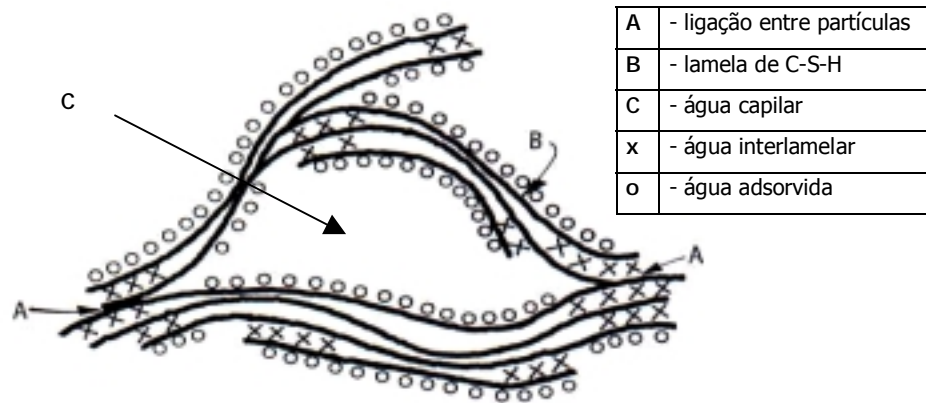


Figura 2.1- Modelo simplificado de Feldman e Sereda da estrutura da pasta de cimento hidratada (FELDMAN; SEREDA, 1968).

Retração por hidratação ou *retração química* - na hidratação do cimento, o volume total dos hidratos formados é inferior ao volume absoluto inicial (soma dos volumes absolutos da água e do cimento anidro). Este fenômeno foi descoberto por Le Chatelier e é chamado de *contração Le Chatelier*. Após a hidratação completa, a contração Le Chatelier é da ordem de 10% do volume inicial da pasta (BAROGHELBOUNY, 1994) (**Figura 2.2**). O volume correspondente a esta contração, entretanto, não implica numa diminuição de volume aparente da mesma ordem de grandeza no compósito, uma vez que a estrutura da pasta endurecida contém também vazios. O volume aparente da pasta endurecida a uma determinada umidade relativa depende da relação *água/cimento* inicial, do grau de hidratação e do tamanho dos grãos de cimento anidro, enquanto o volume absoluto da pasta de cimento hidratada (GAGNÉ et al., 1999) não depende da relação *água/cimento* inicial.

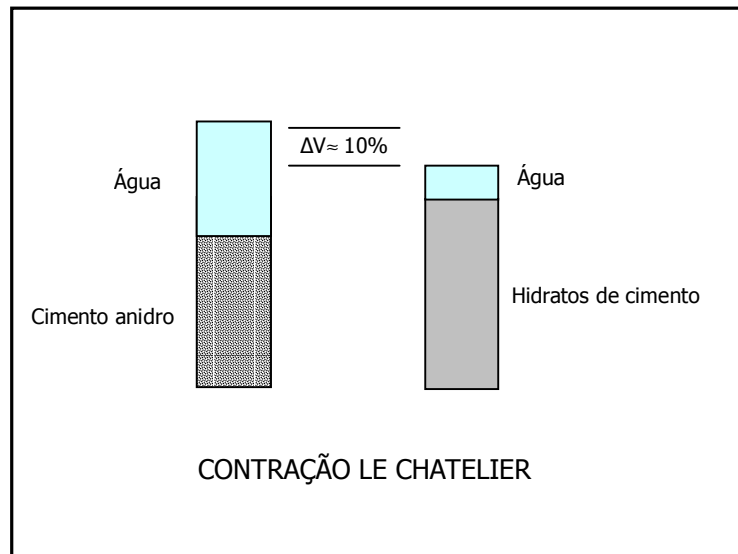


Figura 2.2- Representação esquemática da distribuição volumétrica (volume absoluto) dos componentes da pasta de cimento na retração química ou Contração Le Chatelier.

Retração autógena ou *endógena*³ - é a retração que ocorre em um sistema fechado, com remoção da água capilar da pasta pela hidratação do cimento ainda não hidratado. Ocorre sem troca de umidade com o meio externo, verificando-se, na prática, no interior de uma massa volumosa de concreto ou em corpos-de-prova protegidos por cera, parafina, papel-alumínio ou outro agente impermeabilizante. Há um consumo de água dos capilares num processo conhecido como *auto-secagem*, que se passa no interior da pasta, hidratando a fração anidra remanescente. Isto significa que a umidade relativa interna do material diminui nesta situação. A auto-secagem resulta da diminuição da quantidade de água líquida por transformação em água combinada (**Figura 2.3**) e o resultado macroscópico da retração autógena é a soma da retração química com o efeito físico da retração por depressão capilar.

³ **Autógeno** - que se gera a si mesmo (FERREIRA, 1999).

Endógeno - originado no interior do organismo, ou por fatores internos (FERREIRA, 1999).

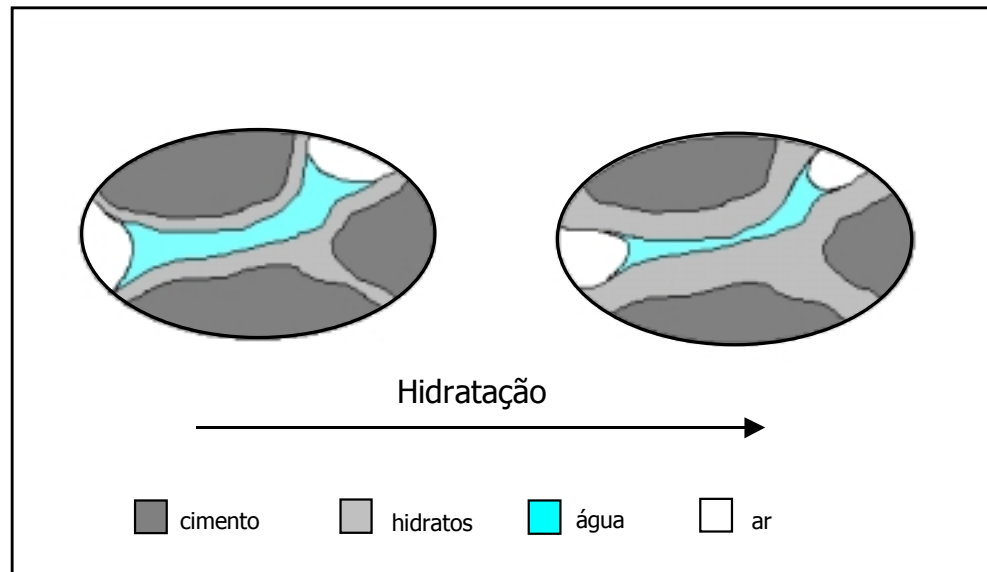


Figura 2.3 – Representação esquemática do processo de hidratação e auto-secagem da pasta de cimento endurecida (GAGNÉ et al., 1999).

BUIL; BARON (1980) descrevem três fases sucessivas da retração autógena no tempo, mostradas numa curva típica de ensaio de determinação unidimensional em pasta de cimento Portland: a) *primeira retração*; b) *expansão*; c) *segunda retração* ou *retração de endurecimento* (**Figura 2.4**).

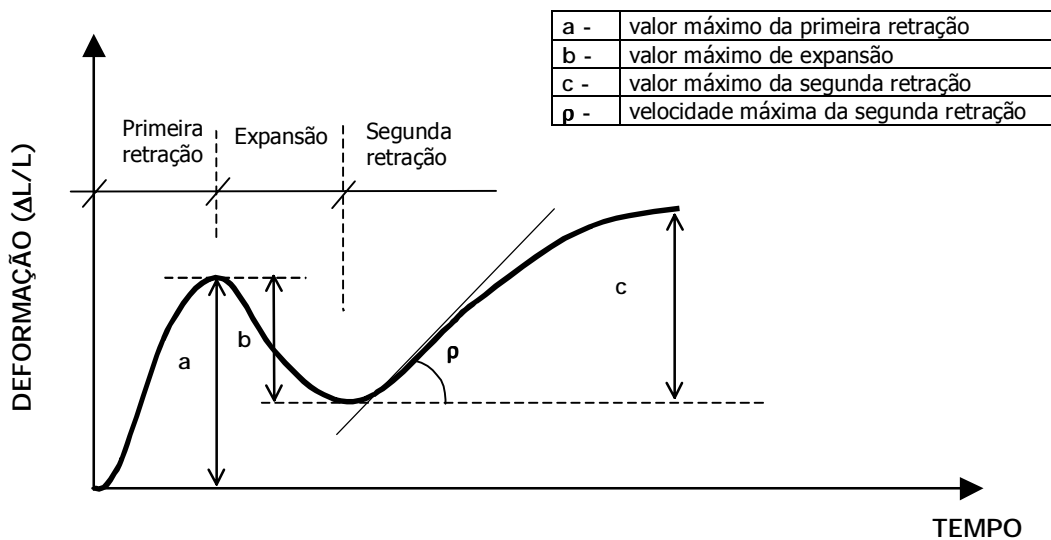


Figura 2.4– Curva típica de retração autógena medida unidimensionalmente em pasta de cimento (BUIL; BARON, 1980).

A primeira retração ocorre até o início de pega do cimento aproximadamente. Esta fase da retração autógena integra a retração plástica do compósito de cimento, mas por ser muito pequena em comparação com a retração total de um corpo-de-prova no

estado plástico exposto a atmosfera não saturada, tem pouca importância prática. A fase de expansão tem duração que varia de acordo com o tipo de cimento. Para certos tipos de cimento, ricos em C_3A e com baixo teor de gipsita, pode haver apenas uma diminuição momentânea da retração. A segunda retração se manifesta após o fim de pega do cimento e depende da relação água/cimento inicial: ela diminui com o aumento de a/c , para praticamente anular-se para relações a/c maiores que 0,35. Por causa do endurecimento progressivo da pasta de cimento, para valores iguais de deformação as tensões devidas à retração são bem maiores na segunda retração do que na primeira.

Retração por carbonatação – o CO_2 do ar reage com compostos hidratados do cimento na pasta endurecida com aumento de massa. Para cada mol de portlandita - $Ca(OH)_2$ - que se transforma em calcita - $CaCO_3$ - o ganho de massa é de 35%. Ocorre aumento de volume absoluto na formação de compostos carbonatados, mas o efeito da carbonatação no compósito de cimento, por diminuir os espaços entre as partículas sólidas de sua estrutura interna, é a retração por depressão capilar.

Retração térmica - a diminuição de temperatura pode ocorrer no compósito de cimento de duas maneiras diferentes: após o pico de evolução da temperatura por acúmulo de calor de hidratação, e após aquecimento por exposição a uma fonte de calor externa. Problemas com contração térmica ligada à hidratação do cimento acontecem, principalmente, em grandes massas de concreto, e o esfriamento à temperatura ambiente pode levar à fissuração (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Este não é o caso das argamassas de revestimento ou pisos de concreto de pouca espessura, em que o calor de hidratação dissipa-se rapidamente no meio externo. A movimentação térmica, nesses casos, é devida a variações de temperatura externas (ambiente); mudanças de temperatura diárias e sazonais causam variação dimensional nos compósitos à base de cimento, principalmente em elementos construtivos de grande relação superfície/volume.

2.3.3 Quanto ao grau de restrição

Retração livre - retração em pasta, argamassa ou concreto, que ocorre em corpo-de-prova ou elemento estrutural isolado, ou seja, livre para retrair-se pelo fato de não estar ligado ou aderido a uma base porosa ou outro elemento estrutural. Mesmo em

casos em que há restrição da retração por causa da presença do agregado na mistura, como em argamassas e concretos, a retração em corpos-de-prova isolados é chamada de retração livre.

Retração restringida ou *retração impedida* - várias formas de restrição podem surgir contra a livre ocorrência da retração: a restrição pela presença do agregado em argamassas e concretos, a restrição por causa da aderência da pasta, argamassa ou concreto a uma base, a restrição devida a ligações entre elementos estruturais de concreto e a restrição devida à aderência do concreto à armadura, no caso do concreto armado. O impedimento da retração provoca o aparecimento de tensões de tração no material e, dependendo da combinação de sua intensidade com a resistência à tração e o módulo de deformação da argamassa ou do concreto, pode ocorrer fissuração.

2.3.4 Quanto à permanência do fenômeno

Este tipo de classificação está normalmente relacionado com ciclos de molhamento e secagem dos compósitos à base de cimento. Após a primeira secagem, a pasta de cimento não retoma suas dimensões externas iniciais ao ser novamente saturada. Esta propriedade leva à classificação da retração quanto à sua reversibilidade ou irreversibilidade.

Retração reversível - parcela da retração recuperada, dimensionalmente, com o molhamento da pasta de cimento após secagem.

Retração irreversível ou *permanente* - é a parcela da retração não recuperada em ciclos molhamento/secagem. A maior parte da retração irreversível ocorre na primeira secagem e parcelas menores podem ocorrer após cada secagem desse ciclo. Deve-se esta irreversibilidade a ligações químicas entre as partículas sólidas na primeira secagem (MEHTA; MONTEIRO, 1994; POWERS, 1968).

Há controvérsias na literatura quanto à dependência da irreversibilidade da retração em relação a determinadas características da pasta de cimento. HELMUTH; TURK (1967) sugeriram o gráfico da **Figura 2.5**, em que mostram que a parcela irreversível da retração (em porcentagem, medida linearmente) de pastas de cimento de diferentes relações água/cimento aumenta com a porosidade total. POWERS (1968), no

entanto, analisa que a irreversibilidade, sendo devida a ligações que se opõem à pressão de desligamento quando a água entra novamente em um corpo-de-prova, é menor em meios mais porosos, onde o número destas ligações é também menor. BENTUR (1979) considera que o desempenho da pasta frente à secagem depende do grau de hidratação: em pastas bem hidratadas, alterações no C-S-H são as maiores responsáveis pela irreversibilidade da retração, enquanto em pastas com menor grau de hidratação, nas primeiras idades, mudanças na porosidade são mais importantes. A parcela reversível da retração, os autores mencionados concordam, independe da porosidade – na **Figura 2.5** observa-se que a distância entre as duas retas que representam a variação dimensional na 1ª secagem e no 1º molhamento não varia.

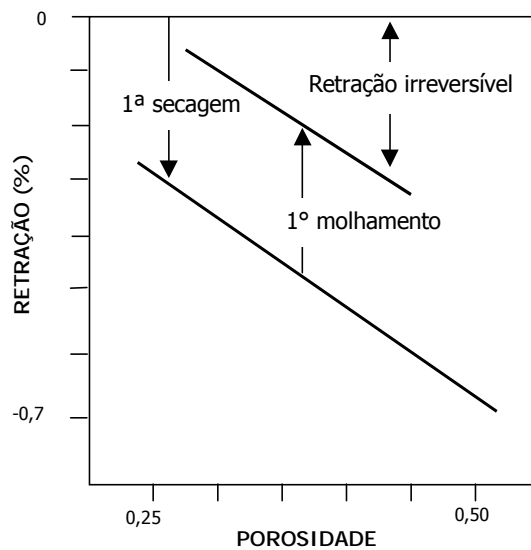


Figura 2.5 – Primeira secagem, primeiro molhamento e retração irreversível de pastas de cimento Portland de porosidade diferente a 47% de umidade relativa (HELMUTH; TURK, 1967).

A **Tabela 2.1** reúne todos os tipos de retração comentados.

Tabela 2.1 – Tipos de retração.

QUANTO AO ESTADO FÍSICO DA ARGAMASSA	QUANTO À NATUREZA DO FENÔMENO	QUANTO AO GRAU DE RESTRIÇÃO	QUANTO À PERMANÊNCIA DO FENÔMENO
Retração plástica (no estado fresco)	Retração por perda de água para o meio externo (por sucção ou por evaporação)	Retração livre	Retração reversível
Retração no estado endurecido.	Retração por hidratação ou retração química	Retração restringida	Retração irreversível
	Retração autógena		
	Retração por carbonatação		
	Retração térmica		

2.4 Ocorrência simultânea dos diferentes tipos de retração

Certamente alguns tipos de retração acontecem simultaneamente durante a vida útil de um compósito à base de cimento. Na **Tabela 2.2**, de cunho didático, procurou-se fazer uma análise qualitativa da retração total, apontando diversos fenômenos que ocorrem no compósito à base de cimento separadamente, para mostrar os casos possíveis de ocorrência simultânea, assinalados com um "X"; para os demais símbolos apresentados na tabela são feitos comentários específicos. Alguns casos dependem de variáveis como a idade do compósito de cimento e a posição de um determinado ponto na massa de concreto considerada, em relação à face externa do elemento estrutural, por exemplo. Por esta razão, determinados espaços da tabela deixaram de ser preenchidos. Como simplificação, a classificação da retração quanto à permanência do fenômeno não

entrou na análise proposta, uma vez que, num dado momento, apenas parte da retração é reversível e parte é irreversível.

Símbolos da **Tabela 2.2** e respectivos comentários :

Δ - mesmo estando em contato com uma superfície porosa, a retração ocorre livremente no estado plástico, por causa da mobilidade das partes sólidas dentro da massa de materiais que compõem a mistura fresca antes do início de pega do cimento. Um certo grau de restrição pode acontecer, no entanto, como já comentado, por causa da presença do agregado na argamassa e no concreto. Considerando-se exclusivamente restrições externas, somente a partir da pega do cimento a retração pode ser considerada restringida, em decorrência da resistência mecânica da pasta de cimento, que aumenta com o tempo, e da aderência na interface *pasta de cimento/base*. Exemplos: argamassa de revestimento/bloco de alvenaria, concreto/armadura, piso de concreto/base.

○ - a carbonatação ocorre do exterior para o interior da pasta de cimento e depende, entre outras condições, da umidade interna da pasta de cimento. A difusão do CO₂ é lenta na água e, por isso, quando os capilares da pasta estão saturados, a carbonatação também é lenta. Desta forma, pode-se afirmar que a retração por perda de água antecede a retração por carbonatação até um certo nível de umidade interna nos capilares da pasta abaixo da saturação, a partir do qual os dois tipos de fenômeno podem ocorrer simultaneamente, dependendo do ponto considerado em relação à superfície externa do compósito.

□ - a carbonatação ocorre à medida que o grau de hidratação da pasta aumenta, disponibilizando hidratos para a reação com o dióxido de carbono do ar. Por isso, pode-se dizer que a retração por carbonatação "segue" a retração química.

▲ - a concomitância da retração por carbonatação e da retração autógena depende do ponto do compósito considerado. No caso de uma grande massa de concreto, a retração autógena pode ocorrer no interior desta massa e a retração por carbonatação em regiões próximas à superfície.

■ - somente a partir da formação de hidratos há a possibilidade de reação química do CO₂ do ar com compostos da pasta hidratada. Portanto, a retração por

carbonatação ocorre posteriormente à retração térmica originada pelo calor de hidratação seguido de diminuição de temperatura (equilíbrio com o ambiente).

A retração total, em suma, é um somatório de efeitos, cada um contribuindo com uma parcela maior ou menor. O que se pode depreender dessas considerações é que o fenômeno da retração é bastante complexo, de um lado, mas, de outro, pode ser controlado. Difícil, no entanto, de ser totalmente eliminado.

2.5 Mecanismos de retração de sistemas cimentícios

As propriedades da pasta de cimento estão intimamente ligadas à interação de sua superfície sólida com a água. Neste item apresentam-se os mecanismos de retração propostos na literatura, através dos quais explica-se fisicamente o fenômeno pela perda de água. Estes mecanismos estão relacionados com a situação da água na pasta, isto é, se água capilar, adsorvida ou interlamelar. São eles (BAROGHEL-BOUNY, 1994; BARON, 1982; BUIL, 1979; FERRARIS, 1986; HUA, 1995; POWERS, 1968a):

- mecanismo de *depressão capilar*, equilibrada por compressão da fase sólida da pasta;
- mecanismo de *variação da pressão de desligamento*, variação esta exercida pela perda de moléculas de água que mantinham afastadas umas das outras as superfícies sólidas do C-S-H;
- mecanismo de *variação de tensão superficial*, causada por variações de umidade da pasta endurecida, estrutura fortemente porosa e de elevada área específica.

2.5.1 Mecanismo de depressão capilar

Este mecanismo foi proposto por Freyssinet, com base nas equações de Kelvin e de Laplace (BAROGHEL-BOUNY, 1994):

<p>Lei de Kelvin: $\Delta P = (RT\rho/M) \ln h$</p> <p>$\Delta P$ - diferença de pressão água/ar R - constante geral dos gases perfeitos T - temperatura ρ - densidade da água M - massa de um mol de água h - umidade relativa</p>	<p>Lei de Laplace: $\Delta P = \sigma (1/r + 1/R)$</p> <p>$\Delta P$ - diferença de pressão água/ar σ - tensão superficial na água r - raio de curvatura do menisco R - raio de curvatura do capilar</p> <p>$\Delta P = 2\sigma/r$, para $r = R$. r e R são chamados <i>raios de curvatura principais</i></p>
---	--

A *pressão de vapor saturante*, a 100% de umidade relativa do ar, é a pressão onde há equilíbrio entre a água líquida do capilar e o vapor de água. Nas primeiras idades, quando ainda muito úmida, a pasta de cimento perde água por secagem, devido ao desequilíbrio com a umidade ambiente a que está exposta, normalmente abaixo de 100%. Esta evaporação dá origem a capilares onde existe o equilíbrio com a umidade ambiente. Nas argamassas de revestimento os capilares se formam logo após a adesão da mesma a uma base, e neles a perda de água se dá por sucção, enquanto esta ação durar, e por evaporação, até haver equilíbrio com a umidade ambiente.

A água condensada no interior de um capilar da estrutura porosa da pasta, admitido em forma de tubo com raio R , forma um menisco com um determinado raio r de curvatura (**Figura 2.6**). Com a secagem progressiva da pasta, há uma diminuição do raio dos meniscos até a umidade de equilíbrio e estabelece-se, ao mesmo tempo, uma diferença de pressão entre a fase líquida e a fase gasosa do capilar, chamada *depressão capilar*⁴, que é equilibrada por uma contração da fase sólida do sistema, manifestada pela retração da pasta.

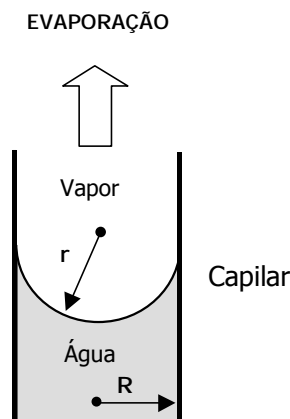


Figura 2.6 – Saída de água de uma cavidade em forma de tubo capilar da estrutura da pasta de cimento, com formação de menisco de raio “r”.

Quanto mais baixa a umidade relativa, menor a dimensão do poro capilar onde o menisco pode existir. No estado de equilíbrio, a uma determinada umidade relativa, existe um raio de poro de dimensão r limite, que divide todos os outros poros quanto ao

⁴ **Depressão** – pressão negativa ou tensão na fase líquida da estrutura interna da pasta de cimento (HUA, 1995).

preenchimento com água da seguinte forma: os de raio menor do que r estão cheios de água e os de raio maior do que r estão vazios. À medida que a pasta de cimento perde água, os poros vão-se esvaziando sucessivamente, dos de maior diâmetro para os de menor diâmetro e, assim, a retração dá-se de forma progressiva.

Este mecanismo é freqüentemente apresentado na literatura e de fácil compreensão do ponto de vista mecânico. A principal crítica ao modelo é feita ao fato de que as leis de Laplace e de Kelvin são leis macroscópicas e o fenômeno de retração se passa também em escala microscópica (HUA, 1995).

HUA (1995) estabelece como fronteira o raio de curvatura de 50 Å do menisco, acima do qual a retração pode ser avaliada a partir das leis de Laplace e Kelvin. Isto corresponde, segundo o mesmo autor, a umidades relativas elevadas, acima de 80% no interior da pasta, para as quais este mecanismo é válido. Pode-se interpretar estas afirmações como uma limitação a ser considerada na adoção do mecanismo de depressão capilar como explicação para o fenômeno de retração da pasta de cimento. Em outras palavras, a explicação da retração por este mecanismo pode ser aceita para a perda de água da mistura da pasta nas primeiras idades ou em situações de umidade relativa ambiente elevada, existente em períodos de chuva intensa.

O diâmetro dos capilares diminui ao longo do endurecimento da pasta, porque a hidratação prossegue e os produtos formados preenchem os vazios, conferindo compacidade à estrutura. Nesta etapa, a ação capilar já não tem a mesma influência sobre a retração em relação à contribuição no estado fresco.

Com base em dados experimentais, de medida simultânea de pressão capilar e retração plástica em corpos-de-prova de concreto fresco de diferentes relações água/cimento, WITTMANN (1976) apresenta como pontos importantes deste mecanismo, o seguinte:

- a pressão capilar aumenta com o tempo. Entre duas e três horas após a moldagem dos corpos-de-prova a taxa de aumento de pressão é elevada;
- no período entre três a quatro horas é atingido um valor máximo de pressão capilar ("break-through pressure" ou *pressão crítica*) e uma queda repentina é observada

logo em seguida. Deve-se isto ao fato de que após a pressão máxima ter sido atingida, a água que resta no sistema não é capaz de preencher todos os seus vazios, permanecendo em pequenos capilares ou formando uma película na zona de contato entre duas partículas. Desta forma, não forma mais uma fase contínua (**Figura 2.7**).

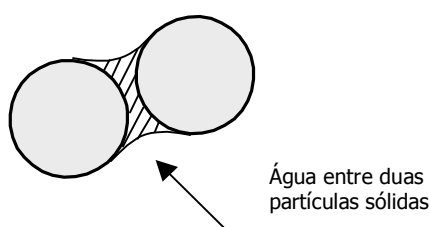


Figura 2.7 – Água capilar remanescente entre duas partículas de cimento muito próximas, após algumas horas de secagem de um concreto (WITTMANN, 1976).

- o aumento de retração é proporcional, até certo ponto, ao aumento de pressão capilar. À medida que a hidratação do cimento progride, ocorre a compactação da mistura e a estrutura da pasta vai-se tornando rígida, havendo, então, quebra da proporcionalidade *deformação x pressão capilar*. Para que continuasse a haver esta proporcionalidade seriam necessários maiores valores de pressão capilar;
- é importante a análise não só do valor da pressão crítica (p_c), como também do tempo (t_c) que ela leva para ocorrer. O autor considera que não há mais retração do tipo plástica⁵ para t_c muito alto, já que a pasta adquire resistência com o progresso da hidratação do cimento;
- o valor de p_c diminui com o aumento da relação água/cimento. Para valores baixos de a/c , as partículas de cimento estão mais próximas, o que resulta em menores raios de curvatura do menisco da água dos capilares à medida que a secagem ocorre em poros de pequeno diâmetro e, portanto, em valores mais elevados de pressão capilar, de acordo com a equação de Laplace. No entanto, decorridas 6 horas após a mistura, alguns produtos de hidratação já estão formados e a distância entre partículas torna-

⁵ O autor utiliza o termo *retração plástica* sem definir exatamente, em termos de tempo, até onde pode ser considerada a sua ocorrência. O termo é adotado, inclusive, para deformações ocorridas no concreto entre 3 a 4 horas após a mistura. O uso mais adequado do termo, apresentado no item 2.3.1, parece ser o que considera a retração plástica como a retração que ocorre antes da pega do cimento, quando a mistura (pasta, argamassa ou concreto) apresenta consistência que corresponde à trabalhabilidade adequada à aplicação em formas, em alvenaria, etc.

se menor novamente. Isto pode explicar porque a elevadas relações a/c (portanto, t_c elevado) o valor da pressão crítica tende a crescer de novo (**Figura 2.8a**). O tempo t_c , decorrido até a pressão crítica, depende da quantidade de água disponível na mistura e, portanto, t_c aumenta com a relação a/c (**Figura 2.8b**);

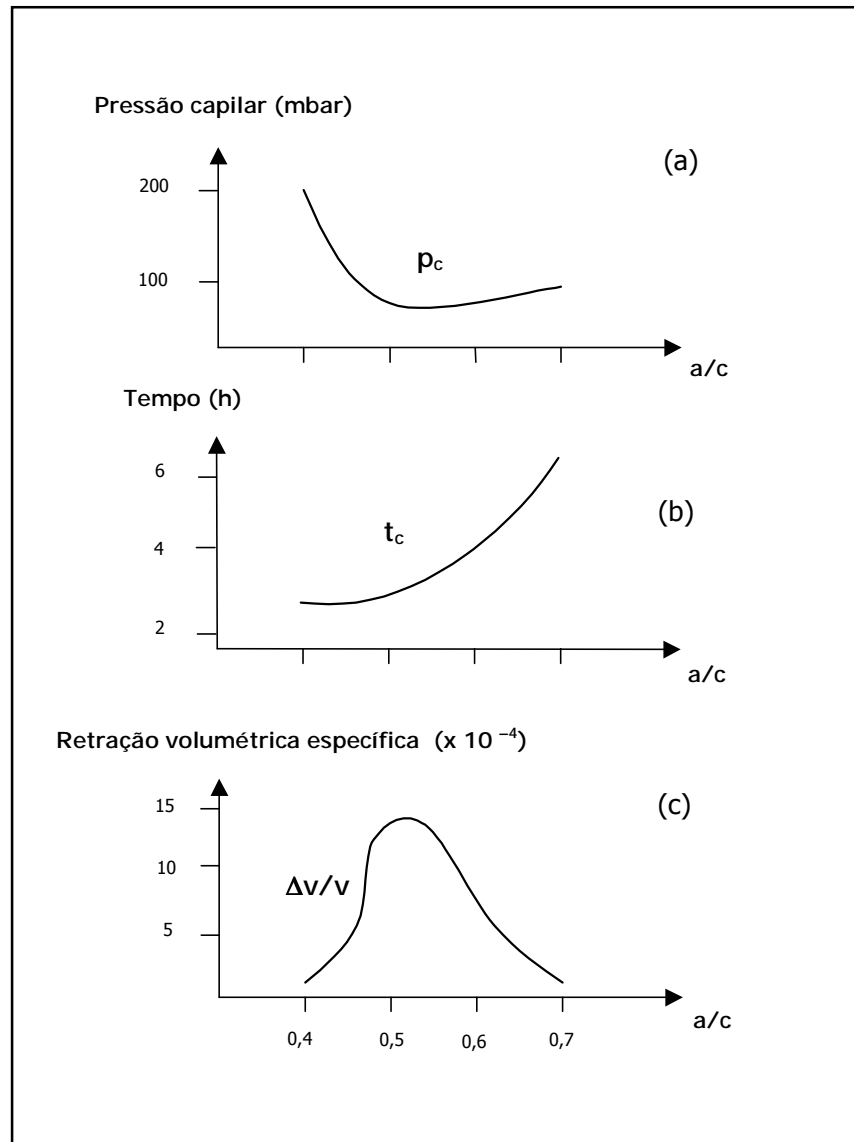


Figura 2.8 – Relações entre pressão capilar crítica (p_c), tempo em que ela ocorre (t_c), retração volumétrica e relação água/cimento do concreto (WITTMANN, 1976). Em (a) encontra-se a unidade de pressão *mbar*, originária do texto da referência bibliográfica citada; $1 \text{ mbar} = 10^5 \text{ Pa}$ (Sistema Internacional).

- a retração plástica aumenta com a relação a/c até um determinado valor de a/c (0,55 nos experimentos de Wittmann). A partir deste valor, o tempo correspondente para ocorrência de p_c aumenta muito rapidamente e, como já mencionado, após períodos

de tempo mais longos decorridos desde a mistura a pasta adquire rigidez, sendo, então, menores as deformações (**Figura 2.8c**).

2.5.2 Mecanismo de variação da pressão de desligamento

Este mecanismo é concernente à água retida entre superfícies sólidas muito próximas, mais próximas do que as admitidas no mecanismo de depressão capilar⁶. Considera a saída da água adsorvida nas paredes das camadas da estrutura do C-S-H da pasta de cimento endurecida.

A resultante de forças entre duas superfícies sólidas, de mesma natureza e hidrófilas, separadas por uma fina camada de água, é, geralmente, repulsiva e chama-se *pressão de desligamento*. A pressão de desligamento e, conseqüentemente, a distância entre as superfícies sólidas, variam com a umidade relativa. Ou seja: a uma determinada temperatura, a espessura da camada de água adsorvida⁷ depende da umidade relativa. Quando o filme de água é extraído por secagem, a pressão de desligamento se anula, havendo uma contração do esqueleto sólido da estrutura onde se passa o fenômeno.

Contrariamente ao conceito de tensão superficial (força mecânica orientada paralelamente à superfície), a pressão de desligamento é uma força perpendicular às lamelas do C-S-H da pasta de cimento endurecida (BAROGHEL-BOUNY, 1994).

O modelo de estrutura da pasta de cimento proposto por FELDMAN; SEREDA (1968, 1970) mostra o movimento de água entre as lamelas do C-S-H e ilustra o mecanismo de variação da pressão de desligamento (**Figura 2.9**).

⁶ POWERS (1968b) estima a distância média entre superfícies sólidas da pasta de cimento como sendo de 15 Å.

⁷ **Adsorção** – fixação das moléculas de uma substância (o adsorvato) na superfície de outra substância (o adsorvente) (FERREIRA, 1999).

Dessorção – processo inverso da adsorção (FERREIRA, 1999).

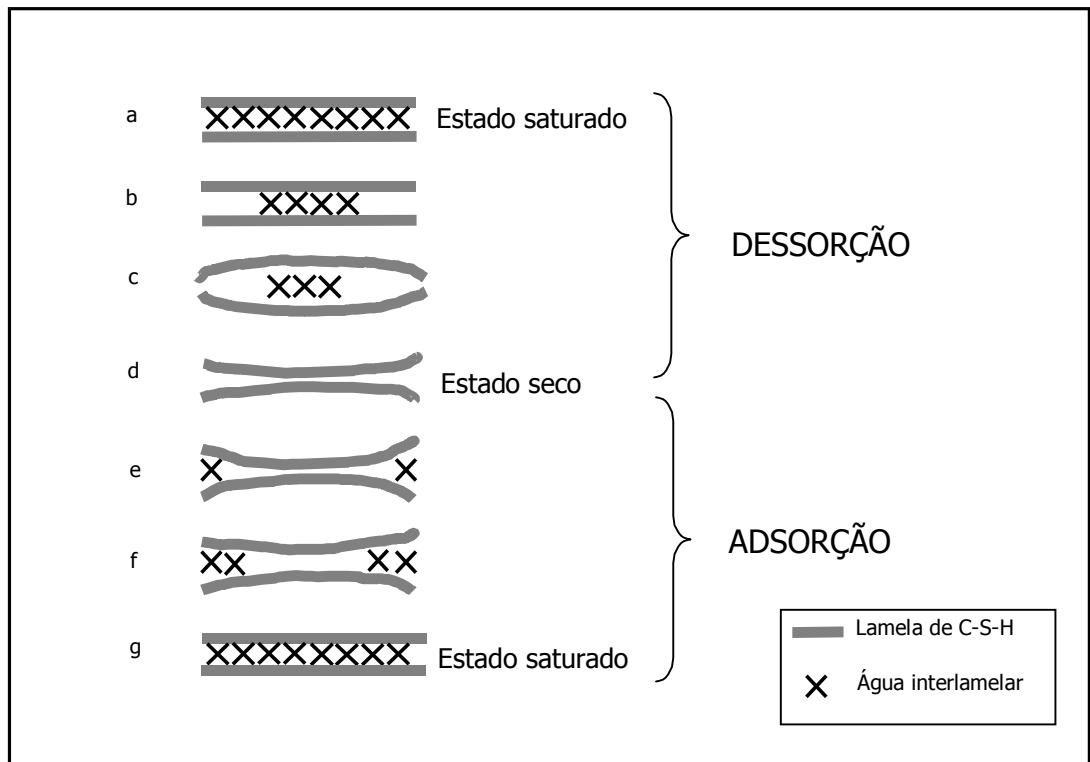


Figura 2.9 – Movimento de entrada e saída de água entre as lamelas do C-S-H no modelo de estrutura da pasta de cimento hidratada proposto por FELDMAN; SEREDA (1968, 1970) – ilustração baseada em FELDMAN; SEREDA (1968).

2.5.3 Mecanismo de variação de tensão superficial

Fisicamente o fenômeno de tensão superficial existe tanto para as superfícies sólidas como para as superfícies líquidas.⁸

A tensão superficial resulta do desequilíbrio das forças de atração a que estão submetidos os átomos ou moléculas nas vizinhanças da superfície. Nesta região produz-se uma pequena variação nas distâncias interatômicas ou intermoleculares, o que induz ao aparecimento de forças tangentes a esta superfície.

Para um determinado material, a tensão superficial depende do ambiente – ela é máxima quando a superfície se encontra no vácuo e se aproxima de zero quando a superfície está em contato com o mesmo material (POWERS, 1968b). Em geral, a

⁸ Energia superficial – trabalho por unidade de área necessário para aumentar a área (SEARS; ZEMANSKY, 1978).

Em líquidos, tensão superficial e energia superficial são numericamente iguais. Em sólidos, estes dois valores têm a mesma ordem de grandeza (WITTMANN, 1976).

adsorção de átomos ou de moléculas por uma superfície sólida provoca uma relaxação da tensão superficial. Ao contrário, a dessorção aumenta a tensão na superfície e o sólido encontra-se em compressão, a qual pode manifestar-se como retração em escala macroscópica (HUA et al., 1995). A pasta de cimento hidratada apresenta uma grande área específica, da ordem de 250 m²/g (POWERS, 1968a), e a interação da água com a superfície desta estrutura fortemente porosa resulta em variações dimensionais. Quando a umidade relativa diminui, a tensão superficial da pasta de cimento endurecida aumenta e a estrutura retrai-se⁹.

De acordo com o *modelo de Munich* descrito por Wittmann (**Figura 2.10**), a retração (ou a expansão) ocorre devido à variação de tensão superficial para umidades relativas abaixo de 40% e por causa de variação de pressão de desligamento para umidades acima deste valor (FERRARIS; WITTMANN, 1987; WITTMANN, 1985). Acima de 80% de umidade relativa, a quantidade de água presente na pasta praticamente preenche os capilares e prevalece o mecanismo de depressão capilar.

⁹ BANGHAM (1937) apud WITTMANN (1976); BAROGHEL-BOUNY (1994) mostraram haver uma relação entre a variação dimensional linear e a energia superficial em sistemas coloidais e sua equação é freqüentemente mencionada na literatura que aborda mecanismos de variação dimensional de pastas de cimento. WITTMANN (1976) mostrou experimentalmente a validade desta expressão para umidades relativas até 42%. Acima deste valor, segundo o autor, predomina o efeito da pressão de desligamento sobre a variação dimensional.

Equação de Bangham : $\Delta l/l = \lambda (\gamma_0 - \gamma)$

$\Delta l/l$ - expansão linear produzida pela adsorção de água na interface sólido/água.

λ - constante dependente do material e de sua estrutura.

γ_0 - energia superficial da interface sem água adsorvida.

γ - energia superficial da interface com água adsorvida.

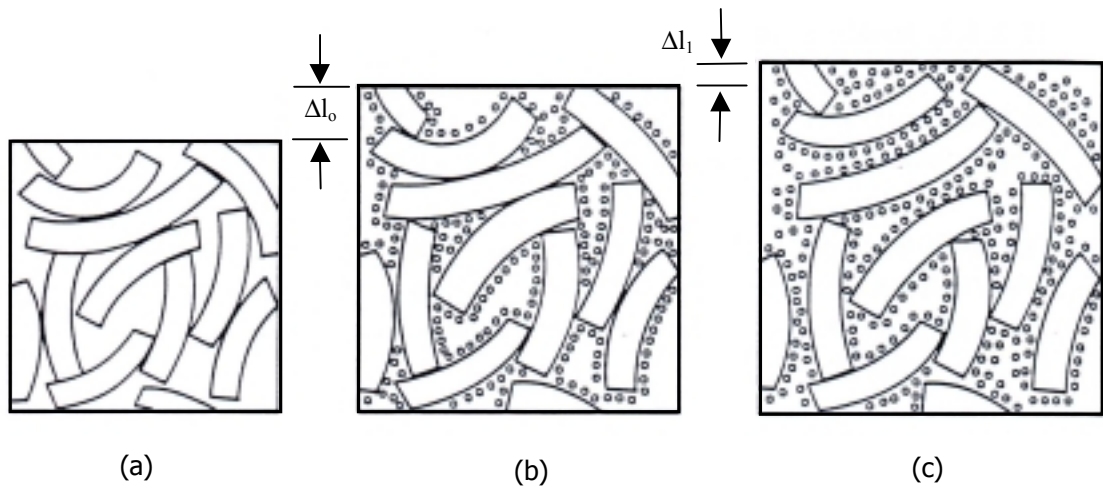


Figura 2.10 – Representação esquemática do Modelo de Munich de três diferentes estágios da estrutura interna da pasta de cimento endurecida. Em (a) a pasta encontra-se no estado seco, onde todas as partículas estão sob compressão por tensão superficial. Em (b) a tensão superficial é reduzida pela adsorção de moléculas de água e o sistema tem expansão igual a Δl_0 . A uma umidade relativa elevada (c), uma expansão adicional Δl_1 é causada por pressão de desligamento e alguns pontos de ligação entre as partículas sólidas são afastados (WITTMANN, 1985).

3. O FENÔMENO DA RETRAÇÃO EM ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Nas argamassas de revestimento, além de estar presente o fenômeno de retração próprio dos materiais cimentícios, ocorre também a influência da perda de água não só por evaporação, mas também por sucção pela base. Por esta razão, o estudo da retração torna-se mais complexo, exigindo uma sistematização que considere fatores intrínsecos e extrínsecos ligados ao desempenho do revestimento e da construção como um todo.

3.1 Fatores extrínsecos e intrínsecos que afetam o desempenho do revestimento

Chama-se de *fator extrínseco* aquele que interage externamente com a argamassa, influenciando o seu desempenho. Fator intrínseco é aquele que diz respeito a características e propriedades próprias da argamassa^{10,11}.

Dentre os *fatores extrínsecos* que podem influenciar a retração dos revestimentos cabe destacar, no âmbito desta pesquisa, aqueles que afetam diretamente a troca de água da argamassa com o ambiente, por evaporação, e que constam na relação de fatores de deterioração desfavoráveis para o desempenho de uma edificação como um todo, da norma ASTM E632-78 – *Standard recommended practice for developing short-term accelerated tests for prediction of the service life of building components and materials* (ASTM,1980 apud CINCOTTO et al., 1995)¹². São eles os agentes atmosféricos: radiação solar, temperatura, água de chuva ou água presente em

¹⁰ Fator **extrínseco** e fator **intrínseco**: termos comumente encontrados na literatura. CULLEN; SNECK (1980), por exemplo, usam esta nomenclatura comentando a realização de colóquio RILEM/ASTM/CIB sobre a avaliação do desempenho de superfícies externas da fachadas de edifícios.

RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions

ASTM - American Society for Testing and Materials

CIB - Comité International du Béton

¹¹ Consideram-se **características** do material o conjunto de atributos próprios (sua composição, por exemplo). Consideram-se **propriedades** os atributos que definem um nível de qualidade para um determinado emprego (CINCOTTO et al., 1995). Exemplo de propriedade é a resistência à tração.

¹² Norma revisada, atual ASTM E632-82 (1996) - *Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials* (fonte: www.astm.org).

vapor no ar, e vento. Além destes, outro fator extrínseco é o substrato onde é aplicado o revestimento que, por sua porosidade, absorve água da argamassa interferindo na intensidade da retração.

Os *fatores intrínsecos* são a composição da mistura - agregados (teor na mistura, composição granulométrica, formato e natureza dos grãos) e pasta (tipos de aglomerante e relação água/aglomerante) - e a espessura da camada de argamassa.

Os fatores de diferentes naturezas mencionados afetam também o desenvolvimento de propriedades mecânicas do revestimento. Como resultado da absorção de água da argamassa pelo substrato, por exemplo, altera-se a cinética das reações químicas dos aglomerantes e, conseqüentemente, propriedades como a resistência à tração e o módulo de deformação.

A **Figura 3.1** ilustra o que foi comentado neste item e, em seguida, aborda-se a forma como alguns desses fatores influencia o desempenho da argamassa quanto à perda de água, retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas.

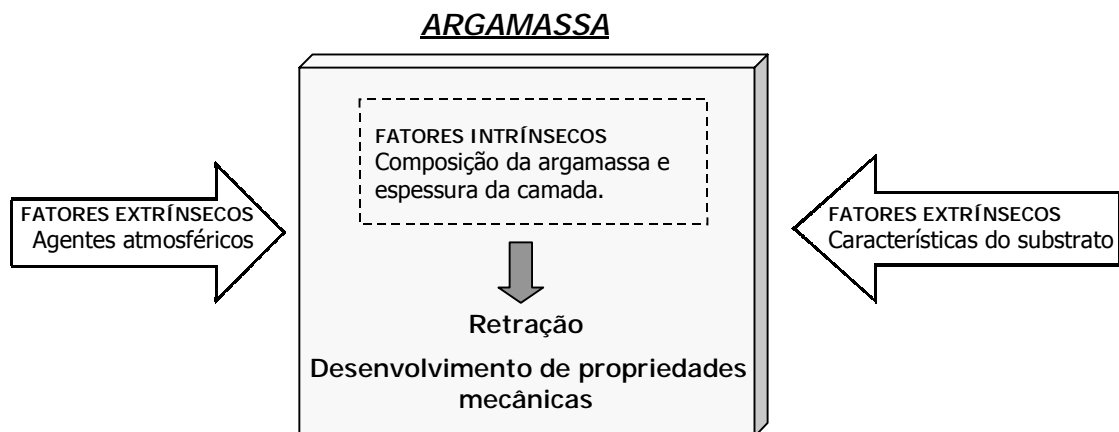


Figura 3.1 - Influência de fatores extrínsecos e intrínsecos sobre a retração e o desenvolvimento de propriedades mecânicas da argamassa de revestimento de camada única.

3.2 Perda de água da argamassa

Sabendo-se que a retração e o desempenho mecânico da argamassa estão intimamente ligados à quantidade de água presente no material fresco e endurecido a cada instante, a discussão sobre a secagem do material assume prioridade didática de abordagem.

A perda de água da argamassa inicia-se logo após a mistura, quando o material é exposto a um ambiente com umidade relativa abaixo de 100% e a água, ao deixar a argamassa por evaporação em condições climáticas normais, o faz através de uma rede de capilares. No estado fresco, o diâmetro médio dos capilares depende da composição da mistura, principalmente da proporção *água/materiais secos* e do teor e finura dos aglomerantes e da areia. A hidratação do cimento e o conseqüente endurecimento da pasta resultam em uma estruturação progressiva interna dos componentes da mistura, com uma rede de vazios entre as partes sólidas, preenchidos ou não pela água. Ao aumento do grau de hidratação da pasta de cimento corresponde uma diminuição do diâmetro médio dos capilares, cujo tamanho depende, para cada composição, da quantidade de água restante a cada instante no material.

A argamassa de revestimento aplicada na fachada dos edifícios sofre de maneira intensa a ação dos agentes climáticos por causa da sua superfície exposta ao ar muito extensa em relação ao seu volume, o mesmo acontecendo com a superfície de contato com o substrato, através da qual ocorre a sucção da água de amassamento. Devido a esta forma de exposição severa, toda avaliação das potencialidades deste tipo de material quanto à variação de massa, retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas deve passar não só pela caracterização do material isoladamente, sem considerar sua interação com outras partes da construção, como também pelo estudo do seu desempenho considerando sua aplicação no substrato e o meio. Segundo as pesquisas realizadas por DÉTRICHÉ (1977, 1978, 1979) e DÉTRICHÉ et al. (1981, 1983, 1984, 1985, 1986), podem ser reunidos da seguinte forma os principais parâmetros a levar em conta nestas duas etapas, alguns já mencionados no item anterior:

- condições de cura;
- composição da argamassa;
- espessura da camada de argamassa;
- relação entre a espessura da camada de argamassa e a espessura do substrato (e_a/e_s);
- características da base ligadas à sua capacidade de sucção de água da argamassa – porosidade e quantidade de água pré-absorvida (pré-umedecimento).

3.2.1 Perda de água por evaporação¹³

Com o intuito de modelar fisicamente o fenômeno da evaporação, o equilíbrio higroscópico de um sólido de porosidade contínua, a uma dada pressão relativa, pode ser caracterizado por um raio “r”. Todos os capilares de raio menor do que “r” estão cheios de água e todos os de raio maior do que “r” estão vazios. O esvaziamento dá-se pelo movimento de ar saturado, induzido pela diferença de pressão existente entre o interior da argamassa e o meio externo.

Influência das condições de cura

As condições de exposição da argamassa nas primeiras horas após a mistura e aplicação são determinantes para a forma como a secagem prosseguirá após este período. Inicialmente, havendo maior quantidade de água livre na argamassa para evaporar-se, a perda de água ocorre mais intensamente em velocidade e quantidade sob condições mais severas. Protegendo-se a argamassa da evaporação por um certo tempo, até que esteja endurecida, parte da água de amassamento passa à condição de água combinada devido à formação de compostos hidratados da pasta de cimento e menos água disponível há para a evaporação. Além disso, com a estruturação progressiva da pasta de cimento devida à hidratação, a diminuição dos espaços internos percorridos pela água dificulta sua remoção.

O gráfico da **Figura 3.2** apresenta curvas de secagem de pastas de cimento de 15 mm de espessura. Após diferentes tipos de exposição inicial todos os corpos-de-prova foram submetidos à mesma condição de cura correspondente à da curva nº 4, de 20 °C de temperatura e 60% de umidade relativa. Destaca-se, neste gráfico, que os valores percentuais de perda de água das pastas protegidas contra a evaporação durante um certo período (curvas 3 e 4), não atingiram os valores das pastas expostas a condições iniciais que favoreceram a evaporação (curvas 1 e 2), ou seja, condições iniciais de cura mais severas aumentaram a evaporação nas primeiras idades e a evaporação total a idades avançadas. Cabe ressaltar que o tipo de cura pode ser propício também à

¹³ Expressa-se a perda de água referindo-se, em geral, à relação entre a quantidade de água perdida e a quantidade de água inicial na mistura, em porcentagem, ou à perda de massa do corpo-de-prova em relação à sua massa total inicial

carbonatação dos compostos hidratados de cimento, o que acarreta ganho de massa. Na realidade, nestes casos, curvas de "perda de massa" apresentam o resultado de um somatório de efeitos a partir da idade em que as condições internas dos poros da argamassa favorecem a penetração do CO₂ do ar.

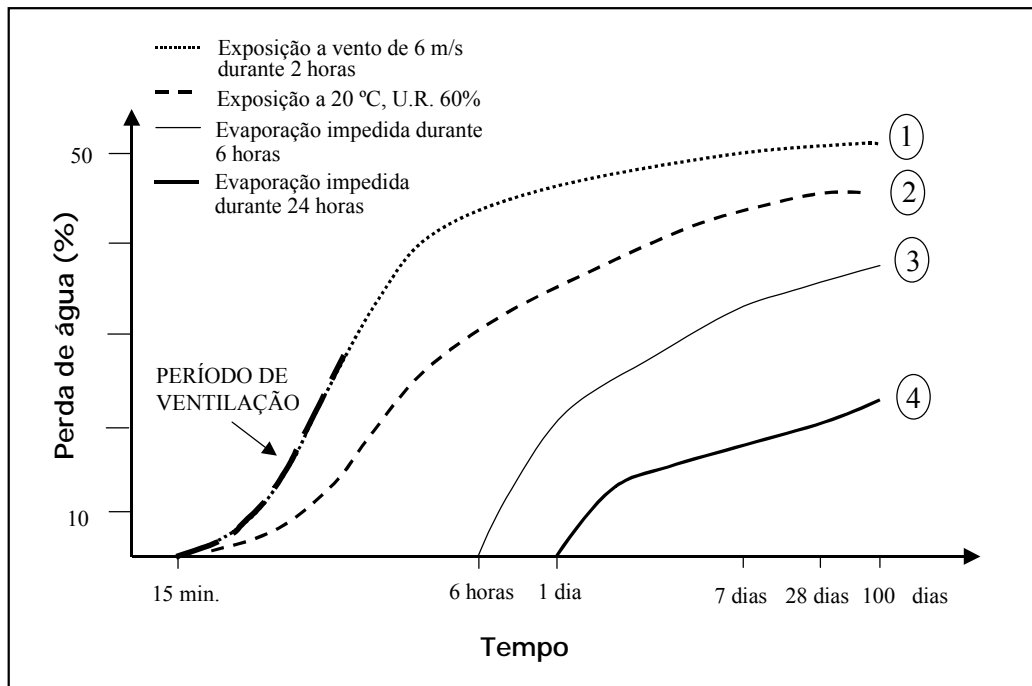


Figura 3.2 – Influência das condições iniciais de cura sobre a perda de água por evaporação de pastas de cimento, relação $a/c = 0,29$ - adaptado de DÉTRICHÉ (1983).

De uma forma geral, em argamassas e pastas sem aditivo retentor de água, sob condições ambientais não rigorosas de cura em laboratório e protegidas da evaporação por 24 horas até a desforma, a maior parte da perda de água por secagem ocorre até o terceiro dia de exposição ao ar livre. KOPSCHITZ et al. (1997) fizeram esta constatação em duas argamassas de cimento, cal e areia, com corpos-de-prova prismáticos de dimensões 25 x 25 x 285 (mm) aplicados sobre base não-porosa, curados numa atmosfera com 50% de umidade relativa e temperatura de 24 °C (**Figura 3.3**).

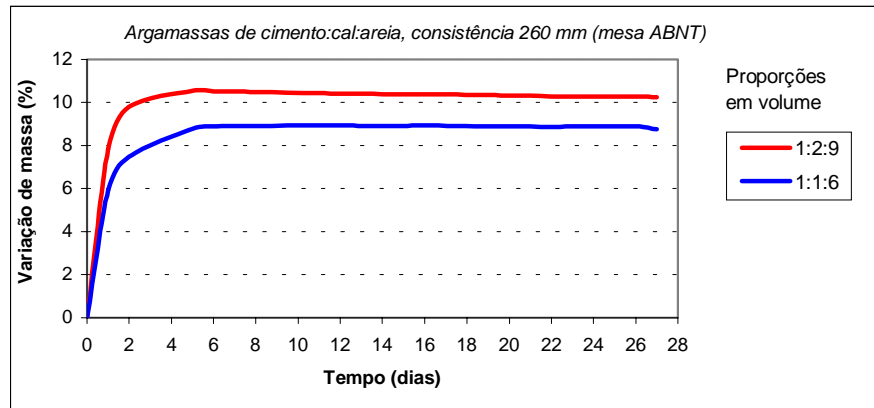
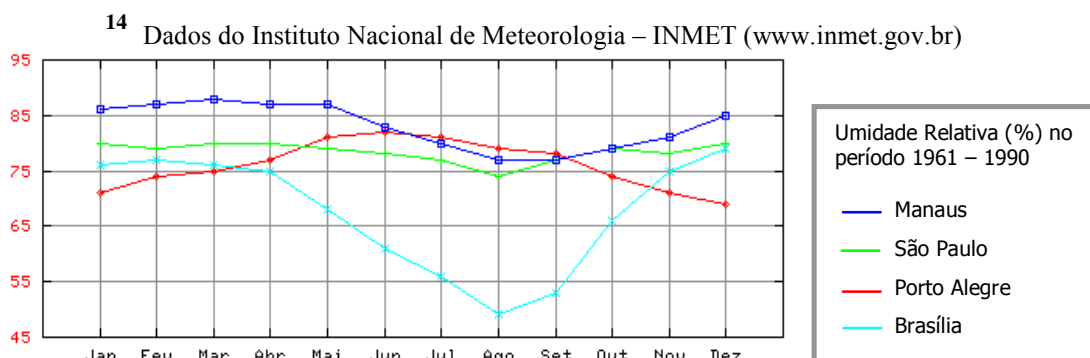


Figura 3.3 – Variação de massa de argamassas mistas – adaptado de KOPSCHITZ et al. (1997). Porcentagem calculada pela relação entre a massa dos corpos-de-prova em determinada idade e a massa logo após a desforma. Os valores positivos no eixo Variação de Massa representam perda de massa.

Vale destacar também a relação existente entre a perda de água e a umidade relativa do ar. Na prática, esta condição ambiental assume importância em países com clima como o do Brasil, onde os valores médios mensais de umidade relativa podem variar entre 50% e 80% numa mesma região¹⁴, de acordo com a época do ano. Sabe-se, ainda, que em determinados dias este valor chega a ser de 20% em algumas cidades do País nas estações mais secas e de 90% em dias de estações úmidas.

L'HERMITE (1962) apresentou esquematicamente, para o concreto, a relação *perda de água x umidade relativa do ar* considerando a possibilidade da água estar presente neste material em três formas diferentes: a) água livre, tendo pouca ou nenhuma influência em variações dimensionais do concreto; b) água ligada fisicamente, cuja remoção está intimamente ligada a estas variações dimensionais; c) água fortemente ligada (água combinada), cuja evaporação se dá somente em condições



excepcionais de tempo e temperatura. No gráfico da **Figura 3.4**, o trecho *AB* representa a remoção de água livre, cuja quantidade depende do volume de grandes vazios da pasta de cimento; *BC* corresponde à saída de água ligada à retração; *CD* equivale à água não-evaporável.

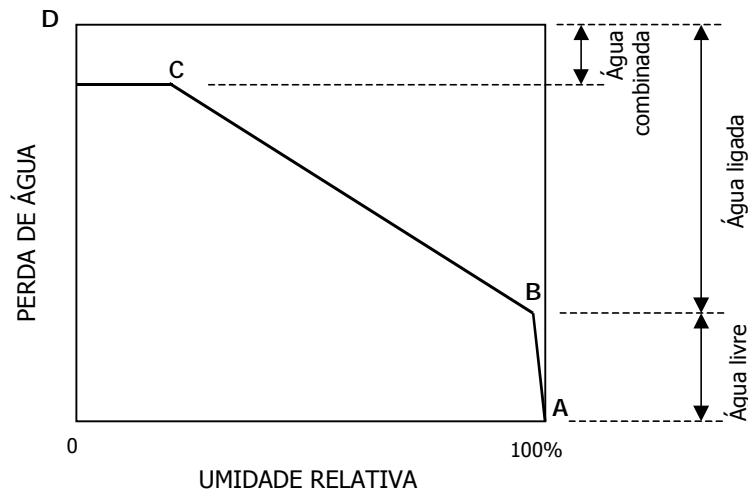


Figura 3.4 – Perda de água em função da umidade relativa (L'HERMITE, 1962).

TAMIN (1986) também estudou a perda de massa de argamassas em condições distintas de umidade relativa do ar, a saber, 20%, 50% e 100%. Neste estudo, para vários tipos de argamassa à base de cimento e de cimento e cal, sujeitas apenas à secagem por evaporação, a perda de massa que ocorreu no segundo dia de exposição dos corpos-de-prova chegou a cerca de 90% da perda aos 28 dias, na cura a 20% U. R.. A 50% U. R., no segundo dia a perda chegou a cerca de 75% e, na atmosfera saturada, praticamente não houve perda de água.

Influência da composição da argamassa

Sabe-se que a presença de partículas finas melhora a retenção de água de misturas como argamassas e pastas. 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 estes dois componentes da mistura, como também diminui os espaços a serem percorridos pela água, dificultando sua remoção. Assim sendo, na comparação de misturas de relação *aglomerante/agregado* diferente, esperam-se curvas cujas posições relativas sejam como as do gráfico da **Figura 3.5**. À medida que diminui o teor de finos, maior é a perda de água por secagem ao longo do tempo.

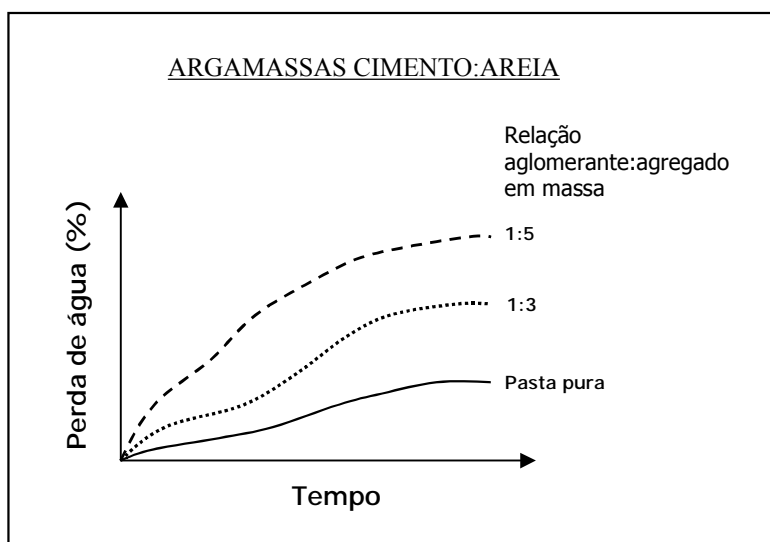


Figura 3.5 – Influência da composição da argamassa na perda de água por evaporação – comparação de misturas de mesma consistência e relação *aglomerante/agregado* diferente (adaptado de DÉTRICHÉ, 1983).

Interferem, portanto, no processo de secagem, características do aglomerante como sua natureza e finura. Aglomerantes de maior finura resultam, pelo mesmo raciocínio feito para o teor de aglomerantes, no aumento da área de contato *água-aglomerante* e na diminuição do diâmetro dos capilares da argamassa e, assim, no estado fresco, a retenção de água é maior. Havendo, ainda, maior reatividade por parte do aglomerante de maior finura, maior quantidade de água combinada significa menor quantidade de água disponível para a evaporação em determinada idade. Quanto à natureza do aglomerante, a cal, de maior finura que o cimento, permite a obtenção de pastas de maior capacidade de retenção inicial de água.¹⁵

Influência da espessura da camada de argamassa

Na prática, é quase impossível evitar que aconteçam variações na espessura do revestimento de argamassa na fachada de um edifício, por maior que seja o esmero na obtenção de verticalidade e planeza na execução da estrutura e da alvenaria. Espessuras diferentes podem também ocorrer de uma obra para outra seguindo especificações de

¹⁵ Cabe ressaltar, não é objetivo deste trabalho abordar aditivos retentores de água e cimentos expansivos que compensam a retração na composição das argamassas.

projeto. Assim, considerando a realidade dos canteiros de obra, deve-se também introduzir o parâmetro *espessura* em pesquisas de laboratório.

DÉTRICHÉ et al. (1983, 1986) constataram que a evaporação aumenta, em velocidade e em intensidade, desde as primeiras horas até idades mais avançadas, com a diminuição da espessura da camada de argamassa (**Figura 3.6**). Como regra geral, as camadas de menor espessura são aquelas que atingem os maiores valores percentuais de perda de água e aquelas que os atingem mais rapidamente. A perda de água de uma camada pouco espessa pode significar, em 24 horas por exemplo, a secagem máxima por evaporação, enquanto outra camada, mais espessa, sofre apenas secagem superficial. No segundo caso, portanto, a secagem prosseguirá por mais tempo.

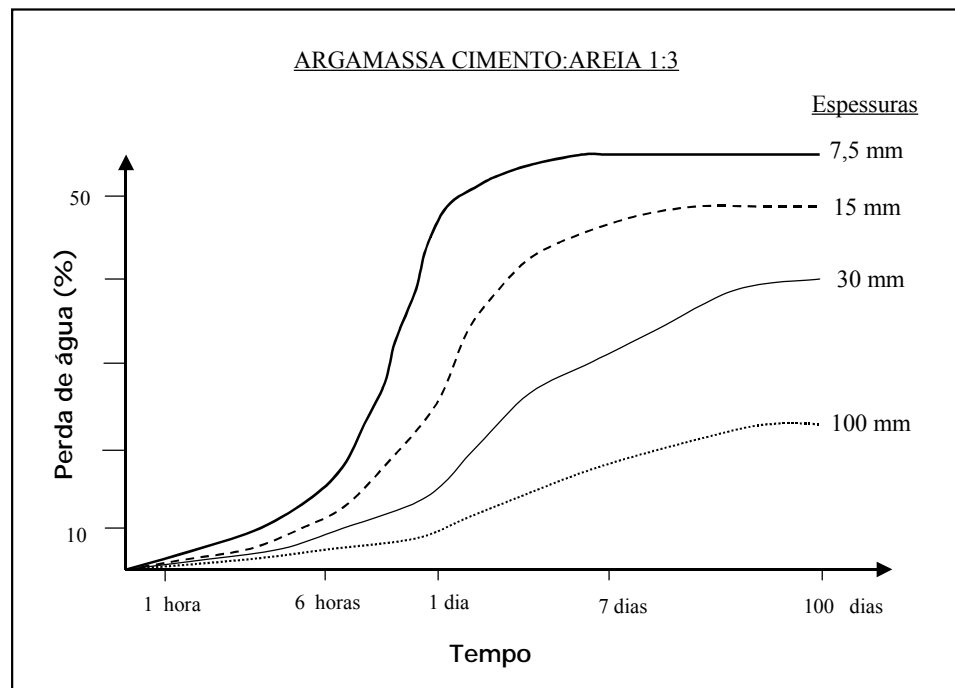


Figura 3.6 – Influência da espessura da camada de argamassa na perda de água por evaporação - adaptado de DÉTRICHÉ (1983).

3.2.2 Perda de água por sucção do substrato

A avaliação da perda de água de argamassas, quando considerado o efeito conjunto da evaporação e da sucção pelo substrato, reproduz a maioria dos casos do revestimento em obra. A capacidade de sucção da base, o maior ou menor poder de retenção de água da argamassa e as condições climáticas são, portanto, fatores a serem analisados conjuntamente em estudo que simula uma situação real de aplicação da argamassa.

Em estudo sobre a aderência de argamassas a bases porosas, CARASEK (1996) apresentou uma discussão consistente sobre sucção de água da argamassa pelo substrato e características dos componentes de alvenaria. Alguns aspectos importantes desta discussão são destacados a seguir:

- o ensaio mais difundido para avaliar-se a sucção de água de blocos de alvenaria é o IRA (*Initial Rate Absorption*)¹⁶. Os valores de taxa inicial de sucção (IRA) variam de acordo com o tipo de substrato. No caso de tijolos cerâmicos, valores frequentes de IRA estão entre 10 e 40 g/30 pol²/min podendo, entretanto, chegar a 160 g/30 pol²/min;
- o IRA é diretamente proporcional ao volume de poros capilares. Blocos diferentes, mas que tenham volumes iguais de poros capilares com o mesmo raio médio, terão o mesmo IRA;
- é de maior interesse a porosidade aberta da base, de diâmetro compreendido entre 0,1 e 20 µm, com capacidade potencial de succionar água das argamassas;
- a interação *poros da argamassa/poros da base* é complexa - poros capilares que contribuem para a sucção de água no ensaio IRA podem não contribuir para remoção de água da argamassa. O IRA, portanto, medido pela imersão parcial de um bloco em água, pode não representar a capacidade de absorção de água do bloco quando em contato com uma argamassa.

Do que foi exposto, depreende-se que o entendimento do desempenho do sistema de revestimento passa, também, pelo levantamento das características da base. Vale comentar que o ensaio de laboratório que caracteriza argamassas no estado fresco quanto à capacidade de retenção de água, submetendo-as à sucção padronizada de um conjunto de pequenos discos de papel-filtro (NBR 9287/86 - *Argamassa de assentamento para alvenaria de bloco de concreto - Determinação da retenção de*

¹⁶ IRA - norma ASTM C-67 - *Standard tests methods of sampling and testing brick and structural clay tile* – ensaio realizado imergindo-se um bloco de alvenaria seco em estufa em uma lâmina de água de 3,2 mm de profundidade durante um minuto. Mede-se a massa de água absorvida para uma área de 30 polegadas quadradas, aproximadamente 194 cm². O IRA é expresso em g/30 pol²/min (CARASEK, 1996).

água) serve apenas para comparar composições diferentes, avaliando-as potencialmente quanto a esta propriedade. Na verdade, trata-se de um ensaio em que a argamassa é sujeita a um tipo de sucção não encontrada em obra.

DÉTRICHÉ; GRANDET; MASO (1983) e DÉTRICHÉ; MASO (1986) descreveram um modelo do conjunto *argamassa-base* em que ambas as partes possuem uma rede de tubos capilares abertos paralelos e perpendiculares à superfície de contato (interface argamassa-base). Através deste modelo os autores tiraram diversas conclusões teóricas, comprovadas experimentalmente. Partiram do princípio de que a base, no momento do contato com a argamassa, está seca e tem o raio médio dos capilares menor do que o raio médio dos capilares da argamassa, então saturados. Nessas condições, a água dos capilares da argamassa vai progressivamente passando para a base, movida por uma pressão motriz resultante da diferença entre a sucção exercida pela base e a retenção da argamassa. Ainda segundo o modelo, a base tem capilares com diâmetro inalterado ao longo do tempo, mas a argamassa, por sua vez, tem o diâmetro médio dos poros reduzido com o tempo, por causa da sucção e da hidratação do cimento. Estes estudos foram realizados com argamassas de cimento e areia aplicadas sobre bases de diferentes capacidades de sucção e duas importantes conclusões podem ser destacadas:

- em cada intervalo de tempo, o volume de água absorvido pela base é função do número de capilares de raio menor do que o raio dos capilares da argamassa. No entanto, este número decresce progressivamente, à medida que os capilares preenchidos com água vão sendo eliminados do fenômeno de sucção;
- bases com poros de diâmetro médio maior têm sucção inicial mais forte do que bases de poros menores. Bases de capilares mais finos apresentaram, seis horas após o contato com a argamassa, uma sucção total maior do que bases de capilares mais grossos.

Os principais efeitos da perda de água na argamassa fresca por sucção são o adensamento mecânico entre as partículas sólidas por depressão capilar¹⁷ e o aumento da concentração de íons dissolvidos que traz uma aceleração na cristalização dos hidratos. Como resultado, ocorre um rápido acréscimo na rigidez da pasta e uma considerável contração de volume da argamassa nas primeiras horas após a aplicação (DÉTRICHÉ; MASO,1986).

3.2.3 Ação conjunta evaporação-sucção

A perda de água por sucção é mais intensa do que a evaporação nas primeiras horas após o contato argamassa-base. A aplicação da argamassa sobre substrato poroso diminui a fração de água perdida por evaporação, mas aumenta a perda de água total devida aos dois fatores em conjunto. Isto quer dizer, em outros termos, que argamassas aplicadas sobre bases não porosas ou pouco porosas são mais sensíveis à ação do meio ambiente quanto à perda de água inicial (DÉTRICHÉ; GRANDET; MASO,1983 e DÉTRICHÉ; MASO, 1986). Nos casos usuais de obra, a absorção capilar da base praticamente se anula entre 2 e 3 horas após a aplicação da argamassa, mas a evaporação continua após este período (DÉTRICHÉ; GALLIAS; GRANDET; MASO, 1985).

3.3 Retração

Os conceitos e alguns resultados de pesquisas apresentados nos itens anteriores sobre perda de água de argamassas e pastas causada por evaporação e sucção do substrato tiveram por finalidade dar subsídios ao entendimento do desempenho do revestimento frente ao fenômeno da retração. Discute-se a seguir este desempenho, notando-se que certos parâmetros de cura, composição e condições de aplicação influenciam a retração de maneira muito próxima à maneira como influenciam a perda

¹⁷ **Capilaridade** - conjunto de fenômenos que se passam quando, num capilar, forma-se uma interface líquido-vapor (FERREIRA, 1986). O termo é usado para descrever os efeitos da elevação de um líquido em um tubo aberto de pequena seção transversal (SEARS; ZEMANSKY, 1978).

Depressão capilar - termo usado quando ocorre, por combinação de determinados fatores, a saída de um líquido de um capilar, como resultante das tensões superficiais sólido-líquido, sólido-vapor e líquido-vapor (SEARS; ZEMANSKY, 1978).

de água das argamassas, uma vez que perda de água e retração estão diretamente relacionadas.

3.3.1 *Relação Retração x Perda de Água*

BARON; SAUTEREY (1982) apresentaram o tema retração de pastas de cimento de forma bastante conclusiva quanto à perda de água. Destaca-se, aqui, a discussão aplicada a casos de "idade constante", em que os corpos-de-prova são secados rapidamente a uma determinada idade, desprezando-se, assim, o avanço das reações de hidratação durante a secagem¹⁸. Por causa da secagem rápida, não é possível considerar a retração em condições de equilíbrio higrotérmico, isto é, considerar que haja, a cada instante, equilíbrio entre a água interna e o vapor de água da atmosfera ambiente. A retração é relacionada, portanto, apenas com a quantidade de água evaporada, isto é, com a perda de massa do corpo-de-prova. Nestas condições, considera-se que a pasta exerce o papel de um material poroso, mas quimicamente inerte e, desta forma, torna-se mais simples relacionar os resultados dos ensaios à sua estrutura interna. O resultado mais marcante, segundo BARON; SAUTEREY (1982), é o de que para todas as pastas de cimento no estado endurecido, quaisquer que sejam a idade e a relação água/cimento, distinguem-se dois estágios sucessivos de retração, designados de *Estágio A* e *Estágio B* (**Figura 3.7**). O Estágio A corresponde à saída de água dos capilares (vazios maiores da pasta) e o Estágio B à saída de água dos poros característicos dos hidratos formados (VERBECK, 1968 apud BARON; SAUTEREY, 1982). Cabe aqui destacar alguns pontos importantes da abordagem da retração feita por esses autores, tomando-se por base o aspecto do gráfico da **Figura 3.7**:

¹⁸ A secagem nestas condições só é possível, comentaram os autores, em corpos-de-prova de pouca espessura, de alguns milímetros.

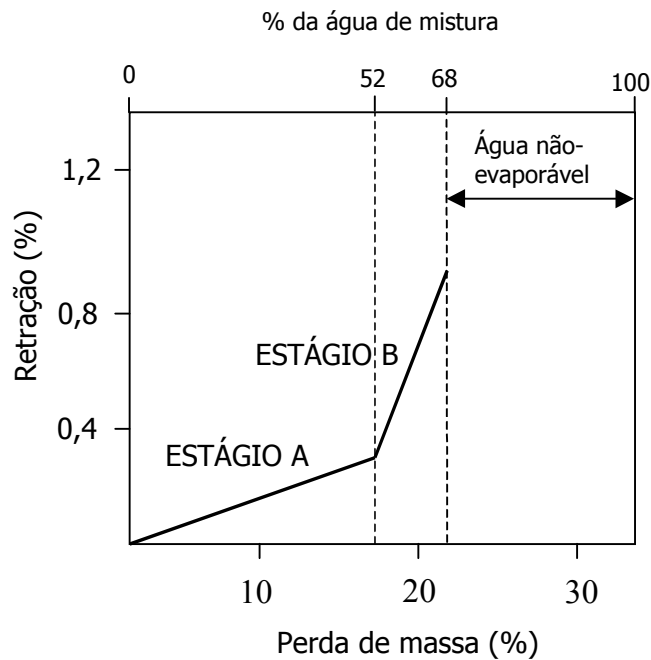


Figura 3.7 – Retração em função da perda de massa – gráfico adaptado de VERBECK (1968) apud BARON; SAUTEREY (1982). Pastas de cimento de 7 dias de idade, relação *água/cimento* = 0,5.

- chama-se taxa de retração T a relação *retração/perda de massa* em um determinado ponto das retas correspondentes aos Estágios A e B, ou a inclinação destas mesmas retas. A taxa de retração T_A é a retração total do Estágio A, dividida pela perda de massa total ao final da retração A. T_A aumenta com a idade da pasta de cimento, por causa da diminuição do raio médio dos capilares, à medida que a hidratação avança. Comparando-se pastas de idade e relação *água/cimento* diferentes constata-se, em linhas gerais, que T_A aumenta com a diminuição dos raios dos capilares;
- a retração A total, ao final do Estágio A, parece aumentar ligeiramente com a relação *a/c* para pastas com idade mais avançada, em torno de 90 dias;
- a taxa de retração T_B (retração total do Estágio B, dividida pela perda de massa total ao final da retração B) é praticamente constante durante toda a secagem do Estágio B e depende muito pouco da idade da pasta e da relação *a/c*. Este fato tem a ver com a estrutura dos hidratos formados, cuja porosidade atinge rapidamente seu valor máximo ($\cong 28\%$), independentemente da idade e da relação *a/c*. T_B é 100 a 200 vezes maior que T_A , sendo que a relação *raio médio dos capilares/raio médio dos poros* também está entre 100 e 200;

- a retração *B* total, ao final do Estágio B, parece depender muito pouco da idade da pasta de cimento; ela aumenta com a relação *a/c*;
- a retração total (Estágio A + Estágio B) aumenta com a idade e, a uma determinada idade, com a relação *a/c* (**Figura 3.8**).

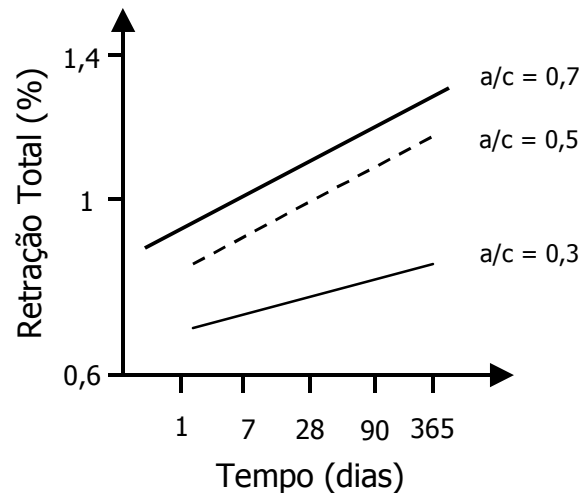


Figura 3.8 – Variação da retração total (Estágio A + Estágio B) em função da idade da pasta de cimento para três valores de *a/c*. A retração aumenta com a idade (curvas crescentes) e com a relação *a/c*.

Com base nos resultados dos ensaios de KOPSCHITZ et al. (1997) apresentados no II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS (1997), foram construídos os gráficos da **Figura 3.9a**, nos quais se observa a estreita relação entre a retração e variação de massa da argamassa de cimento, cal e areia, em experimento que considerou a hidratação e a secagem ao mesmo tempo. Outrossim, é interessante notar, na **Figura 3.9b**, a semelhança do aspecto da curva *retração x variação de massa* em relação ao aspecto da curva da **Figura 3.7**, que mostra dois estágios de retração. Mesmo tratando-se de materiais, formato de corpos-de-prova e condições de equilíbrio diferentes daqueles adotados por BARON; SAUTEREY (1982) apresentadas, a secagem das argamassas mistas também evoluiu segundo dois estágios nitidamente distintos sob o ponto de vista de taxa de retração (inclinação da curva), até 28 dias de idade. Esta constatação permite sugerir, em analogia ao raciocínio de Verbeck, que o desempenho da argamassa quanto a variações dimensionais, nestas condições, altera-se acentuadamente quando a água começa a sair de vazios menores

(capilares ou poros) que uma determinada dimensão. Da mesma forma, foi possível observar o fenômeno em argamassa de cimento e areia, conforme mostra a **Figura 3.9c**.

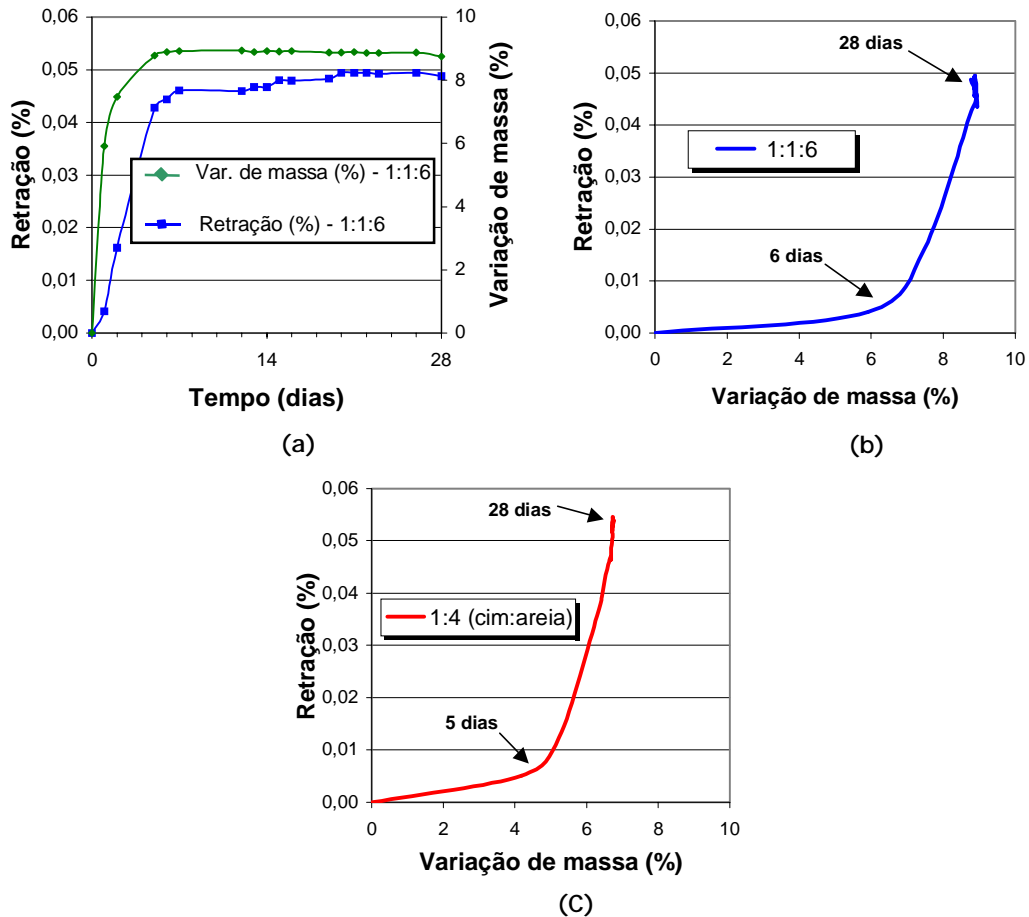


Figura 3.9 – Retração de argamassa de cimento:cal:areia, proporções 1:1:6 em volume, consistência 260 mm (mesa ABNT) - curvas (a) e (b). Retração de argamassa de cimento e areia, proporções 1:3 em volume, consistência 260 mm - curva (C). Ensaio realizado em corpos-de-prova prismáticos de dimensões 25 x 25 x 285 (mm), aplicados sobre base não-porosa, curados em ambiente de temperatura 24 °C e umidade relativa de 50%. As argamassas foram protegidas contra evaporação até 48 horas após a moldagem, quando se deu a desforma e foram realizadas as primeiras medidas de retração e de massa (KOPSCHITZ et al., 1997).

3.3.2 Influência da composição da argamassa

Influência do agregado

A simples presença do agregado na argamassa faz surgir o efeito da restrição da retração, principalmente nas primeiras horas após a mistura. Além disso, o teor de agregado na mistura e a sua composição granulométrica determinam a quantidade de pasta da argamassa, sendo que a pasta é a parte da argamassa potencialmente responsável pela retração. Do ponto de vista da retração, o teor e a composição

granulométrica ideais do agregado são aqueles que permitem a redução da quantidade de pasta, com manutenção de trabalhabilidade adequada ao uso, e níveis de propriedades mecânicas no estado endurecido, que garantam o bom desempenho da argamassa.

Estudos encontrados na literatura (MEHTA; MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997) comprovaram existir influência do tipo de agregado e do seu módulo de deformação sobre os valores de retração do concreto. Mas a interferência destes tipos de relação ultrapassa os objetivos da presente pesquisa, inclusive por ser ainda fortemente predominante no Brasil o uso de um só tipo de agregado nas argamassas mistas de cimento e cal para revestimento, que é a areia quartzosa natural de rio.

Influência do teor de pasta

Em geral, ao aumento do teor de pasta nas argamassas corresponde um acréscimo nas deformações dependentes da umidade. Para um dado consumo de cimento, um aumento da relação água/cimento faz aumentar também a retração por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.3.3 Aspecto típico de curvas de retração de argamassa aplicada em camada única

DÉTRICHÉ (1977, 1983), em duas teses de doutorado, estudou extensa e detalhadamente a retração de argamassas de diferentes proporções cimento: areia aplicadas em camada única, em espessura de 15 mm, fazendo variações no teor de pasta e no consumo de cimento; a tomada das medidas de deformação começou 15 minutos após o início da mistura dos materiais em argamassadeira. Dos seus resultados extraíram-se alguns pontos importantes como subsídio para a interpretação dos resultados de argamassas mistas:

- pode haver, dependendo da composição da argamassa, o acúmulo de uma película de água de exsudação sobre o corpo-de-prova logo após a moldagem. Neste caso, o material se comporta como se estivesse em cura submersa e as deformações registradas no ensaio são devidas somente à hidratação do cimento. Esta condição permanece enquanto o fluxo de água que chega até a superfície do corpo-de-prova for maior do que a taxa de evaporação da água acumulada para o ambiente. O autor

chamou este período de **Primeira Fase** ou **Fase de Inibição**. Vale comentar que a exsudação é menos comum em misturas com cal, devido à sua capacidade de retenção de água;

- após o término da Fase de Inibição, toda água que deixa o material é extraída de seu interior e inicia-se a chamada **Segunda Fase**, na qual é observada uma retração rápida acompanhada de uma perda de massa que se efetua a velocidade praticamente constante. A velocidade de retração, por sua vez, após atingir um valor máximo, tende a diminuir e se anular (**Figura 3.10**) - com o início da pega do cimento a deformabilidade da mistura diminui e, portanto, é normal que, a uma velocidade de perda de massa constante, haja uma queda progressiva da velocidade de retração. A retração atinge, então, um valor máximo denominado **Primeira Retração** (**Figura 3.11**). Por outro lado, ao mesmo tempo, os espaços percorridos pela água diminuem de dimensão com a hidratação, o que faz com que haja a tendência de aumento da retração a uma velocidade de perda de massa constante. Parece haver, então, dois mecanismos que se opõem, prevalecendo, ao final desta etapa, o de aumento de rigidez do material;

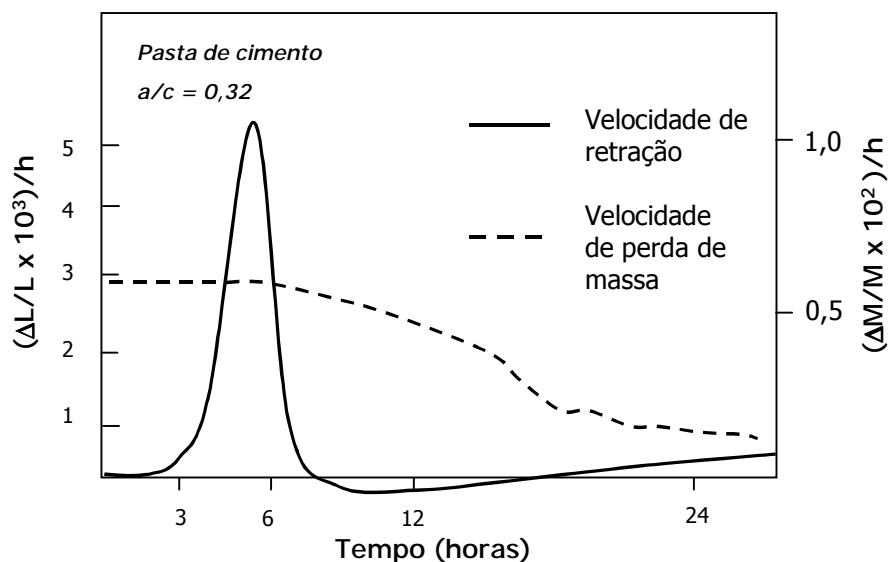


Figura 3.10 – Evolução das velocidades de retração e de perda de massa durante as primeiras 24 horas após a moldagem (DÉTRICHÉ, 1977), de pasta de cimento de relação a/c 0,32.

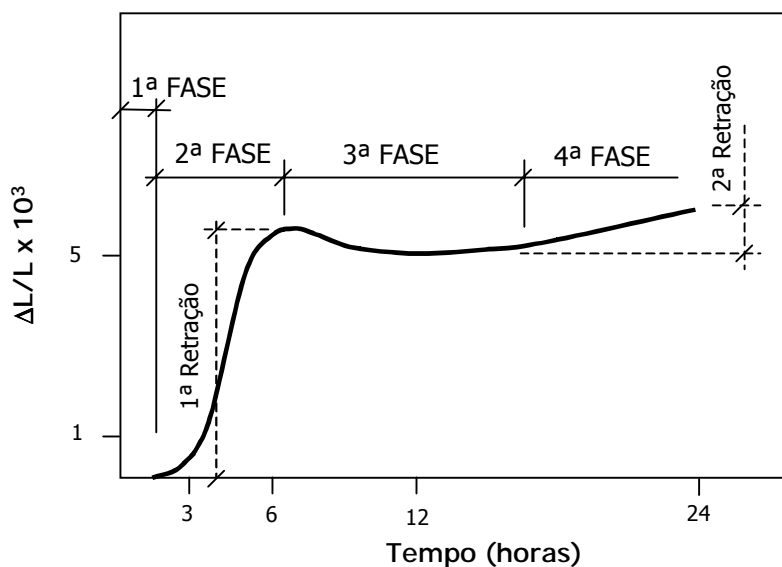


Figura 3.11 – Fases da retração de pasta de cimento (DÉTRICHÉ, 1977).

- o valor máximo da primeira retração tendo sido atingido, o corpo-de-prova apresenta, agora numa **Terceira Fase (Figura 3.11)**, deformação muito pequena durante algumas horas, se comparada com a retração alcançada antes da pega do cimento (Primeira Retração). A deformação nesta fase pode ser de retração ou de aumento de volume do corpo-de-prova, como em muitos casos, dependendo do tipo de cimento e das proporções da mistura. O aumento de rigidez da estrutura da pasta explica a diminuição da retração, mas não explica, no entanto, o fenômeno de expansão do material, de natureza química. Continua a haver dois mecanismos ligados às deformações do material, como ilustra a **Figura 3.12**. Vale dizer que no início das deformações, antes da pega do cimento, já existe o mecanismo de aumento de volume aparente do corpo-de-prova por causa da formação dos hidratos mas, nesta fase, este efeito torna-se desprezível diante da intensidade da retração plástica devida à perda de água por evaporação. O autor ressalta que a expansão não se deve a uma elevação de temperatura ligada ao calor de hidratação do cimento, dadas as condições experimentais do ensaio de retração. Nestas condições, o calor liberado numa camada de pouca espessura dissipa-se muito rapidamente no ambiente. A ocorrência da expansão pode provir, por exemplo, da reação entre a gipsita e o C_3A do cimento, que ocorre desde os primeiros instantes após a mistura do cimento com a água e aumenta progressivamente à medida que ocorre a dissolução da gipsita. A expansão, em resumo, está relacionada com a composição química do cimento e se explica pelas reações de hidratação, tanto no que diz respeito à natureza dos hidratos

formados como à sua formação mais ou menos rápida. Em particular, o aspecto desta fase de deformações é fortemente condicionado pelo teor de gipsita do cimento (TAYLOR, 1997);

- ultrapassada a fase de diminuição da velocidade de retração ou de expansão da argamassa, que pode ser traduzida, enfim, como sendo uma fase de estabilização das deformações, dada a pequena amplitude do fenômeno, a retração volta a prevalecer, mas iniciando uma etapa de menor velocidade. É a **Quarta Fase**, em que ocorre a retração no estado endurecido, ou **Segunda Retração**, de valor final bem menor que a retração ocorrida com o material no estado fresco, mesmo se observada após decorrido um período de tempo mais longo, de 28 dias, por exemplo. Observa-se que a evaporação de água decresce rapidamente, devido não só à diminuição da quantidade de água evaporável, mas também porque a extração da água se dá a partir de uma estrutura que se torna mais densa progressivamente. Esta nova etapa engloba, necessariamente, uma parte de retração capilar por evaporação, mas, frisa o autor, modificações físicas e químicas de outra natureza intervêm também nas deformações. Uma delas é a atração física (força de Van der Waals) entre partes sólidas muito próximas: com a secagem, a intensidade dessas ligações tende a aumentar e, quanto maior a quantidade de produtos formados na hidratação, maior a tendência à contração.

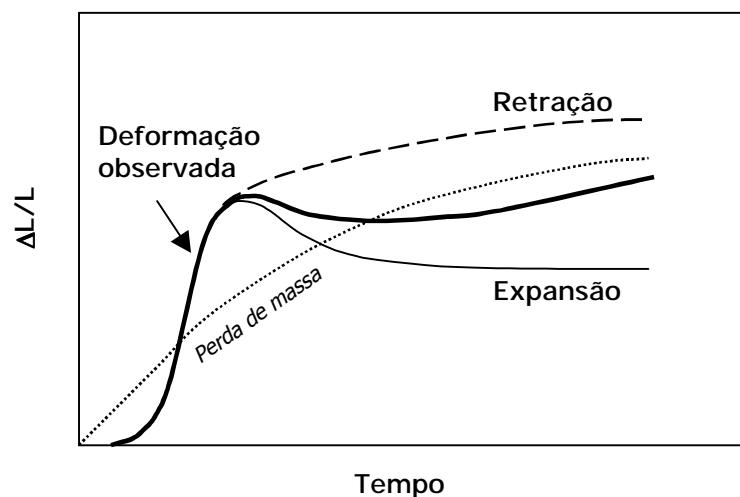


Figura 3.12 – Deformação observada de retração e de expansão (DÉTRICHÉ, 1977).

3.4 Efeitos da retração no revestimento

A retração pode ser restringida, já nas primeiras horas, em corpos-de-prova aplicados sobre base não-porosa, pela simples presença do agregado na argamassa. Havendo somente este tipo de restrição raramente ocorre fissuração, se o atrito com a base for mínimo nas primeiras horas e o corpo-de-prova for liberado do molde tão logo seja possível fazê-lo. No caso de argamassa aplicada sobre blocos cerâmicos e de concreto, por exemplo, como acontece na maioria das fachadas de edifícios, a restrição ou impedimento da retração ocorre principalmente por causa da aderência da argamassa à base. Como consequência da restrição aparecem tensões de tração na argamassa, que podem levar à fissuração do revestimento.

3.4.1 Retração e fissuração do revestimento

Para evitar-se a fissuração e o conseqüente comprometimento do revestimento é preciso que haja uma combinação favorável de fatores, que pode ser traduzida em um único termo, utilizado em tecnologia do concreto: *extensibilidade*.

A explicação geralmente dada a respeito da fissuração é a de que a ruptura ocorre quando as tensões atuantes por causa da restrição da retração ultrapassam a resistência mecânica à tração do compósito cimentício em determinada idade. Para que isto não ocorra, o material terá que possuir uma extensibilidade adequada, ou seja, uma combinação favorável do *módulo de deformação* e da *resistência à tração*. A situação de favorecimento à diminuição do risco de fissuração é aquela em que existe contribuição:

- da deformabilidade do material - evolução lenta do módulo de deformação com o tempo, possibilitando diminuição das tensões de tração;
- da resistência à tração, que deverá ser de valor superior ao das tensões que ocorrem no compósito devidas ao impedimento da retração.

Esta combinação pode ser ainda favorecida pela relaxação das tensões, proveniente, em alguns casos, da microfissuração interna que ocorre no material quando a retração é impedida nas primeiras idades.

TAMIN (1986) apresentou o conceito de relaxação de tensões para revestimento de argamassa, demonstrando que o cálculo teórico de tensões sem levar em conta este fenômeno não corresponde à situação real em que se criam microfissuras por conta da aderência. A importância da relaxação de tensões também é discutida na tecnologia do concreto, como ilustra a **Figura 3.13**.

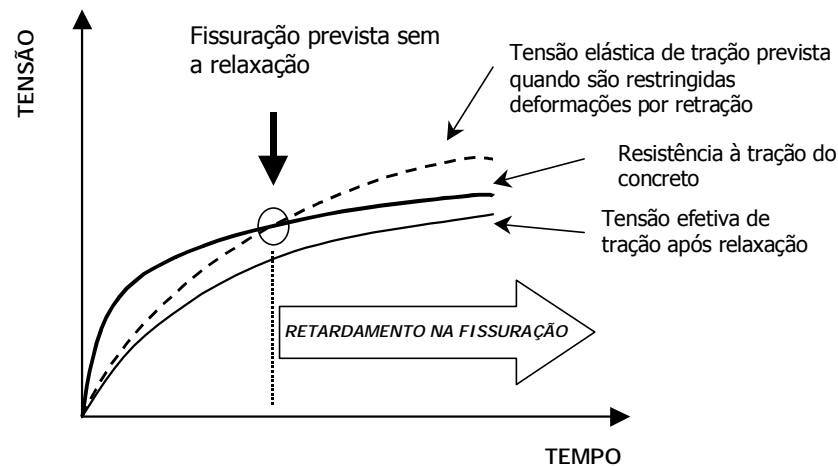


Figura 3.13 – Influência da relaxação de tensões na fissuração do concreto (adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Foi apresentada, nos capítulos 2 e 3, uma revisão da literatura sobre retração em materiais cimentícios, destacando-se conceitos e aspectos que influenciam o desempenho das argamassas de revestimento quanto a este fenômeno, ligados à perda de água, composição da mistura, espessura da camada e condições de cura. Foi também abordada a retração de argamassas cimento/areia no estado fresco, aplicada em camada única, procurando-se dar embasamento aos capítulos que se seguem de metodologia empregada nesta pesquisa, do seu planejamento experimental, e de resultados obtidos com argamassas mistas de cimento, cal e areia.

4 . METODOLOGIA

4.1 Introdução

Inúmeros são os métodos de ensaio desenvolvidos para o estudo da retração em laboratório, alguns, inclusive, normalizados. Muitos acompanham a evolução do fenômeno volumetricamente, mas a maioria mede linearmente a retração. Desconsiderados os efeitos térmicos, levam em conta que, na prática, a origem das principais variações dimensionais dos compósitos à base de cimento está na troca de água com o meio e na hidratação do cimento, podendo serem assim distinguidos:

a) experimentos que estudam as duas variáveis separadamente:

- aqueles que consideram apenas a *secagem* são feitos de forma que ela ocorra rapidamente, podendo-se assim desprezar as reações de hidratação;
- aqueles que consideram somente os *efeitos da hidratação* são realizados em corpos-de-prova protegidos contra a perda de água para o meio externo, através da aplicação de uma membrana impermeável ou lâmina de papel- alumínio;

b) experimentos que fazem uma análise global do material, isto é, integram as duas variáveis.

A intensidade dos efeitos da secagem, da hidratação e da interação de ambos depende da fase em que se encontra o endurecimento do compósito cimentício. Por isso, dá-se ênfase ao fenômeno cujo efeito seja o mais importante em cada fase, no tempo, de acordo com o enfoque de cada pesquisa. Por exemplo: a observação da perda de água por evaporação em camadas de argamassa de pouca espessura é mais importante nas primeiras horas após o lançamento no molde.

As pesquisas realizadas sobre retração em argamassas de revestimento no Brasil apresentam, em sua maioria, experimentos que utilizam corpos-de-prova em forma de pequenas barras prismáticas, de dimensões (25 x 25 x 285) mm, aplicadas sobre substrato não-poroso, sujeitas apenas à perda de água por evaporação. Neste tipo de ensaio só é possível medir valores de retração a partir do estado endurecido da

argamassa, após a desforma dos corpos-de-prova, horas depois da moldagem. As observações assim feitas quanto à retração servem apenas para avaliar-se potencialmente o desempenho da argamassa isoladamente. Como já foi exposto em itens precedentes deste trabalho, as solicitações na argamassa aplicada sobre uma base absorvente são completamente diferentes das que se dão em um corpo-de-prova no qual a retração é livre. Portanto, conclusões baseadas em estudos de retração livre são limitadas, se confrontadas com as condições da maioria dos casos em obra.

Outra limitação dos ensaios de retração livre em pequenas barras é o fato de que as medidas de retração não são, geralmente, feitas de forma contínua e em curtos intervalos de tempo, minutos, por exemplo. Costuma-se fazer uma ou duas leituras por dia, o que é razoável apenas para idades acima de três dias após a desforma, dependendo da estabilização da perda de massa e da retração. Nas primeiras horas e nos primeiros dias, no entanto, quando a perda de água é mais intensa e a retração evolui mais rapidamente, o procedimento de leituras nas barras é pouco produtivo para intervalos de tempo menores, o que dificulta trabalhar com um número maior de corpos-de-prova.

Quanto à pesquisa sobre propriedades mecânicas, a realidade não é diferente: o formato dos corpos-de-prova não condiz com a realidade do revestimento em obra, e as condições de aplicação não levam em conta a influência da base quanto à perda de água por sucção e aderência. Exemplo disso são os corpos-de-prova cilíndricos, muito utilizados em ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação.

A **Figura 4.1** apresenta um panorama geral de métodos de ensaio quanto à aplicação ou não sobre substrato absorvente. É mostrada a evolução tecnológica que vai dos ensaios tradicionais aos métodos desenvolvidos nesta pesquisa, passando pelos encontrados nos trabalhos de DÉTRICHÉ et al. (1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985), GRANDET (1975), OUZIT (1990) e TAMIN (1986). O método que emprega grelha metálica + papel-filtro + base absorvente, desenvolvido neste trabalho, pretendeu incluir a influência da base e seu teor de umidade no momento da aplicação da argamassa.

ENSAIOS EM CORPOS-DE-PROVA DE FORMATOS DIVERSOS, NÃO APLICADOS SOBRE BASE POROSA

Retração: realizados geralmente em barras de 25 x 25 x 285 (mm). Medem apenas a retração livre no estado endurecido.

Propriedades mecânicas: corpos-de-prova prismáticos 40 x 40 x 160 (mm) e cilíndricos (h = 10 cm, Ø = 5 cm).



ENSAIOS COM ARGAMASSA EM FORMA DE PLACA APLICADA SOBRE BASE NÃO-POROSA

Retração: corpos-de-prova em forma de placas com a espessura equivalente à do revestimento de parede. É possível medir a retração nos estados fresco e endurecido (DETRICHE, 1977). Não são levados em consideração os efeitos da sucção de água da argamassa pela base.

Propriedades mecânicas: corpos-de-prova em forma de placas com a espessura equivalente à do revestimento de parede. Também não é considerada a influência da base na perda de água da argamassa por sucção.



ENSAIOS COM ARGAMASSA EM FORMA DE PLACA APLICADA SOBRE BASE POROSA

- Com interposição de grelha metálicas entre a argamassa e o fundo de aço do molde : simula a restrição da retração pela aderência da argamassa na grelha, mas não possibilita ainda o efeito da sucção da água da argamassa pela base.

- Com uso de papel-filtro entre a argamassa e a base porosa : permite-se a sucção de água pela base e a vantagem de se recuperar o corpo-de-prova da base para ensaios mecânicos, mas não se consegue a restrição da retração por aderência da argamassa sobre a base.

- Grelha metálica + papel-filtro + fundo poroso : ensaio mais completo. Acoplado-se uma base porosa no fundo do molde obtém-se uma situação do corpo-de-prova muito próxima da realidade do revestimento de parede, com aderência da argamassa na grelha, sucção de água pela base e possibilidade de se recuperar o corpo-de-prova para ensaios mecânicos.

Figura 4.1 - Métodos de ensaio para estudo da retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas de revestimento.

A **Figura 4.2** mostra a barra prismática moldada para ensaios de retração pelo método da ABNT NBR 8490/84 - *Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural - Retração por secagem*.

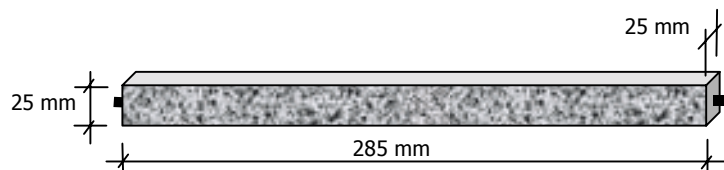


Figura 4.2 - Corpo-de-prova de argamassa usado em medida de retração livre no estado endurecido - barra moldada com pinos metálicos nas extremidades para leitura da retração com relógio comparador (NBR 8490/84 da ABNT).

Na **Figura 4.3** apresentam-se exemplos de moldes para ensaios em corpos-de-prova de argamassa em forma de placa. LEJEUNE (1995) realizou este tipo de ensaio para observar a retração impedida, que corresponde à deformação medida na argamassa logo após a desforma. É tomada a distância entre duas pastilhas metálicas previamente coladas na face livre do corpo-de-prova, 24 horas após a moldagem (**Figura 4.4**). A retração impedida foi medida no trabalho de OUZIT (1990), que também usou o sistema de pastilhas, além de fazer o cálculo da deformação na face restringida da argamassa após a desforma, por meio da medida da flecha apresentada pelo corpo-de-prova devida ao arqueamento.

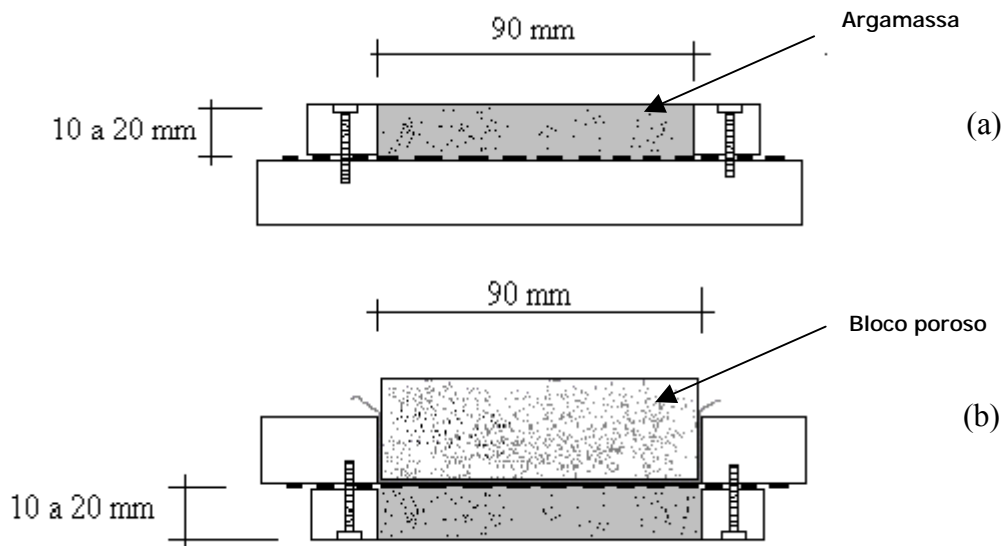


Figura 4.3 - Formas metálicas para moldagem de argamassa em forma de placa de 90 mm x 450 mm – desenho esquemático de corte transversal. a) Sistema com fundo não absorvente e grelha metálica entre e argamassa e o fundo para simulação de aderência e restrição da retração. b) Sistema que permite o contato da argamassa com um material absorvente. O papel-filtro entre a base e a grelha metálica permite a sucção de água e a desmoldagem da argamassa.

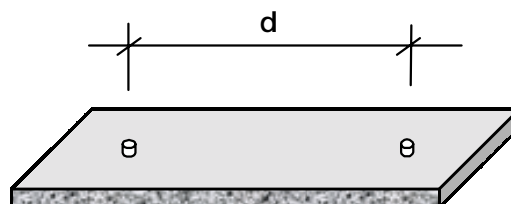


Figura 4.4 - Placa de argamassa para medida da “retração impedida” pela variação da distância "d" entre duas pastilhas metálicas coladas.

Além dos ensaios mencionados na **Figura 4.1**, vale citar também o que mede a força necessária para impedir que uma pequena placa de argamassa se deforme

linearmente por secagem (**Figura 4.5**). Quando os relógios comparadores fixados no equipamento captam uma deformação no corpo-de-prova, é feito um ajuste no seu comprimento por um sistema de parafuso (parte superior do desenho), fazendo-o retornar à dimensão inicial. Com o auxílio de uma célula de carga capta-se a força exercida neste ajuste e, dividindo-se esta força pela área da seção transversal da placa, obtém-se a *tensão de retração*, simulando o que ocorreria na argamassa caso ela estivesse impedida de se retrair por causa da aderência a uma base (LEJEUNE, 1995).

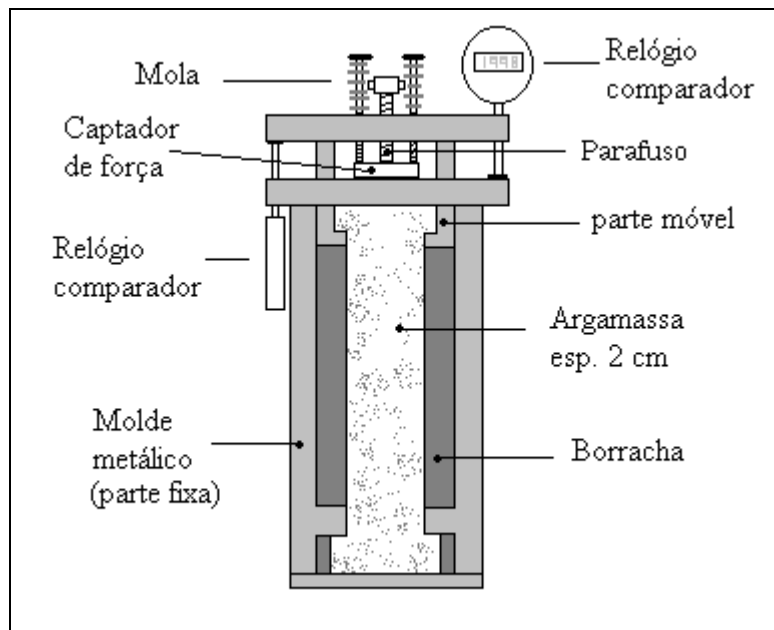


Figura 4.5 - Aparelho de medida de tensão de retração - desenho esquemático (LEJEUNE, 1995).

Há necessidade, portanto, de se evoluir no nosso meio técnico em termos de método de ensaio, procurando adotar um sistema de moldagem que proporcione o formato de pequenas placas de espessuras correspondentes às normalmente encontradas em revestimento de parede, ou seja, 10 a 25 mm, especificadas na norma ABNT NBR 13 749/96 - *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação*. O método adequado deve permitir a medida da retração a partir dos primeiros minutos após a moldagem, com a argamassa no estado fresco, e oferecer também a possibilidade de estudo da retração impedida e da sucção da água da argamassa por uma base porosa. O CSTB - *Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*, instituição francesa de longa experiência em certificação de argamassas de revestimento, adota a prática de reproduzir condições de aplicação próximas daquelas de um revestimento aderente a uma base, não só bloqueando as variações dimensionais,

como também observando o estado de tensões internas do revestimento. Além disso, determinam-se propriedades mecânicas da argamassa após um certo tempo de endurecimento (LEJEUNE, 1995), soltando da base a placa formada.

A seguir são detalhados os métodos de ensaio com os quais se trabalhou na presente pesquisa.

4.2 Panorama geral dos ensaios realizados

Foram estudados quatro casos diferentes de **aplicação da argamassa**, procurando simular situações próximas das condições do revestimento em obra, que forneceram dados sobre a influência isolada ou conjunta dos fatores *absorção da água da argamassa pela base, aderência da argamassa à base, teor de umidade da base e espessura da camada de argamassa* sobre a retração e sobre o desenvolvimento de propriedades mecânicas (**Figura 4.6**).

- CASO I: argamassa aplicada sobre base não absorvente (fundo do molde);
- CASO II: argamassa aplicada sobre base não absorvente, com grelha metálica sobre o fundo do molde para obtenção do efeito de aderência;
- CASO III: argamassa aplicada sobre base porosa (bloco cerâmico), com interposição de uma folha de papel-filtro entre a base e a argamassa para permitir a absorção da água e a recuperação do corpo-de-prova endurecido para ensaio mecânico. Nos ensaios de retração no estado fresco as argamassas foram aplicadas diretamente sobre a base porosa, sem o papel-filtro;
- CASO IV: reunião dos três primeiros, isto é, o conjunto completo bloco/papel-filtro/grelha/argamassa.

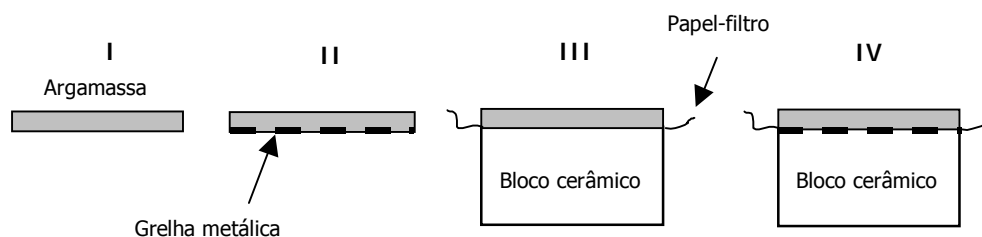


Figura 4.6 - Casos de aplicação de argamassa estudados em ensaios de retração e mecânicos.

TAMIN (1986) aplicou a argamassa diretamente sobre um componente de alvenaria e observou, por microscopia eletrônica de varredura, microfissuração no revestimento. Atribuiu a esta microfissuração menores valores de módulo de deformação e relaxação de tensões no revestimento. Por isso, na presente pesquisa, inicialmente estava programado realizar ensaios mecânicos em corpos-de-prova dos quatro casos de aplicação de argamassa mencionados. Os corpos-de-prova dos casos II e IV teriam sua resistência avaliada após a retirada da grelha, estando a argamassa endurecida, numa condição de aplicação que considera a aderência ao substrato. Após os primeiros resultados, no entanto, não foi detectada diferença significativa em relação aos valores de tensão de ruptura obtidos nos corpos-de-prova dos casos I e III, ou seja, não foi possível avaliar o efeito da aderência sobre as propriedades mecânicas do revestimento utilizando a grelha metálica para restrição da retração. Assim sendo, a avaliação do segundo e quarto casos de aplicação da argamassa foi abandonada para o estudo de propriedades mecânicas, sendo o procedimento do CASO IV adotado apenas para os ensaios de retração impedida.

Dentro de uma faixa de **espessuras** que correspondem à realidade das obras e que poderiam ter sido adotadas para os corpos-de-prova, as de **15 e 25 mm** foram as escolhidas, com base nos seguintes critérios:

- 15 mm: espessura comumente encontrada em especificações de projetos para revestimento de fachadas. Valores inferiores foram descartados para estudo em laboratório, embora seja possível sua execução em obra, por causa de dificuldades relacionadas a perdas em laboratório por quebra de corpos-de-prova muito delgados no manuseio, nas primeiras idades;

- 25 mm: embora um tanto quanto exagerada considerando-se obras executadas com rigor técnico, esta espessura foi adotada com a intenção de se estudar a influência do fator *espessura da camada* de argamassa nos resultados de alguns ensaios.

O **substrato** escolhido para aplicação da argamassa foi o bloco cerâmico vazado, de larga utilização em fechamento de vãos em estruturas de concreto armado, compondo a alvenaria das fachadas dos edifícios. A umidade do substrato foi variada neste tipo de ensaio, pois esta é uma situação muito comum em canteiro de obras, dependendo da estação do ano e de como é estocado o material.

Como grelha metálica para efeito de aderência das argamassas foi usada uma chapa de aço de 1 mm de espessura, perfurada com furos redondos de 5 mm de diâmetro, cujo espaçamento entre si resulta numa área de abertura de 50% (**Figura 4.7**). A chapa foi cortada em diversos tamanhos, de acordo com o ensaio realizado, isto é, de acordo com o tamanho da forma usada na moldagem de corpos-de-prova para ensaios de retração e ensaios de propriedades mecânicas.

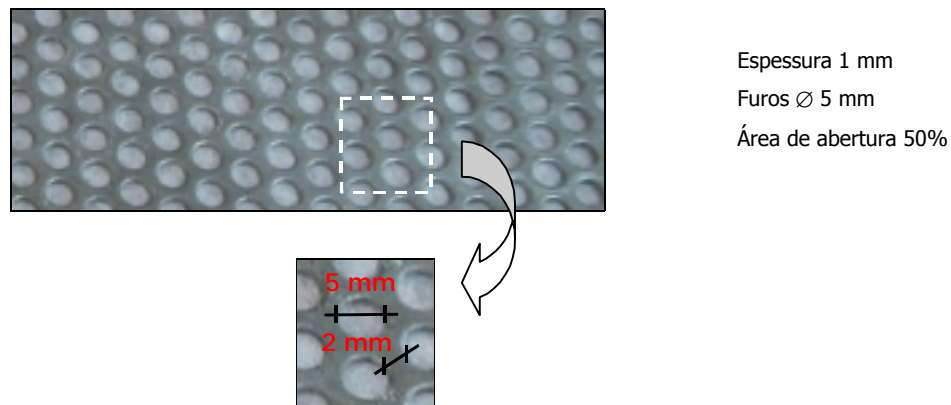


Figura 4.7 – Grelha metálica usada no fundo das formas para obter o efeito de aderência da argamassa à base.

4.3 Ensaios de retração

4.3.1 Retração no estado fresco

Os ensaios em argamassa aplicada sobre base não absorvente foram realizados em moldes de aço inoxidável (superfície de acabamento liso), projetados e construídos no INSA de Toulouse, que permitem a moldagem de corpos-de-prova de 150 mm x 400 mm de base. Cada molde tem duas peças laterais removíveis de 25 mm de altura e duas

extremidades que permitem o controle de seu preenchimento para a fabricação de corpos-de-prova de espessuras variáveis. As partes componentes do molde – fundo, duas laterais e duas extremidades – possuem um sistema de encaixe e de fixação de umas nas outras por meio de parafusos, formando um conjunto firme e estanque para as operações de moldagem (**Figura 4.8**). Os ensaios em argamassa aplicada sobre base porosa foram realizados substituindo-se o fundo de aço do molde por um bloco cerâmico.

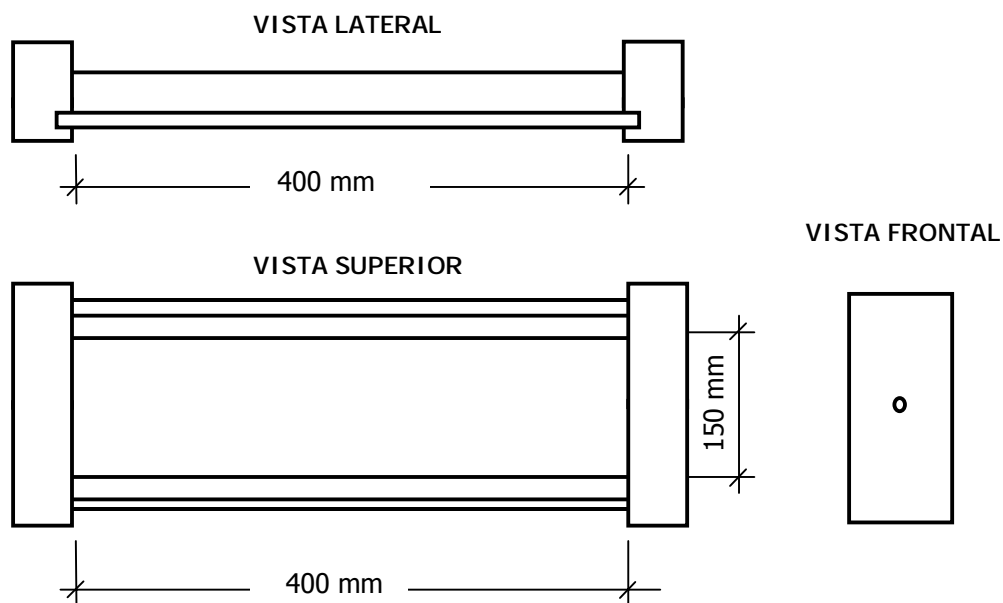


Figura 4.8 – Molde utilizado nos ensaios de retração até 24 horas, constituído de fundo, duas extremidades e duas laterais que são montadas por sistema de encaixe e parafusos - desenho esquemático.

Sistema de medida das deformações da argamassa

Cada extremidade do molde possui um pequeno orifício de 2,0 mm de diâmetro que atravessa toda a espessura da peça e por onde faz-se passar uma haste metálica de 130 mm de comprimento e 1,5 mm de diâmetro. A haste tem colada, na extremidade do lado interno do molde, uma pequena grelha metálica (placa de 35 mm x 70 mm, com 1,5 mm de espessura, perfurada com furos redondos - **Figura 4.9**). Esta grelha, posicionada a 5 mm do fundo do molde, é completamente envolvida pela argamassa durante a moldagem e, desta forma, acompanha sua deformação linear horizontalmente, transmitindo-a à haste. Do lado externo do molde, a outra extremidade da haste é colada a um captor de deformações (**Figura 4.10** e **Figura 4.11**). O registro das informações

do ensaio foi feito de forma direta e contínua por meio de um sistema informatizado de aquisição de dados.

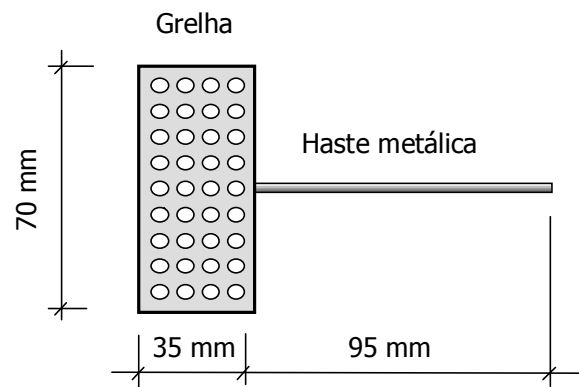


Figura 4.9 – Conjunto grelha/haste metálica colados.

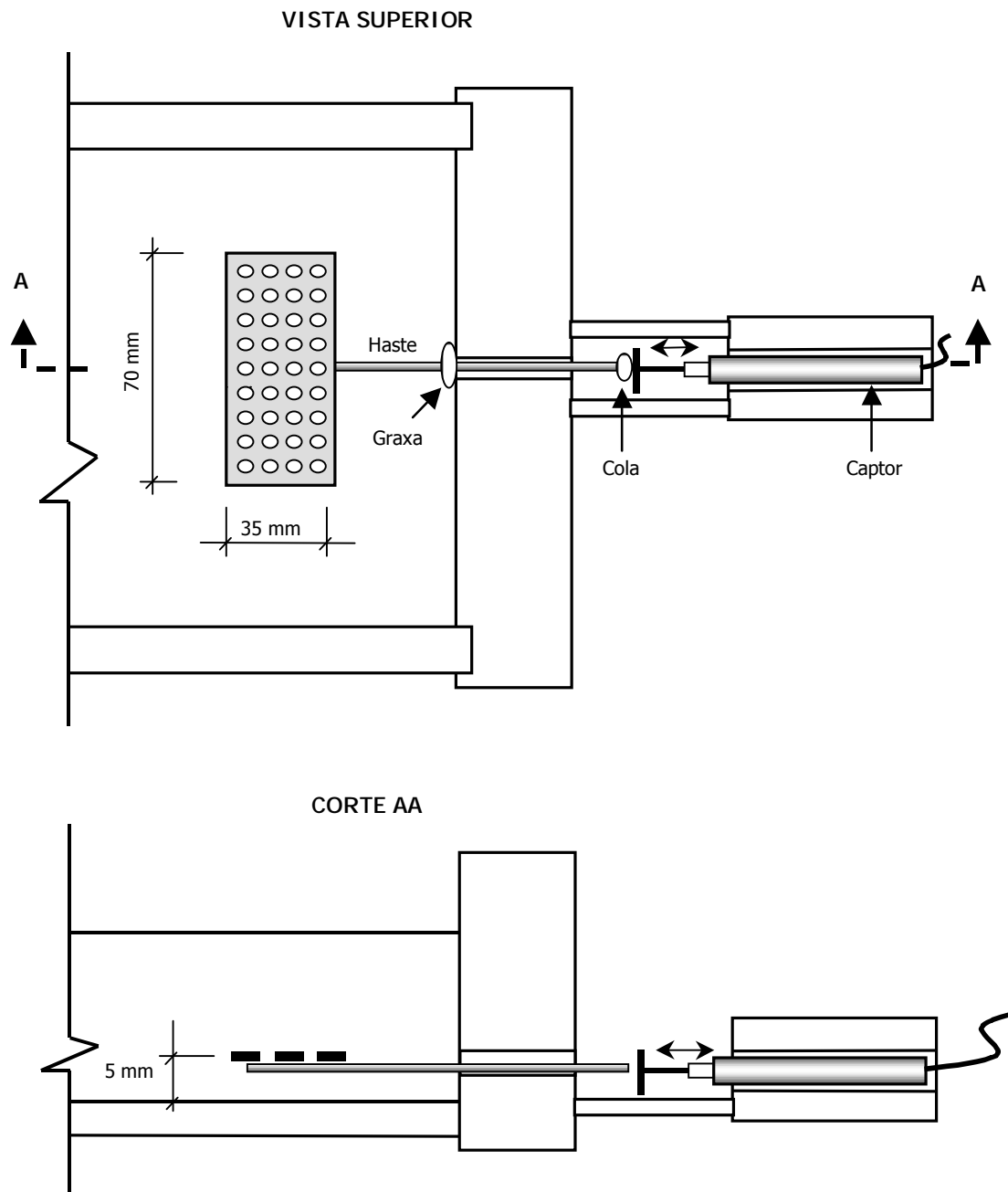


Figura 4.10 – Extremidade do molde de aço inoxidável , conjunto *haste-grelha metálica* e captor de deformações – desenho esquemático.



Figura 4.11 – Fotografia de um captor de deformação tipo digital, de curso máximo 2,5 mm e precisão 0,001 mm.

Para a realização dos ensaios cujo objetivo foi observar a retração em planos horizontais diferentes do corpo-de-prova, as extremidades do molde foram deslocadas verticalmente em relação às suas laterais. Desta maneira, nestes ensaios, realizados em camada de 25 mm de espessura aplicada sobre bloco cerâmico, a grelha metálica a ser envolvida pela argamassa ficou posicionada a 5 mm da superfície livre exposta ao ar da argamassa (Figura 4.12).

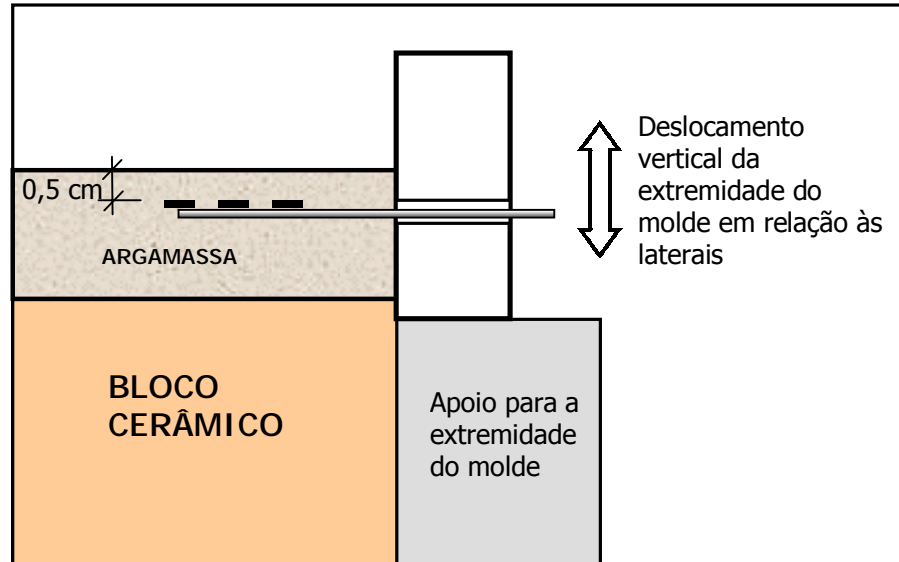


Figura 4.12 – Molde posicionado sobre bloco cerâmico para realização de ensaio de retração em argamassa de 25 mm de espessura, com grelha metálica posicionada a 5 mm da face superior da camada – desenho esquemático (vista parcial de corte longitudinal).

Realização do ensaio

Caso I – Argamassa aplicada sobre base não absorvente

A) *Preparação do equipamento*: os ensaios foram realizados utilizando-se dois moldes de cada vez. A seguir, a seqüência de operações básicas realizadas para deixar o conjunto pronto para o lançamento da argamassa do CASO I, de aplicação de argamassa sobre o fundo de aço dos moldes.

- revestimento das superfícies internas dos moldes (laterais e fundo), com exceção das extremidades, com película plástica auto-adesiva. Esta película, que recebeu ainda aplicação de óleo antes da moldagem, teve a função de diminuir o atrito da argamassa com as superfícies internas do molde;
- aplicação de óleo na haste metálica, no trecho que fica embutido no orifício da extremidade do molde, antes de colocá-la em sua posição final para o ensaio. Esta providência teve como finalidade diminuir o atrito entre a haste e o molde;
- colocação das hastes na posição correta para o ensaio. As duas pequenas grelhas coladas nas hastes de cada molde distavam, de centro a centro, 320 mm, distância tomada como base para o cálculo da deformação específica da argamassa (**Figura 4.13**). Uma pequena marca feita à caneta em cada haste ajudava a controlar visualmente sua posição, evitando o deslocamento horizontal durante o lançamento da argamassa no molde;
- aplicação, na haste, de uma pequena quantidade de graxa junto ao orifício da extremidade do molde, para evitar a fuga de água da mistura durante a moldagem que, carreando partículas sólidas da argamassa, poderiam prejudicar a livre movimentação da haste (**Figura 4.10**).

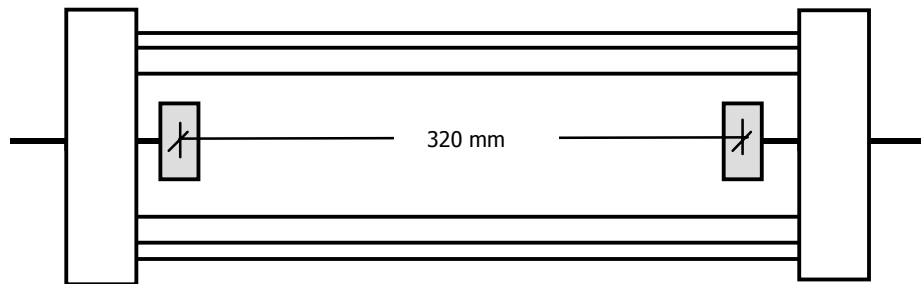


Figura 4.13 – Vista superior do molde para ensaio de retração de argamassa – desenho esquemático. A distância entre as grelhas metálicas, de centro a centro, é de 320 mm.

B) *Moldagem* : a argamassa foi aplicada no molde sempre em camada única, independentemente da espessura total desejada para o corpo-de-prova (15 ou 25 mm). Utilizando-se uma colher de pedreiro de tamanho pequeno, foram preenchidas primeiramente as áreas próximas às extremidades do molde, fazendo com que a argamassa envolvesse totalmente as duas grelhas. Foi preciso segurar as hastes com as mãos durante o lançamento da argamassa, pelo lado externo do molde, para evitar que o conjunto grelha-haste saísse da posição correta. Após esta operação foram preenchidas as partes centrais dos moldes, também com colher de pedreiro, com uma quantidade de argamassa que ultrapassava em cerca de 3 mm a altura final desejada do corpo-de-prova. Usando-se um pequeno gabarito controlador da espessura desejada da camada (acessório confeccionado em PVC), que era apoiado sobre as peças laterais dos moldes, procedeu-se em seguida ao arrasamento da argamassa em cada molde para obtenção da altura final, fazendo-se um movimento longitudinal de vai-e-vem (**Figura 4.14**). Finalmente, fez-se o acabamento da superfície da argamassa alisando-a com a colher de pedreiro, também em movimentos longitudinais de vai-e-vem, com uma leve pressão até a obtenção de textura lisa. Os dois moldes preenchidos com argamassa foram, então, cobertos com pano úmido para evitar-se evaporação da água da mistura fresca enquanto realizava-se a operação de colagem das extremidades externas das hastes aos captores.

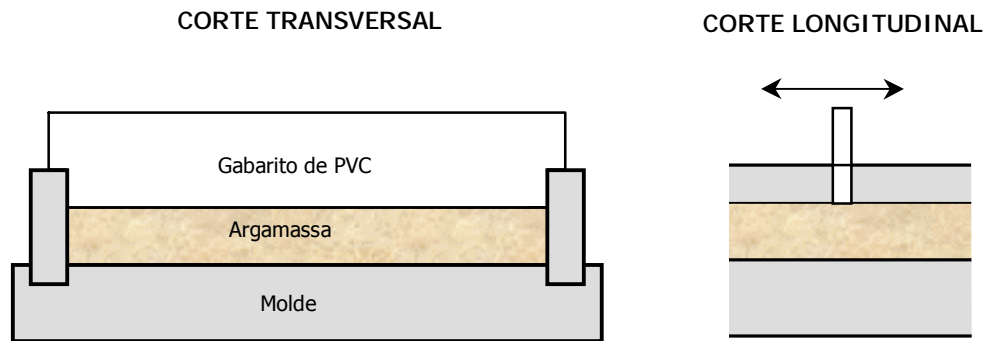


Figura 4.14 – Controle da altura da argamassa no molde de ensaio de retração, por meio de pequeno gabarito confeccionado em PVC – desenho esquemático.

C) *Colagem da haste ao captor de deformação*: para a colagem, cada captor foi aproximado da extremidade da haste correspondente por meio de um dispositivo com rosca externo ao molde, até tocá-la levemente (fotografia **Figura 4.15**). Foi utilizada cola de endurecimento rápido (3 minutos) e de alta rigidez após a secagem (Cola Rápida X60, marca HBM). Terminada a colagem, foi retirado o pano úmido que cobria os moldes.

D) *Registro da deformação longitudinal da argamassa*: começou imediatamente após a retirada do pano úmido que cobria os moldes preenchidos com argamassa, com o comando no microcomputador conectado aos captores. O intervalo de tempo decorrido entre o término da mistura na argamassadeira e o início da contagem de tempo do ensaio foi de cerca de 15 minutos.

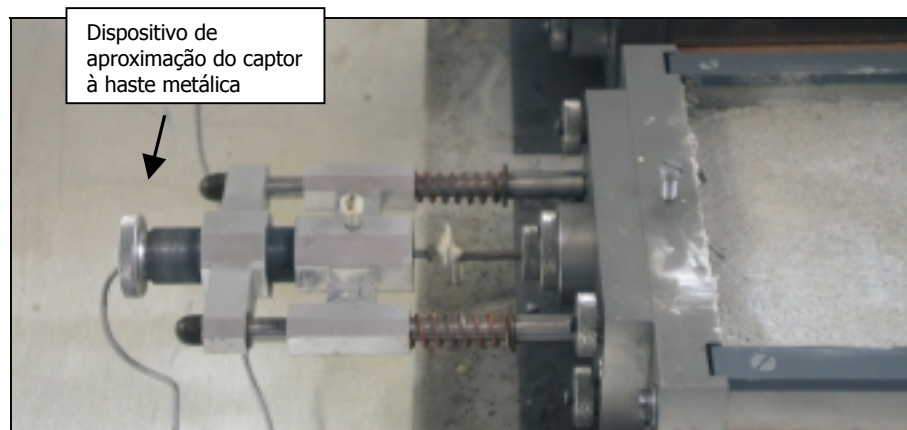


Figura 4.15 – Fotografia da extremidade do molde de aço para ensaio de retração.

E) *Critério adotado para tomada das medidas de deformação*: nos ensaios realizados no INSA de Toulouse foi registrada, por um programa de computador (*Orbit*

Excel), uma medida de deslocamento das hastes a cada segundo para cada captor. O programa fez uma média dos valores registrados a cada 600 medidas e, portanto, 10 minutos é o intervalo entre cada ponto dos gráficos *Retração x Tempo* apresentados neste trabalho, no eixo do tempo. A deformação específica, em *mm/m*, medida em cada corpo-de-prova num determinado intervalo de tempo, é a soma dos deslocamentos registrados, em milímetros, das duas hastes metálicas inseridas na argamassa, dividida por 0,32 m (distância de centro a centro das grelhas perfuradas coladas às hastes).

Além desta seqüência de operações básicas, alguns cuidados adicionais devem ser tomados para o perfeito funcionamento do equipamento, encontrados no ANEXO A.

Caso II – Argamassa aplicada sobre grelha metálica em base não absorvente

Para a execução do ensaio em que se procurou impedir a retração na interface *argamassa/base*, o fundo do molde não foi revestido com filme plástico. Uma grelha metálica perfurada foi posicionada sobre o fundo do molde (**Figura 4.16**) e, neste caso, a aplicação de óleo para diminuição de atrito foi feita apenas nas laterais e nas extremidades do molde. As operações de preparação do molde, moldagem e colagem da haste aos captors foram as mesmas descritas para o CASO I.

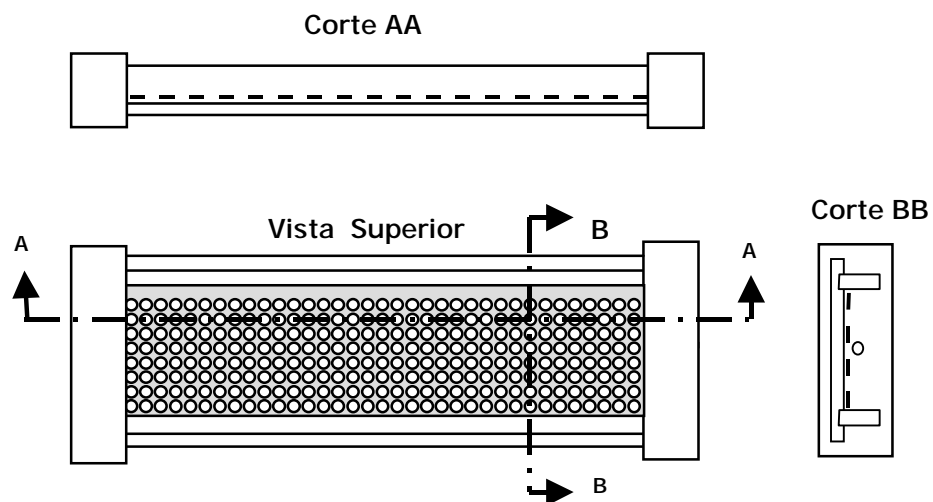


Figura 4.16 - Molde metálico para ensaio de retração com grelha metálica posicionada sobre o fundo de aço (CASO II) – desenho esquemático.

Caso III – Argamassa aplicada sobre base absorvente (bloco cerâmico)

Para a medida das deformações lineares da argamassa no estado fresco sujeita à absorção de água por um substrato poroso, o fundo do molde de aço inoxidável foi substituído por um bloco cerâmico. O bloco foi cortado de modo a encaixar-se longitudinalmente entre as duas extremidades do molde. No sentido transversal, as duas peças laterais do molde foram apoiadas sobre o bloco. As operações de preparo do equipamento para a realização do ensaio, moldagem e colagem das hastes aos captores foram as mesmas descritas para o CASO I, exceto a de revestimento do fundo do molde com filme plástico. Com a finalidade de fazer com que a argamassa fresca tomasse contato com toda a extensão do bloco cerâmico ao mesmo tempo, foi colocada uma folha plástica semi-rígida sobre o bloco (**Figura 4.17**), que permaneceu nesta posição durante o lançamento. A retirada da folha plástica (dividida longitudinalmente ao meio para facilitar esta operação) aconteceu entre o término da colagem das hastes metálicas aos captores de deformação e o início do registro das deformações da argamassa pelo computador.

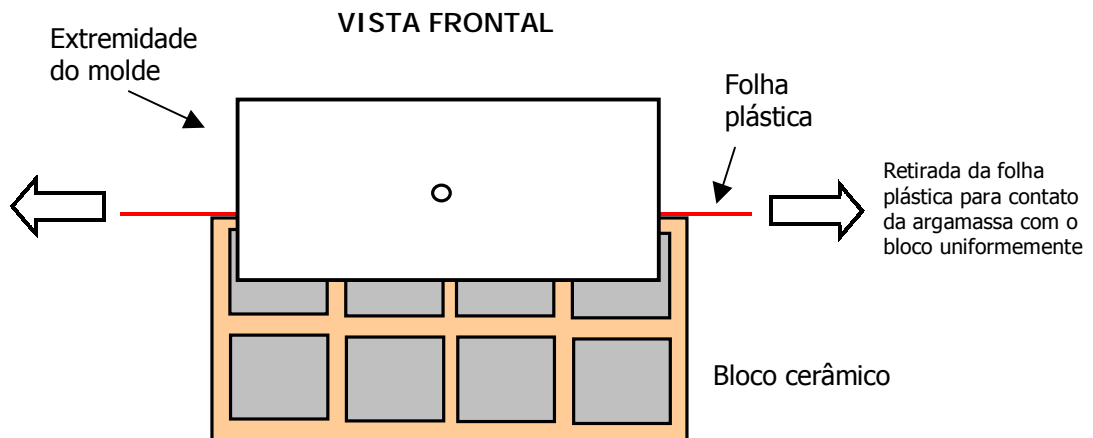


Figura 4.17 – Ensaio de retração de argamassa no estado fresco – desenho esquemático de moldagem sobre bloco cerâmico.

As fotografias da **Figura 4.18** mostram a extremidade do equipamento preparado para o ensaio e o aspecto geral da realização do ensaio de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico e, a fotografia da **Figura 4.19**, um panorama geral da sala de realização dos ensaios com o conjunto *moldes – computador* em funcionamento.

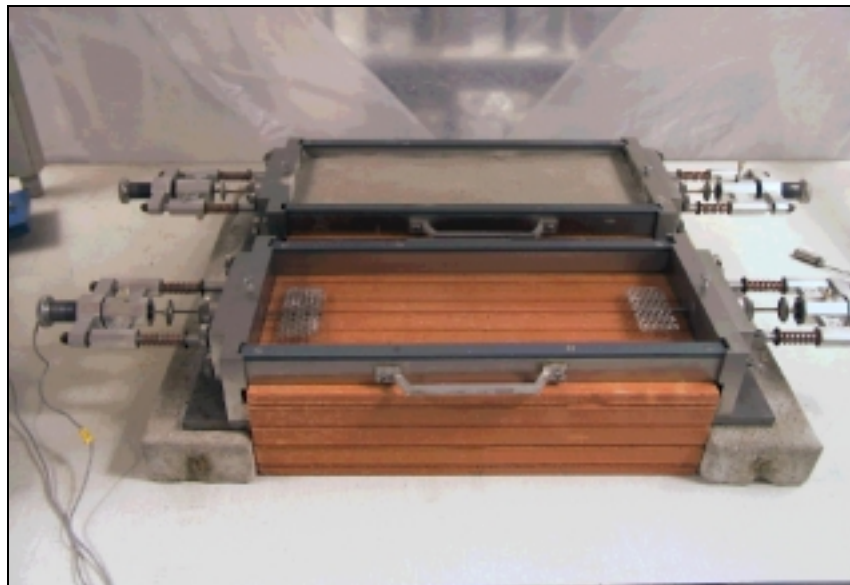
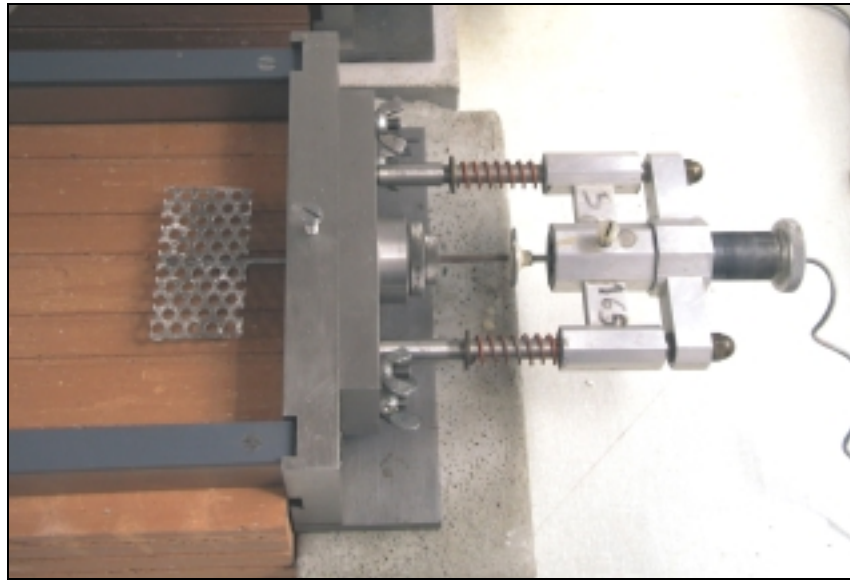


Figura 4.18 – Equipamento do ensaio de retração de argamassa no estado fresco (até 24 horas) – detalhe da extremidade e dois moldes com bloco cerâmico como fundo, um deles preenchido com argamassa.

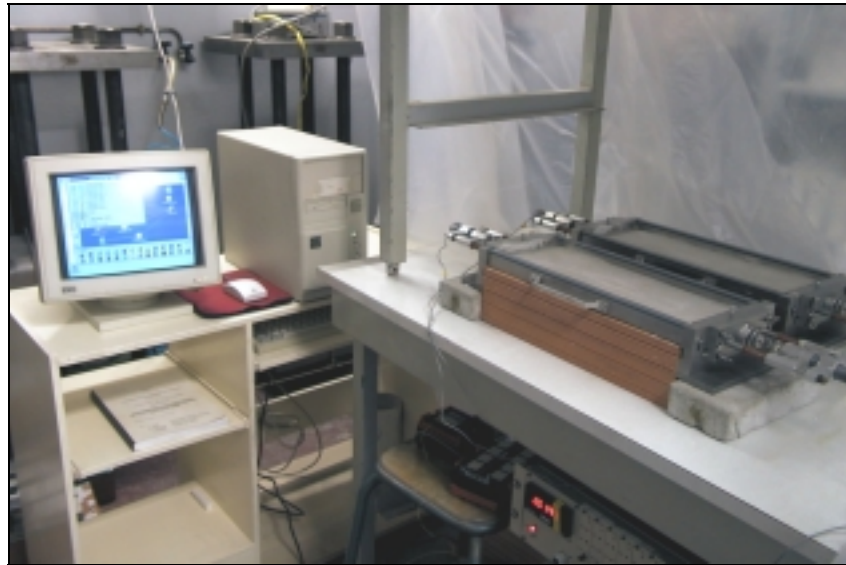


Figura 4.19 - Panorama geral da sala de realização dos ensaios de retração, com o conjunto moldes – computador.

4.3.2 Retração no estado endurecido

Para a medida da retração de placas de argamassa no estado endurecido, de mesmo formato dos corpos-de-prova dos ensaios de retração no estado fresco (400 mm x 150 mm e espessura 15 mm), foi fabricado um equipamento de ensaio que consiste em um pórtico de aço inoxidável com um relógio comparador de precisão 0,001 mm acoplado. As placas de argamassa foram moldadas com duas pequenas grelhas metálicas embutidas nas extremidades, cada grelha com uma haste colada de forma que, depois da desmoldagem, sobrasse um pequeno pedaço de 0,5 cm para fora do corpo-de-prova depois da desmoldagem (**Figura 4.20**).

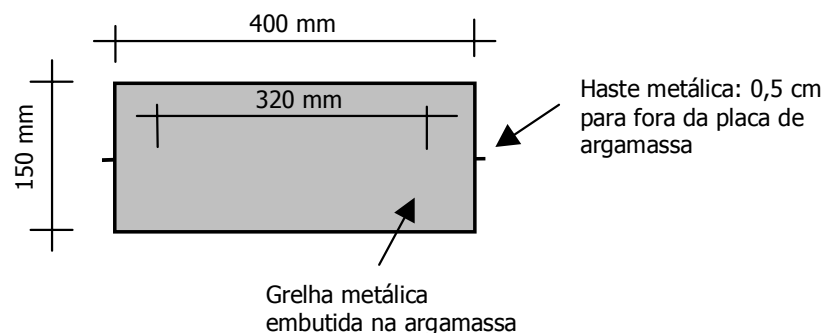


Figura 4.20 – Corpo-de-prova de argamassa para ensaio de retração no estado endurecido.

Com a argamassa endurecida foi colado, pelo lado externo do corpo-de-prova, em cada ponta de haste, um pino metálico perfurado longitudinalmente, com a finalidade de permitir o encaixe da placa de argamassa no pórtico e no relógio comparador (**Figura 4.21**).

A variação dimensional da argamassas teve como referência uma barra-padrão metálica (fabricada com o mesmo aço inoxidável do pórtico) de 420 mm de comprimento, usada para se obter a leitura "zero" no relógio comparador¹⁹. Após este procedimento foi feita a leitura nas placas de argamassa, com a retração sendo calculada em mm/m, dividindo-se a diferença entre uma determinada leitura e a leitura inicial (tomada imediatamente após a desforma e colagem dos pinos) por 0,320 m (distância de centro a centro das grelhas metálicas embutidas na placa). Convencionou-se adotar os valores de retração como sendo positivos.

$$R = (L - L_i)/0,320, \text{ onde:}$$

- R - retração (mm/m);
- L - leitura no relógio comparador em determinada idade após a desforma (mm);
- L_i - leitura inicial, realizada logo após a colagem dos pinos na placa de argamassa, 24 horas após a moldagem.

¹⁹ Foi realizado um procedimento de observação da variação dimensional da barra-padrão em função de possível variação de temperatura na câmara seca de cura das argamassas e leitura da retração dos corpos-de-prova. O pórtico metálico foi mantido, juntamente com o relógio comparador, em uma câmara de temperatura constante (24 °C), enquanto se variou a temperatura em outra câmara que continha a barra-padrão. A barra-padrão permaneceu durante 24 horas a 26 °C e, em seguida, durante o mesmo período, a 22 °C. Foram feitas as seguintes leituras com a barra no relógio comparador: 24 °C – 0,000 mm; 26 °C – 0,002 mm; 22 °C – 0,000 mm. Para a uma variação de temperatura de 4 °C (mantida a umidade relativa em 50%), acima, portanto, da variação admitida no funcionamento da câmara seca de cura das argamassas, foi detectada alteração de 0,002 mm no comprimento da barra-padrão metálica, com o mesmo relógio comparador usado nas leituras de retração das placas de argamassa. Esta alteração representa 0,37% da retração total ocorrida na argamassa 1:1:6 nos primeiros 28 dias de leitura, considerada desprezível.

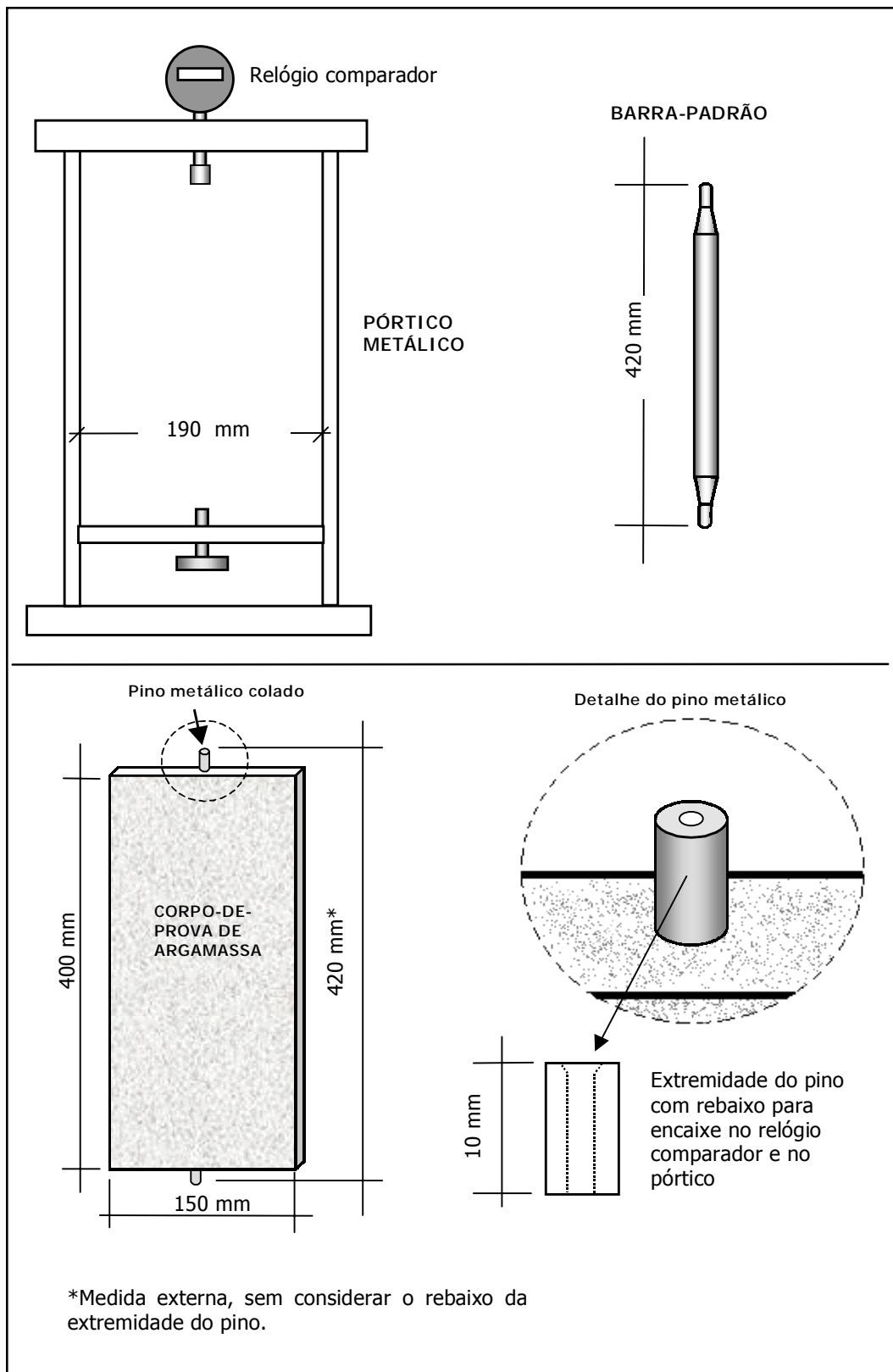


Figura 4.21 - Equipamento para medida de retração de argamassa em forma de placa, no estado endurecido, e corpo-de-prova preparado para o ensaio, com pinos metálicos colados nas extremidades – desenho esquemático.

As fotografias da **Figura 4.22** mostram a realização do ensaio.



Figura 4.22 - Fotografias do ensaio de retração de placa de argamassa no estado endurecido – posicionamento da barra-padrão para obtenção da leitura inicial "zero" no relógio comparador e leitura do comprimento da placa.

4.3.3 *Retração impedida*

Os resultados de retração livre em placas, como já comentado em itens anteriores deste trabalho, é limitado em termos de reprodução da realidade do revestimento em obra. Neste sentido, buscou-se aprimorar o ensaio de retração no estado endurecido, idealizando-se um procedimento cujo objetivo foi estudar o fenômeno com a argamassa aderida a uma base.

Foi pressuposto, a partir dos resultados dos ensaios de retração no estado fresco com a grelha metálica no fundo do molde que, se existe uma parcela da retração impedida de ocorrer livremente por causa da aderência à base, esta parcela poderia ser medida diretamente quando cessada a restrição, isto é, uma vez liberada a argamassa da base. Ensaio semelhante foi realizado por OUZIT (1990) que, no entanto, obteve a deformação impedida do corpo-de-prova, devida à aderência, de forma indireta. Este autor moldou a argamassa em camada única sobre grelha metálica perfurada e, ao liberar a grelha, com a argamassa endurecida, mediu o valor da flecha no meio do corpo-de-prova, uma vez que cessada a restrição da retração houve um ligeiro arqueamento da placa de revestimento. A partir do valor da flecha, então, foi feito o

cálculo da deformação na superfície correspondente à interface argamassa/grelha, obtendo-se a *retração impedida*.

Foi idealizado, na presente pesquisa, um procedimento de ensaio que permitiu:

- promover a aderência da argamassa a uma base, mantendo o comprimento inicial do corpo-de-prova, depois de endurecido, até a idade desejada;
- considerar a sucção de água da argamassa pela base;
- cessar o efeito da aderência a uma determinada idade;
- medir de forma direta as deformações na face livre e na interface argamassa/base.

Foi adotado o sistema de impedimento da retração com a mesma grelha metálica perfurada usada nos ensaios de retração no estado fresco, apresentada no item 4.2, facilmente removível da argamassa endurecida. A grelha, cortada de forma a ultrapassar as dimensões da base do corpo-de-prova em cerca de 5 mm, foi posicionada entre a argamassa e o bloco cerâmico, com a finalidade não só de permitir a sucção de água pela base, como também de restringir a retração até a idade prevista para sua liberação. A retração foi medida por meio de um retratômetro com relógio comparador (precisão 0,002 mm), tomando-se a distância entre duas pastilhas coladas na superfície dos corpos-de-prova. Como o objetivo foi medir o desempenho da argamassa na face livre exposta ao ar e na face onde a retração foi impedida pela grelha, foram coladas 4 pastilhas em cada corpo-de-prova, duas de cada lado (**Figura 4.23**). Os corpos-de-prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem, cada um permanecendo com sua respectiva grelha metálica. Durante este período e até a idade prevista de liberação da grelha a cura foi em câmara seca (25 °C e 50% U.R.). A colagem das pastilhas foi feita logo em seguida à desmoldagem, o que somente foi possível na superfície da interface *argamassa/base* graças a duas pequenas aberturas feitas previamente em todas as grelhas (**Figura 4.24**). Estas aberturas possibilitaram a obtenção, com a grelha ainda aderida, de duas pequenas regiões lisas no corpo-de-prova. Uma folha de papel-filtro foi colocada entre as grelhas e o bloco (**Figura 4.24**), de modo a permitir a sucção de água pela base e a recuperação dos corpos-de-prova para o prosseguimento do ensaio.

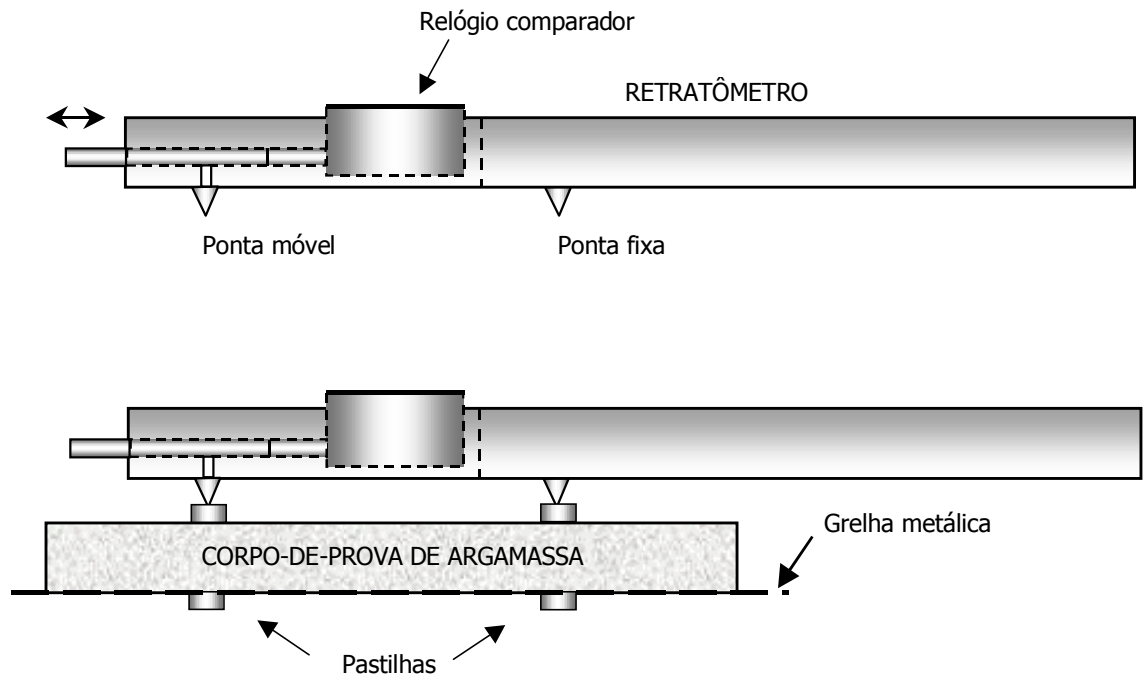


Figura 4.23 – Medida da retração em corpo-de-prova com pastilhas metálicas e grelha metálica, por meio de retratômetro com relógio comparador – desenho esquemático.

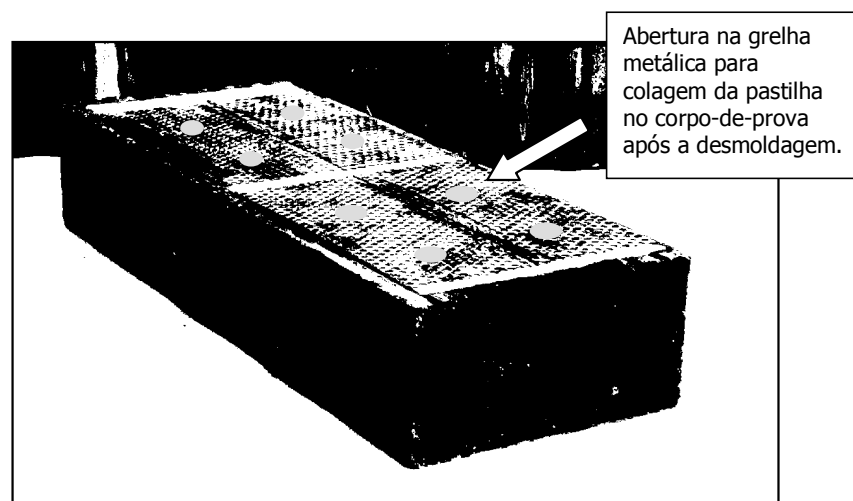


Figura 4.24 – Fotografia de bloco cerâmico com papel-filtro e grelhas metálicas, conjunto preparado para moldagem de corpos-de-prova para ensaio de retração impedida.

A seqüência de fotografias da **Figura 4.25** mostra um corpo-de-prova com a grelha metálica aderida, um corpo-de-prova com pastilhas coladas e já sem a grelha, e a medida da distância entre as pastilhas com o retratômetro.

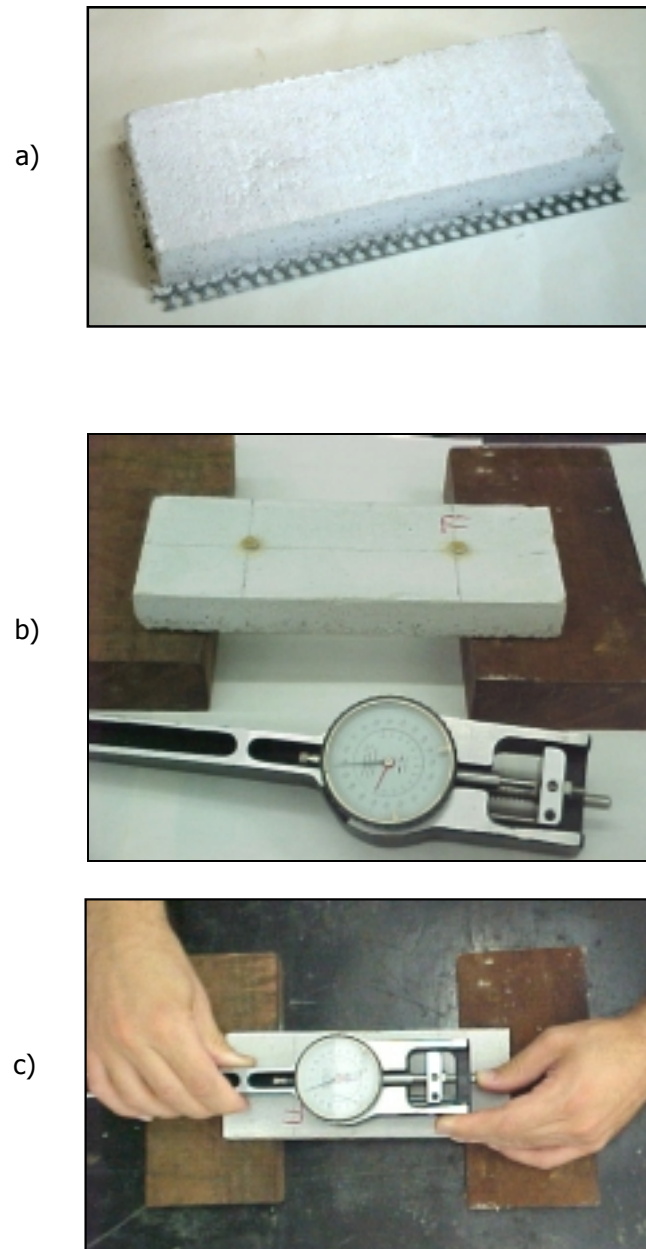


Figura 4.25 - a) Corpo-de-prova após a desforma, com a grelha metálica aderida; b) corpo-de-prova com as pastilhas coladas e retratômetro; c) medição da distância entre as pastilhas.

A variação dimensional da argamassas, tomada pela distância entre as pastilhas, teve como referência uma barra-padrão metálica, com dois orifícios distanciados 100 mm um do outro, para encaixe do retratômetro. Com esta barra foi obtida a leitura "zero" no relógio comparador²⁰, antes de cada leitura nos corpos-de-prova de

²⁰ O relógio possui um anel externo que gira com os números do mostrador. Ao posicionar o retratômetro na barra-padrão para a leitura de referência, o operador pode escolher o valor 0,000 ou outro qualquer, desde que mantido para todos os ensaios.

argamassa. Após este procedimento foi feita a leitura nas placas de argamassa, com a retração sendo calculada em mm/m, dividindo-se a diferença entre uma determinada leitura e a leitura inicial (tomada imediatamente após a colagem das pastilhas) por 0,100 m. A distância inicial entre as pastilhas de cada lado dos corpos-de-prova era de 0,100 m, obtida com o auxílio de um gabarito. Convencionou-se adotar os valores de retração como sendo positivos.

$$R = (L - L_i)/0,100, \text{ onde:}$$

R - retração (mm/m);

L - leitura no relógio comparador em determinada idade após a desforma (mm);

L_i - leitura inicial, realizada logo após a colagem das pastilhas nos corpos-de-prova.

4.4 Ensaios de propriedades mecânicas

Para a realização de ensaios mecânicos em argamassa aplicada sobre substrato não absorvente e sobre substrato poroso foi necessário desenvolver metodologia de ensaio que aproximasse os ensaios de laboratório da realidade da argamassa de revestimento aplicada em obra, principalmente quanto ao formato dos corpos-de-prova, moldagem e ensaio propriamente dito em equipamento de aplicação de carga. Foi projetado e fabricado um molde em PVC com o objetivo de obter as três condições de aplicação de argamassa estudadas neste trabalho. Pequenas placas de argamassa foram moldadas através de um sistema que permitiu a recuperação dos corpos-de-prova para os ensaios mecânicos fora da base, após a aplicação sobre diferentes tipos de substrato - ensaios de flexão que possibilitaram o cálculo da tensão de tração e do módulo de deformação.

4.4.1 Molde

Os moldes foram fabricados recortando-se chapas de PVC de 25 mm de espessura e o projeto (**Figura 4.26**) foi desenvolvido considerando-se alguns aspectos de ordem prática, como a necessidade de atender aos seguintes requisitos:

- moldagem de corpos-de-prova de 200 mm de comprimento e 75 mm de largura, mantendo-se a mesma proporção *comprimento/largura* do molde usado nos ensaios de retração de argamassa fresca, de base 400 mm x 150 mm;
- controle da espessura dos corpos-de-prova, entre 15 e 25 mm. A espessura máxima corresponde à altura das peças laterais do molde e a de 15 mm foi obtida pelo controle do enchimento do molde com um pequeno gabarito de PVC;
- estudo da influência do substrato nas propriedades mecânicas da argamassa. O molde tem o fundo removível, de modo a permitir sua substituição por componente de alvenaria de diferentes tipos e dimensões. Desta forma, a argamassa moldada sobre bloco cerâmico, por exemplo, perde água por sucção e o corpo-de-prova apresenta, no estado endurecido, características próximas às do revestimento em obra;
- obtenção de mais de um corpo-de-prova a cada operação de moldagem, proporcionando maior produtividade e praticidade nos trabalhos de laboratório. Foi possível a moldagem de um conjunto de dois ou quatro corpos-de-prova de cada vez, de acordo com o tamanho do bloco cerâmico usado como base porosa.

A fotografia da **Figura 4.27** mostra o molde completo, com fundo removível de PVC para a moldagem de argamassa aplicada sobre base não absorvente.

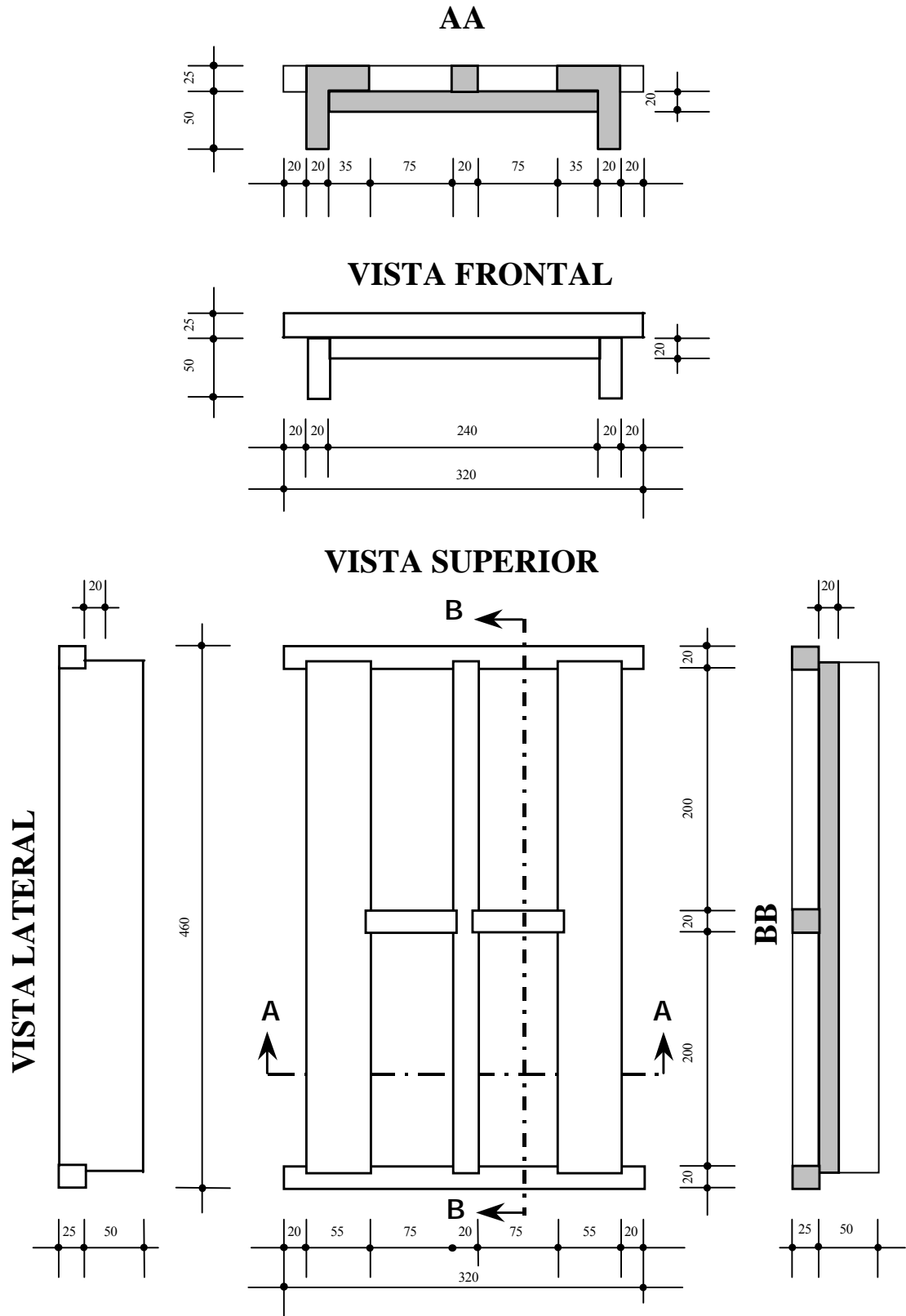


Figura 4.26 – Projeto do molde construído em PVC para a realização dos ensaios mecânicos em argamassa.



Figura 4.27 – Fotografia de molde em PVC para fabricação de corpos-de-prova de argamassa para ensaios mecânicos. O fundo removível do molde serve como base não-absorvente para as moldagens do Caso I.

4.4.2 *Produção de corpos-de-prova prismáticos de argamassa, de dimensões 200 x 75 x 15 (mm) e 200 x 75 x 25 (mm).*

A seguir é apresentada a seqüência de operações realizadas para produção de corpos-de-prova para cada caso de aplicação de argamassa para ensaio mecânico.

CASO I - argamassa aplicada sobre base não absorvente

- aperto dos parafusos e porcas do molde para evitar perda de água nas juntas de encontro de suas partes componentes;
- aplicação, com pincel, de uma demão de líquido desmoldante nas superfícies internas do molde;
- preenchimento do molde com argamassa em camada única, para fabricação de corpos-de-prova de 15 mm de espessura, e em duas camadas, para os de 25 mm. Para cada corpo-de-prova de camada única, após a colocação de uma quantidade de argamassa que ultrapassava um pouco o nível desejado na forma, foram aplicados, manualmente, 30 golpes sobre esta camada com um soquete metálico cilíndrico de acabamento liso (NBR 7215/96 - *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*), espalhados uniformemente na argamassa fresca. O excesso de argamassa foi retirado com o movimento de vai-e-vem de um gabarito, uma pequena peça confeccionada em PVC, apoiada nas bordas do molde. Com este movimento

promoveu-se, ao mesmo tempo, o arrasamento da superfície do corpo-de-prova. Em seguida, o molde com argamassa foi posicionado sobre uma mesa vibratória, para adensamento da argamassa até o nivelamento e a retirada de bolhas de ar de seu interior (tempo de vibração igual a 1 minuto, frequência de vibração 70 Hz). O acabamento da superfície foi feito com uma espátula, passada sobre a superfície da argamassa apenas para torná-la lisa, sem aplicação de pressão, num movimento longitudinal de ida e volta. Nos casos de preenchimento do molde em duas camadas, para os corpos-de-prova de 25 mm de espessura, as operações foram repetidas para a segunda camada de maneira idêntica, a partir do adensamento da primeira, fazendo-se o acabamento com espátula apenas sobre a camada final. A **Figura 4.28** mostra o aspecto final dos moldes preenchidos com argamassa.

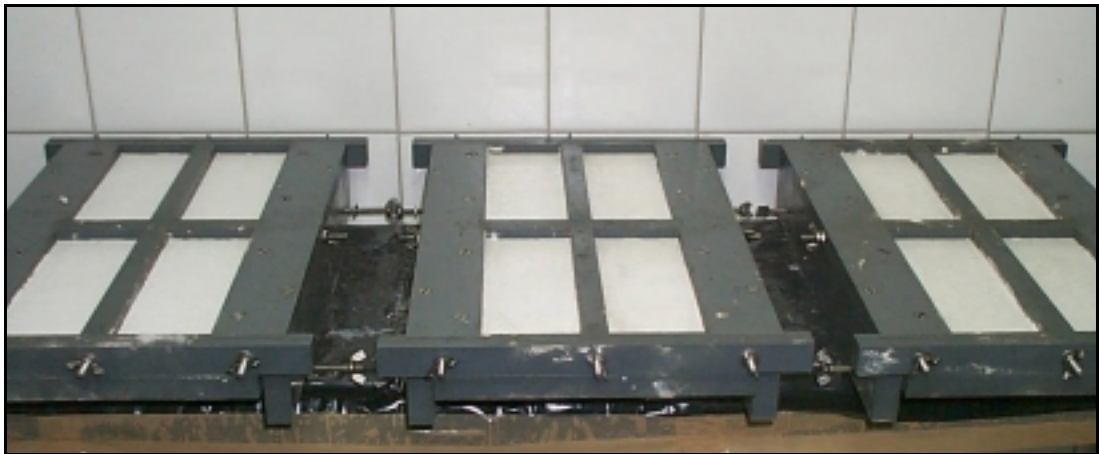


Figura 4.28 – Moldes de PVC preenchidos com argamassa para a produção de corpos-de-prova para ensaios mecânicos.

Caso III - argamassa aplicada sobre base porosa (bloco cerâmico) com interposição de folha de papel-filtro entre a base e a argamassa:

- remoção do fundo em PVC do molde;
- aplicação, com pincel, de uma demão de óleo desmoldante nas superfícies internas do molde;
- preparação do bloco cerâmico, com fixação do papel-filtro (80 g/m^2 , porosidade $3 \mu\text{m}$) sobre a superfície de aplicação da argamassa, com o auxílio opcional de fita adesiva nas bordas. O papel-filtro foi umedecido antes de tomar contato com a argamassa – este procedimento evita seu enrugamento durante a moldagem;

- fixação do bloco cerâmico sob o molde, usando os parafusos das paredes laterais do molde;
- preenchimento do molde com argamassa de maneira idêntica à do Caso I e realização da operação de adensamento levando-se o conjunto *molde-bloco* à mesa de vibração. Para que a argamassa dos quatro corpos-de-prova do molde entrasse em contato com a base ao mesmo tempo, foi colocada uma folha plástica entre o papel-filtro e o bloco cerâmico. Esta folha ultrapassava a dimensão do bloco, na direção longitudinal, para que pudesse ser retirada com as mãos. Para maior facilidade na retirada, a folha plástica foi cortada ao meio e as partes foram puxadas para cada um dos lados após o preenchimento do molde e adensamento dos quatro corpos-de-prova de cada bloco cerâmico (**Figura 4.29**).

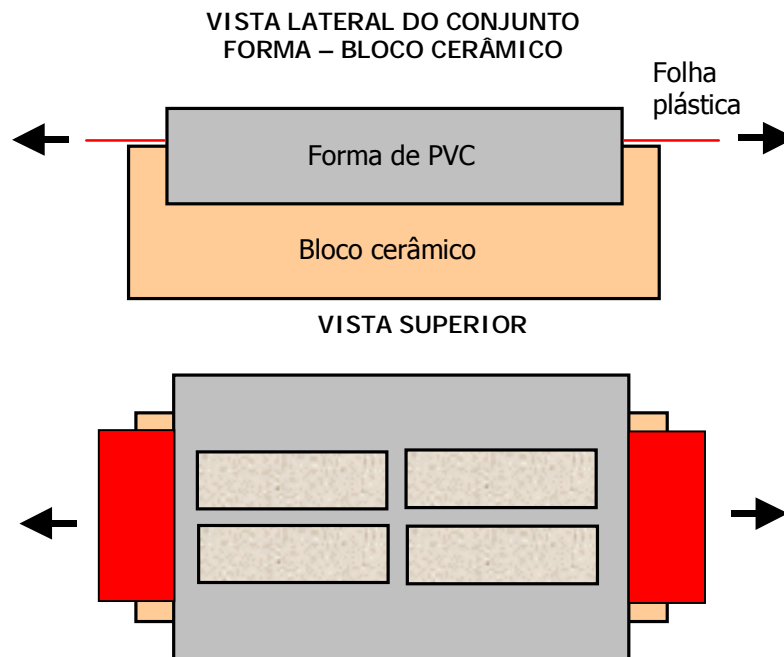


Figura 4.29 – Moldagem de argamassa sobre base porosa – desenho esquemático da retirada da folha plástica que permite o contato da argamassa fresca dos 4 corpos-de-prova do molde simultaneamente com a base - CasoIII.

As fotografias a seguir mostram o conjunto *molde-bloco* preenchido com argamassa (**Figura 4.30**), a operação de desmoldagem dos corpos-de-prova (**Figura 4.31**) e o aspecto final do conjunto após a desmoldagem (**Figura 4.32**).

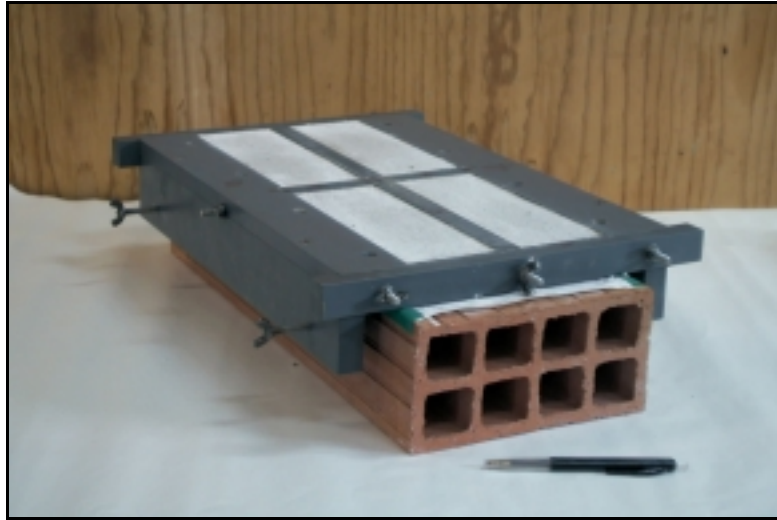


Figura 4.30 – Fotografia do conjunto *molde-bloco cerâmico* preenchido com argamassa.



Figura 4.31 - Fotografia da operação de desmoldagem dos corpos-de-prova de argamassa do conjunto *molde-bloco cerâmico* do Caso III.



Figura 4.32 – Fotografia dos corpos-de-prova de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico e papel-filtro, após a retirada da forma.

4.4.3 Tração na flexão

Os ensaios de tração na flexão foram realizados adaptando-se o método ISO/DIS 679 - *Methods of testing cements - Determination of strength* (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1987), para corpos-de-prova de dimensões 40 x 40 x 160 (mm). Aplicando-se uma carga distribuída uniformemente na seção transversal do meio do corpo-de-prova bi-apoiado (**Figura 4.33**), a tensão de tração na flexão é dada por $\sigma = 1,5 PL/bh^2$, onde²¹:

- σ - tensão de tração na flexão (MPa)
- P - carga aplicada no meio do prisma (N)
- L - distância entre os apoios (160 mm)
- b - maior lado da seção transversal do corpo-de-prova (mm)
- h - espessura do corpo-de-prova (mm)

A distância entre os apoios do corpo-de-prova, de 160 mm, foi definida arbitrariamente. A velocidade de aplicação da carga de 0,02 kN/minuto foi adotada, após testados diferentes valores, em função do tempo de duração do ensaio até a ruptura do corpo-de-prova. Valores mais altos resultaram no rompimento dos corpos-de-prova

das primeiras idades em tempo demasiadamente curto (menos de 1 minuto), e valores muito baixos tornaram o ensaio lento (cerca de 30 minutos) para as idades mais avançadas. Assim sendo, a velocidade adotada foi a que melhor atendeu à programação de ensaios do ponto de vista prático.

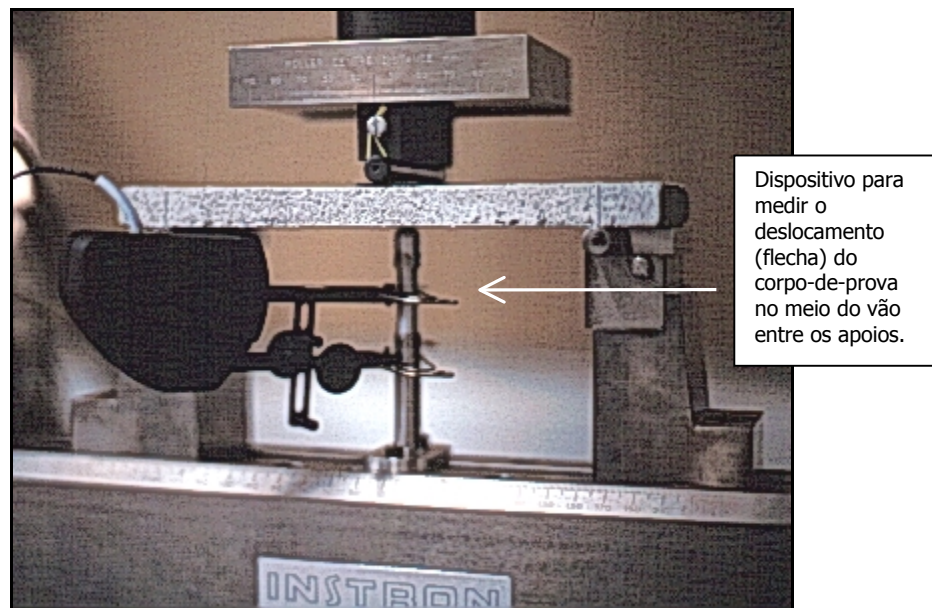
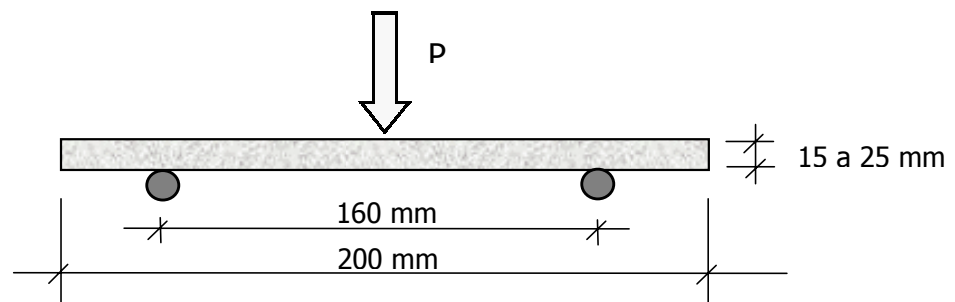


Figura 4.33 – Ensaio de tração na flexão de corpo-de-prova de argamassa (200 mm x 75 mm x 15 mm) - desenho esquemático e fotografia.

4.4.4 Módulo de deformação

A propriedade módulo de deformação, que representa a relação entre um determinado nível de tensão aplicado em um corpo e a deformação nele existente por

²¹ Esta relação é frequentemente adotada para ensaios mecânicos de flexão em argamassa, devendo-se ressaltar que é válida admitindo-se o corpo-de-prova em regime elástico-linear durante o carregamento (proporcionalidade *tensão x deformação*).

conta desta tensão, é considerada de grande importância para as argamassas de revestimento. Como já mencionado, o material aplicado em fachada possui uma relação *área/volume* muito grande e, em função disso, sofre ação intensa do meio ambiente e da base, ação esta transformada em um estado de tensão praticamente permanente, se levado em conta que raramente as condições de exposição são estáveis por muito tempo. De forma alguma interessa um revestimento demasiadamente rígido, a ponto de fissurar-se sob um determinado nível de tensões, sem antes oferecer a possibilidade de deformar-se. Por este motivo, torna-se importante estudar a deformabilidade das argamassas de revestimento de uma maneira que mais se aproxime da realidade do revestimento em obra.

A seguir apresentam-se as etapas e critérios seguidos no ensaio e nos cálculos do módulo de deformação das argamassas aplicadas em base não-absorvente, bloco cerâmico seco e bloco com 50% de umidade.

- com a finalidade de avaliar a deformabilidade das argamassas, foi medido o deslocamento vertical (flecha) dos corpos-de-prova de 200 x 75 x 15 (mm) no ensaio de flexão, no meio do vão entre os apoios, usando-se o dispositivo indicado na fotografia da **Figura 4.33**. Este dispositivo consta de uma haste metálica que possui um núcleo móvel capaz de acompanhar o deslocamento vertical do corpo-de-prova durante o ensaio. Um captor de deformações de precisão 0,001 mm foi preso por meio de dois grampos à haste, um na parte fixa e outro no núcleo móvel (**Figura 4.34**), e o ensaio forneceu curvas *Carga (kN) x Deslocamento (mm)* como as da **Figura 4.35**.

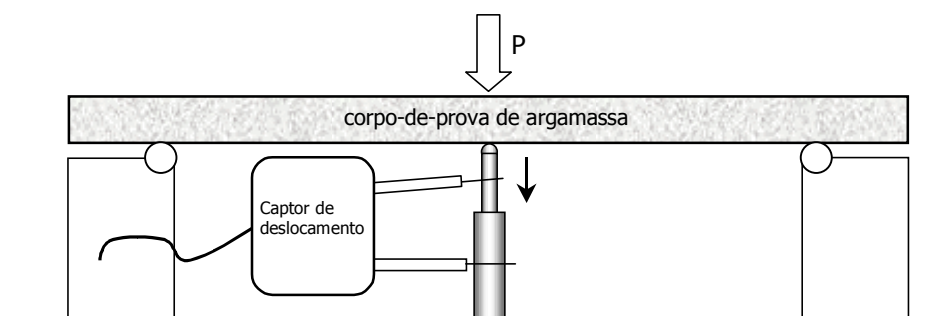


Figura 4.34 – Ensaio de flexão, com dispositivo para medida do deslocamento do corpo-de-prova de argamassa no meio do vão entre os apoios – desenho esquemático.

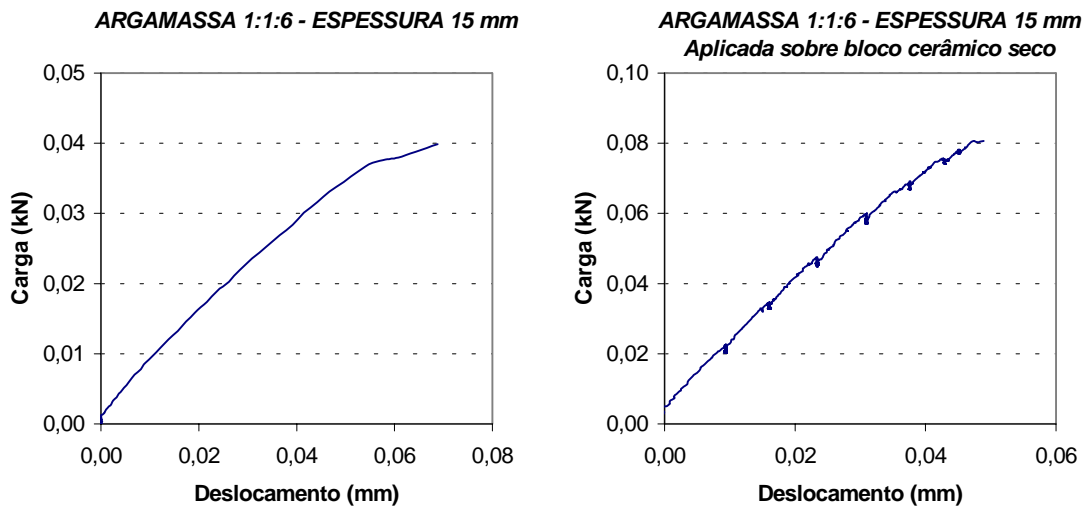


Figura 4.35 – Curvas *Carga x Deslocamento (flecha)* obtidas no ensaio de flexão, com medida da flecha no meio do vão entre os apoios dos corpos-de-prova de 200 x 75 x 15 (mm). Resultado do corpo-de-prova nº 5, de 14 dias de idade – argamassa 1:1:6, aplicada sobre base não-absorvente e sobre bloco cerâmico seco em estufa por 24 horas.

- o cálculo do módulo de deformação foi feito a partir da relação entre a *tensão de tração na flexão (MPa)* e a *deformação (mm/mm)* correspondente. A tensão no regime elástico-linear, como já mencionado, é dada por $\sigma = 1,5 PL/bh^2$ e o módulo de deformação, em função da flecha, considerando-se o mesmo regime, por $E = PL^3/4\delta bh^3$, onde:

E - módulo de deformação (MPa)

P - carga aplicada no meio do prisma (N)

L - distância entre os apoios (160 mm)

b - maior lado da seção transversal do corpo-de-prova (mm)

h - espessura do corpo-de-prova (mm)

δ - deslocamento (flecha) no meio do corpo-de-prova, medido durante o ensaio de flexão (mm).

- como, na realidade, não houve proporcionalidade na relação tensão/deformação do ensaio de flexão das argamassas ao longo de todo o carregamento²², tornou-se necessário fixar alguns parâmetros e adotar simplificações no cálculo do módulo. Foi

²² Apenas alguns corpos-de-prova apresentaram uma curva *Carga x Deslocamento* muito próxima de uma reta, considerando uma inspeção visual do gráfico resultante do ensaio de flexão, mas este não pode ser adotado como tendo sido o desempenho de todos os casos de aplicação de argamassa estudados.

adotado o Módulo Corda para representar a deformabilidade das argamassas, que é dado pela declividade da reta traçada entre dois pontos da curva *tensão x deformação* (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Adotando-se os pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura (**Figura 4.36**), o Módulo Corda foi calculado pela expressão:

$$E_c = (\sigma_{30} - \sigma_5) / (\epsilon_{30} - \epsilon_5).$$

onde:

E_c - módulo corda (MPa);

σ_i - tensão de tração na flexão igual a "i" % da tensão de ruptura (MPa);

ϵ_i - deformação longitudinal específica de tração (mm/mm) no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra, no meio do vão entre os apoios, correspondente à tensão de tração na flexão igual a "i"% da tensão de ruptura.

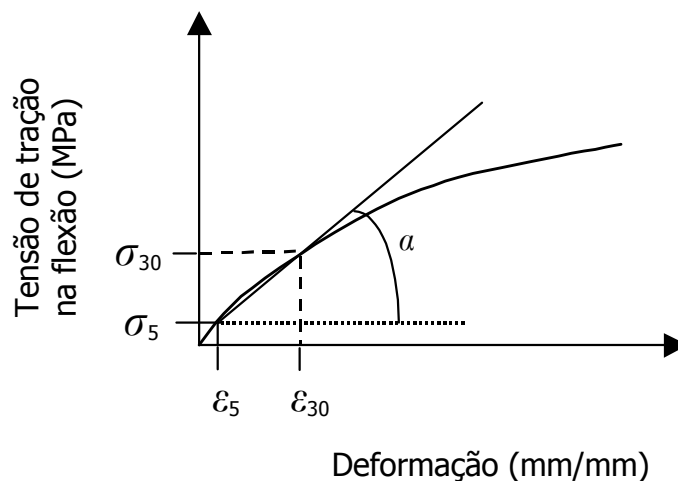


Figura 4.36 – Curva *tensão x deformação longitudinal de tração no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra*, com traçado da reta que passa nos pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura. A declividade "α" corresponde ao Módulo Corda.

- a deformação ϵ_i foi calculada nos pontos correspondentes a 5% e 30% da tensão de ruptura pela relação $\epsilon = \sigma/E$, sendo $\sigma = 1,5 PL/bh^2$ e $E = PL^3/4\delta bh^3$ (expressões já mencionadas);
- o cálculo do Módulo Corda foi adotado para que, concomitantemente, fosse possível:
 - a) descartar um pequeno trecho inicial da curva *tensão x deformação* (de 0 a 5% da tensão de ruptura), em função de possíveis acomodações do corpo-de-prova na

prensa de ensaio que pudessem ter ocorrido, causadas, por exemplo, por pequenas imperfeições ou partículas soltas na superfície da argamassa, nos pontos de contato máquina/ corpo-de-prova; b) avaliar o desempenho da argamassa quanto à sua capacidade de deformação adotando a hipótese de linearidade na relação *tensão x deformação* (aproximando a curva de uma reta) apenas em um trecho inicial do ensaio, até 30% da tensão de ruptura;

- para cada corpo-de-prova (6 a 8 em cada idade, em cada caso de aplicação da argamassa) foi montada uma seqüência de cálculos como a da **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 – Exemplo de seqüência de cálculos para obtenção do Módulo Corda de cada corpo-de-prova de argamassa.

% da carga de ruptura	Carga (kN)	Tensão (MPa) $\sigma = 1,5 PL/bh^2$	Deslocamento no meio do vão (mm)	Deformação (mm/mm) $\epsilon_i = \sigma_i/E_i$	Módulo Corda 5%/30% (MPa) $E_c = (\sigma_{30} - \sigma_5)/(\epsilon_{30} - \epsilon_5)$.
5	0,001981	0,02817	0,00096	0,000003	4045,70
30	0,011886	0,16905	0,01087	0,000038	

4.5 Ensaios de porosimetria

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados com o intuito de observar a microestrutura das argamassas quanto ao efeito provocado pelas alterações de composição e pela perda de água por sucção, quando a argamassa é aplicada sobre base porosa.

A técnica de intrusão de mercúrio, embora limitada em determinados aspectos, como a impossibilidade de se atingir os poros fechados do material, é válida para efeito de comparação entre resultados obtidos em amostras de mesma natureza.

No ANEXO B encontram-se dados do experimento relacionados com o equipamento utilizado e com o procedimento de ensaio.

5 . PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A seguir são apresentados os materiais, as proporções de mistura, a consistência das argamassas, as condições de aplicação e de cura, e o planejamento dos ensaios da pesquisa, agrupando-se os dados dos experimentos realizados no INSA de Toulouse e na Escola Politécnica da USP. No capítulo subsequente indica-se, na legenda das figuras dos resultados, o local de realização dos mesmos.

5.1 Materiais

Cimento:

Portland CPJ CEM II/B 32,5 R - norma francesa/européia NF EN 197-1 - *Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.*

Portland CP II E 32 - norma ABNT NBR 5732/91- *Cimento Portland comum.*

Cal:

CL 90 - norma francesa NF P15-311 - *Chaux de construction - Définitions, spécifications et critères de conformité.*

CH I – norma ABNT NBR 7175/92 - *Cal hidratada para argamassas.*

Areia:

Areia especificada na norma francesa/européia NF EN 196-1 - *Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques (1995)*, de granulometria apresentada na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1 - Composição granulométrica da areia utilizada no INSA (norma EN 196-1).

Abertura das peneiras de malha quadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Porcentagem retida acumulada	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Areia normal do IPT, composta de quatro frações, de acordo com a **Tabela 5.2**, para obtenção de curva granulométrica próxima à da areia normalizada francesa.

Tabela 5.2 – Composição granulométrica da areia utilizada na EPUSP.

Abertura de malha quadrada (mm)	Porcentagem retida na peneira, em massa, por kg de areia composta
1,20	20
0,60	40
0,30	20
0,15	20

Comparação entre a granulometria das areias IPT e INSA:

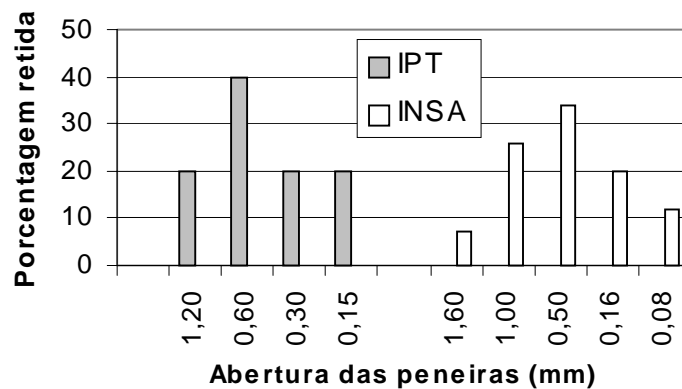


Figura 5.1- Granulometria das areias IPT e INSA – porcentagem retida.

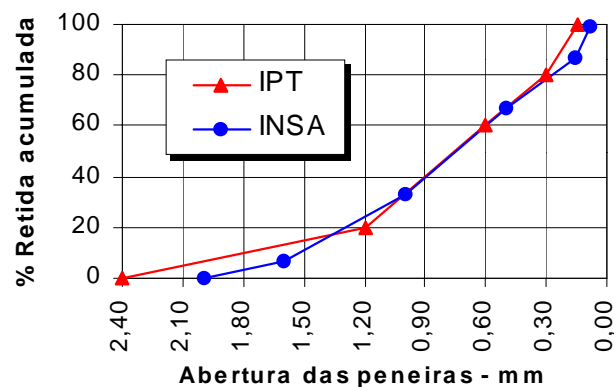


Figura 5.2 - Granulometria das areias IPT e INSA – porcentagem retida acumulada

Dados da caracterização dos materiais como composição química, massa unitária e massa específica real encontram-se no ANEXO C.

5.2 Proporções de mistura

A mistura de cimento, cal e areia de proporções em volume **1:1:6** foi estudada como composição de referência, por ser tradicionalmente utilizada para revestimento de fachada em construções. Suas expressões em massa 1:0,44:7,50:1,17 (INSA) e 1:0,44:7,50:1,50 (EPUSP) foram calculadas com base nos valores das massas unitárias dos materiais (ANEXO C), medidas em laboratório.

A partir da argamassa de referência foram variados os teores de **cal** e de **pasta** da argamassa 1:1:6. É de conhecimento geral que argamassas muito rígidas, isto é, de pequena capacidade de deformação devido ao consumo elevado de cimento, são mais propensas à fissuração quando o revestimento sofre variações dimensionais provocadas por mudanças de temperatura, molhamento/secagem, deformações na estrutura do edifício, etc. Optou-se, por isso, por alterações na proporção de mistura no sentido de aumentar gradativamente a relação *cal/aglomerantes*. Além disso, é sabido que a cal melhora a retenção de água da argamassa, de suma importância para a mistura no estado fresco, o que torna interessante também avaliar a influência do teor deste material na retração. A variação da relação *pasta/massa total* também foi considerada relevante, por ser a pasta a parte da mistura potencialmente responsável pela retração.

A **Figura 5.3** ilustra como foram feitas as alterações nas proporções dos materiais citadas. Ao serem alterados os teores de cal (relação *massa de cal/massa total de aglomerantes* ou, simplesmente, relação *cal/aglomerantes*) e de pasta, a consistência de um primeiro grupo de argamassas, para o qual não foi corrigida a quantidade de água total da mistura, também foi alterada. Com o aumento do teor de cal, a argamassa tornou-se mais seca e, com o aumento do teor de pasta, mais fluida.

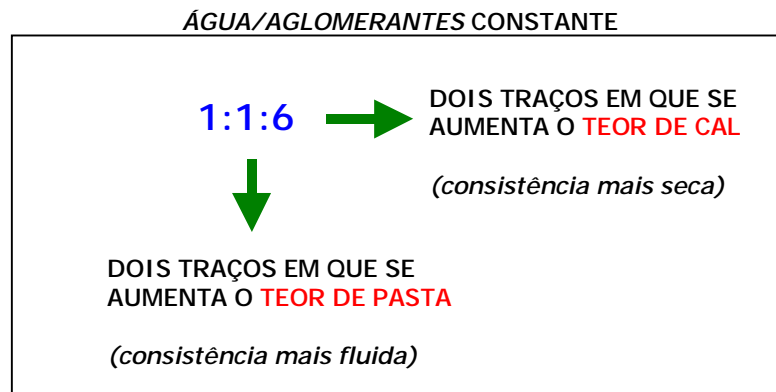


Figura 5.3 – Variação da composição das argamassas a partir do proporção de referência 1:1:6. Grupo de argamassas de relação água/aglomerantes constante.

Teores de cal e pasta a partir da mistura de referência: ao variar as relações *cal/aglomerantes* e *pasta/massa total* as argamassas ficaram separadas em **dois grupos**, de acordo com a correção ou não da quantidade de água total original da mistura.

- *Argamassas de relação água/aglomerantes constante:* na direção horizontal da **Figura 5.4**, da esquerda para a direita, as relações *cal/aglomerantes* são iguais a **0,30** (argamassa 1:1:6), **0,45** e **0,60**. Na direção vertical da mesma figura, manteve-se a composição da pasta (cimento + cal + água) da argamassa de referência 1:1:6, alterando-se a proporção *pasta/massa total* das argamassas. De cima para baixo, as proporções *pasta/massa total* são iguais a **0,25** ; **0,30** e **0,35**.
- *Argamassas de consistência constante :* foi corrigida apenas a quantidade de água de cada mistura do grupo anterior, de forma a obter-se, para todas as argamassas, consistência igual à da argamassa 1 : 1 : 6 de referência.

ARGAMASSAS DE REL. ÁGUA/AGLOMERANTES CONSTANTE E CONSISTÊNCIA VARIÁVEL

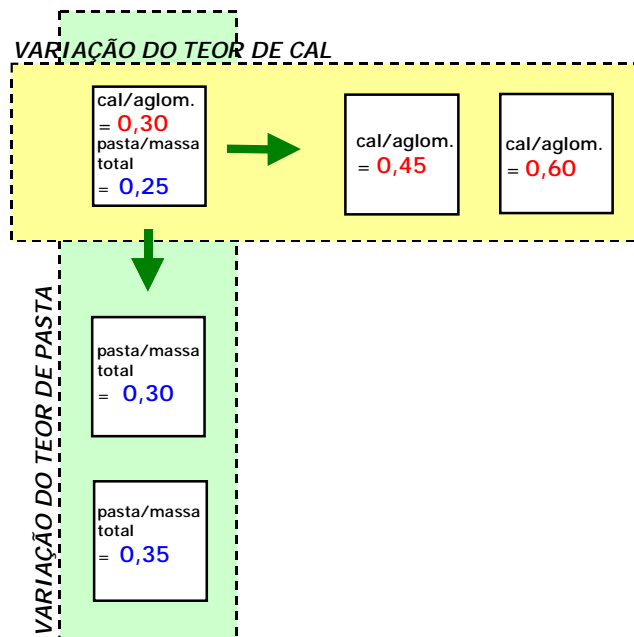


Figura 5.4 - Composição das argamassas – esquema do critério de variação dos teores de cal e pasta das misturas, adotado a partir da proporção de referência 1:1:6 em volume, mostrando a relação *cal/aglomerante* e *pasta/massa total* das proporções de relação *água/aglomerantes* igual e consistências diferentes.

Em resumo, trabalhou-se com dois grupos de argamassa: um de *mesma relação água/aglomerantes* e outro de *mesma consistência*, que perfizeram, no total, nove composições.

5.3 Nomenclatura das argamassas

Foi adotado um critério de identificação das argamassas da pesquisa, dando a cada uma um nome que contém um parâmetro da mistura, ou que simplesmente remeta à sua composição. A argamassa de cimento, cal e areia de proporções 1:1:6 em volume foi chamada simplesmente de **1:1:6**. As argamassas do grupo de *mesma relação água/aglomerantes* e consistência diferente cujo teor de cal foi alterado, receberam o nome **CAL**, seguido de um número que representa a porcentagem de cal em relação à massa total de aglomerantes. Dentro do mesmo grupo, deu-se o nome **PASTA**, seguido de um número relacionado à porcentagem de pasta na massa total de materiais da mistura, às composições onde variou apenas a quantidade de pasta da argamassa de referência. (Figura 5.5 e Figura 5.6). Seguindo o mesmo critério, apenas foi acrescentada a sigla "CORR" (de *corrigida*) ao nome das argamassas do grupo de

mesma consistência, que tiveram corrigida a quantidade de água para obtenção de consistência igual à da argamassa 1:1:6 (**Figura 5.7**).

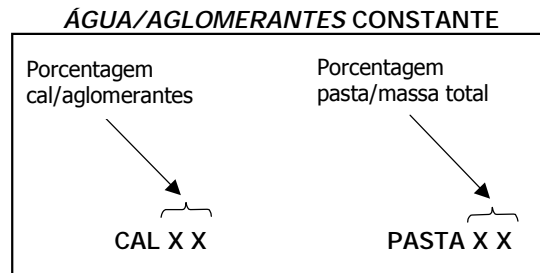


Figura 5.5 - Nomenclatura das argamassas de relação *água/aglomerantes* constante e consistência variável.

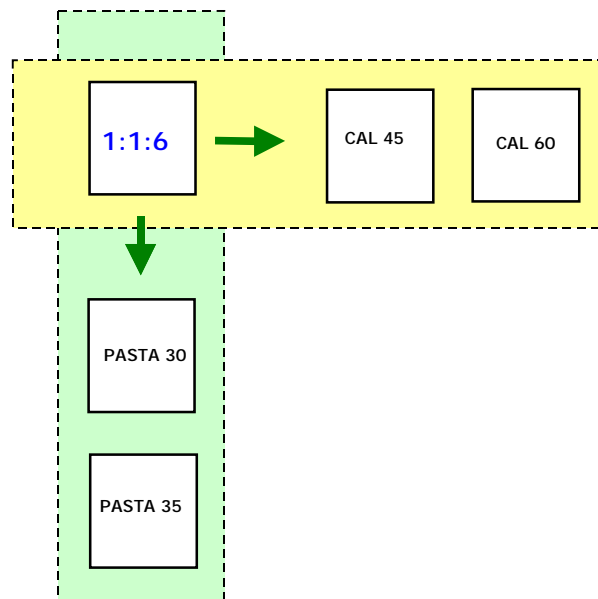


Figura 5.6 - Esquema da nomenclatura das argamassas, baseado na variação dos teores de cal e pasta das proporções de relação *água/aglomerantes* constante e consistência variável.

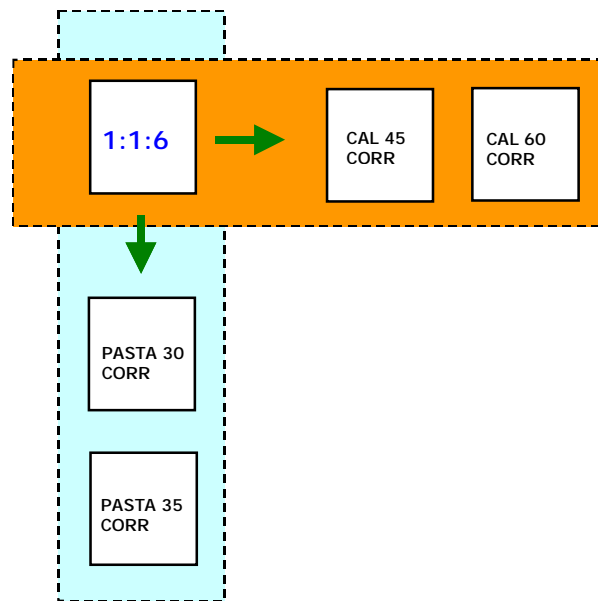


Figura 5.7 - Esquema da nomenclatura das argamassas, baseado na variação dos teores de cal e pasta das proporções corrigidas, isto é, de relação *água/aglomerantes* variável e consistência constante.

A seguir relacionam-se as nove argamassas da pesquisa:

1:1:6

Cal 45

Cal 60

Pasta 30

Pasta 35

Cal 45 CORR

Cal 60 CORR

Pasta 30 CORR

Pasta 35 CORR

Na **Figura 5.8** é apresentado um esquema completo de informações sobre a composição das argamassas de *relação água/aglomerantes* constante (grupo de consistência variável), com os tamanhos das divisões internas dos desenhos indicando as proporções dos materiais, em massa. Na **Tabela 5.3** e na **Tabela 5.4** encontram-se as proporções em massa e diversas relações entre os materiais constituintes de todas as misturas INSA e EPUSP. Na **Tabela 5.5**, a composição e consistência da mistura cimento/areia, que aparece unicamente no ensaio de retração no estado endurecido EPUSP.

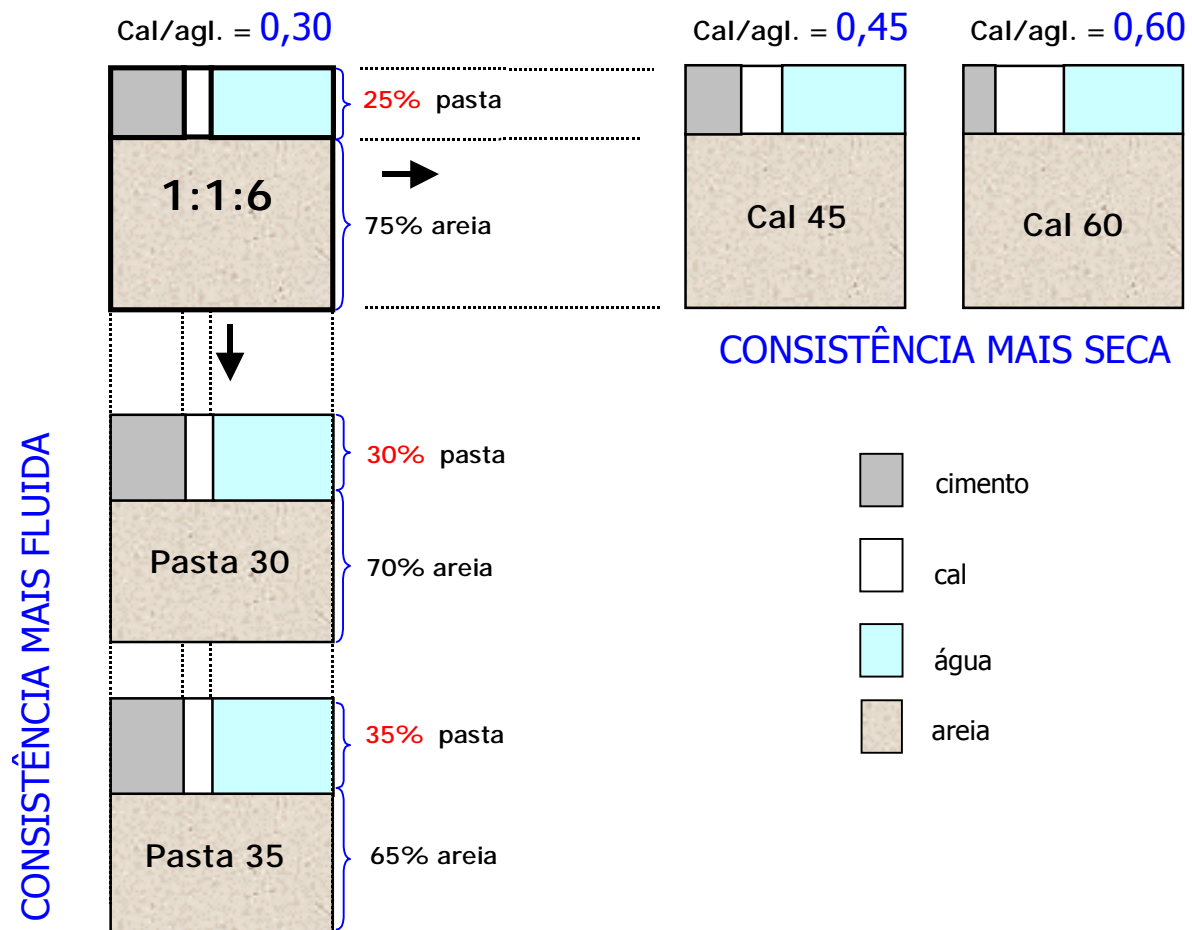


Figura 5.8 - Composição das argamassas de relação *água/aglomerantes* constante e consistência variável.

Tabela 5.3 – Composição das misturas INSA

ARGAMASSA		Composição (em massa)				Relações entre constituintes da argamassa (em massa)							
						a/c	água/ aglomerantes	cal/total	cal/ aglomerantes	agregados/ total	agl./total	água/total	pasta/total
		cim	Cal	areia	água								
Argamassa de referência	1:1:6	1	0,44	7,50	1,17	1,17	0,81	0,04	0,31	0,74	0,14	0,12	0,26
Água/aglomerantes constante	Cal 45	1	0,83	10	1,5	1,50	0,82	0,06	0,45	0,75	0,14	0,11	0,25
	Cal 60	1	1,49	13,63	2,04	2,04	0,82	0,08	0,60	0,75	0,14	0,11	0,25
	Pasta 30	1	0,43	6,06	1,17	1,17	0,82	0,05	0,30	0,70	0,17	0,14	0,30
	Pasta 35	1	0,43	4,82	1,17	1,17	0,82	0,06	0,30	0,65	0,19	0,16	0,35
Consistência constante	Cal 45 CORR	1	0,83	10	1,55	1,55	0,85	0,06	0,45	0,75	0,14	0,12	0,25
	Cal 60 CORR	1	1,49	13,63	2,2	2,20	0,88	0,08	0,60	0,74	0,14	0,12	0,26
	Pasta 30 CORR	1	0,43	6,06	0,98	0,98	0,69	0,05	0,30	0,72	0,17	0,12	0,28
	Pasta 35 CORR	1	0,43	4,82	0,82	0,82	0,57	0,06	0,30	0,68	0,20	0,12	0,32

Cimento CPJ CEM II/B 32,5 R

Cal CL 90

Areia EN 196-1

Tabela 5.4 - Composição das misturas EPUSP.

ARGAMASSA		Composição (em massa)				Relações entre constituintes da argamassa (em massa)							
						a/c	água/ aglomerantes	cal/total	cal/ aglomerantes	agregados/ total	agl./total	água/total	pasta/total
		cim	Cal	areia	água								
Argamassa de referência	1:1:6	1	0,44	7,50	1,50	1,50	1,04	0,04	0,30	0,72	0,14	0,14	0,28
Água/aglomerantes constante	Cal 45	1	0,82	9,60	1,90	1,90	1,04	0,06	0,45	0,72	0,14	0,14	0,28
	Cal 60	1	1,5	13,10	2,60	2,60	1,04	0,08	0,60	0,72	0,14	0,14	0,28
	Pasta 30	1	0,44	6,62	1,50	1,50	1,04	0,05	0,30	0,67	0,16	0,17	0,33
	Pasta 35	1	0,44	4,76	1,50	1,50	1,04	0,06	0,30	0,62	0,19	0,19	0,38
Consistência constante	Cal 45 CORR	1	0,82	9,60	1,99	1,99	1,09	0,06	0,45	0,72	0,14	0,15	0,28
	Cal 60 CORR	1	1,50	13,10	2,85	2,85	1,14	0,08	0,60	0,71	0,14	0,15	0,29
	Pasta 30 CORR	1	0,44	5,92	1,24	1,24	0,86	0,05	0,30	0,69	0,17	0,14	0,31
	Pasta 35 CORR	1	0,44	4,76	1,06	1,06	0,74	0,06	0,30	0,66	0,20	0,15	0,34

Cimento CP II E 32

Cal CH I

Areia IPT

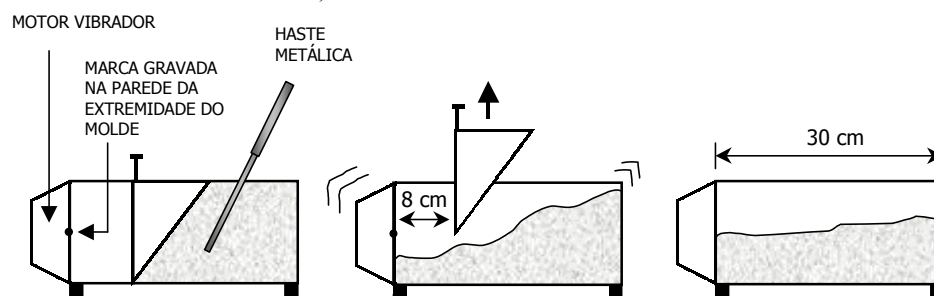
Tabela 5.5 - Composição da argamassa cimento:areia EPUSP

CIMENTO:AREIA			Abatimento (mm)
Proporção em massa (kg)			
Cimento	areia	água	261*
1	5,25	1,04	

5.4 Consistência

A quantidade de água das argamassas estudadas no INSA foi fixada como sendo aquela que proporcionou a trabalhabilidade necessária à aplicação em obra. A determinação da consistência seguiu as normas francesas NF P 18 452 - *Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres* (1988) e NF P 15 437 - *Liants hydrauliques - Technique des essais - Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers* (1987) (DUPAIN, 1995); uma porção de argamassa fresca foi vibrada dentro de um recipiente, tomando-se o tempo que a mistura levou para acomodar-se até atingir uma determinada marca no equipamento de ensaio²³. Quanto mais fluida a argamassa, menor o tempo medido. Foi obtido o tempo de 23 segundos para a consistência da argamassa 1:1:6, com base em experiência anterior, e como sendo aquela de trabalhabilidade necessária ao uso em canteiro de obras e que corresponde, aproximadamente, à consistência de 260 mm

²³ Ensaio de determinação da consistência de argamassas por meio de vibração (normas francesas NF P 18 452 e NF P 15 437):



1 - enchimento do molde com argamassa por apicoamento.

2 - simultaneamente: retirada da parte móvel e início da vibração e contagem do tempo (cronômetro).

3 - parada do cronômetro quando a argamassa atinge a marca na parede do molde.

medida no ensaio da mesa ABNT (NBR 7215/96 - *Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão*).

A **Tabela 5.6** relaciona os nomes das argamassas INSA e as respectivas consistências.

Tabela 5.6 – Consistência das argamassas INSA (NF P 18 452 e NF P 15 437).

Argamassas de relação água/aglomerantes constante	Consistência (segundos)*	Argamassas de consistência constante	Consistência (segundos)*
1:1:6	23	Cal 45 CORR	24
Cal 45	26		
Cal 60	48	Cal 60 CORR	25
Pasta 30	1**	Pasta 30 CORR	23
Pasta 35	1**	Pasta 35 CORR	22

* Média dos resultados de três ensaios para cada argamassa.

** Argamassas muito fluidas. O tempo de 1 s é apenas simbólico, representando a rapidez com que a argamassa fluiu, atingindo a marca do recipiente do equipamento de ensaio quase instantaneamente.

A quantidade de água das misturas com as quais se trabalhou na EPUSP também foi a necessária à obtenção da consistência para aplicação da argamassa em obra. A consistência de 260 ± 5 mm da argamassa 1:1:6 foi obtida na mesa ABNT (**Tabela 5.7**), pelo procedimento de ensaio da NBR 7215/96.

Tabela 5.7 – Consistência das argamassas EPUSP (ABNT NBR 7215/96)

Argamassas de relação água/aglomerantes constante	Consistência Espalhamento mesa ABNT (mm)	Argamassas de consistência constante	Consistência Espalhamento mesa ABNT (mm)
1:1:6	262	Cal 45 CORR	260
Cal 45	239		
Cal 60	209	Cal 60 CORR	258
Pasta 30	> 300*	Pasta 30 CORR	260
Pasta 35	> 300*	Pasta 35 CORR	264

* Argamassas muito fluidas, de consistência não indicada para aplicação como revestimento.

5.5 Condições de cura

Em todos os experimentos as argamassas foram curadas em câmara seca, em ambiente de temperatura 24 ± 1 °C e umidade relativa de 50 ± 5 %.

5.6 Retração no estado fresco

Todos os ensaios desta etapa foram realizados no INSA de Toulouse.

Condições de aplicação das argamassas:

Casos I, II e III, detalhados no capítulo de metodologia. No Caso III, conforme mencionado anteriormente, a argamassa foi aplicada sobre base porosa - bloco cerâmico furado, de textura superficial com ranhuras longitudinais, cujo formato e dimensões estão na **Figura 5.9**.

Umidade do bloco cerâmico na aplicação:

- bloco com 0% de umidade: secagem em estufa a 100 °C durante 24 horas, período após o qual foi obtida constância de massa na secagem;
- bloco com 100% de umidade: imersão em água por 24 horas;
- bloco com 50% de umidade: imersão em água por 5 minutos, tempo extraído da curva de ganho de massa do material por absorção, obtida em laboratório com uma amostra de 6 blocos (**Figura 5.10**).

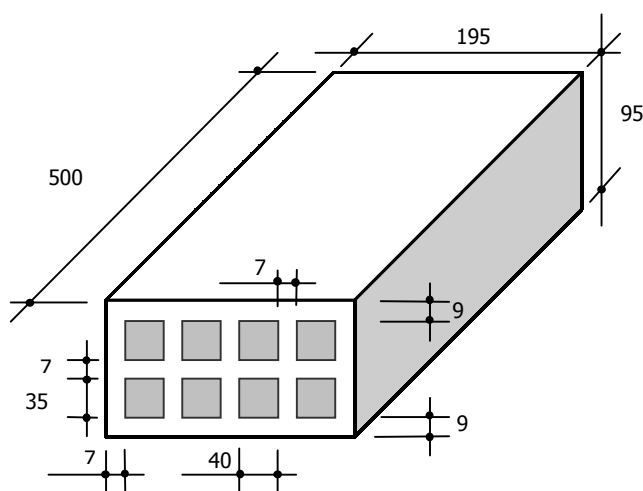


Figura 5.9 - Bloco cerâmico usado como substrato nos ensaios de retração de argamassa no estado fresco – desenho esquemático.

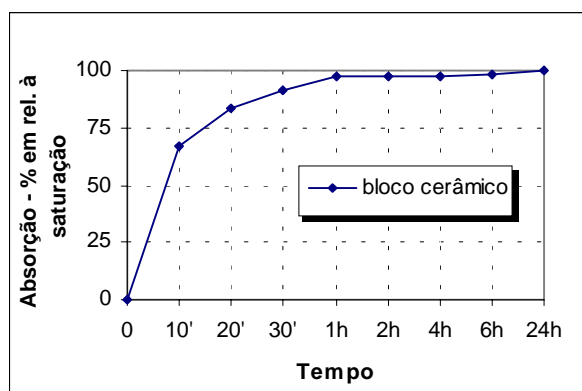


Figura 5.10 – Curva de ganho de massa por imersão em água (média de 6 corpos-de-prova) do bloco cerâmico usado como substrato nos ensaios de retração de argamassa no estado fresco. Quando foi necessário obter a umidade de 50% para a realização de determinados ensaios, foi estabelecido que os blocos seriam imersos em água por 5 minutos (tempo extraído da curva).

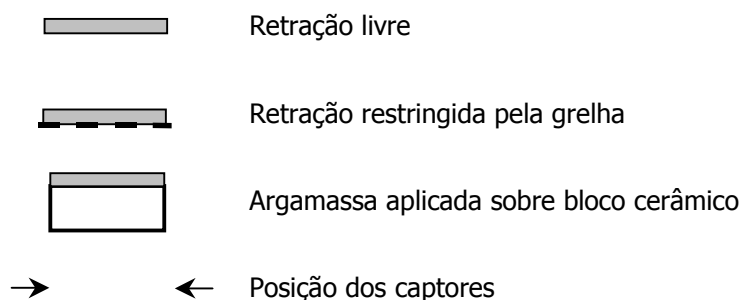
Espessura da camada de argamassa e medida da retração:

Foram adotadas as espessuras de 15 e 25 mm. Para a medida da retração da argamassa de 15 mm, os captos foram posicionados a 5 mm do fundo do molde ou da superfície do bloco (posição M). Na espessura de 25 mm a medida da retração foi realizada em duas posições: a 5 mm do fundo do molde ou da superfície do bloco (posição I), e em uma posição mais próxima da superfície exposta ao ar da argamassa, com os captos a 20 mm do fundo do molde ou da superfície do bloco (posição S).

Ensaio realizados:

A **Tabela 5.8** apresenta todos os ensaios de retração no estado fresco (até 24 horas) realizados, resumindo, para cada caso, a composição da argamassa, a espessura da camada aplicada, a posição dos captos de deformação e o teor de umidade da base.

Tabela 5.8 - Ensaio de retração no estado fresco (até 24 horas) - INSA.





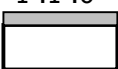
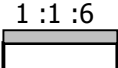
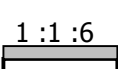
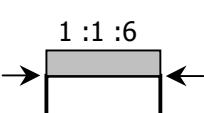
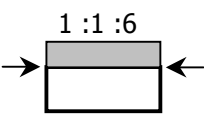
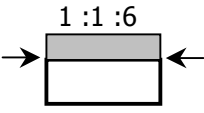
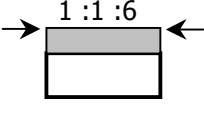
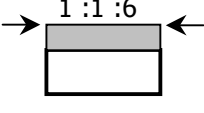
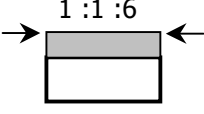
	Composição/ Condição de aplicação	Espessura da camada	Posição dos captore	Teor de umidade da base
1	1 : 1 : 6 	15	M	---
2	Cal 45 	15	M	---
3	Cal 60 	15	M	---
4	Pasta 30 	15	M	---
5	Pasta 35 	15	M	---
6	Cal 45 CORR 	15	M	---
7	Cal 60 CORR 	15	M	---
8	Pasta 30 CORR 	15	M	---
9	Pasta 35 CORR 	15	M	---
10	1 : 1 : 6 	15	M	---
11	1 : 1 : 6 	25	I	---

Tabela 5.8– continuação

12		15	M	0%
13		15	M	50%
14		15	M	100%
15		25	I	0%
16		25	I	50%
17		25	I	100%
18		25	S	0%
19		25	S	50%
20		25	S	100%

5.7 Retração no estado endurecido

As argamassas foram aplicadas sobre base não absorvente (CASO I), em molde de PVC, e as placas desformadas após 24 horas. A medida do comprimento da cada placa foi tomada a cada 24 horas até o 14º dia após a desforma e em intervalos maiores após esta idade.

O formato das argamassas em placa delgada redundou em índice muito alto de perda, por quebra, no manuseio dos corpos-de-prova durante a operação de desmoldagem, por causa da baixa resistência adquirida pelos corpos-de-prova em 24 horas. Optou-se, ainda assim, por manter a desforma após este período, com a intenção de apresentar ao meio técnico uma maneira de observar a retração dando seqüência ao ensaio realizado com a argamassa no estado fresco, onde a observação do fenômeno foi feita até 24 horas. Por este motivo, são apresentados apenas resultados das argamassas *cimento:areia* e *1:1:6*, mais ricas em cimento, com as quais foi possível trabalhar neste tipo de experimento. Para outras argamassas faz-se necessário determinar o tempo adequado de desforma e ampliar o tempo de registro da retração no estado fresco. Desta forma será possível observar as variações dimensionais das argamassas para uma gama maior de composições, dos primeiros minutos após a mistura até idades mais avançadas.

5.8 Retração impedida

Foi analisado o caso de aplicação da argamassa 1:1:6 sobre bloco cerâmico seco, CASO IV de aplicação, em corpos-de-prova em formato de pequenas placas de dimensões 200 mm x 75 mm e espessura de 25 mm. Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneceram em câmara seca (24 °C e umidade relativa 50%)²⁴.

A retração foi calculada de acordo com os seguintes critérios:

- a) leitura da distância entre as pastilhas, imediatamente após sua colagem, nas duas faces de cada corpo-de-prova, até a idade de liberação da grelha. Foram moldados 4 grupos de 8 corpos-de-prova, para liberação da grelha aos 3, 7, 14 e 28 dias;
- b) leitura da distância entre as pastilhas, nas duas faces, 30 minutos após liberação da grelha metálica;
- c) prosseguimento da leitura da distância entre as pastilhas nas duas faces, a cada 24 horas, nos três dias subseqüentes à liberação da grelha e em idades mais avançadas, até 28 dias.

Cada ponto das curvas *retração x tempo* representa, portanto, a média das leituras dos oito corpos-de-prova de cada grupo.

5.9 Tração na flexão e módulo de deformação

Para análise do desempenho das argamassas quanto a propriedades mecânicas foram moldados corpos-de-prova para os casos I e III de aplicação. A **Tabela 5.9** resume os principais parâmetros adotados nos ensaios de flexão, para cálculo da tensão de tração na ruptura e do módulo de deformação das argamassas.

Tabela 5.9 – Parâmetros adotados nos ensaios de flexão

Argamassa	1:1:6	
Formato dos corpos-de-prova (mm)	200 x 75 x 15 200 x 75 x 25	
Sistema de apoio do corpo-de-prova no ensaio	Bi-apoiado, com distância entre os apoios de 160 mm	
Velocidade de carregamento	0,02 kN/minuto	
Equipamento	Prensa marca Instron, com célula de carga de capacidade 1 kN	
Idade de realização dos ensaios	3, 7, 14 e 28 dias	
Teor de umidade do bloco cerâmico (%)	0/ 50/100	Porcentagem de água no bloco em relação à massa de água absorvida após 24 horas em imersão
Número de corpos-de-prova por idade	oito	

5.10 Porosimetria

Os ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio foram realizados com as argamassas misturadas na EPUSP. Foram analisados os casos I (base não absorvente) e

²⁴ Moldes de PVC e procedimento de moldagem: os mesmos dos ensaios de propriedades mecânicas.

III (bloco cerâmico) de aplicação das argamassas 1:1:6, Cal 60 e Cal 60 CORR. No Caso III, variou-se o teor de umidade do bloco cerâmico: 0%, 50% e saturado. Tem-se, portanto, como resultado da combinação dos parâmetros de ensaio, os seguintes casos a serem analisados (**Tabela 5.10**):

Tabela 5.10 – Casos de aplicação de argamassa para análise em ensaios de porosimetria por intrusão de mercúrio

	Argamassa	Base	Teor de umidade da base (%)
1	1:1:6	NÃO ABSORVENTE	-
2	1:1:6	BLOCO CERÂMICO	0
3	1:1:6	BLOCO CERÂMICO	50
4	1:1:6	BLOCO CERÂMICO	100
5	Cal 60	NÃO ABSORVENTE	-
6	Cal 60	BLOCO CERÂMICO	0
7	Cal 60	BLOCO CERÂMICO	50
8	Cal 60	BLOCO CERÂMICO	100
9	Cal 60 Corr	NÃO ABSORVENTE	-
10	Cal 60 Corr	BLOCO CERÂMICO	0
11	Cal 60 Corr	BLOCO CERÂMICO	50
12	Cal 60 Corr	BLOCO CERÂMICO	100

As amostras para o ensaio de porosimetria foram retiradas de corpos-de-prova de argamassa endurecida de dimensões (200 x 75 x 15) mm, moldados segundo o mesmo procedimento descrito para os ensaios mecânicos. Os pequenos pedaços de argamassa provieram de uma posição central das placas de argamassa, partidas manualmente até obtenção de uma amostra de cerca de 1 cm³ (**Figura 5.11**). Para cada argamassa e cada condição de aplicação foram analisadas duas amostras, retiradas de duas placas diferentes.

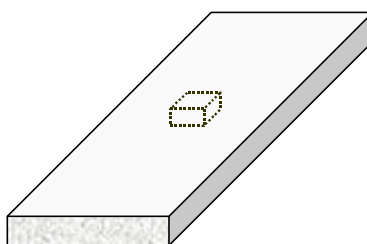


Figura 5.11 - Corpo-de-prova de argamassa, com indicação da posição de retirada da amostra para o ensaio de porosimetria.

Preparo das amostras:

- idade e cura dos corpos-de-prova : 28 dias em câmara seca (24° C e 50% U. R.);
- no 28° dia: retirada das amostras das placas e imersão das amostras em álcool isopropílico;
- permanência das amostras no álcool isopropílico: 20 dias;
- após retirada do álcool: secagem em estufa a 100 °C, a vácuo, por 24 horas;
- após retirada da estufa: embalagem em papel alumínio e armazenagem em dessecador a 20% U.R., até o ensaio no porosímetro por intrusão de mercúrio.

6 . RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Retração no estado fresco

Cada curva apresentada nos gráficos a seguir representa a média das medidas de quatro corpos-de-prova para cada condição, com moldagens de dois corpos-de-prova de cada amassamento. Houve boa reprodutibilidade quanto à superposição das quatro curvas de cada condição (ANEXO D); quando isto não ocorreu, considerou-se que houve falha no procedimento de ensaio e mais dois corpos-de-prova foram moldados, de modo a obter quatro curvas válidas para a análise dos resultados.

a) Argamassa 1:1:6 sobre base não-absorvente:

Todas as argamassas sujeitas apenas à perda de água por evaporação, ou seja, não sujeitas à sucção de água pela base, apresentaram curvas com aspecto semelhante ao da curva da **Figura 6.1**, da argamassa 1:1:6. Houve três estágios principais de deformações: Primeira Retração, ocorrida na primeira hora após a moldagem, com a argamassa no estado fresco, um Período de Estabilização das deformações, e Segunda Retração, após o fim de pega do cimento, com a argamassa no estado endurecido. Foi observada, ainda, uma nítida divisão da Segunda Retração em dois trechos de velocidades de retração bem distintas: o primeiro, entre a 5ª e a 10ª hora de ensaio, aproximadamente, e o segundo, da 10ª hora até o término do ensaio.

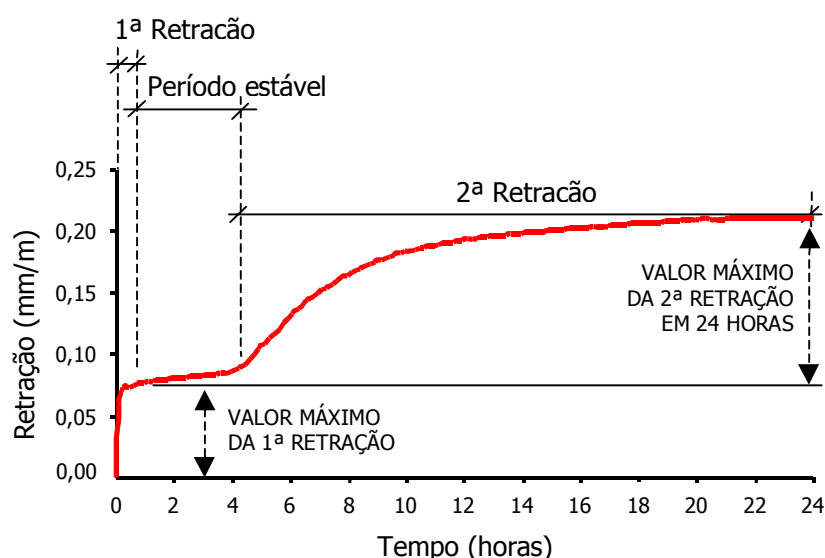


Figura 6.1 – Curva de retração no estado fresco, até 24 horas, de argamassa mista de cimento, cal e areia, proporções 1:1:6 em volume.

A análise dos resultados dos ensaios de todas as argamassas foi realizada agrupando-se determinados casos em um mesmo gráfico, para efeito de comparações. A interpretação do aspecto de uma curva ou grupo de curvas pode ser feita de acordo com a composição das argamassas e condições de aplicação (teor de umidade do substrato e espessura), ou seja, levando-se em conta os parâmetros:

- teor de cal;
- teor de pasta;
- consistência;
- aderência à base (grelha metálica);
- sucção de água pela base;
- teor de umidade da base;
- espessura da camada de argamassa;
- posição dos captores de deformação em relação à interface argamassa/base.

É possível interpretar as curvas, isoladamente ou por conjuntos, considerando, ainda, a influência dos parâmetros mencionados nos seguintes aspectos:

- inclinação da curva (taxa de retração) no trecho correspondente à Primeira Retração, e início e tempo de duração da Primeira Retração;
- valor máximo da Primeira Retração;
- início e tempo de duração do período de estabilização das deformações;
- inclinação da curva (taxa de retração) no trecho correspondente à Segunda Retração, e início e tempo de duração da Segunda Retração, até 24 horas;
- valor máximo da Segunda Retração em 24 horas;

Cada caso ou conjunto de casos, no entanto, é comentado apenas segundo aspectos que foram considerados de maior destaque em virtude da influência deste ou daquele parâmetro.

Foi adotada a unidade mm/m para a retração nos gráficos, prática sob o ponto de vista de ordem de grandeza dos números que daí resultaram, embora em grande parte dos textos sobre retração de pastas, argamassas e concretos seja comum encontrar-se resultados de ensaios expressos em $mm/mm \times 10^{-6}$.

b) Tempos de início e de fim de pega da pasta da argamassa 1:1:6:

São indicados na **Figura 6.2** (retração da argamassa 1:1:6 até 24 horas) os tempos de início e fim de pega da pasta cimento/cal de proporção e consistência iguais às da argamassa 1:1:6, determinados segundo a norma ABNT NBR 11581/91 – *Cimento Portland - Determinação do Tempo de Pega*. O gráfico mostra que a pega da pasta se dá no período de estabilização das deformações, o que permite adotar para a argamassa 1:1:6 desta pesquisa, as conclusões de DÉTRICHÉ (1977) para argamassa de cimento/areia: o fim da Primeira Retração está relacionado com a diminuição da deformabilidade da pasta e o início da Segunda Retração se dá com o material no estado endurecido²⁵.

²⁵ Torna-se necessário o desenvolvimento de um método de ensaio para medida do tempo de pega de **argamassas de revestimento** no nosso meio técnico. O ensaio de tempo de pega do concreto (NBR 9832/92 - *Concreto e argamassa - Determinação dos tempos de pega por meio de resistência à penetração*) mostrou-se inadequado para as argamassas desta pesquisa. O formato e as dimensões do recipiente cilíndrico utilizado no método não permitiram a perda de água por evaporação de forma semelhante à que ocorre com a argamassa quando aplicada como revestimento. Os tempos de início e fim de pega assim obtidos foram demasiadamente longos, em relação ao que realmente ocorre com o material quando aplicado em camada de pouca espessura. DÉTRICHÉ; GRANDÉ (1981) apresentaram um dispositivo que mede o enrijecimento da argamassa de revestimento, adotando o mesmo princípio da Agulha de Vicat.

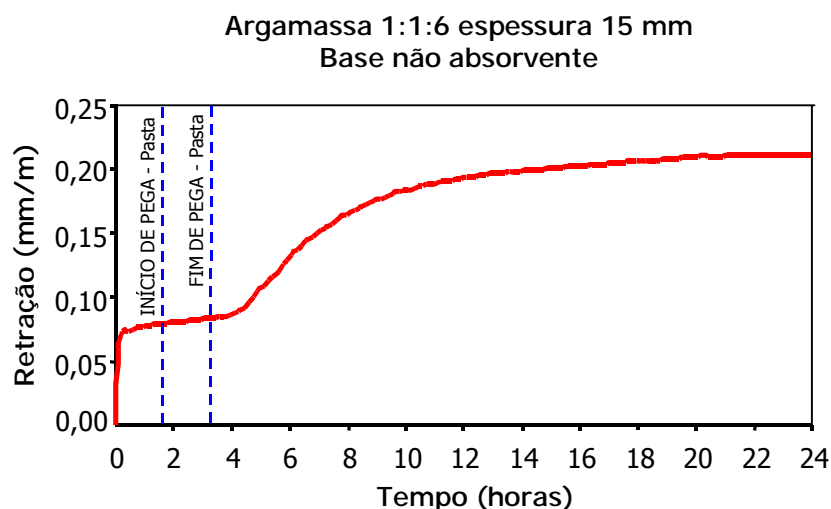


Figura 6.2 – Curva de retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base não absorvente, com indicação dos tempos de início e fim de pega da pasta de cimento e cal de mesma consistência.

c) Argamassas de relação *água/aglomerantes* constante:

c.1) Variação do teor de cal:

As curvas mostram que ao aumento do **teor de cal** correspondeu o aumento tanto da Primeira como da Segunda Retração, devendo-se ressaltar a alteração bem mais acentuada da Segunda Retração (**Figura 6.3**).

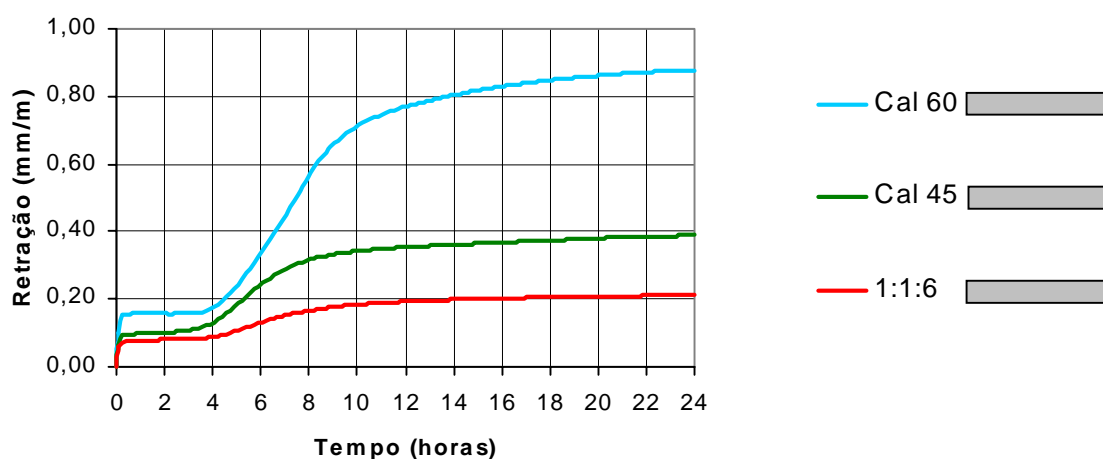


Figura 6.3 – Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

Levando-se em conta a capacidade de retenção de água da cal, o efeito da secagem na retração deveria ser menor, quanto maior o teor deste aglomerante.

As curvas de secagem por evaporação de argamassas cimento/areia e cimento/cal/areia com produtos nacionais, com proporções e consistência muito próximas às das argamassas da **Figura 6.3**, comprovam nitidamente que a adição de cal melhora a retenção de água (**Figura 6.4**).

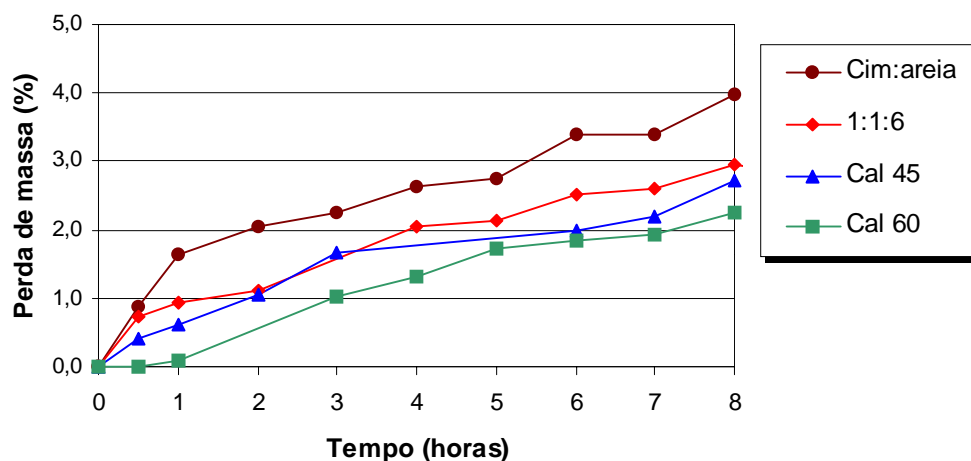


Figura 6.4 – Perda de massa por evaporação de argamassas cimento/areia e cimento/cal/areia - placas (200 x 175) mm e 15 mm de espessura, mantidas a 24 °C e 50% U.R. (ensaio EPUSP).

A discussão, então, dirige-se ao campo da deformabilidade da argamassa e do efeito provocado pela presença da cal na saída de água da mistura. O aumento da relação *cal/cimento* leva à maior capacidade de deformação (menor módulo de deformação) sob uma determinada tensão. Ocasiona também a diminuição dos espaços entre as partículas sólidas da mistura, pela presença de um material de maior finura, de onde a perda de água (a uma velocidade muito próxima para todas argamassas após a primeira hora, na Figura 6.4) se dá com aumento de tensão capilar. Estes dois fatores associados superam, em termos de efeito, a retenção de água da cal, resultando no aumento da retração livre. Em outras palavras, a quantidade de água perdida por evaporação nas primeiras horas, em um dado instante, não é o fator que determina se a retração foi maior ou menor, quando se comparam argamassas de composições diferentes.

Deve ser ressaltado, também, que a variação do teor de cal não interferiu no início do período de estabilização das deformações e nem no seu tempo de duração, que foram praticamente iguais para as três misturas, isto é, de 4 horas (**Figura 6.3**).

c.2) Variação do teor de pasta

Ao ser aumentado o **teor de pasta** das argamassas, mantida a composição da pasta da argamassa 1:1:6, a principal consequência foi, mais uma vez, o aumento da Segunda Retração, como pode ser visto na **Figura 6.5**, que mostra os resultados das argamassas Pasta 30 e Pasta 35, muito próximos, comparados com a argamassa 1:1:6.

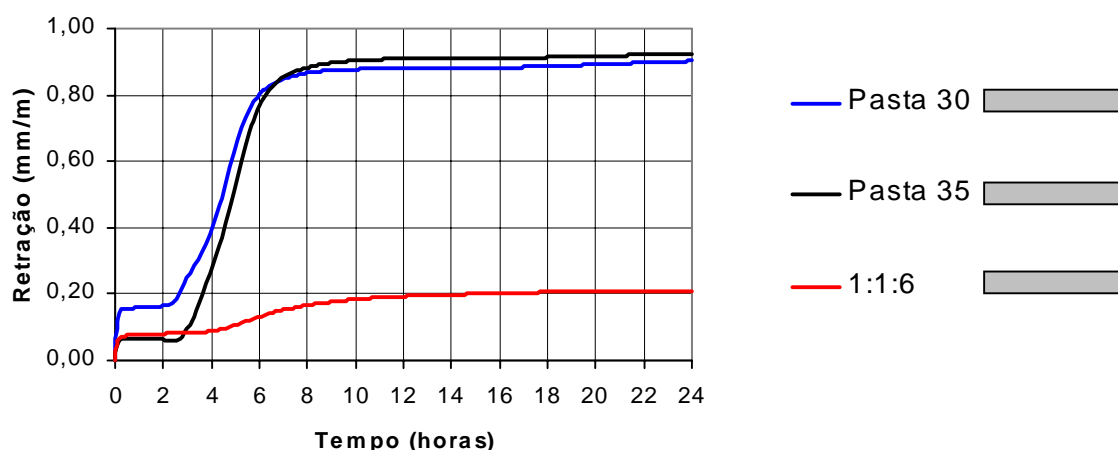


Figura 6.5 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 30 e Pasta 35, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

Os resultados relativos a alterações da quantidade de pasta, de um lado, comprovaram a conhecida influência do seu teor no sentido de tornar a argamassa mais sensível a variações dimensionais. Por outro lado, no entanto, permitiram, para as argamassas mistas aplicadas em camada única, a constatação de que o aumento de retração é observado com muito mais intensidade estando o material no estado endurecido.

d) Argamassas de consistência constante:

A correção da consistência das argamassas Cal 45 e Cal 60, de consistência mais seca, para obtenção da mesma consistência da proporção 1:1:6, foi feita com adição de água, o que fez aumentar ainda mais a Segunda Retração (**Figura 6.6** e **Figura 6.7**), como pode ser observado para as argamassas Cal 45 Corr e Cal 60 Corr. Novamente, a Segunda Retração foi o aspecto das curvas a sofrer maior mudança com a variação da composição de cada argamassa.

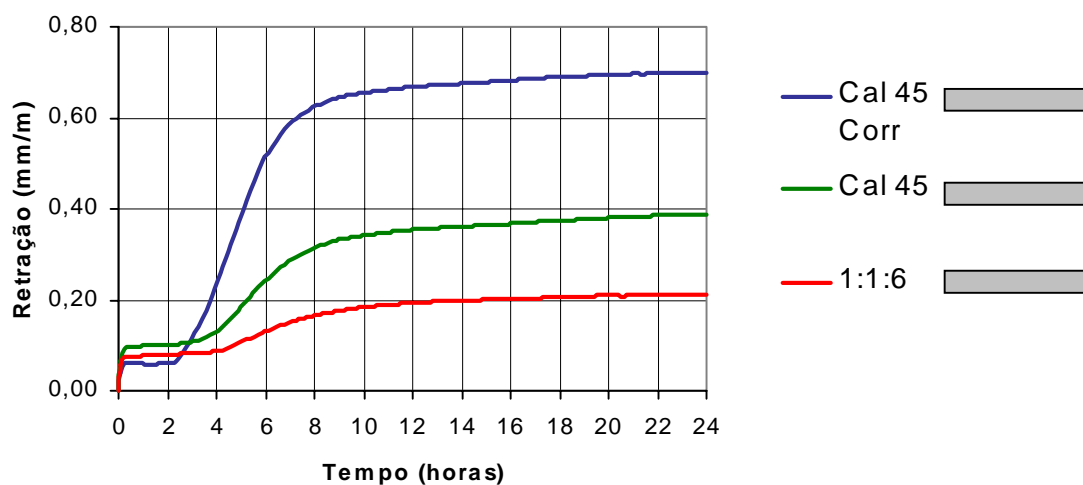


Figura 6.6 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 45 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

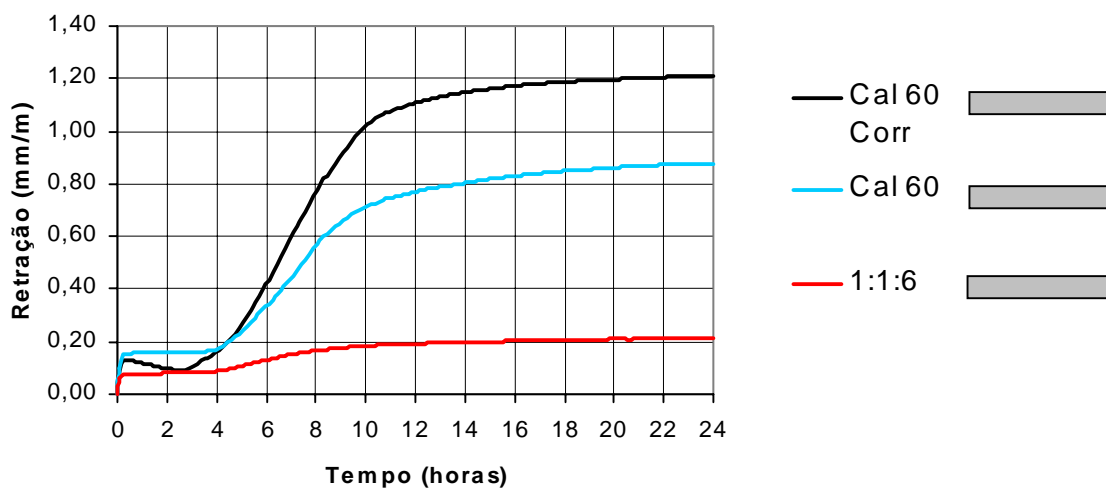


Figura 6.7 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 60 e Cal 60 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

Para a correção da consistência das argamassas Pasta 30 e Pasta 35, de consistência mais fluida, por outro lado, a diminuição do consumo de água teve como consequência uma considerável diminuição da Segunda Retração (Figura 6.8 e Figura 6.9) que, ainda assim, continuou sendo maior do que a ocorrida na argamassa 1:1:6. Isto quer dizer: independentemente da consistência da argamassa, o aumento da quantidade de pasta provocou aumento da Segunda Retração.

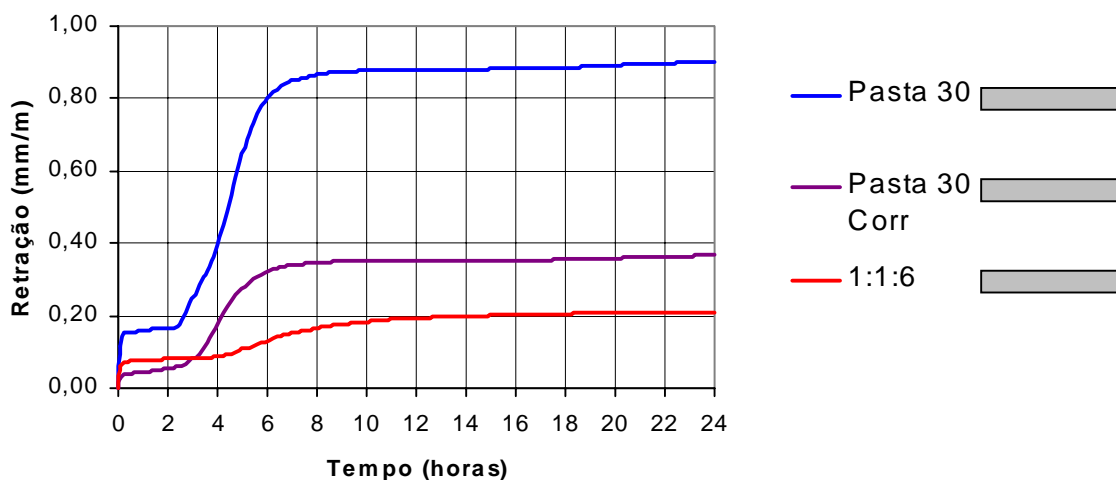


Figura 6.8 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 30 e Pasta 30 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

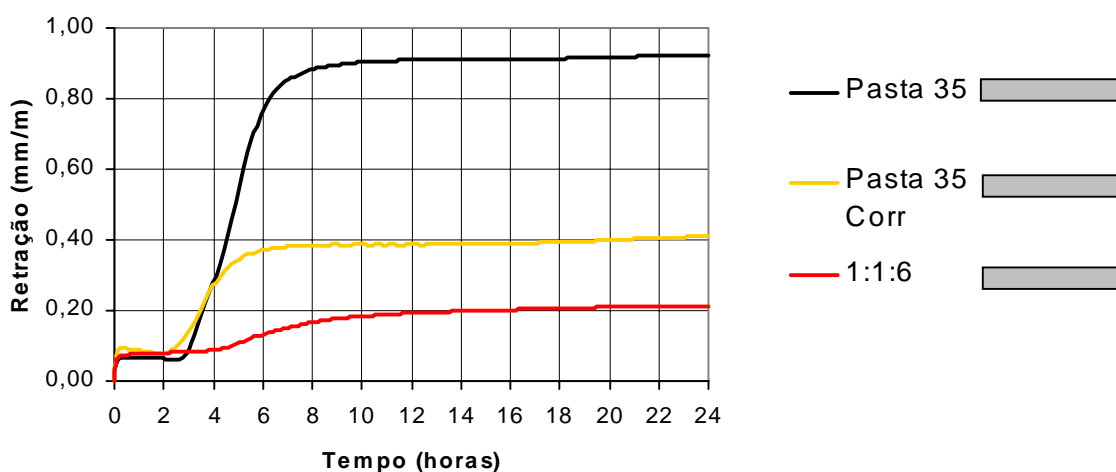


Figura 6.9 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Pasta 35 e Pasta 35 Corr, aplicadas sobre base não-absorvente (INSA).

e) Argamassa 1:1:6 aplicada sobre base não-absorvente com grelha metálica – ensaio de retração impedida:

O ensaio realizado com a grelha metálica posicionada sobre o fundo de aço do molde teve como principal consequência uma mudança muito significativa no aspecto da curva de retração livre, coincidente com a diminuição da capacidade de deformação da argamassa. Durante o período em que a mistura esteve no estado fresco, ou seja, antes do início de pega da pasta, a mobilidade das partículas sólidas da mistura fez com

que a argamassa 1:1:6 tivesse o mesmo desempenho ocorrido no ensaio de retração livre, com a Primeira Retração evoluindo de maneira idêntica quanto à velocidade e valor máximo atingido. A partir da diminuição de deformabilidade, no entanto, não foi captada mais nenhuma deformação importante, resultado que pode ser traduzido como não-ocorrência ou impedimento da Segunda Retração - **Figura 6.10**.

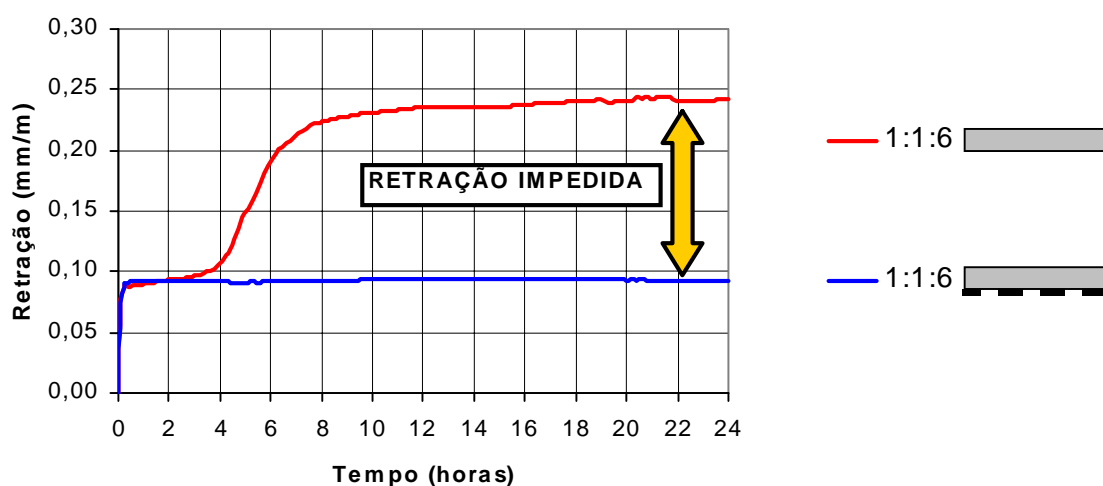


Figura 6.10 – Retração impedida – ensaio de retração da argamassa 1:1:6 no estado fresco, até 24 horas, aplicada sobre base não-absorvente com grelha metálica (INSA).

Deste resultado depreendeu-se: em base não-absorvente, enquanto existiu mobilidade entre as partículas sólidas da mistura, a deformação da argamassa ocorreu de forma independente do tipo de superfície onde esteve aplicada - se lisa ou de natureza propícia à adesão. A influência do tipo de base ficou ressaltada apenas depois do enrijecimento da argamassa, após o fim de pega da pasta, revelando a fase da evolução das deformações em que ocorreu o impedimento da retração.

Este experimento permitiu observar, levando-se em conta o efeito da aderência na Segunda Retração, a partir de que ponto da curva *Retração x Tempo* tornam-se mais importantes avaliações a respeito da fissuração. Antes da pega da pasta, o nível de tensões gerado pela retração não oferece risco quanto a este aspecto, uma vez que o material possui um grau de deformabilidade em virtude do qual a livre deformação não é impedida pela aderência à base.

f) Argamassa 1:1:6 aplicada sobre base absorvente (bloco cerâmico):

f.1) Efeitos da aderência ao bloco cerâmico e da sucção de água de amassamento:

Destaca-se, ao iniciar as discussões sobre a influência de base porosa nas deformações sofridas pela argamassa, o efeito da aderência ao bloco. Na **Figura 6.11** pode-se notar que o perfil da curva da argamassa 1:1:6 aplicada sobre o bloco cerâmico é semelhante ao da argamassa aplicada sobre a grelha metálica, no que diz respeito à ausência da Segunda Retração. Esta semelhança de aspecto permitiu comprovar a eficiência do uso da grelha metálica para investigação do desempenho do revestimento quando sujeito ao impedimento de deformações. Guardadas as diferenças entre os dois tipos de superfície onde foi aplicada a argamassa, houve, nos dois casos, restrição da retração a partir da perda de deformabilidade material. Este enrijecimento pode acontecer mais cedo ou mais tarde, de acordo com as quantidades de aglomerantes, da relação água/aglomerantes inicial, do tipo de cimento ou da intensidade com que a água é succionada pela base.

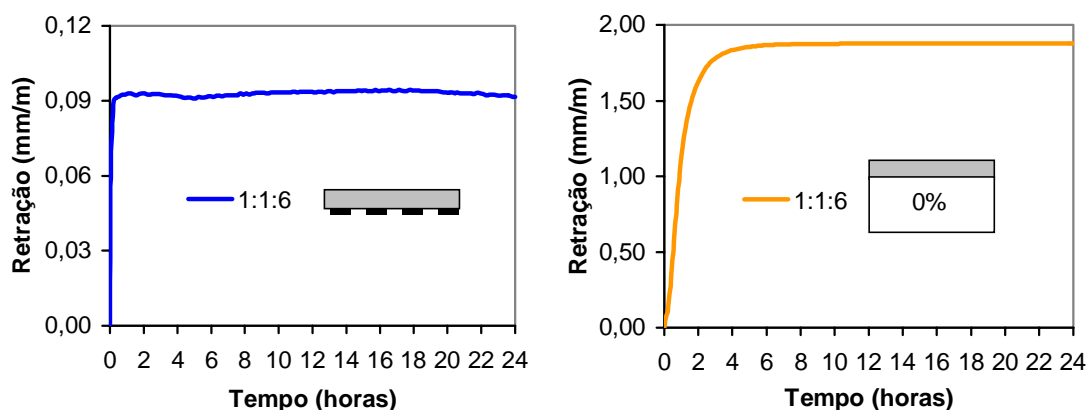


Figura 6.11 – Retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada sobre o fundo de aço do molde, com grelha metálica, e sobre bloco cerâmico seco em estufa (INSA).

Quanto ao valor de retração registrado, houve uma diferença altamente significativa entre a retração observada no caso de argamassa aplicada sobre base não-absorvente, aderida à grelha metálica, e a retração que ocorreu na moldagem sobre o bloco cerâmico. A **Figura 6.12** destaca que a retração da argamassa submetida à sucção pelo bloco seco em estufa por 24 horas foi cerca de 20 vezes maior no patamar em que

as deformações se estabilizaram, bloqueadas pela aderência, após a quinta hora de ensaio. Destaca-se também a inclinação desta mesma curva enquanto houve aumento de retração: a sucção fez com que a velocidade de retração permanecesse elevada e constante até cerca de duas horas após o início do ensaio.

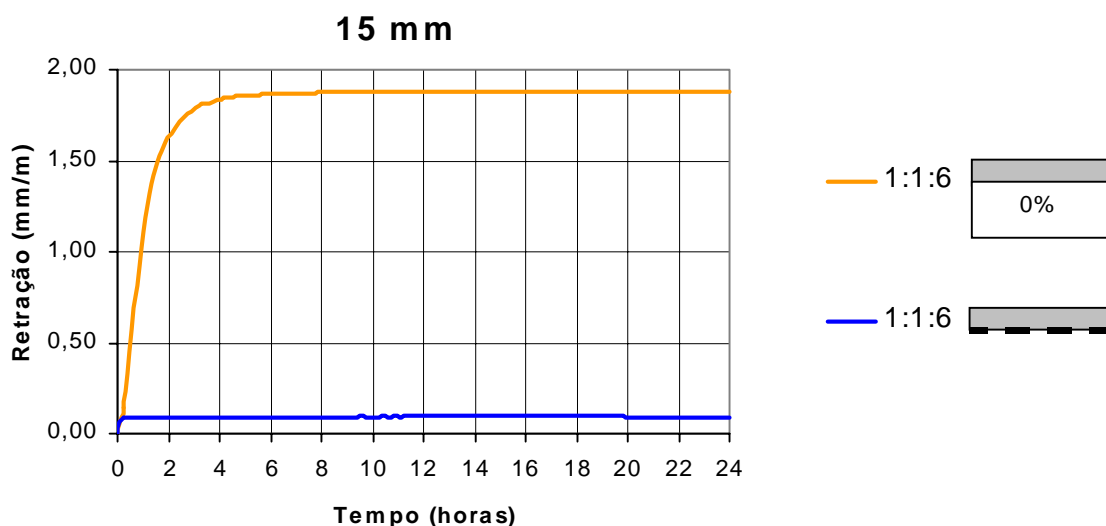


Figura 6.12 – Retração no estado fresco, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada sobre o fundo de aço do molde, com grelha metálica, e sobre bloco cerâmico seco em estufa (INSA).

O desempenho quanto à velocidade e tempo de duração da Primeira Retração pode ser interpretado sob dois pontos de vista diferentes para a argamassa aplicada sobre o bloco seco: a) o da interação argamassa/base, dependente das características dos materiais, como a distribuição dos tamanhos dos poros da base e a composição da argamassa; b) o da perda de deformabilidade da argamassa.

Interação argamassa/base:

A capacidade de retenção de água da argamassa assume maior importância quando há interação argamassa/base, onde a sucção da fase líquida tem efeito completamente diferente ao da evaporação. A evaporação continua a ocorrer, mas o contato da argamassa a uma base porosa como o bloco cerâmico para alvenaria dá à sucção o papel mais importante na secagem do revestimento, na maioria dos casos. De maneira geral, pode-se dizer que a retenção de água é maior em argamassas com maior teor de cal, independentemente da forma como é realizada a sucção – o ensaio da norma da ABNT NBR 13 277/95 - *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento*

de paredes e tetos - Determinação da retenção de água, por exemplo, usa um conjunto de discos de papel-filtro de gramatura conhecida com esta finalidade. Mas a sucção pode ser provocada de outras formas: em experimento realizado nesta pesquisa, foi registrada a quantidade de água retida na argamassa após 30 minutos de contato com um bloco cerâmico. As argamassas EPUSP, de composições, proporções em massa e consistência muito próximas às das argamassas INSA, foram moldadas em camada única de (200 x 175) mm e 15 mm de espessura sobre bloco cerâmico. No experimento, uma folha plástica foi previamente posicionada sobre o bloco e retirada no instante do início da contagem de tempo, 5 minutos depois do término da mistura na argamassadeira, para que toda a extensão da camada pudesse entrar em contato com a base ao mesmo tempo e de forma homogênea. A camada foi adensada com 45 golpes de soquete metálico espalhados uniformemente; o conjunto *bloco/forma/argamassa fresca* foi levado em seguida a uma mesa vibratória (tempo de vibração igual a 1 minuto, em 70 Hz). Durante os 30 minutos de contato da argamassa com a base, após o adensamento, o conjunto permaneceu em ambiente com 24 °C e 50% U.R., sujeito à perda de água por evaporação. Os resultados da **Figura 6.13** representam a média de duas moldagens para cada argamassa e mostram nitidamente a melhoria da capacidade de retenção de água das argamassas com o aumento do teor de cal, tendência de ambos os grupos de relação *água/aglomerantes* constante e de consistência constante.

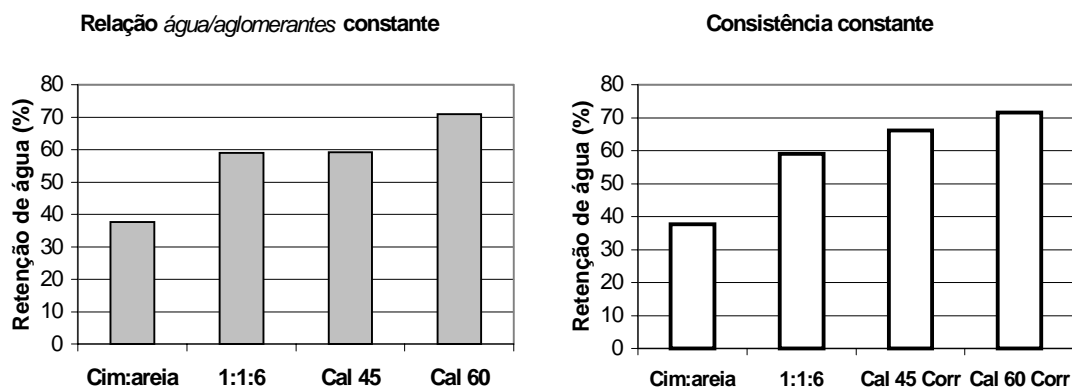


Figura 6.13 - Retenção de água (porcentagem da massa de água retida na argamassa em relação à massa de água original da mistura antes da sucção) em argamassas de cimento e areia e de cimento, cal e areia, moldadas sobre bloco cerâmico (bloco furado, absorção inicial - IRA - 14,65 g/ 30 pol², ensaio realizado na face lisa do bloco onde se aplica normalmente o revestimento) – ensaio EPUSP.

Foi observada a retração no estado fresco das argamassas EPUSP de relação água/aglomerantes constante 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico seco. As curvas da **Figura 6.14** mostram a mesma tendência dos resultados dos ensaios sobre base não absorvente: a retração aumentou com o aumento do teor de cal. Também nesta condição de aplicação, o efeito da tensão capilar, maior devido à adição de partículas finas na mistura fresca, superou o efeito da retenção de água da cal.

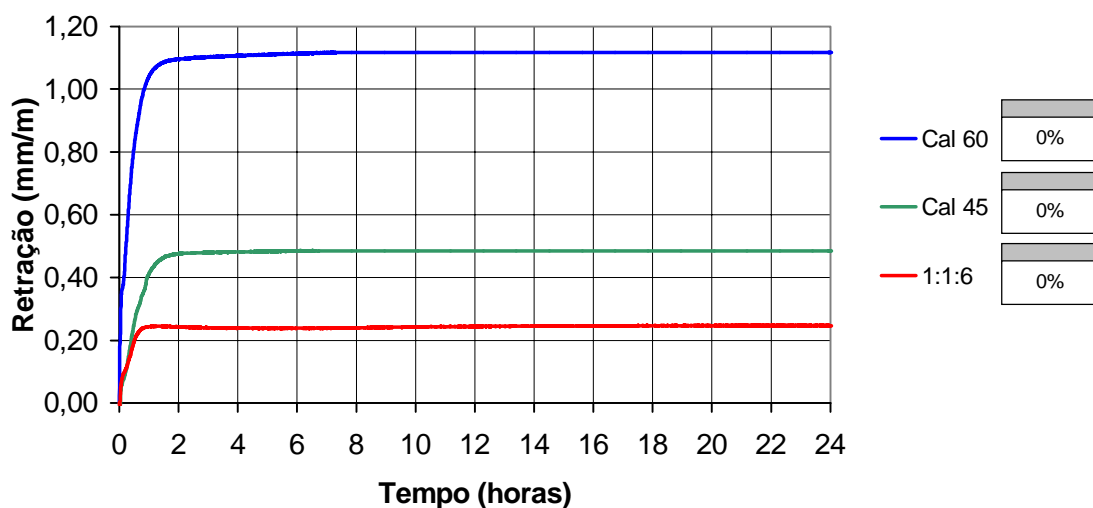

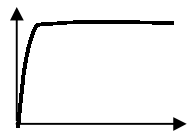




Figura 6.14 - Retração no estado fresco, até 24 horas, das argamassas 1:1:6, Cal 45 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico com teor de umidade 0% (ensaio realizado na EPUSP).

Deformabilidade da argamassa:

O enrijecimento da argamassa, ligado aos tempos de início e fim de pega da pasta, depende, entre outros fatores, da quantidade de água disponível a cada instante para a hidratação do cimento, do tipo de cimento e das proporções da mistura. Caso a sucção se efetue muito rápida e intensamente, o adensamento mecânico da mistura logo nos primeiros minutos de aplicação da argamassa torna-se o fator mais importante no seu enrijecimento. A **Tabela 6.1** mostra quatro aspectos da curva de retração que, supõe-se, possam ocorrer no trecho antes da estabilização das deformações, de acordo com a intensidade da sucção exercida pela base e com a pega da pasta. Apontam-se também características da base e dos aglomerantes que possivelmente influenciam no aspecto das curvas.

Tabela 6.1 – Análise dos aspectos possíveis da curva de retração da argamassa no estado fresco, até 24 horas, aplicada sobre base absorvente, em função da intensidade da sucção de água e da pega da pasta.

ASPECTO DA CURVA DE RETRAÇÃO ANTES DO PATAMAR DE ESTABILIZAÇÃO	SUCÇÃO	PEGA DA PASTA	CARACTERÍSTICAS DA BASE E DOS AGLOMERANTES	
Muito inclinada Valor máximo atingido pequeno		Forte	Rápida	Base muito porosa ou com maior concentração de poros grandes* Aglomerante de pega rápida
Muito inclinada Valor máximo atingido elevado		Forte	Normal	Base muito porosa ou com maior concentração de poros grandes* Aglomerante de pega normal
Pouco inclinada, Valor máximo atingido pequeno		Fraca	Rápida	Base pouco porosa ou de distribuição uniforme dos tamanhos de poros Aglomerante de pega rápida
Pouco inclinada, Valor máximo atingido elevado		Fraca	Normal	Base pouco porosa ou de distribuição uniforme dos tamanhos de poros Aglomerante de pega normal

* Desde que participantes do mecanismo de sucção (raio menor que o raio médio dos capilares da argamassa).

f.2) Efeito do teor de umidade da base:

A **Figura 6.15** apresenta a retração ocorrida até 24 horas na argamassa 1:1:6, aplicada sobre bloco cerâmico com teores de umidade 0%, 50% e 100%, em camada única de espessura 15 mm. A observação das três curvas permite constatar a importância do teor de umidade da base no valor de retração ocorrida até o patamar de estabilização. O bloco saturado, por estar com os poros preenchidos com água no momento da moldagem, não exerceu sucção de água sobre a argamassa - a mínima retração visível no gráfico ocorreu por conta da evaporação. O bloco seco exerceu sucção intensa de água, conforme pode ser observado pela inclinação da curva nas duas primeiras horas de ensaio, enquanto a impregnação do bloco com 50% da quantidade de água absorvida na saturação resultou em sucção mais branda, cujo efeito foi o de tornar a curva de retração menos inclinada até a estabilização das deformações. No caso do bloco seco a estabilização das deformações se deu por um dos dois seguintes fatores, ou por ambos ao mesmo tempo: a) paralisação do fluxo de água da argamassa para a base (esgotamento da água disponível); b) pega da argamassa. Uma conclusão mais precisa a este respeito depende do estudo da pega da argamassa aplicada como revestimento. Quanto à aplicação sobre o bloco com 50% de umidade, uma vez que a perda de água foi lenta neste caso, a estabilização parece ter ocorrido devido à diminuição de deformabilidade da argamassa.

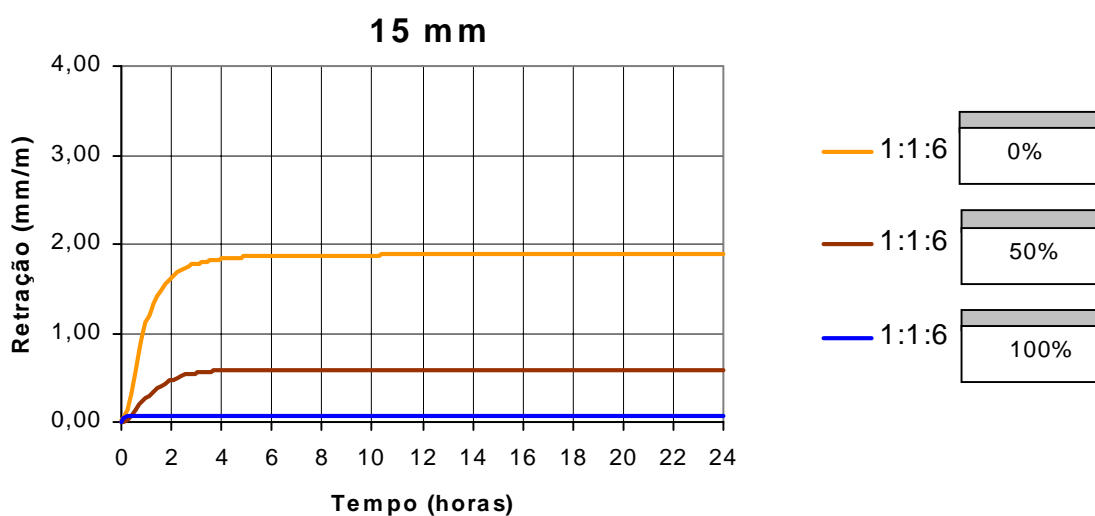


Figura 6.15 – Retração, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 15 mm sobre bloco cerâmico com diferentes teores de umidade (INSA).

A influência do teor de umidade da base sobre a retração ocorreu de forma semelhante para a argamassa aplicada em camada de 25 mm, podendo-se observar, no entanto, na **Figura 6.16**, que o valor atingido pela retração foi maior, neste caso, tanto na aplicação da argamassa sobre o bloco seco, como sobre o bloco com 50% de umidade. Este resultado não pode ser considerado representativo da camada de argamassa como um todo, senão para a região mais próxima da interface argamassa/base, onde foram posicionados os captadores de deformação, a 5 mm da superfície do bloco cerâmico.

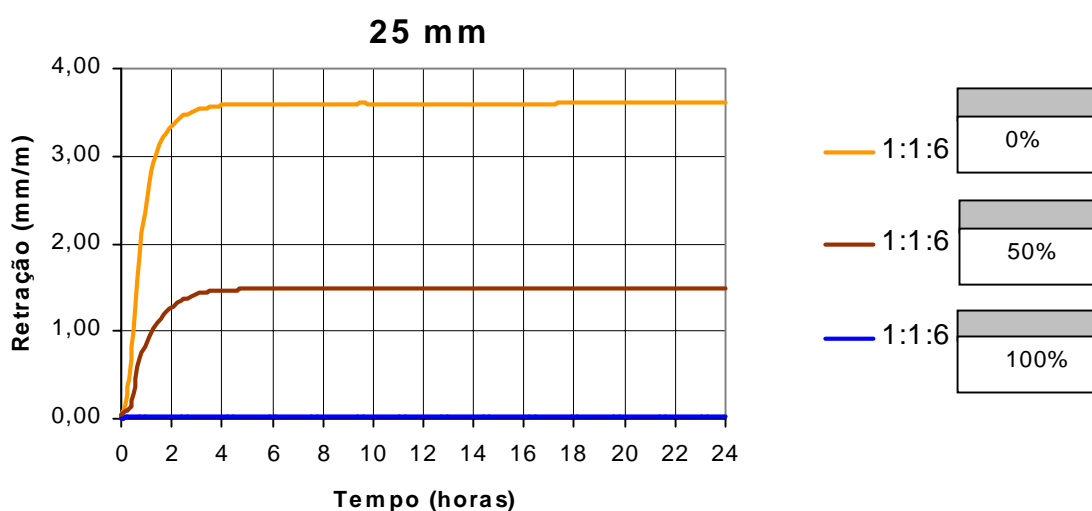


Figura 6.16 - Retração, até 24 horas, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm sobre bloco cerâmico com diferentes teores de umidade (INSA).

g) Influência da espessura da camada de argamassa:

A espessura da camada de argamassa foi variada em laboratório em função do que ocorre freqüentemente em obra na aplicação da argamassa de revestimento. Não só a estrutura das edificações pode apresentar falta de prumo, como também a alvenaria pode estar imperfeita quanto aos quesitos planeza e prumo, obrigando a aplicação da argamassa com espessuras diferentes de um ponto ao outro do sistema de revestimento, para corrigir falhas em etapas anteriores da construção.

A seguir são comparados os casos de argamassa 1:1:6 aplicada em camada de espessuras 15 e 25 mm, sobre base não absorvente e sobre bloco cerâmico com teores de umidade diferentes.

g.1) Base absorvente:

Vale lembrar que o desempenho do revestimento quanto à retração é diferenciado em planos da argamassa mais próximos ou mais distantes da interface argamassa/base. Por este motivo, como as medidas de retração deste conjunto de ensaios foram tomadas a 5 mm da interface, os resultados não podem ser considerados representativos para a espessura da camada como um todo, mas somente para o plano que contém os captadores de deformação.

Aplicando-se a argamassa sobre bloco cerâmico seco, observou-se que a retração ocorrida até a estabilização foi maior na camada de 25 mm do que na de 15 mm.

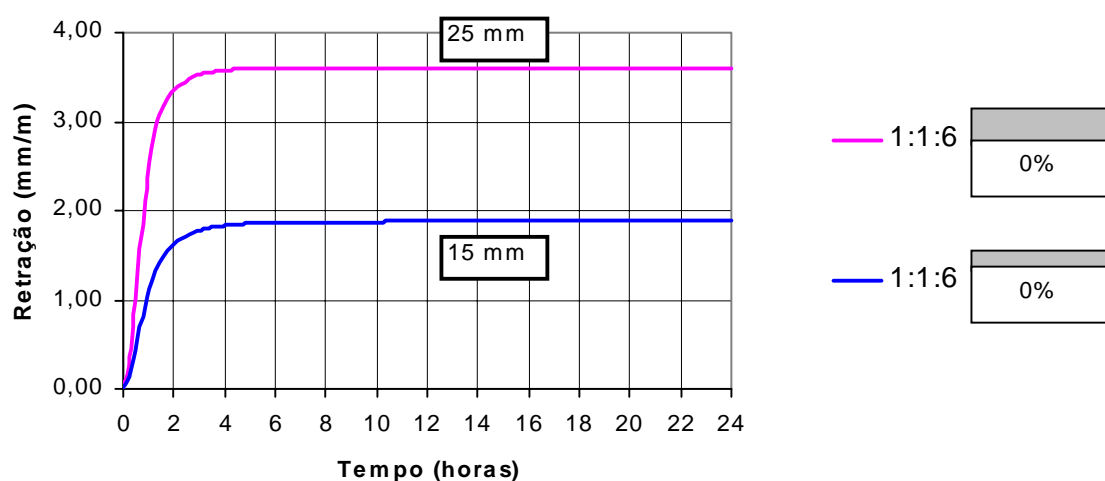


Figura 6.17 – Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm, sobre bloco cerâmico seco (INSA).

Da análise das curvas pode-se comentar:

- a perda de água ocorreu predominantemente na direção argamassa-base, pelo fato de que a sucção ocorreu, para as condições do ensaio, de maneira bem mais rápida e intensa do que a evaporação;
- a estabilização das deformações pode ocorrer: a) pelo enrijecimento da argamassa devido ao fim do fluxo de água argamassa-base, isto é, pelo esgotamento da água disponível para sucção – fenômeno físico, ou b) pelo enrijecimento devido à pega da pasta – fenômeno químico;

- considerando que o início do patamar de estabilização se deu ao mesmo tempo para as duas espessuras, o fato de a retração ter sido maior para a camada de 25 mm indica que a velocidade de retração foi maior para a camada mais espessa, o que pode ser confirmado visualmente pela inclinação das duas curvas. No entanto, justificar este fato afirmando que houve sucção mais rápida para a camada mais espessa não é uma explicação plausível, já que as bases, nos dois casos, eram de mesma natureza;
- resta a hipótese de que a diferença de velocidade de retração encontrada nas duas curvas deu-se por causa do enrijecimento mais rápido da camada de 15 mm, por um dos seguintes dois motivos: ou o tempo de início de pega da argamassa foi menor (fenômeno químico) ou a sucção teria causado um maior aperto mecânico entre as partículas sólidas da camada menos espessa de argamassa (fenômeno físico).

O mesmo raciocínio é válido para a argamassa aplicada sobre bloco com 50% de umidade nas espessuras 15 e 25 mm (**Figura 6.18**).

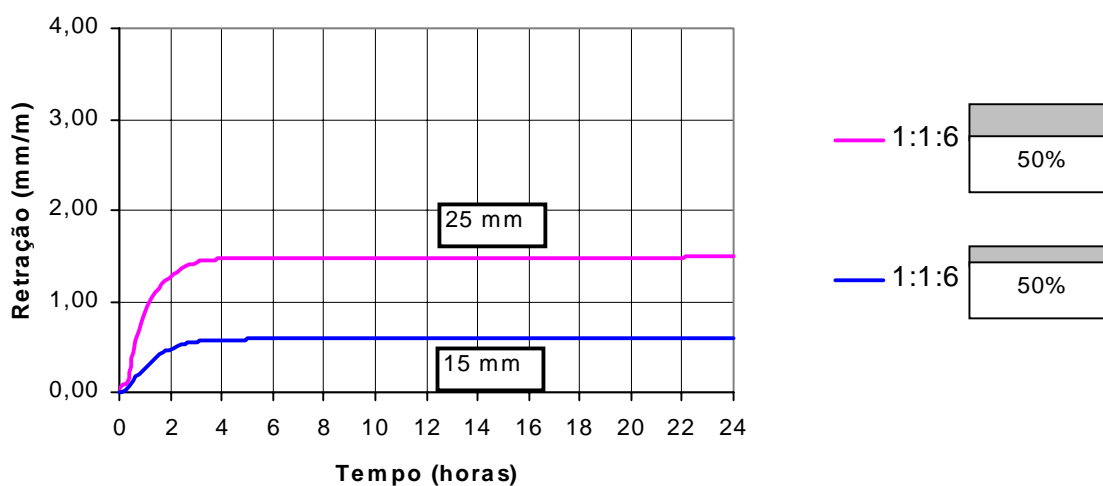


Figura 6.18 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre bloco cerâmico com teor de umidade 50% (INSA).

A aplicação da argamassa sobre o bloco saturado resultou na inversão da posição das curvas de retração para as camadas de 15 e 25 mm: antes do patamar de estabilização, o valor de deformação atingido foi maior para a camada de 15 mm (**Figura 6.19**). Torna-se importante lembrar que a retração foi medida em um plano

mais próximo da interface argamassa/base do que da superfície livre da argamassa, e que o sentido do fluxo de água ao sair do corpo-de-prova inverteu-se, pois o fenômeno predominante foi o da evaporação. A retração, portanto, tendo ocorrido inicialmente na superfície livre da argamassa, foi-se transferindo progressivamente para a região mais próxima do bloco, por conta do avanço da frente de evaporação nos capilares da mistura fresca. A frente de evaporação, ao atravessar a camada de 25 mm, chegou à interface argamassa/bloco mais tardiamente do que no caso da camada de 15 mm e, provavelmente, por ser lento seu avanço, a pega da argamassa e a conseqüente diminuição de deformabilidade aconteceram antes que pudessem ser registradas deformações no plano dos captadores, com a argamassa ainda fresca. Daí o fato de a retração registrada para a camada de 25 mm ter sido menor na Figura 6.19.

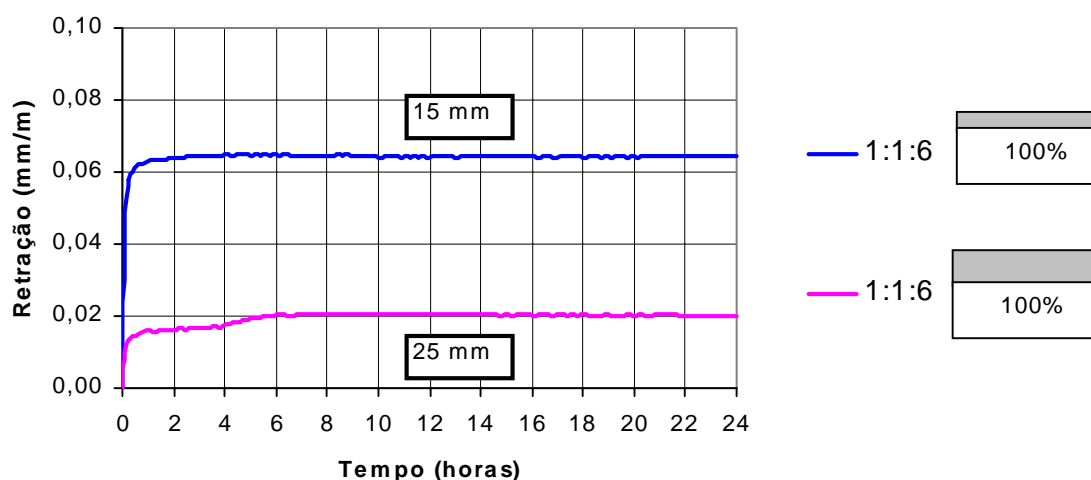


Figura 6.19 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre bloco cerâmico saturado (INSA).

g.2) Base não absorvente:

As observações feitas para a argamassa aplicada em espessuras diferentes sobre o bloco saturado (sem haver sucção de água) puderam ser confirmadas em aplicação semelhante, com a argamassa sobre base não absorvente e grelha metálica, como mostra a **Figura 6.20** – o valor máximo atingido antes do patamar de estabilização foi maior na camada de 15 mm do que na de 25 mm.

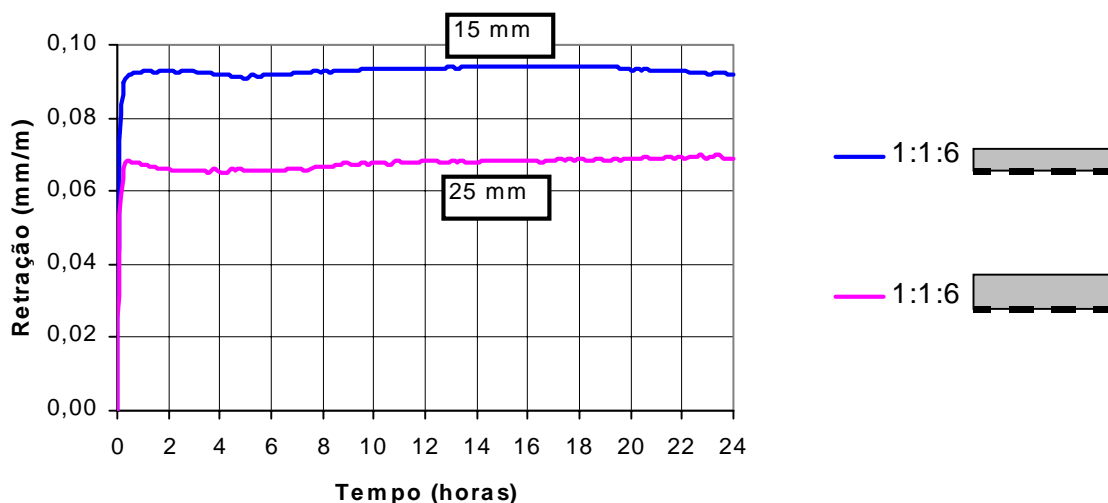


Figura 6.20 - Retração de argamassa 1:1:6 até 24 horas, aplicada em camadas de 15 e 25 mm sobre base não-absorvente e grelha metálica (INSA).

A partir das primeiras constatações decorridas da comparação da retração em camadas de argamassa de espessuras diferentes, tornou-se imperioso o estudo do fenômeno posicionando-se os captores em diferentes planos paralelos à interface argamassa/base.

h) Retração na superfície livre da argamassa e na interface argamassa/base:

Os gráficos a seguir mostram a retração ocorrida até 24 horas, na superfície e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico com três teores de umidade.

Com a argamassa aplicada sobre bloco seco percebeu-se, pela observação da **Figura 6.21**, que o efeito da sucção foi igual na interface e na superfície no início do ensaio, e que a retração estabilizou-se, em ambas as curvas, aproximadamente 2 horas após a moldagem. A estabilização, no entanto, ocorreu em patamares diferentes, atingindo valor mais alto na interface. Tal desempenho pode ser explicado pelo fato de que o fluxo de água no sentido argamassa-base encerrou-se mais tarde na região mais próxima ao bloco, com a última porção de água fornecida pela região mais próxima à superfície livre, e que havia, até este momento, deformabilidade suficiente na argamassa para permitir que a retração prosseguisse por depressão capilar. Na superfície, ao contrário, os espaços entre as partículas sólidas tornaram-se vazios mais cedo, pela

soma dos efeitos da sucção e da evaporação, interrompendo o efeito de depressão capilar.

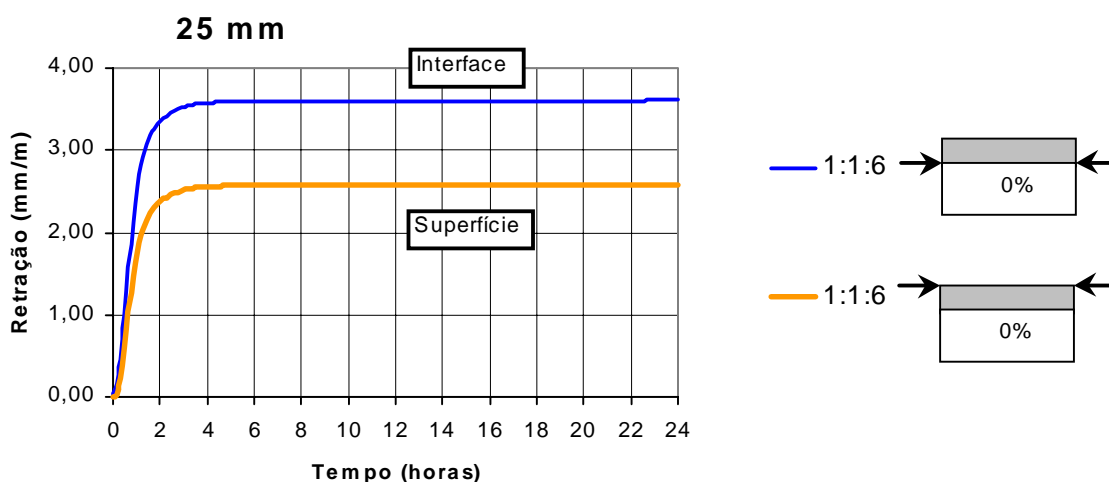


Figura 6.21 – Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico seco (INSA).

A Figura 6.22 mostra, esquematicamente, três estágios da perda de água da argamassa por sucção e evaporação, e o efeito de retração causado no corpo-de-prova sobre o bloco seco. O impedimento da retração na superfície, acredita-se, foi ocasionado pela soma de dois mecanismos: fim do fluxo de água argamassa-base e diminuição da deformabilidade da argamassa.

ARGAMASSA 1:1:6 APLICADA SOBRE BLOCO CERÂMICO SECO – ESPESSURA 25 mm

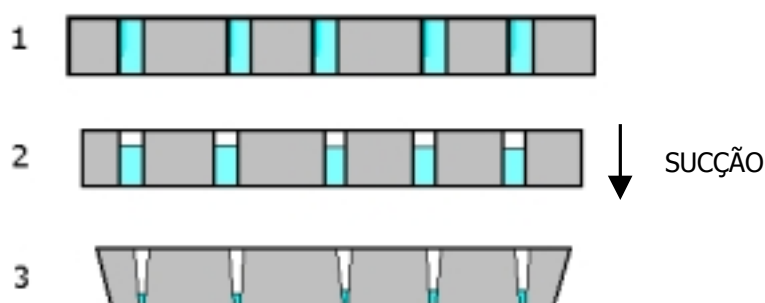


Figura 6.22 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico seco e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.

Com a aplicação da argamassa sobre o bloco cerâmico com 50% de umidade houve equilíbrio na perda de água por evaporação e por sucção, e uma conseqüente uniformidade na retração ocorrida na superfície e na interface argamassa/base. O valor

atingido até a estabilização, no entanto, foi inferior ao do caso anterior, nas duas curvas, por estarem os poros da base parcialmente preenchidos com água antes do ensaio (Figura 6.23).

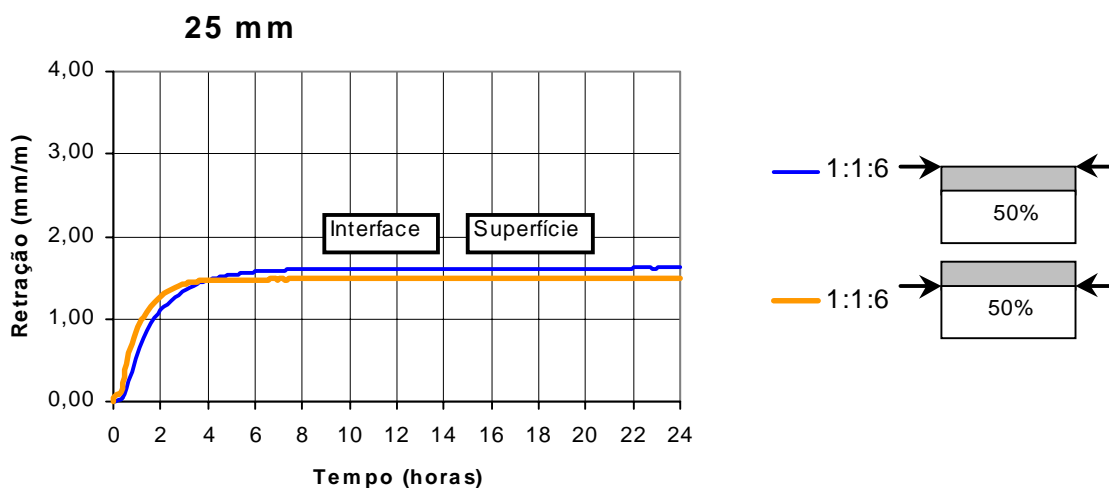


Figura 6.23 - Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico com teor de umidade 50% (INSA).

A **Figura 6.24** mostra, esquematicamente, três estágios da perda de água da argamassa por sucção e evaporação, e o efeito de retração causado no corpo-de-prova sobre o bloco com teor de umidade 50%.

ARGAMASSA 1:1:6 APLICADA SOBRE BLOCO CERÂMICO COM 50% DE UMIDADE – ESPESSURA 25 mm

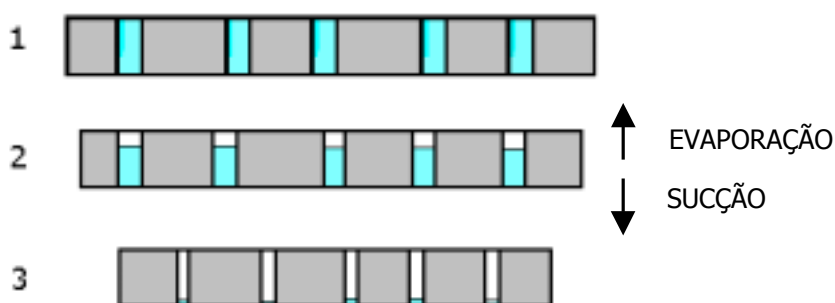


Figura 6.24 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico com 50% de umidade e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.

O resultado do ensaio de retração com a base pré-umedecida mostrou que é possível obter-se, para um determinado tipo de argamassa, equilíbrio nas deformações do revestimento ao longo da espessura da camada aplicada. Este equilíbrio, função da quantidade de água perdida por evaporação e por sucção, depende de condições de

aplicação e exposição da argamassa, como espessura da camada, características da base, temperatura e umidade relativa do ar.

Com a aplicação da argamassa sobre o bloco saturado, tanto o fenômeno de perda de água quanto a posição das curvas se inverteram: a retração maior ocorreu na superfície, com o fluxo de água ocorrendo no sentido argamassa-superfície, por causa da evaporação e pelo fato de praticamente não ter havido sucção - os poros da base estavam preenchidos com água (**Figura 6.25**). O valor alcançado pela retração até o patamar de estabilização foi inferior aos valores dos dois casos precedentes - como a perda de água por evaporação ocorre lentamente, prevaleceu o impedimento da retração causado pela aderência à base.

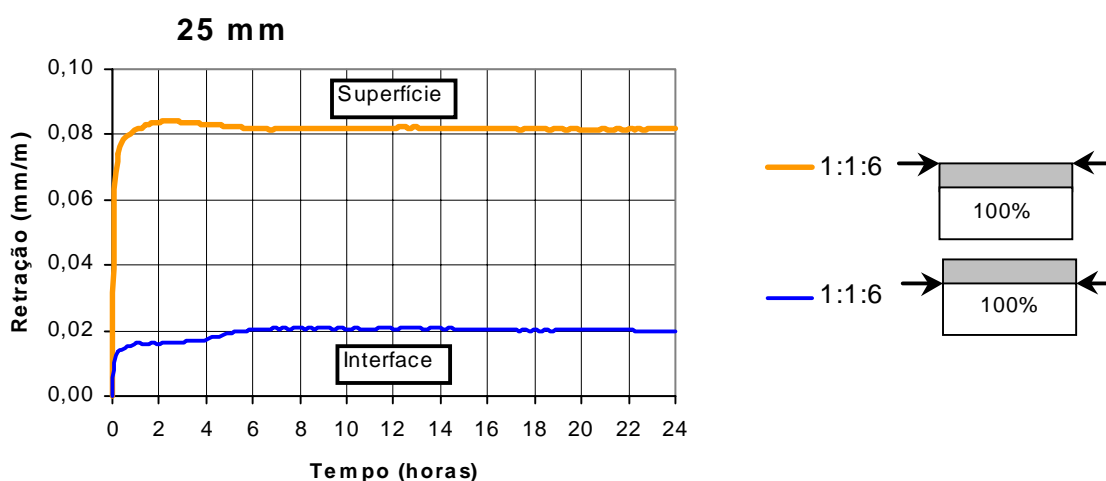


Figura 6.25 - Retração até 24 horas, na superfície livre e na interface argamassa/base, da argamassa 1:1:6 aplicada em camada de 25 mm de espessura, sobre bloco cerâmico saturado (INSA).

A **Figura 6.26** mostra, esquematicamente, três estágios da perda de água da argamassa por sucção e evaporação, e o efeito de retração ocorrido no corpo-de-prova sobre o bloco saturado.

ARGAMASSA 1:1:6 APLICADA SOBRE BLOCO CERÂMICO SATURADO – ESPESSURA 25 mm

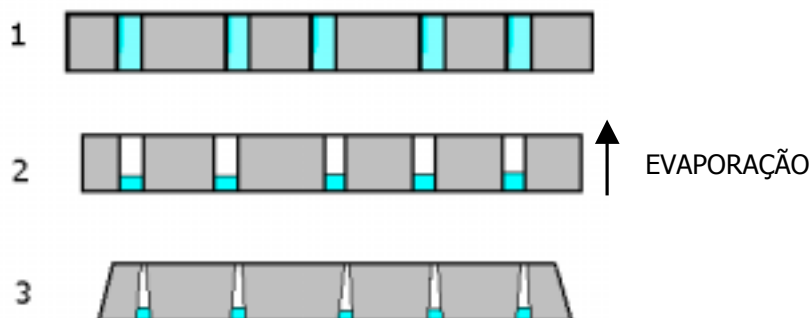


Figura 6.26 - Representação esquemática de três estágios do esvaziamento dos capilares da camada de argamassa aplicada sobre bloco cerâmico saturado e do efeito de retração causado na superfície e na interface argamassa/base.

6.2 Retração no estado endurecido

A **Figura 6.27** mostra que houve perda de massa nas primeiras 48 horas após a desforma para as duas argamassas, seguida de estabilização até o 14º dia, quando os corpos-de-prova começaram a apresentar ganho de massa devido à carbonatação. KOPSCHITZ et al. (1997) também observaram ganho de massa a partir desta idade em argamassas de cimento e areia e de cimento, cal e areia, moldadas em corpos-de-prova prismáticos de dimensões 25 x 25 x 285 (mm). Destaca-se ainda, na **Figura 6.27**, a menor perda de massa ocorrida na argamassa 1:1:6, confirmando, mais uma vez, a influência da capacidade de retenção de água da cal.

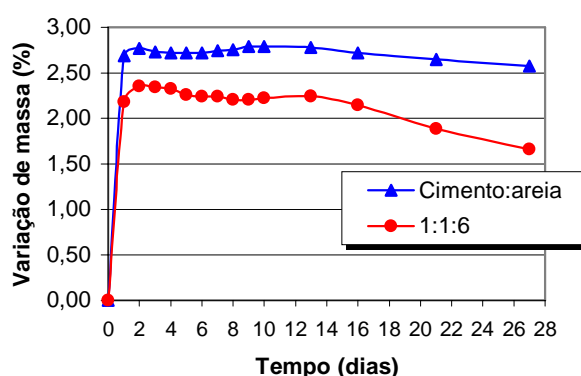


Figura 6.27 – Variação de massa de placas de argamassa de 400 x 150 (mm) e 15 mm de espessura, medida a partir de 24 horas após a moldagem, até 28 dias de idade (cada ponto da curva representa a média das leituras em três corpos-de-prova) – ensaio EPUSP.

A variação dimensional linear das placas das argamassas *cimento:areia* e *1:1:6* até 28 dias de idade pode ser vista na **Figura 6.28** a seguir, onde se destaca que a

adição de cal resultou em aumento de retração livre. A maior parcela da retração ocorreu até o segundo dia após a desforma, ou terceiro de idade dos corpos-de-prova, nas duas argamassas. Destaca-se, ainda, que continuou a haver retração após o 14º dia de leituras, quando as argamassas apresentaram ganho de massa devido à carbonatação. A contribuição deste fenômeno para a retração, no entanto, não é objeto deste trabalho, dependendo de estudo específico.

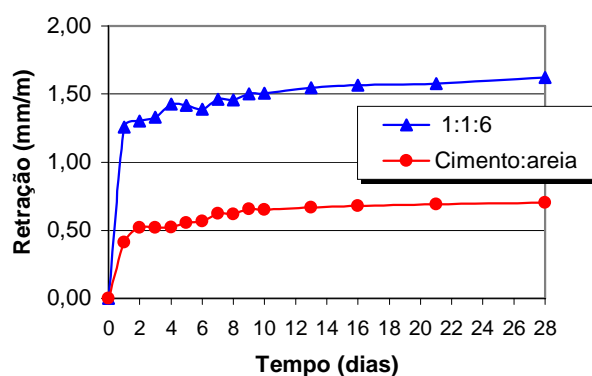


Figura 6.28 - Retração de placas de argamassa de 400 x 150 (mm) e 15 mm de espessura, medida a partir de 24 horas após a moldagem (cada ponto da curva representa a média das leituras em três corpos-de-prova) - ensaio EPUSP.

6.3 Retração impedida

Foi possível constatar, pela observação dos gráficos da **Figura 6.29**, que a retração na face livre dos corpos-de-prova ocorreu de forma completamente diferente em relação ao desempenho da argamassa na face aderida à grelha, ou seja, a aderência tem o efeito de impedir a retração no plano correspondente à interface argamassa/grelha, mas este efeito não se propaga com a mesma intensidade em direção a planos mais afastados desta interface. Esta constatação de desempenho diferenciado da argamassa quanto à distância do plano de medida das deformações em relação à base foi também feita nos ensaios de retração no estado fresco. A seguir são feitos comentários quanto ao desempenho para as faces livre e impedida.

Observações na face impedida:

- a **Figura 6.29** mostra que na face impedida os valores de deformação dos corpos-de-prova permaneceram próximos de zero até a liberação da grelha, como esperado,

comprovando, mais uma vez, a eficiência deste artifício de simulação do efeito de aderência da argamassa aplicada como revestimento de parede;

- na primeira leitura, realizada trinta minutos após a liberação da grelha, a argamassa apresentou nitidamente retração (retração impedida) na face onde até então o fenômeno estava impedido de ocorrer, retração esta que prosseguiu aumentando por alguns dias subsequentes, até uma certa estabilização, em todas as idades;
- quanto menor a idade dos corpos-de-prova, mais intenso foi o desenvolvimento da retração a partir da liberação da grelha até 28 dias de idade. Este fenômeno, acredita-se, deveu-se à maior deformabilidade da argamassa nas primeiras idades e à maior quantidade de água inicialmente disponível para a secagem.

Observações na face livre:

- na face livre ocorreu um fenômeno contrário ao da face impedida quanto ao valor da retração aos 28 dias, isto é, a retração total foi menor nos corpos-de-prova em que a grelha foi liberada mais cedo. A retirada da grelha, permitindo retração na face impedida, provocou o arqueamento dos corpos-de-prova (visível nas curvas em alguns casos) e, com isso, uma compensação na face livre no sentido de diminuir a retração. Este arqueamento também aconteceu nos experimentos de retração impedida de OUZIT (1990).

Na **Figura 6.30** pode ser observado o desempenho da argamassa nas faces livre e impedida dos corpos-de-prova em todas as idades conjuntamente

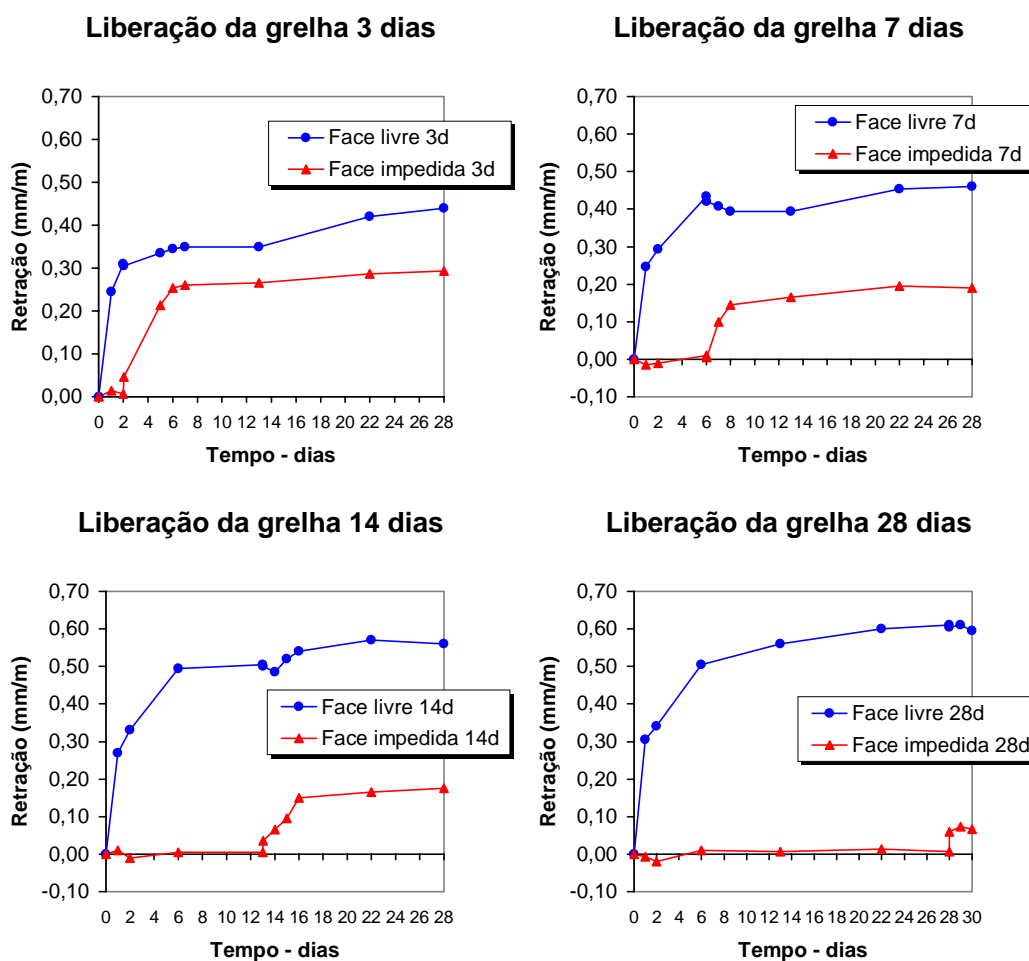


Figura 6.29 – Curvas de retração na face livre e na face impedida, com retirada da grelha metálica aos 3, 7, 14 e 28 dias após a moldagem – ensaio realizado com pastilhas coladas sobre a argamassa. Argamassa 1:1:6, espessura 25 mm, aplicada sobre bloco cerâmico furado com 0% de umidade (EPUSP).

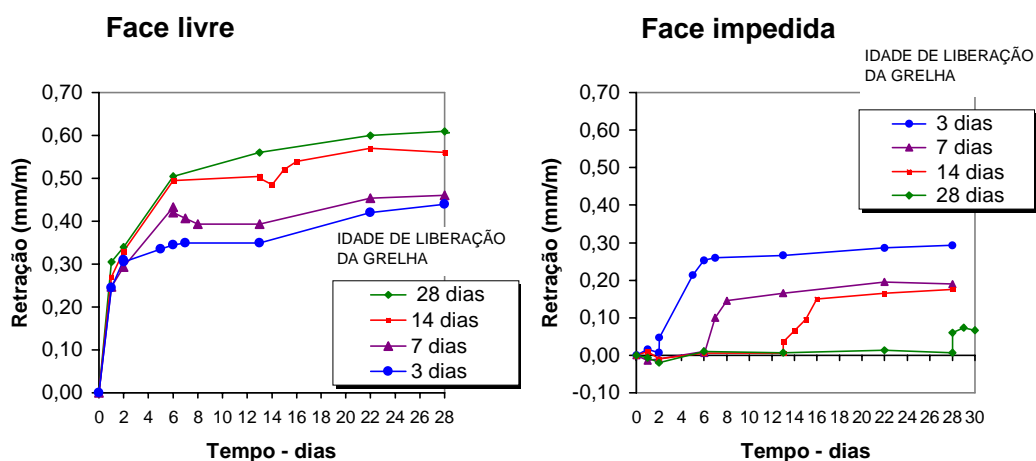


Figura 6.30 - Curvas de retração na face livre e na face impedida - argamassa 1:1:6, espessura 25 mm, aplicada sobre bloco cerâmico furado com 0% de umidade (EPUSP).

O ensaio de retração impedida permitiu uma avaliação qualitativa do desempenho do revestimento quanto à retração no estado endurecido, na interface argamassa/base e na superfície livre dos corpos-de-prova. Nestes dois planos paralelos, os resultados foram totalmente diferenciados. Dentro das condições de ensaio adotadas foi possível constatar que existiu o impedimento da retração por causa da aderência à base até 28 dias. Conseqüentemente, até esta idade os corpos-de-prova permaneceram também sob tensão de tração na interface argamassa/base. Quanto aos valores atingidos pela retração 30 minutos após a liberação da grelha, considera-se que se deva aperfeiçoar o método para obtenção de uma leitura imediata, isto é, no exato momento da cessão da restrição da retração pela base. Desta forma poder-se-á melhor avaliar o desempenho do revestimento quanto à retração impedida, aprofundando o estudo quanto ao nível de tensões presente nos corpos-de-prova em cada idade. Um determinado valor de retração impedida pode significar, ou não, um nível de tensão de tração que represente risco de fissuração para o revestimento, dependendo da combinação deste valor com o módulo de deformação da argamassa. Deformações pequenas em uma idade avançada do corpo-de-prova, por exemplo, podem resultar em elevada tensão de tração, uma vez que o módulo de deformação normalmente aumenta com o tempo.

6.4 Propriedades mecânicas

6.4.1 Tração na Flexão

Na **Figura 6.31**, a seguir, apresentam-se os resultados dos ensaios de tração na flexão, representados nas curvas pelos valores de tensão na ruptura. Cada ponto das curvas representa a média dos resultados de oito corpos-de-prova para a espessura de 15 mm, e de quatro, para a de 25 mm (todos os resultados encontram-se no ANEXO E). Em determinados casos, alguns corpos-de-prova foram descartados para cálculo da média, por apresentarem valores muito discrepantes dos demais, em um mesmo conjunto. Considerou-se que houve erro de ensaio.

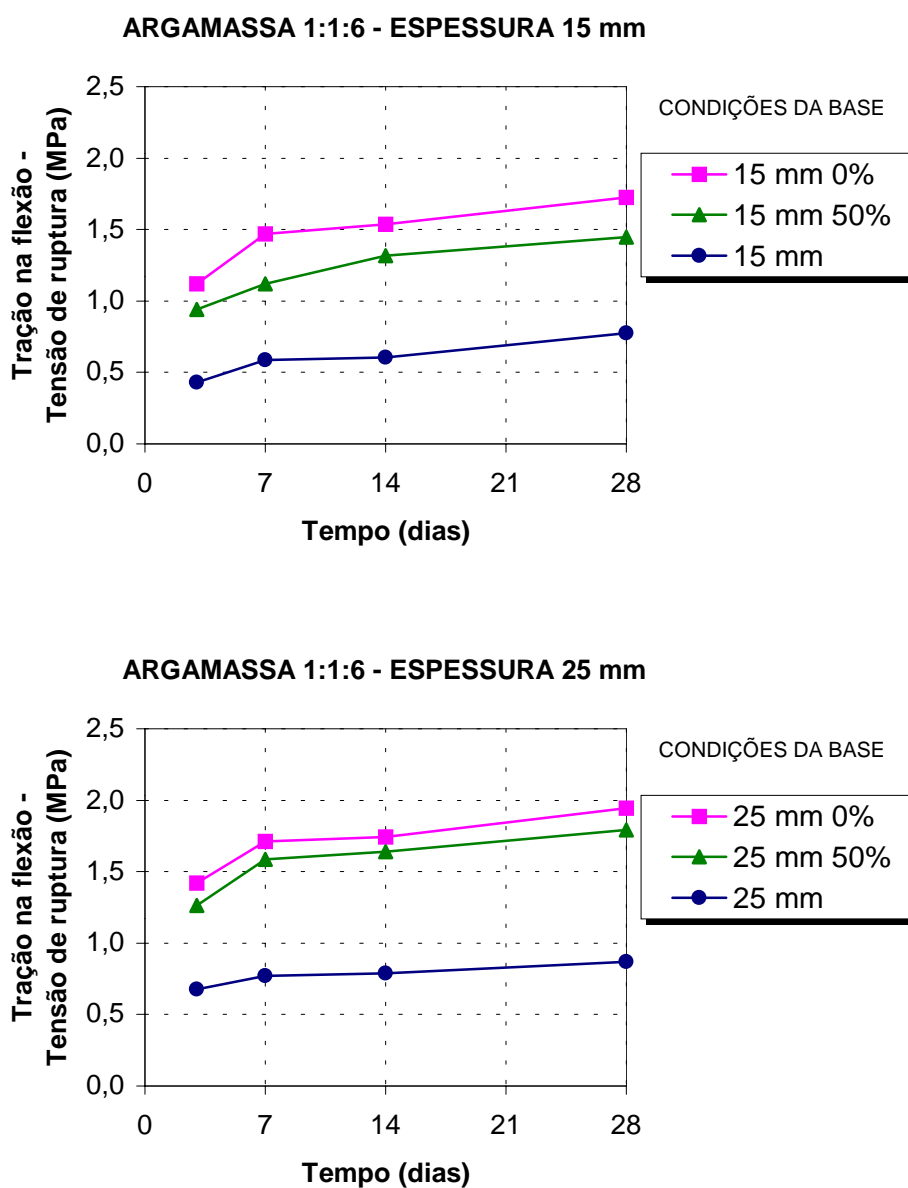


Figura 6.31 - Resultados do ensaio de tração na flexão de argamassa 1:1:6 aplicada sobre base em três condições de umidade, com espessuras 15 e 25 mm – tensão de ruptura aos 3, 7, 14 e 28 dias de idade (EPUSP).

Os resultados mostram a influência da sucção da água da argamassa pela base, no sentido de ter provocado aumento de resistência à tração em todas as idades, nas duas espessuras: quanto mais intensa a sucção, maior foi a tensão de ruptura em cada idade. Vale destacar que, de um modo geral, nas diversas idades de ensaio a influência da sucção significou dobrar a resistência mecânica da argamassa. Este efeito é devido ao

adensamento mecânico da argamassa promovido pela sucção da água, ocasionando maior área de contato e ligação mais íntima entre as partes sólidas da mistura.

Para os três casos de aplicação da argamassa (base não absorvente, base seca e base com 50% de umidade) a tensão de ruptura foi maior para os corpos-de-prova de 25 mm de espessura, em todas as idades (**Figura 6.32**). Esta diferença ocorreu, provavelmente, por causa da aplicação e adensamento da argamassa de 25 mm em duas camadas no molde de PVC.

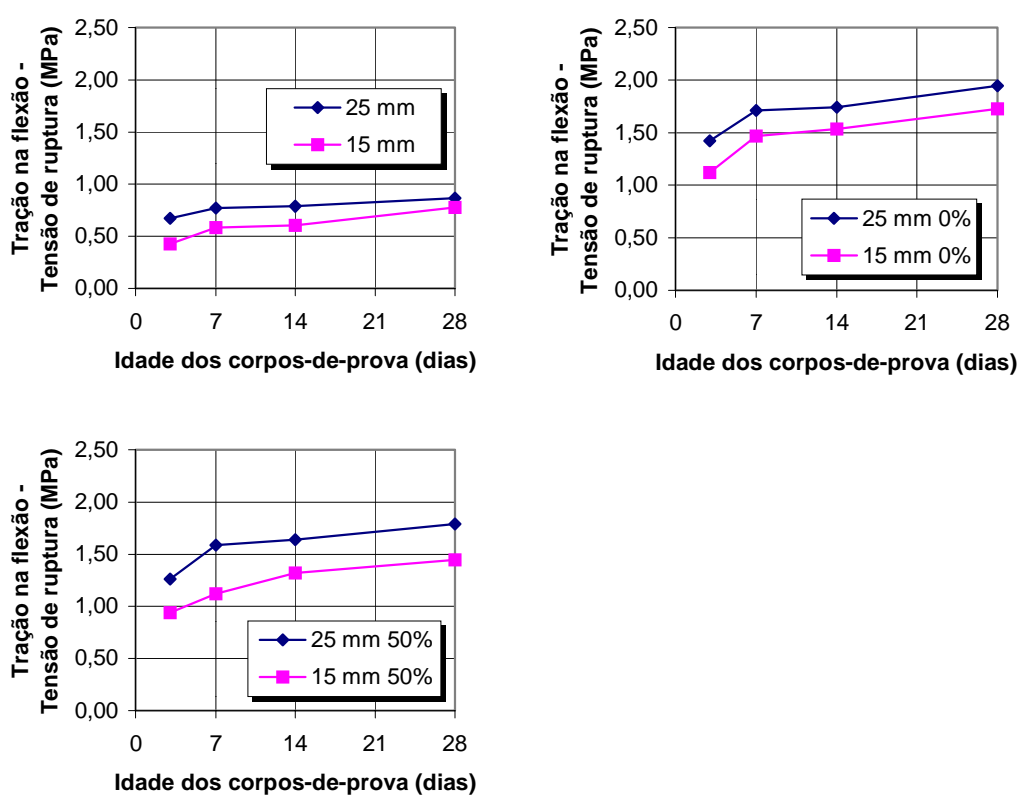


Figura 6.32 – Comparação entre os resultados do ensaio de tração na flexão dos corpos-de-prova de 15 mm e 25 mm de espessura – argamassa 1:1:6 (EPUSP).

Achou-se por bem apresentar valores de tensão de tração na flexão da argamassa 1:1:6, aos 28 dias de idade, obtidos por um procedimento normalizado. A norma ISO 679/89 - *Methods of testing cements - Determination of strength* (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 1987) determina a realização do ensaio em corpos-de-prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 (mm). A comparação destes valores com os da mesma argamassa fabricada nos moldes de PVC, apresentada na **Tabela 6.2**, tem, no entanto, caráter apenas ilustrativo, uma vez que há

diferenças entre os métodos de ensaio quanto à forma de adensamento da argamassa nos moldes, quanto à taxa do carregamento aplicado, e quanto à distância entre os apoios dos corpos-de-prova. As condições de cura dos dois ensaios foram idênticas.

Tabela 6.2 – Resistência à tração na flexão da argamassa 1:1:6 aos 28 dias (EPUSP).

Dimensões dos corpos-de-prova (mm)	Tração na flexão Tensão de ruptura aos 28 dias (MPa)
200 x 75 x 15	0,78
200 x 75 x 25	0,87
40 x 40 x 160	1,20*

* Média de 3 corpos-de-prova

6.4.2 Módulo de deformação

Os resultados da argamassa 1:1:6, de espessura 15 mm (**Figura 6.33**), mostram a influência da sucção da água da argamassa pela base, no sentido de ter provocado aumento do módulo de deformação em todas as idades: quanto mais intensa a sucção, maior foi o módulo de deformação. Observou-se a mesma tendência nos resultados calculados de tensão de tração na flexão, na ruptura, de acordo com o esperado.

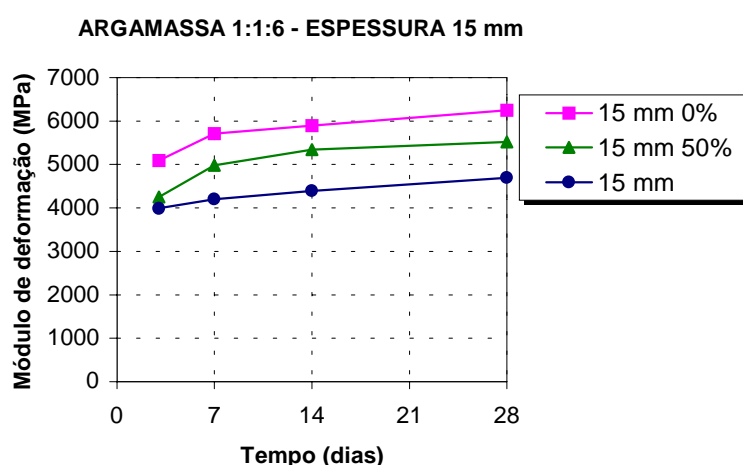


Figura 6.33 - Resultados do cálculo do módulo de deformação da argamassa 1:1:6, espessura 15 mm, aplicada sobre base absorvente com três teores de umidade. Cálculo realizado para as idades 3, 7, 14 e 28 dias (EPUSP).

No ANEXO F apresentam-se os valores do Módulo Corda de todos os corpos-de-prova ensaiados.

6.5 Porosimetria

Os resultados dos ensaios de intrusão de mercúrio são apresentados de duas formas:

- *Volume de mercúrio x Diâmetro dos poros* – indica, pelo volume de mercúrio intrudido, a quantidade de poros de um determinado diâmetro;
- *Volume de mercúrio acumulado x Diâmetro dos poros* – indica a quantidade total de mercúrio intrudido, por unidade de massa da amostra, a um determinado nível de pressão atingido durante o ensaio, representando a porosidade do material até o diâmetro de poro correspondente. Ao final do ensaio, o gráfico mostra a porosidade total da amostra, por unidade de massa.

A seguir é analisada a influência, sobre a porosidade, dos fatores *teor de cal e sucção de água pela base*. As curvas representam a média de dois ensaios (duas amostras) por argamassa e por condição de aplicação.

Influência do teor de cal

A **Figura 6.34** mostra uma distribuição de tamanhos de poros diferente para as argamassas 1:1:6 e Cal 60; com a adição de cal houve um aumento da quantidade de poros de diâmetros próximos a 0,8 μm e diminuição da quantidade de poros iguais ou maiores que 1,0 μm . O aumento do teor de cal também significou a diminuição da porosidade total, como mostra a curva de volume total de poros da argamassa Cal 60 ao final do ensaio.

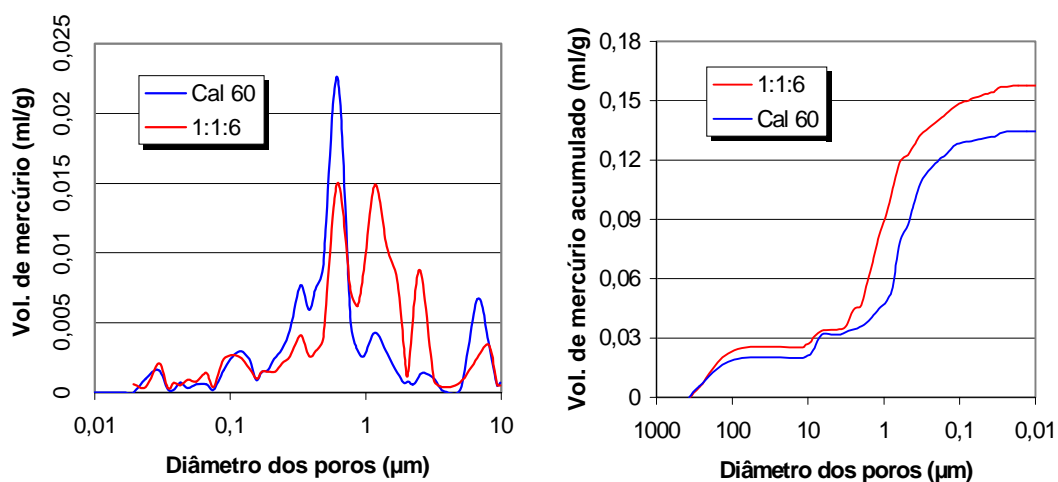


Figura 6.34 – Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassas 1:1:6 e Cal 60 (EPUSP).

Com as argamassas 1:1:6 e Cal 60 aplicadas sobre bloco cerâmico seco, a posição das curvas de porosidade total se inverteu: a porosidade total foi maior para a argamassa Cal 60 (Figura 6.35). Nesta condição de aplicação parece ter havido influência da capacidade de retenção de água da cal sobre a porosidade total da argamassa, ou seja, a quantidade de água retida resultou em maior volume de vazios.

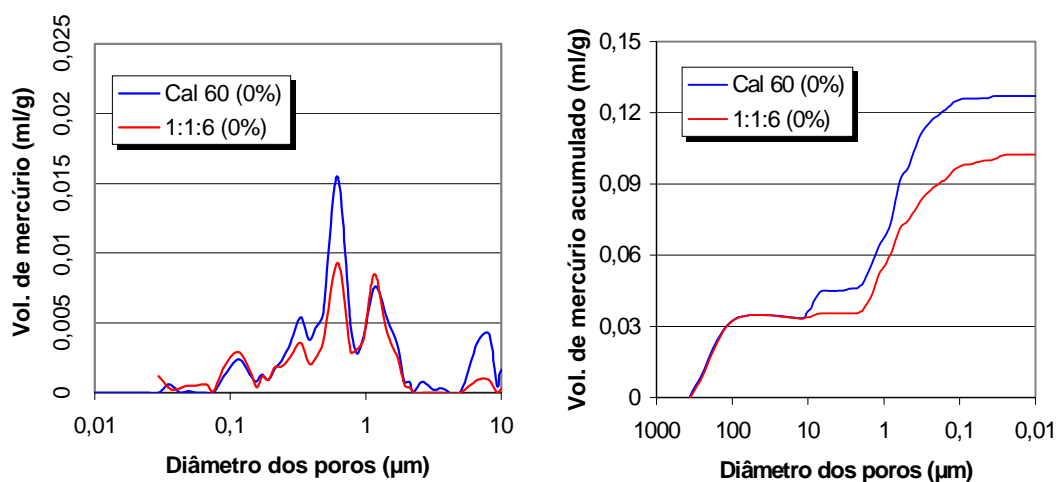


Figura 6.35 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassas 1:1:6 e Cal 60, aplicadas sobre bloco cerâmico seco (EPUSP).

Influência da sucção de água pela base

Nos gráficos da Figura 6.36 observa-se a diminuição do volume de poros de diâmetros 0,8 a 5,0 µm, devida à perda de água por sucção ocorrida na argamassa 1:1:6 aplicada sobre bloco cerâmico, em comparação com o perfil da distribuição de poros da mesma argamassa aplicada sobre base não absorvente. A curva de volume de mercúrio

acumulado mostra o efeito de diminuição do volume total de poros provocado pela sucção de água pela base, tanto no caso de aplicação sobre bloco seco como no de bloco com 50% de umidade. Esta posição relativa das curvas confirma o adensamento mecânico exercido sobre a argamassa fresca pela sucção, efeito que provocou aumento da resistência à tração na flexão e do módulo de deformação da argamassa 1:1:6, conforme mostrado nos itens 6.4.1 e 6.4.2.

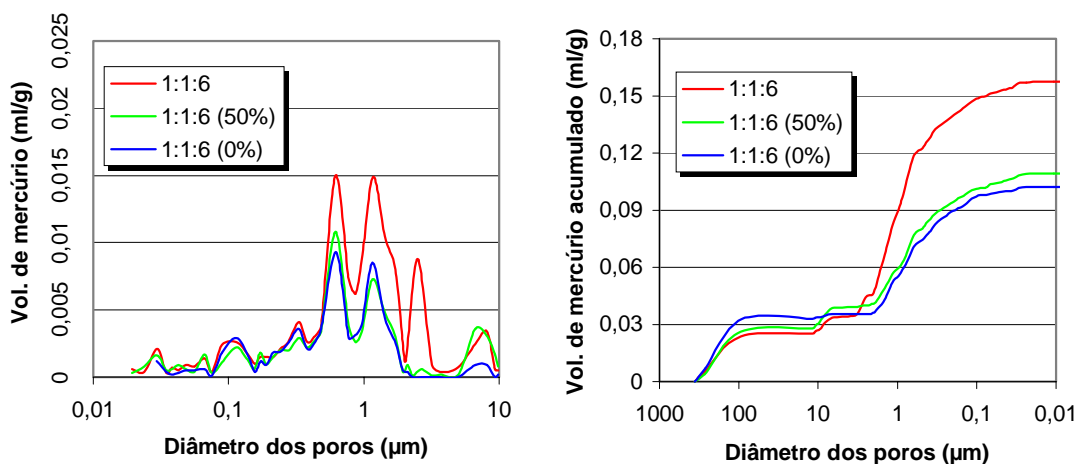


Figura 6.36 - Distribuição dos tamanhos de poros e volume de poros acumulado – argamassa 1:1:6 aplicada sobre base não absorvente e sobre bloco cerâmico seco e com teor de umidade 50% (EPUSP).

7 . CONCLUSÕES

As principais observações e conclusões restritas aos materiais e condições de ensaio desta pesquisa são a seguir apresentadas.

Equipamento de medida de retração

Este ensaio permite analisar em detalhe o aspecto da curva de retração obtida a partir dos primeiros minutos após a mistura e moldagem das argamassas, período de observações perdido em ensaios que se iniciam com a argamassa no estado endurecido, comumente realizados pelo nosso meio técnico. Como possibilidades importantes deste ensaio citam-se os estudos de:

- retração no estado fresco, com prosseguimento do ensaio no **estado endurecido**,
- retração em placas de argamassa de espessuras variáveis;
- retração impedida por aderência a uma grelha metálica, sem sucção de água na base do molde;
- retração da argamassa aplicada sobre substratos de diferentes tipos;
- retração em mais de um plano da argamassa paralelo à interface argamassa/substrato.

As observações podem ser feitas em intervalos mínimos de tempo, sendo possível o registro de deformações da argamassa pelo equipamento a cada segundo. Permite-se, enfim, a caracterização de argamassas produzidas em laboratório ou industrializadas quanto ao fenômeno de retração, para um documento de referência técnica, por exemplo, e a simulação em laboratório de condições próximas às da realidade de aplicação em obra.

Retração no estado fresco

Argamassa aplicada sobre base não-absorvente: todas as argamassas apresentaram uma curva com três estágios principais de deformação nas primeiras 24 horas - *Primeira Retração*, ocorrida na primeira hora após a moldagem, um *Período de*

Estabilização, seguido de uma *Segunda Retração*, que ocorre após o fim de pega, determinado para a pasta.

Quando a argamassa é aplicada sobre base não-absorvente com grelha metálica constata-se que não ocorre a Segunda Retração, após o final da pega, o que certamente gera tensões devidas ao impedimento da retração.

Quando a argamassa é aplicada sobre base absorvente, nesta pesquisa o bloco cerâmico, a curva também não apresenta a Segunda Retração.

Teor de umidade da base

Da aplicação sobre a base com 0, 50 e 100% de umidade pode-se constatar que esta variação nas condições de ensaio altera significativamente o valor atingido pela retração até o patamar de estabilização. Tanto para a camada de 15 mm de espessura, como para a de 25 mm, a retração foi maior com a diminuição do teor de umidade da base.

Com os captadores posicionados a 5 mm da base, o resultado da comparação entre a retração ocorrida nas camadas de 15 e 25 mm dependeu do sentido do fluxo de perda de água, ligado às condições de aplicação. A retração foi maior na camada de 25 mm estando o bloco com 0% e com 50% de umidade. Com a aplicação da argamassa sobre base não absorvente ou base saturada, a retração foi maior na camada de 15 mm.

Valor da retração atingido até o patamar de estabilização			
Argamassa 1:1:6 INSA (mm/m)			
Espessura da camada de argamassa (mm)	Teor de umidade da base (%)		
	0	50	100
15	1,9	0,6	0,06
25	3,5	1,5	0,02

Retração na interface *argamassa/base* x retração na superfície exposta

Os resultados obtidos com base com 50% de umidade evidenciaram que existe uma condição de equilíbrio na perda de água por evaporação, para o ambiente, e por sucção, para a base, na qual a retração ocorre de maneira uniforme ao longo da espessura da camada de argamassa. Este ensaio foi realizado para a espessura de 25 mm mas acredita-se que essa conclusão seja válida também para espessuras maiores. O equipamento de ensaio tem a vantagem de permitir variar a espessura da camada por ajuste das laterais do molde, aspecto a ser abordado em estudos futuros.

Esta conclusão motiva uma continuação do estudo da retração para diferentes tipos de base, variando também as condições de cura de modo a representarem a realidade climática nacional.

Composição da argamassa

Argamassas de relação *água/aglomerantes* constante

Os resultados mostraram, para diferentes condições de aplicação das argamassas (base absorvente e base não absorvente), que ao aumento do **teor de cal**, correspondeu o aumento da Primeira e da Segunda Retração, alteração bem mais significativa na Segunda Retração. Explica-se este resultado pelo fato de que argamassas mais deformáveis e com espaços mais reduzidos entre as partículas sólidas manifestam com maior intensidade, sobre a retração, o efeito da depressão capilar por perda de água por evaporação, apesar do efeito da retenção de água da cal.

Com a mesma relação *água/aglomerantes*, o aumento do **teor de pasta** comprovou a influência deste constituinte no sentido de tornar a argamassa mais sensível a variações dimensionais, no ensaio com argamassa sobre base não absorvente. O aumento de retração, no entanto, é observado com muito mais intensidade estando o material no estado endurecido, isto é, na Segunda Retração. Observou-se também que um pequeno aumento percentual no teor de pasta corresponde a um aumento significativo da retração.

Em resumo, o aumento dos teores de cal e de pasta da argamassa representaram aumento da retração. O que é preciso analisar, ainda, é o significado desta conclusão quanto à ocorrência ou não de fissuração, em estudo de tensões no revestimento.

Argamassas de consistência constante

A correção da quantidade de água para obtenção de consistência adequada para aplicação da argamassa em obra influencia de maneira importante a retração das argamassas, sendo que pequenas alterações na quantidade de água levam a alterações significativas de retração. Na prática, a adição de água de amassamento é feita de forma indiscriminada e depende do oficial pedreiro. Isto pode levar a desempenho diferente do esperado em especificações de projeto, no caso de argamassa preparada em obra, ou pelo fabricante, no caso de argamassas industrializadas.

Retração no estado endurecido

Foi feita a tentativa de medida da retração no estado endurecido dando seqüência ao ensaio de retração no estado fresco, utilizando os mesmos corpos-de-prova. Devido à desmoldagem com 24 horas e ao tamanho das placas deste ensaio, houve grande perda por quebra no manuseio. É evidente a necessidade de aumento do tempo de cura até a operação de desmoldagem. Ressalta-se, no entanto, a importância da observação da retração no estado endurecido em corpos-de-prova do mesmo formato que o adotado para o ensaio no estado fresco, em forma de placa, que permite uma condição de exposição ao meio próxima à do revestimento em obra.

Ensaio mecânicos

Como os resultados da resistência à tração e o cálculo do módulo de deformação foram feitos em corpos-de-prova em placa, não é possível uma comparação com resultados nacionais. Mas o que se procurou foi reproduzir, através do ensaio, condições de aplicação reais da argamassa, onde existe o fenômeno da sucção. Ficou evidenciada a influência da base nas propriedades mecânicas do revestimento, observação importante para avaliação do desempenho da argamassa em estudos que consideram as tensões existentes no revestimento. O que se pretende é inovar em tecnologia de argamassas, divulgando estes procedimentos para se obter valores destas propriedades que sirvam de

parâmetros a serem adotados como requisito de desempenho, visando futura classificação das argamassas no Brasil.

Sugestões para pesquisas futuras

Além dos já citados neste capítulo, apresentam-se alguns temas para futuros trabalhos em argamassas de revestimento, especialmente ligados à retração e a propriedades mecânicas:

- medição de tensões existentes na argamassa durante a ocorrência da retração nas primeiras horas e em idades mais avançadas;
- análise da influência da carbonatação dos compostos hidratados da pasta da argamassa sobre a retração;
- efeito da presença de aditivos na composição das argamassas sobre o fenômeno de retração, como os retentores de água;
- aplicação da argamassa sobre substrato poroso de natureza diferente da adotada nesta pesquisa, como o bloco de concreto, para o estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas;
- influência da variação do tipo de cimento sobre o fenômeno de retração;

ANEXOS

ANEXO A

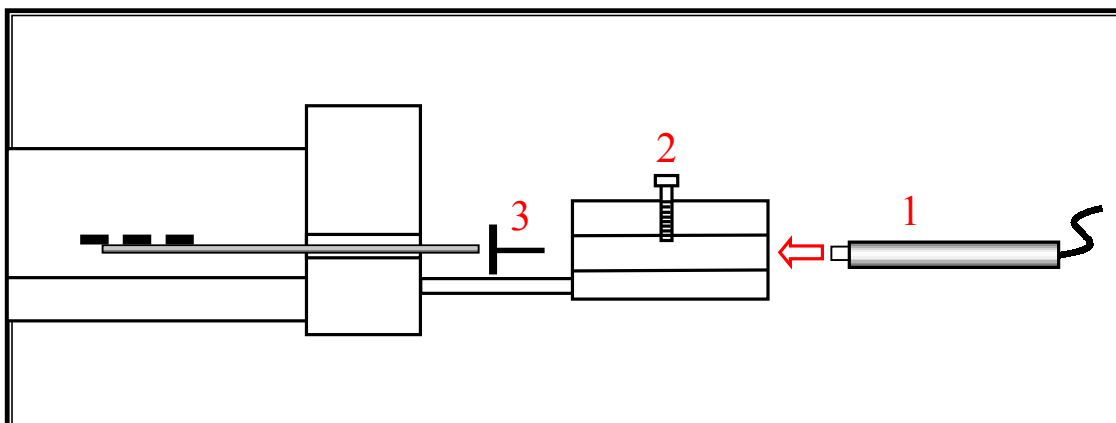
CUIDADOS ADICIONAIS PARA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE RETRAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Montagem do captor de deformações para realização do ensaio:

A pequena ponta metálica da extremidade do captor, em forma de disco, é fixada por meio de rosqueamento. Para que o captor fique na posição correta, ela deve ser retirada e presa novamente ao iniciar-se a montagem do equipamento para um novo ensaio. O aperto final, ao rosquear-se a ponta, não deve ser em demasia, e nem feito segurando-se o captor pelo fio. O procedimento correto é **fixar o captor ao molde pelo parafuso plástico vertical** da peça externa do molde e, em seguida, proceder ao rosqueamento do pequeno disco. O mesmo deve ser feito ao desmontar-se o equipamento.

Seqüência de operações para a montagem:

- 1) passagem do captor, sem a ponta metálica em forma de disco, através da peça externa do molde, de fora para dentro;
- 2) fixação do captor pelo parafuso vertical de plástico;
- 3) rosqueamento do disco metálico ao captor.



Seqüência de montagem do captor no molde de aço inoxidável para ensaio de retração de argamassa no estado fresco.

Desmontagem do captor do molde:

Ao desmontar-se o equipamento para limpeza, após o ensaio, é preciso remover a cola endurecida para soltar o captor do conjunto haste-grelha metálica. Esta operação é feita tomando-se o máximo de cuidado para não danificar o captor. O procedimento correto é **soltar o parafuso de plástico** que prende o captor ao molde e **quebrar a cola usando-se um pequeno alicate de ponta fina**. Não se deve, em hipótese alguma, tentar soltar o pequeno disco metálico do captor forçando-o com o captor preso ao molde.

ANEXO B

**DADOS DO EQUIPAMENTO E PARÂMETROS DO ENSAIO DE
POROSIMETRIA POR INTRUSÃO DE MERCÚRIO**

54484 argamassa ref. 0%		
AUTOPORE II 9220 V3.06		PAGE 1
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: DATA1 /129		
OPERATOR: LUIS		LP 13:33:45 11/08/00
SAMPLE ID: 54484 ref. 0 %		HP 14:58:06 11/08/00
SUBMITTER: 54484 argamassa ref. 0%		REP 14:58:06 11/08/00
PENETROMETER NUMBER: 92061707	ADVANCING CONTACT ANGLE: 130.0 deg	
PENETROMETER CONSTANT: 10.79 $\mu\text{L}/\text{pF}$	RECEDING CONTACT ANGLE: 130.0 deg	
PENETROMETER WEIGHT: 68.4800 g	MERCURY SURFACE TENSION: 485.0 dyn/cm	
STEM VOLUME: 0.3920 mL	MERCURY DENSITY: 13.5335 g/mL	
MAXIMUM HEAD PRESSURE: 4.4500 psia	SAMPLE WEIGHT: 1.4800 g	
PENETROMETER VOLUME: 6.0396 mL	SAMPLE+PEN+Hg WEIGHT: 141.4000 g	
LOW PRESSURE:		
EVACUATION PRESSURE:	50 μmHg	
EVACUATION TIME:	5 min	
MERCURY FILLING PRESSURE:	0.4868 psia	
EQUILIBRATION TIME:	15 sec	
HIGH PRESSURE:		
EQUILIBRATION TIME:	15 sec	
INTRUSION DATA SUMMARY		
(FROM DIAMETER 0.0020 TO 1000.0000 μm)		
TOTAL INTRUSION VOLUME =	0.1310 mL/g	
TOTAL PORE AREA =	1.147 $\text{sq-m}/\text{g}$	
MEDIAN PORE DIAMETER (VOLUME) =	1.3530 μm	
MEDIAN PORE DIAMETER (AREA) =	0.1112 μm	
AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A) =	0.4568 μm	
BULK DENSITY =	1.9452 g/mL	
APPARENT (SKELETAL) DENSITY =	2.6106 g/mL	
POROSITY =	25.49 %	
STEM VOLUME USED =	49 %	

ANEXO C

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Cimento CPJ - CEM II/B 32,5 R:

O cimento composto CPJ - CEM II/B tem de 65% a 79% de clínquer. O restante é composto de um ou mais constituintes (cinzas volantes silicosas, cinzas volantes cálcicas, escória granulada de alto-forno, pozolanas naturais, calcários, xistos calcinados, fillers). (ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DES LIANTS HYDRAULIQUES, 1998; BARON, J.; OLLIVIER, J. P., coord., 1996). As normas francesas NF P 15-301 e NF EN 196-1 classificam os cimentos segundo sua resistência à compressão em corpo-de-prova de argamassa. Esta classificação existe tanto para 28 dias quanto para 2 dias. Para a idade de 28 dias existem 3 classes de resistência, diferenciadas por seu valor característico inferior, em MPa: 32,5 – 42,5 – 52,5. Para cada classe de resistência aos 28 dias existem duas classes de resistência aos 2 dias, chamadas *normal* e *elevada*, a segunda sendo distinguida pela letra **R**, de "rapide", após a indicação da classe de resistência aos 28 dias (por exemplo, 32,5 R). O cimento 32,5 R, deve ter resistência mínima garantida de 12 MPa aos 2 dias, e uma resistência mínima característica de 32,5 MPa aos 28 dias.

Cal CL 90 (Norma Européia ENV459:1:1994) :

A sigla *CL* vem de "calciqne lime" e *90* representa a porcentagem mínima, em massa, de CaO + MgO. A mesma norma também especifica para a cal CL 90 as porcentagens: MgO ≤ 5%, CO₂ ≤ 4% e SO₃ ≤ 2%.

Composição química - cimento CPJ CEM II B 32,5 R

Compostos e respectivas porcentagens					
SiO ₂	16,40	Al ₂ O ₃	4,00	Na ₂ O	0,13
CaO	62,50	Fe ₂ O ₃	2,25	SO ₃	2,24
MgO	1,30	K ₂ O	0,80	Perda ao fogo	9,70

Composição química - cimento CP II E 32
(ensaio realizado no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)

Componentes maiores	%
Perda ao fogo (PF)	4,45
Anidrido silícico (SiO ₂)	19,9
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	4,79
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2,40
Óxido de cálcio (CaO)	60,4
Óxido de magnésio (MgO)	4,24
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	3,04
Componentes menores	
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,04
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,80
Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,57
Sulfeto (S ₂ ⁻)	0,08
n.d. - não determinado Equivalente alcalino (em Na ₂ O) = % Na ₂ O + 0,658 x %K ₂ O	
Determinações em separado	
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,43
Resíduo insolúvel (RI)	0,66
Anidrido carbônico (CO ₂)	3,27

Composição química – cal CL 90

Compostos e respectivas porcentagens					
SiO ₂	20,50	Al ₂ O ₃	0,20	Na ₂ O	0,07
CaO	73,40	Fe ₂ O ₃	0,40	SO ₃	0,01
MgO	0,30	K ₂ O	0,07	Perda ao fogo	2,52

Tempo de pega cimento CPJ/CEM II B 32,5 R

CPJ/CEM II B 32,5 R (NF EN 196-3, Ago/95)		
Tempo de início de pega	2 h	a/c = 0,234
Tempo de fim de pega	3 h 30 min	

**Caracterização física do cimento CP II E 32 e da cal hidratada CH I
(ensaios realizados no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)**

Cimento CP II E 32						
Finura na peneira 200						2,6 %
Água para pasta de consistência normal (NBR-11.580/91)						26,7 %
Início de pega (NBR-11.581/91)						235 min (3,92 h)
Fim de pega (NBR-11.581/91)						295 min (4,92 h)
Expansibilidade "Le Chatelier" (NBR-11.582/91)						
a frio						0,5 mm
a quente 5 h						1 mm
Massa específica (NBR-NM-23/98)						3,08 g/cm ³
Finura - Método de Blaine (NBR-NM-76/98)						3370 cm ² /g
Consistência da argamassa						172 mm
Resistência à compressão (NBR-7215/96) Obs. : Relação água/cimento 0,48.						
Idade	Tensão (MPa)					DRM
(dias)	C.P. 01	C.P. 02	C.P. 03	C.P. 04	Média	(%)
3	26,5	25,9	25,9	26	26,1	1,5
7	32,4	32,5	32,4	32,1	32,4	0,9
28	41,2	41,1	41	40,9	41,1	0,5

CAL HIDRATADA CH I

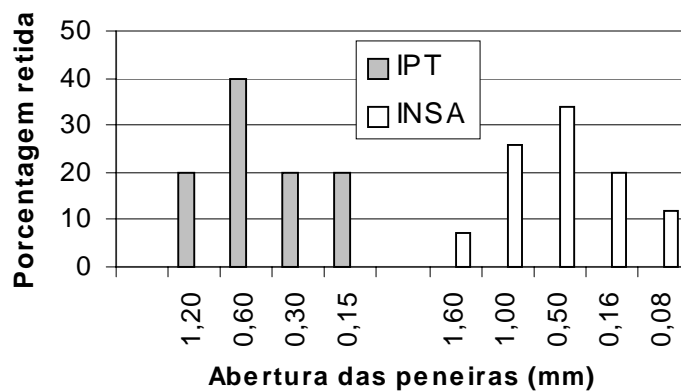
Finura NBR-9289/98			
Peneira	Abertura (mm)	Material Retido (%)	
		individual	acumulado
30	0,6	0	0
200	0,075	1,9	1,9
Estabilidade - NBR-9205/85			
Fator água/cal = 0,97			
Consistência = 23 mm			
Apresentou cavidades ou protuberâncias			
Plasticidade - NBR-9206/86			
Fator água/cal = 0,97			
Consistência = 23 mm			
Leitura final = 100			
Tempo final = 228 s			
Plasticidade = 107			
Retenção de água - NBR-9290/96			
Fator água/cal = 1,05			
Consistência antes da sucção = 207 mm			
Consistência após a sucção = 199 mm			
Retenção de água = 90%			
Capacidade de incorporação de areia - NBR-9207/85			
Traço final = 1,00 : 4,50			
Fator água/cal = 1,08			
Consistência = 211 mm			
Altura da argamassa não extrudada = 20 mm			

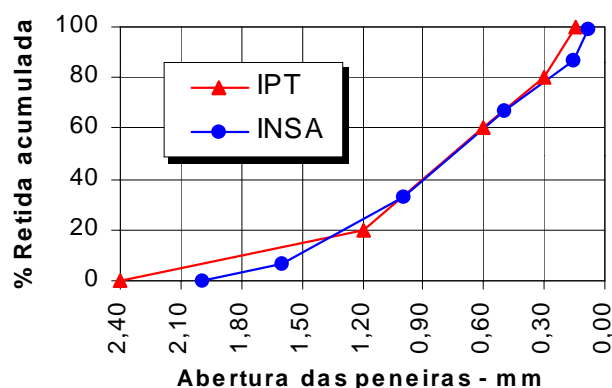
Areias:**Composição granulométrica da areia utilizada no INSA (norma francesa NF P 13 511)**

Abertura das peneiras de malha quadrada (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Porcentagem passante acumulada	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Comparação areias IPT x INSA de Toulouse - porcentagens retidas acumuladas.

Peneiras - mm	IPT	INSA
2,40	0	
1,20	20	
0,60	60	
0,30	80	
0,15	100	
2,00		0
1,60		7
1,00		33
0,50		67
0,16		87
0,08		99

**Granulometria areias IPT e INSA – porcentagem retida**



Granulometria areias IPT e INSA – porcentagem retida acumulada

Massa unitária dos materiais: ensaio realizado em recipiente cilíndrico metálico de capacidade 1 dm³. O enchimento foi feito com concha de laboratório de modo a deixar o material cair, em três camadas, de uma altura de 5 cm do bordo do recipiente. Os resultados da tabela a seguir representam a média de 3 determinações, realizadas medindo-se a massa do material solto após o arrasamento da superfície com régua.

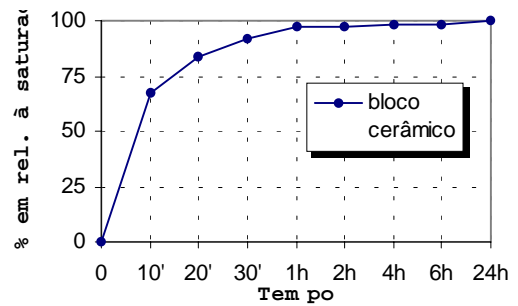
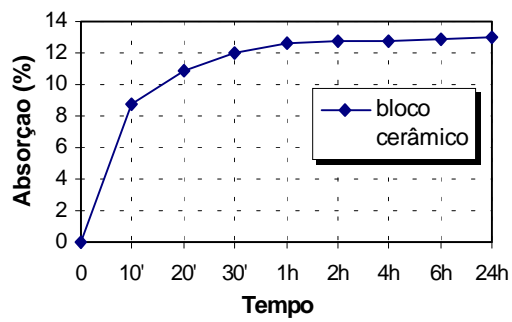
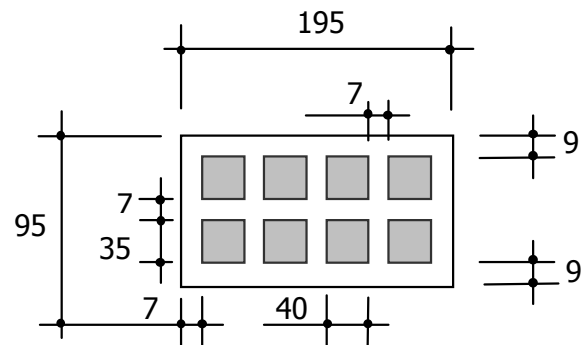
Material	Massa unitária (kg/dm ³)
Cimento CPJ/CEM II B 32,5 R	1,03
Cimento CP II E 32	1,13
Cal CL 90	0,43
Cal CH I	0,48
Areia INSA	1,60
Areia IPT	1,40

Massa específica real:

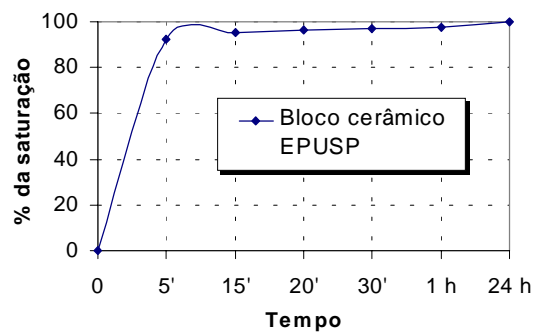
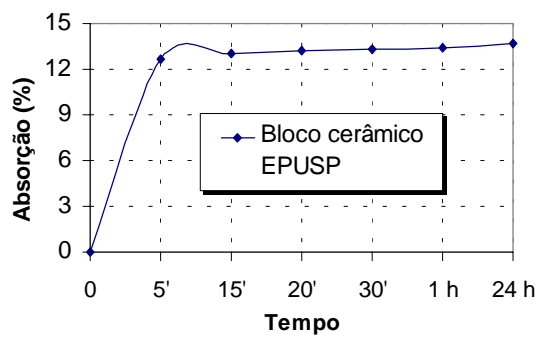
Material	M. E. Real (kg/dm ³)	Norma
Cimento CPJ/CEM II B 32,5 R	3,10	NF EN 196-6 – agosto/1990
Cimento CP II E 32	3,08	
Cal CL 90	2,20	NF EN 196-6 – agosto/1990
Areia INSA	2,72	

Características do bloco cerâmico INSA:

Dimensões 95 x 195 x 500 (mm)



Características do bloco cerâmico EPUSP:



BLOCOS CERÂMICOS EPUSP

Absorção Inicial (IRA)

Bloco	dim.1 (mm)	dim.2 (mm)	Área (mm ²)	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (g)	IRA (g/30pol ²)
1	289,80	190,70	55264,86	6448	6491	43	15,060
2	290,60	192,70	55998,62	6469	6508	39	13,480
3	290,15	192,30	55795,85	6458	6505	47	16,304
4	290,10	190,75	55336,58	6472	6512	40	13,991
5	290,40	192,70	55960,08	6477	6521	44	15,218
6	289,90	192,40	55776,76	6467	6507	40	13,880
Média	290,16	191,93	55688,79	6465	6507	42	14,655

Absorção Total

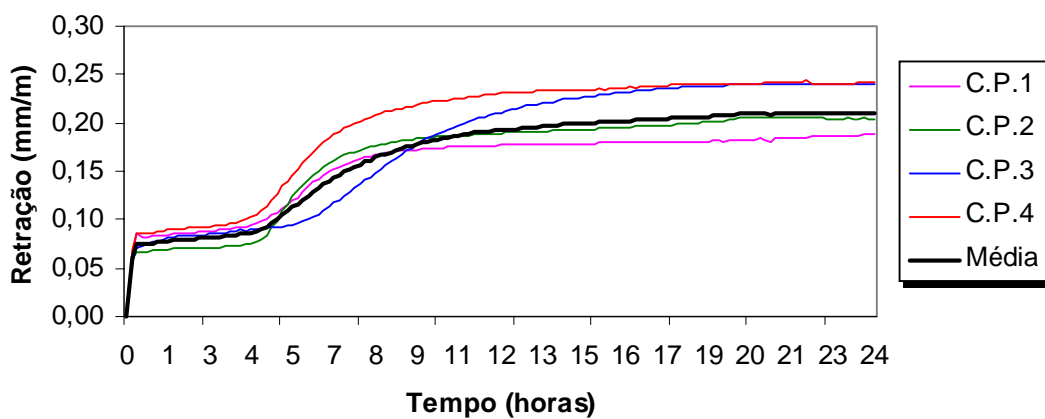
Bloco	Massa seca (g)	Massa úmida (g)	Absorção (g)	Absorção (%)
1	6448	7352	904	14,02
2	6469	7378	909	14,05
3	6458	7351	893	13,83
4	6472	7375	903	13,95
5	6477	7387	910	14,05
6	6467	7358	891	13,78
Média	6465	7367	902	13,95

Resistência à compressão

Bloco	Dim. 1 (mm)	Dim. 2 (mm)	Área (mm ²)	Carga de Ruptura (tf)	Res. Compr. (MPa)
1	291,25	139,80	40716,75	46,05	11,09
2	291,48	139,85	40762,78	55,95	13,46
3	290,80	138,83	40370,31	53,7	13,05
4	290,95	140,13	40769,37	55,55	13,37
5	291,13	139,60	40641,05	53,5	12,91
6	290,50	139,60	40553,8	54,3	13,14
Média	291,02	139,63	40635,68	53,18	12,84

ANEXO D**RETRAÇÃO NO ESTADO FRESCO**

Argamassa 1:1:6, espessura 15 mm - base não absorvente



ANEXO E

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NA FLEXÃO

CARGAS

15 mm

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura (kN)			
	3d	7d	14d	28d
1	0,0272	0,0446	0,0443	0,0562
2	0,0331	0,0382	0,0433	0,0556
3	0,0271	0,0413	0,0412	0,0584
4	0,0364	0,0339	0,042	0,038
5	0,0327	0,0432	0,0399	0,059
6	0,0259	0,0416	0,0535	0,0643
7	0,0296	0,0458	0,0396	0,0673
8	0,0287		0,0376	0,0564
Média	0,0301	0,0412	0,0427	0,0569
Desvio-padrão	0,0036	0,0041	0,0049	0,0087
Coef. var.	12%	10%	11%	15%

15 mm – 0%

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura (kN)			
	3d	7d	14d	28d
1	0,0830	0,0724	0,1167	0,1161
2	0,0823	0,1185	0,1266	0,0885
3	0,0840	0,0913	0,1278	0,1251
4	0,0748	0,1006	0,1051	0,0961
5	0,0722	0,1172	0,0806	0,1603
6	0,0860	0,1162	0,106	0,1266
7	0,0716	0,1069	0,0927	0,1343
8				
Média	0,07913	0,1033	0,10793	0,121
Desvio-padrão	0,01229	0,016881	0,017373	0,024048
Coef. var.	0,182416	0,163413	0,160967	0,198743

15 mm – 50%

Corpos-de-prova	Carga de Ruptura (kN)			
	3d	7d	14d	28d
1	0,0555	0,093	0,1153	0,1248
2	0,0652	0,0781	0,0905	0,0995
3	0,061	0,0641	0,0745	0,0986
4	0,0666	0,0664	0,085	0,0978
5	0,0733	0,0872	0,08	0,0906
6	0,065	0,0836	0,1063	0,1121
7	0,0725		0,0974	0,0984
8				0,0911
Média	0,06559	0,07873	0,09271	0,10161
Desvio-padrão	0,006213	0,011537	0,014574	0,011451
Coef. var.	0,094727	0,146537	0,157196	0,11269

TENSÃO NA RUPTURA

Idade	Tensão de tração na ruptura - MPa		
	15 mm	15 mm 0%	15 mm 50%
3	0,428	1,124	0,939
7	0,586	1,469	1,120
14	0,607	1,535	1,319
28	0,776	1,726	1,445

Idade	Tensão de tração na ruptura - MPa		
	25 mm	25 mm 0%	25 mm 50%
3	0,676	1,276	1,265
7	0,771	1,713	1,588
14	0,787	1,744	1,638
28	0,868	1,946	1,792

ANEXO F

MÓDULO DE DEFORMAÇÃO – ARGAMASSA 1:1:6 15 mm

15 mm

3 dias	Módulo corda
C.P. 1	3326,88
C.P. 2	3842,00
C.P. 3	4236,28
C.P. 4	4112,23
C.P. 5	4428,15
C.P. 7	4190,00
C.P. 8	3992,11
C.P. 9	3788,12
Média	3989,47
Desvio Padrão	340,16
Média + desv.	4329,63
Média - desv.	3649,31
Coef. Variação (%)	8,53

14 dias	Módulo corda
C.P. 1	4832,21
C.P. 2	4235,96
C.P. 3	3895,52
C.P. 4	5149,37
C.P. 5	3836,57
C.P. 6	4288,14
C.P. 7	4396,33
C.P. 8	4525,12
Média	4394,90
Desvio Padrão	443,23
Média + desv.	4838,14
Média - desv.	3951,67
Coef. Variação (%)	10,09

7 dias	Módulo corda
C.P. 1	3725,90
C.P. 2	3873,34
C.P. 3	4346,36
C.P. 4	3590,26
C.P. 5	4543,17
C.P. 6	5154,95
C.P. 7	4218,35
Média	4207,47
Desvio Padrão	540,73
Média + desv.	4748,20
Média - desv.	3666,75
Coef. Variação (%)	12,85

1528d	Módulo corda
C.P. 1	4587,26
C.P. 2	3616,99
C.P. 3	4083,52
C.P. 4	7639,41
C.P. 5	5380,80
C.P. 6	5424,30
C.P. 7	4728,50
C.P. 8	2119,31
Média	4697,51
Desvio Padrão	1597,08
Média + desv.	6294,59
Média - desv.	3100,43
Coef. Variação (%)	34,00

15 mm 0%

<i>3 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	4340,79
C.P. 2	5758,70
C.P. 3	4949,65
C.P. 4	5585,13
C.P. 8	4823,24
Média	5091,50
Desvio Padrão	579,76
Média + desv.	5671,26
Média - desv.	4511,74
Coef. Variação (%)	11,39

<i>7 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	5892,69
C.P. 2	2205,20
C.P. 3	8788,93
C.P. 4	5838,67
C.P. 5	2904,68
C.P. 6	6217,13
C.P. 7	8106,26
Média	5707,65
Desvio Padrão	2438,66
Média + desv.	8146,31
Média - desv.	3268,99
Coef. Variação (%)	42,73

<i>14 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	7070,65
C.P. 3	5223,52
C.P. 5	5425,69
C.P. 6	5952,00
C.P. 7	5623,25
C.P. 8	6140,12
Média	5905,87
Desvio Padrão	661,78
Média + desv.	6567,65
Média - desv.	5244,09

<i>28 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	5786,00
C.P. 2	5885,44
C.P. 3	5698,00
C.P. 4	6203,48
C.P. 5	6941,41
C.P. 6	6988,00
Média	6250,39
Desvio Padrão	506,18
Média + desv.	6756,57
Média - desv.	5744,21

15 mm 50%

<i>3 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	3726,24
C.P. 2	5879,14
C.P. 3	3899,50
C.P. 4	4755,80
C.P. 5	3867,09
C.P. 6	3402,69
Média	4255,08
Desvio Padrão	913,40
Média + desv.	5168,48
Média - desv.	3341,67
Coef. Variação (%)	21,47

<i>7 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	3578,21
C.P. 2	5881,17
C.P. 4	3893,38
C.P. 5	6109,77
C.P. 6	5445,37

<i>14 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	5805,93
C.P. 2	5397,41
C.P. 3	5968,48
C.P. 4	3413,23
C.P. 5	5095,49
C.P. 6	5888,98
C.P. 7	5843,85
Média	5344,77
Desvio Padrão	907,62
Média + desv.	6252,39
Média - desv.	4437,14
Coef. Variação (%)	16,98

<i>28 dias</i>	Módulo corda
C.P. 1	6478,09
C.P. 2	7894,52
C.P. 3	6296,85
C.P. 4	5759,59
C.P. 5	3004,98
C.P. 6	4533,06
C.P. 7	5593,21
C.P. 8	4586,98
Média	5518,41
Desvio Padrão	1482,87
Média + desv.	7001,28
Média - desv.	4035,53
Coef. Variação (%)	26,87

Idade	Módulo corda		
	15 mm	15 mm 0%	15 mm 50%
3	3989,47	5091,50	4255,08
7	4207,47	5707,65	4981,58
14	4394,90	5905,87	5344,77
28	4697,51	6250,39	5518,41

ANEXO G

PREPARO DAS ARGAMASSAS DE CIMENTO:CAL:AREIA

As argamassas de cimento, cal e areia foram preparadas em duas etapas na argamassadeira elétrica de 5 litros. Na primeira etapa misturou-se apenas cal, areia e parte da água pré-definida para a consistência desejada. A mistura intermediária ficou em repouso por 24 horas em saco plástico, protegida da evaporação, para maturação da cal. Na segunda etapa foi adicionado o cimento e o restante da água, efetuando-se a mistura com o funcionamento do equipamento na velocidade lenta em dois ciclos de 1 minuto cada, com um rápido intervalo entre eles para uma mistura manual, com o equipamento desligado, com pequena pá de plástico que remove a argamassa agarrada internamente no equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. Integrated view of shrinkage deformation. **Concrete International**, p. 35-41, sept. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: determinação da resistência à compressão** - NBR 7215/91. São Paulo, 1991.

_____. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**, NBR 8802/94. São Paulo, 1994.

_____. **Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural : retração por secagem** - NBR 8490/84. São Paulo, 1984.

_____. **Concreto: determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão/deformação** - NBR 8522/84. São Paulo, 1984.

ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DES LIANTS HYDRAULIQUES. **Guide pratique pour l'emploi des ciments**. Paris, Ed. Eyrolles, 1998.

BAROGHEL-BOUNY, V. **Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons**. Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1994.

BARON, J.; SAUTEREY, R., coord. **Le béton hydraulique – connaissance et pratique**. Paris, Presses de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, 1982.

BARON, J.; OLLIVIER, J. P., coord. **Les bétons – bases et données pour leur formulation**. Paris, Ed. Eyrolles, 1996.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Testing concrete - Part 203. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete** - BS 1881: Part 203:1986. London, 1986.

BUIL, M.; BARON, J. Le retrait autogène de la pâte de ciment durcissante. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 7., Paris, 1980. **Anais**. Paris, 1980. v. 3, p. 37- 42.

BUIL, M. **Contribution a l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante**. Paris, 1979. 150 p. Tese (Docteur-Ingénieur) - École Nationale des Ponts et Chaussées.

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

CEBECI, O. Z. et al. Strength and drying shrinkage of masonry mortars in various temperature-humidity environments. **Cement and Concrete Research**, v. 19, p. 53-62, 1989.

_____. Strength development of mortars in hot and dry environment. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Anais**. Rio de Janeiro, 1986. v. 6, p. 565.

CINCOTTO, M. A. et al. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995 (Publicação IPT 2378).

CULLEN, W. C.; SNECK, T. Evaluation des surfaces externes des façades des constructions. **Matériaux et Constructions**, v. 13, n.76, p. 323-30, 1980.

DÉTRICHÉ, C. H. **Contribution à l'étude des déformations des couches minces de mortiers de liants hydrauliques**. Toulouse, 1977, p. 247. Tese (Docteur-ingénieur) - Université Paul Sabatier de Toulouse.

_____. Analyse expérimentale du retrait de couches minces de mortier mesure depuis le moulage. **Matériaux et Constructions**, v.11, n. 64, p. 247 - 59, 1978.

_____. Premier et second retrait de couches minces de mortier. **Matériaux et Constructions**, v.12, n. 69, p. 185-91, 1979.

_____. **Contribution à l'étude du comportement des couches minces de mortiers de liants hydrauliques – applications aux enduits**. Toulouse, 1983, p. 202. Tese (Docteur-ingénieur) - Université Paul Sabatier de Toulouse.

DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J. C. Modèle de calcul du retrait des mortiers en couches minces. **Matériaux et Constructions**, v. 13, n.77, p. 353-60, 1980.

DÉTRICHÉ, C. H. GRANDET, J. Influence de la succion des supports poreux sur la prise et la résistance au cisaillement des mortiers moulés à leur contact. **Matériaux et Constructions**, v. 14, n. 80, p. 91-102, 1981.

DÉTRICHÉ, C. H.; GRANDET, J.; MASO, J. C. Dessiccation des mortiers d'enduit. **Matériaux et Constructions**, v.16, n. 94, p. 251-8, 1983.

DÉTRICHÉ, C. H. Mouvements 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. 429-39, 1986.

DUPAIN R.; LANCHON R.; SAINT-ARROMAN, J. C. **Granulats, Sols, Ciments et Bétons**. Paris, Editions Casteilla, 1995.

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties. **Matériaux et Constructions**, v. 1, n. 6, p. 509-20, 1968.

_____. A new model for hydrated portland cement and its practical implications. **Engineering Journal**, v. 53, n. 8/9, p. 53-9, 1970.

FERRARIS, C.F. **Mécanismes du retrait de la pâte de ciment durcie**. Lausanne, 1986, p. 229. Tese (Docteur ES Sciences Techniques) – Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

FERRARIS, C. F.; WITTMANN, F. H. Shrinkage mechanisms of hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 17, p.453-64, 1987.

FERREIRA, A. B. H. **Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1999.

_____. **Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa**. 2. ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1986.

GAGNÉ, R. et al. Developement of a new experimental technique for the study of the autogenous shrinkage of cement paste. **Materials and Structures**, v. 32, p. 635-42, 1999.

GRANDET, J. **Contribution a l'étude de la prise et de la carbonatation des mortiers au contact de matériaux poreux**. Toulouse, 1975, p. 287. Tese (Docteur ES Sciences Physiques) - Université Paul Sabatier de Toulouse.

HELMUTH, R. A.; TURK, D. The reversible and irreversible drying shrinkage of hardened Portland cement and tricalcium silicate pastes. **Journal of The PCA Research and Development Laboratories**, p. 8-20, mai/1967.

HUA, C. **Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante**. Paris, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1995.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. Retrait d'autodessiccation du ciment – Analyse et modélisation macroscopique. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, n. 196, p. 79-89, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Methods of testing cements - determination of strength - ISO 679**.1989.

KHALAF, F. M.; HENDRY, A. W.; FAIRBAIRN, D. R. Mechanical properties of materials used in concrete blockwork construction. **Magazine of Concrete Research**. v. 44, n. 158, p. 1-14, 1992.

KOPSCHITZ et al. Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas de revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais**. Salvador, ANTAC, 1997. p. 120-32.

LEJEUNE, C. Comportement a la fissuration des enduits d'imperméabilisation. /Apresentado no I Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, Goiânia, 1995/

L'HERMITE, Robert G. Volume Changes of Concrete. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 4., Washington D. C., 1960. **Proceedings**. Washington D. C., United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1962. v. 2, p. 659 – 93.

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

MEHTA, P. K. Hardened cement paste - microstructure and its relationship to properties. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Anais**. Rio de Janeiro, 1986. v. 1, p. 113-21.

NEVILLE, Adam. **Propriedades do concreto**. 2. ed. Trad. de Salvador E. Giamusso . São Paulo, Pini, 1997.

NORME EUROPEENNE. **Methodes d'essai pour mortier à maçonner - partie: détermination de la résistance à la flexion et en compression du mortier durci - EN - 1015**. Brussels, 1993.

OUZIT, M-A. **Contribution a l'étude du comportement mécanique des enduits de façade a base de liants hydrauliques**. Paris, 1990, p. 136. Tese (Doctorat) - Université Paris VI.

POWERS, T. C. Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF THE STRUCTURE OF CONCRETE AND ITS BEHAVIOUR UNDER LOAD, London, 1965. **Proceedings**. London Cement and Concrete Association, 1968a, p. 319-44.

_____. The thermodynamics of volume change and creep. **Matériaux et Constructions**, v. 1, n. 6, p. 487-506, 1968b.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física: mecânica - hidrodinâmica**. Trad. de José de Lima Accioli. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1978.

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 1., Goiânia, 1995. **Anais**. Goiânia, ANTAC, 1995.

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2., Salvador, 1997. **Anais**. Salvador, ANTAC, 1997.

TAMIN, P. F. **Etude du comportement mécanique des revêtements de façades-enduits**. Paris, 1986. 138 p. Tese (Docteur-ingenieur en Sciences et Techniques du Bâtiment) - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo, Pini/Escola Politécnica da USP/Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2.ed. Londres, Thomas Telford, 1997.

WITTMANN, F. H. On the action of capillary pressure in fresh concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 6, p. 49-56, 1976.

_____. The structure of hardened cement paste – a basis for a better understanding of the materials properties. In: CONFERENCE "HYDRAULIC CEMENT PASTES: THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES", Sheffield, 1976. **Proceedings**. Sheffield, Cement and Concrete Association, 1976, p. 97-117.

_____. Water and mechanical properties of concrete. In: SEMINAIRE "LE BETON ET L'EAU", St. Rémy-lés-Chevreuses, 1985. **Proceedings**. St. Rémy-lés-Chevreuses, 1985, p.104-121.