

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 19/07/00
Ass: 

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos para obtenção do título de Mestre em Tecnologia do Ambiente Construído.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013636

Autor: CHRISTIANO WOOD BORTOLUZZO
Orientador: Prof. Dr. JEFFERSON B.L. LIBORIO



São Carlos
2000

Class.	TESE
Cont.	0723
Tomo	T01S7100

31100013626

et 1097674

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B739c Bortoluzzo, Christiano Wood
Contribuição ao estudo do comportamento mecânico
dos revestimentos de argamassa/ Christiano Wood
Bortoluzzo. -- São Carlos, 2000.

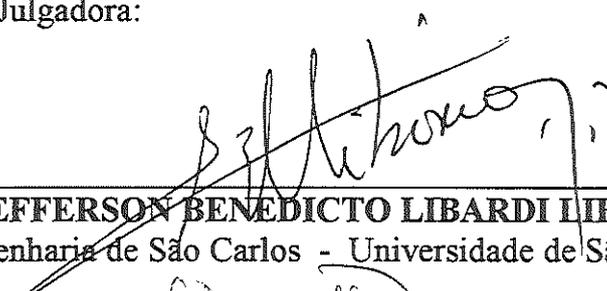
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Tecnologia do Ambiente Construído.
Orientador: Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio.

1. Comportamento das argamassas de revestimento. 2.
Tensões devido retração impedida. I. Título.

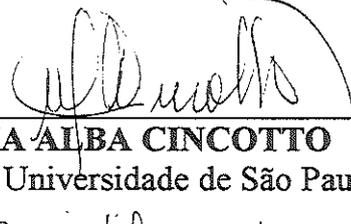
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **CHRISTIANO WOOD BORTOLUZZO**

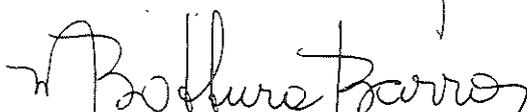
Dissertação defendida e aprovada em 02.05.2000
pela Comissão Julgadora:



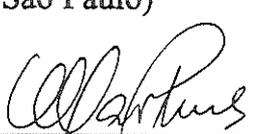
Prof. Doutor **JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBÓRIO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



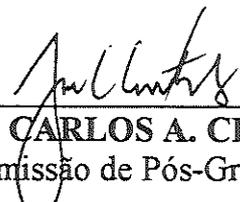
Profa. Doutora **MARIA ALBA CINCOTTO**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Profa. Doutora **MÉRCIA MARIA SEMENSATO BOTTURA DE BARROS**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)



Prof. Assoc. **CARLOS ALBERTO FERREIRA MARTINS**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia do Ambiente Construído



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Àqueles que participaram e apoiaram o trabalho desempenhado: Joana, meus pais Valter e Edna, minha irmã Alexandra e amigos.

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

A Holderchem do Brasil S/A.

A Queveks do Brasil S/A.

Ao meu professor e orientador Jefferson B. L. Liborio.

SUMÁRIO

RESUMO.....	I
--------------------	----------

ABSTRACT.....	II
----------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS.....	III
------------------------------	------------

LISTA DE TABELAS.....	VII
------------------------------	------------

LISTA DE SÍMBOLOS	X
--------------------------------	----------

1 INTRODUÇÃO.....	1
--------------------------	----------

1.1 QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA	1
---	----------

1.2 PATOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA	2
--	----------

1.2.1 PATOLOGIAS DE ORIGEM MECÂNICA	3
--	----------

1.2.1.1 Fissuração do revestimento de argamassa.....	3
---	----------

1.2.1.2 Descolamento da argamassa em forma de placas.....	5
--	----------

1.2.2 PATOLOGIAS DE ORIGEM QUÍMICA	6
---	----------

1.2.2.1 Descolamento por empolamento	6
---	----------

1.2.2.2 Descolamento da argamassa com pulverulência	7
--	----------

1.2.2.3 Vesículas	7
--------------------------------	----------

1.2.2.4 Problemas decorrentes da umidade.....	8
--	----------

1.2.3 PROBLEMAS DEVIDO ÀS FALHAS NA CONCEPÇÃO DO COMPORTAMENTO DE OUTROS COMPONENTES.....	10
--	-----------

1.2.4 PROBLEMAS NOS REVESTIMENTOS DECORRENTES DE FALHAS NAS ALVENARIAS	15
---	-----------

1.3 DIAGNÓSTICOS DAS PATOLOGIAS.....	17
---	-----------

1.4	AS FALHAS DE CONHECIMENTO	18
1.5	OBJETO DA PESQUISA.....	19
2	<u>QUADRO DE REFERÊNCIA ESPECÍFICO.....</u>	21
2.1	HISTÓRIA E CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS.....	21
2.2	USOS, FUNÇÕES E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....	23
2.3	PROPRIEDADES E NORMALIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	24
2.3.1	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	27
2.3.1.1	Trabalhabilidade	27
2.3.1.2	Coesão e Tixotropia	28
2.3.1.3	Consistência	28
2.3.1.4	Plasticidade	29
2.3.1.5	Retenção de água	30
2.3.1.6	Exsudação	32
2.3.1.7	Teor de ar incorporado.....	32
2.3.1.8	Massa específica.....	33
2.3.2	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	33
2.3.2.1	Resistência mecânica	33
2.3.2.2	Elasticidade e módulo de deformação	37
2.3.2.3	Retração por secagem	41
2.3.2.4	Permeabilidade	43
2.3.2.5	Resistência de aderência	44
2.4	MATERIAIS CONSTITUINTES	49
2.4.1	AGREGADOS	50
2.4.1.1	Composição química e mineralógica	50
2.4.1.2	Forma geométrica dos grãos.....	51
2.4.1.3	Tamanho dos grãos	52
2.4.1.4	Distribuição granulométrica	52
2.4.1.5	Teor de materiais pulverulentos	52
2.4.1.6	Especificações e ensaios normalizados.....	54
2.4.2	CALES.....	54
2.4.3	ADITIVOS INCORPORADORES DE AR.....	58

2.5	TENSÕES NAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA.....	61
3	<u>HIPÓTESES DO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO</u>	65
4	<u>METODOLOGIA E RESULTADOS DE PESQUISA TEÓRICA DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO.....</u>	67
4.1	MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS.....	69
4.2	1ª FASE DE MODELAÇÃO.....	72
4.2.1	PARÂMETROS DE CONTROLE DOS MODELOS.....	72
4.2.1.1	Ações incidentes.....	72
4.2.1.2	Propriedades dos materiais.....	74
4.2.1.3	Condições de contorno do problema.....	74
4.2.2	RESULTADOS DOS MODELOS DA 1ª FASE.....	75
4.3	2ª FASE DE MODELAÇÃO.....	77
4.3.1	PARÂMETROS DE CONTROLE DOS MODELOS.....	78
4.3.2	RESULTADOS DOS MODELOS DA 2ª FASE E CRIAÇÃO DE UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS REVESTIMENTOS ARGAMASSADOS	79
4.3.2.1	Tensão máxima de tração e posição de ocorrência.....	80
4.3.2.2	Tensão máxima de cisalhamento e posição de ocorrência.....	81
4.3.2.3	Distância D.....	81
4.3.2.4	Resultados das tensões de tração máxima de referência.....	81
4.3.2.5	Resultados das tensões de cisalhamento máximas de referência.....	82
4.3.2.6	Resultados dos deslocamentos de referência da argamassa nas extremidades do pano de revestimento.....	83
4.3.2.7	Discussão dos resultados.....	84
5	<u>METODOLOGIA DA PESQUISA EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....</u>	89
5.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	89
5.2	ARGAMASSAS EMPREGADAS.....	90

5.3 - PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	91
5.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	92
5.4.1 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	93
5.4.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	95
5.4.2.1 Equipamento de tração.....	97
5.4.2.2 Pastilhas de arrancamento	100
5.4.2.3 Dispositivo de corte do revestimento.....	100
5.4.2.4 Adesivos.....	100
5.4.2.5 Execução do ensaio.....	101
5.4.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	102
5.4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	104
5.4.5 DENSIDADE DE MASSA APARENTE.....	104
<u>6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.....</u>	<u>105</u>
6.1 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	105
6.2 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	107
6.2.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	107
6.2.2 ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA NA COMPRESSÃO	113
6.2.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	122
6.2.4 ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM.....	130
6.2.4.1 Argamassas mistas.....	131
6.2.4.2 Argamassas aditivadas.....	136
6.2.4.3 Formulação para cálculo da retração por secagem	143
6.2.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	153
6.2.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO	156
6.3 IDENTIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DA QUANTIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA	157

<u>7</u>	<u>METODOLOGIA DA PESQUISA DAS TENSÕES DE RETRAÇÃO IMPEDIDA</u>	<u>161</u>
7.1	ESTUDO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES	161
7.2	INFLUÊNCIA DO FENÔMENO DE RELAXAÇÃO NA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES.....	164
7.2.1	MODELO EMPREGADO PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA.....	165
7.2.2	MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA	168
<u>8</u>	<u>ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS TENSÕES DE RETRAÇÃO IMPEDIDA</u>	<u>169</u>
8.1	CONSIDERAÇÃO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES	169
8.2	CONSIDERAÇÃO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES ASSOCIADA AO FENÔMENO DE RELAXAÇÃO	171
8.2.1	COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES DE TRAÇÃO CALCULADAS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO FENÔMENO DA RELAXAÇÃO.....	175
8.2.2	RESULTADOS DAS TENSÕES CALCULADAS PELO MÉTODO PROPOSTO PARA TODOS OS TRAÇOS	181
<u>9</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>186</u>
<u>10</u>	<u>PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA</u>	<u>189</u>
<u>11</u>	<u>ANEXOS</u>	<u>191</u>
11.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS.....	191
11.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL	193
11.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	218
11.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	227

11.5 ROTINA COMPUTACIONAL EM FORTRAN 229

12 BIBLIOGRAFIA..... 232

RESUMO

O propósito deste trabalho é estudar o comportamento mecânico das argamassas de revestimento, tendo em vista a sua durabilidade frente aos agentes patológicos de origem física.

Também são focalizados, neste estudo, os principais fenômenos físicos relacionados ao equilíbrio mecânico dos esforços que atuam no sistema do revestimento. Isso envolve parâmetros de propriedades do material, agentes patológicos incidentes no revestimento e algumas condições de contorno, como as características geométricas do sistema. Tal estudo é feito por modelação computacional via programa de elementos finitos.

A partir daí, propõe-se um método de avaliação da possibilidade de ocorrência de fissuração nas argamassas de revestimento. No caso de haver fissuração, o método ainda irá determinar o espaçamento e a abertura das fissuras.

Também são estudados alguns fenômenos, ainda um pouco obscuros para as argamassas de revestimento, como: a retração por secagem, as tensões provocadas quando a retração é impedida e a relaxação dessas tensões com o tempo.

Finalmente são pesquisadas, experimentalmente, as propriedades mecânicas de diversos traços de argamassas mistas de cal e cimento e argamassas aditivadas com incorporador de ar. Tal estudo visa compreender a inter-relação entre essas propriedades e como elas são influenciadas pelas características de dosagem.

PALAVRAS-CHAVE: Revestimentos de argamassa, comportamento mecânico dos revestimentos, tensões devido à retração impedida.

ABSTRACT

The aim of this paper is to study the mechanical behavior of rendering mortar, in order to ensure its durability toward pathological agents.

The main physical phenomena related to the mechanical balance effort, which influence rendering mortars, are focused on this paper. This matter involves the properties of the materials, pathological agents and geometric characteristics of the system. This study is done with computer patterns through a finite element software program.

Later on, a method to test the appearance of possible fissures in the rendering mortar is developed. If a fissure is depicted, the testing method will measure the distance and width of this fissure.

Other still obscure phenomena considering rendering mortars, such as free shrinkage, dry shrinkage, tensions originated when this shrinkage is avoided and the relaxation of these tensions, after some time, are also studied in this paper.

Finally, the mechanical properties of many mortar kinds, such as the mixed with cement and sand and incorporated air or lime are experimentally investigated. The goals of these experiments are to provide the understanding of the relationship among these properties, and how they are influenced by the proportions of the dosage used.

KEY-WORDS: Rendering mortar, rendering mechanical behaviour, stresses due constrained shrinkage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estado de tensões devido à distorção angular (ALONSO, 1995).....	12
Figura 2 – Esquema de tensões para deformação livre.	61
Figura 3 – Esquema de tensões para deformação impedida.	62
Figura 4 – Fluxograma do modelo de comportamento do sistema de revestimento.	68
Figura 5 – Esquema da simplificação geométrica do modelo a ser empregado na análise dos revestimentos de argamassa.	70
Figura 6 - Esquema ilustrando o tipo de elemento empregado na análise por elementos finitos no programa ANSYS.	71
Figura 7 - -- Esquema de equilíbrio dos esforços.	79
Figura 8 - Tensão de tração máxima de referência em função da espessura e do tamanho do pano do revestimento.	82
Figura 9 – Deslocamento de referência da argamassa na sua extremidade em função da espessura e o tamanho do pano de revestimento.	84
Figura 10 – Esquema da posição das tensões máximas na argamassa.	85
Figura 11 – Esquema da parede que serviu de base para o revestimento.	96
Figura 12 – Projeto dos dispositivos de arrancamento construídos.	99
Figura 13 – Relação entre resistência à compressão uniaxial e relação a/c para argamassas aditivadas.	108
Figura 14 - Relação entre resistência à compressão uniaxial e relação a/c para argamassas mistas.	108
Figura 15– Relação entre resistência à compressão aos 28 d e relação a/c.....	109
Figura 16 - Relação entre resistência à compressão uniaxial e o consumo de cimento.	110
Figura 17 – Curvas da resistência ao longo do tempo para argamassas aditivadas.	111
Figura 18 – Curvas da resistência ao longo do tempo para argamassas mistas. .	111
Figura 19 – Correlação entre resistência à compressão e teor de cimento para argamassas aditivadas.	112
Figura 20 - Correlação entre resistência à compressão e teor de cimento para argamassas mistas.	112
Figura 21 - Exemplo de uma curva obtida com o traçado dos dados de ensaio. .	113
Figura 22 - Exemplo do cálculo do módulo tangente inicial.	114
Figura 23 - Diagramas tensão - deform das aditivadas, comparando-se os traços.	117
Figura 24 - Diagramas tensão - deform das mistas, comparando-se os traços. ...	117

Figura 25 - Diagramas tensão – deform. das aditivadas, comparando-se as idades.	119
Figura 26 - Diagramas tensão – deform. das mistas, comparando-se as idades..	119
Figura 27 - Evolução do módulo tangente inicial com o tempo.	120
Figura 28 - Correlação do módulo de deformação inicial com a resistência à compressão.	120
Figura 29 – Relação entre resistência de aderência e relação a/c.	125
Figura 30 – Relação entre resistência de aderência e teor de cimento.	125
Figura 31 – Correlação entre resistência de aderência e resistência à compressão.	126
Figura 32 - Relação entre a relação a/c e o coeficiente que expressa o fator de perda de água nas argamassas revestidas.	129
Figura 33 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M1.	131
Figura 34 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M2.	132
Figura 35 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M3.	133
Figura 36 — Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M4.	134
Figura 37 – Curvas experimentais de retração para todas as argamassas mistas.	135
Figura 38 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A1....	136
Figura 39 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A2....	137
Figura 40 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A3....	138
Figura 41 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A4....	139
Figura 42 – Curvas experimentais de retração para todas as argamassas aditivadas.	140
Figura 43 – Curva genérica do modelo que representa a retração por secagem.	145
Figura 44 –Curvas teóricas e experimentais de retração das argamassas aditivadas.	148
Figura 45 – Retração final teórica das argamassas aditivadas.	149
Figura 46 – Curvas teóricas da retração com o tempo para as argamassas.	150
Figura 47 - Curvas teóricas e experimentais de retração das argamassas mistas.	152
Figura 48 - Retração final teórica das argamassas mistas.	153
Figura 49 - Variação da absorção de água por capilaridade com o traço e tipo de argamassa.	154
Figura 50 - Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo para todos os traços das argamassas mistas e aditivadas.	155
Figura 51 – Deformação de ruptura na tração em função do teor de cimento das argamassas.	158
Figura 52 – Dois indivíduos esticam a corda com uma força que só depende da rigidez da corda.	162

Figura 53– Enquanto A e B não movimentam a corda, a presença de C em nada interfere no sistema de forças.....	162
Figura 54 – A e B esticam mais a corda e sentem o aumento de rigidez ocasionado por C.....	162
Figura 55 Gráficos exemplo de cálculo de tensões devido à retração impedida com evolução incremental das tensões.....	170
Figura 56 – Coeficiente de relaxação para diversas idades de carregamento.....	171
Figura 57 – Coeficiente de relaxação para diversas unidades relativas do ar.....	172
Figura 58 - Coeficiente de relaxação para diferentes espessuras fictícias.....	173
Figura 59 - - Coeficiente de relaxação para diferentes resistências mecânicas de argamassa.....	174
Figura 60 – Tensões de tração calculadas para os traços A1 e A2.....	176
Figura 61 – Tensões de tração calculadas para os traços A3 e A4.....	177
Figura 62 – Tensões de tração calculadas para o traços M1 e M2.....	178
Figura 63 – Tensões de tração calculadas para o traços M3 e M4.....	179
Figura 64 – Tensões de tração em todos os traços para diferentes UR%.....	182
Figura 65 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A1 (3 d).....	194
Figura 66 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A1 (7 d).....	195
Figura 67 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A1 (28 d).....	196
Figura 68 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (3 d).....	197
Figura 69 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (7 d).....	198
Figura 70 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (28 d).....	199
Figura 71 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (3 d).....	200
Figura 72 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (7 d).....	201
Figura 73 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (28 d).....	202
Figura 74 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (3 d).....	203
Figura 75 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (7 d).....	204
Figura 76 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (28 d).....	205
Figura 77 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (3 d).....	206
Figura 78 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (7 d).....	207
Figura 79 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (28 d).....	208
Figura 80 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (3 d).....	209
Figura 81 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (7 d).....	210
Figura 82 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (28 d).....	211
Figura 83 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (3 d).....	212
Figura 84 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (7 d).....	213
Figura 85 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (28 d).....	214

Figura 86 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (3 d)	215
Figura 87 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (7 d)	216
Figura 88 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (28 d)	217

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Usos, funções e propriedades das argamassas (MARTINELLI, 1991)..	24
Tabela 2 - Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado plástico.....	25
Tabela 3 - Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido aplicadas à base.	25
Tabela 4- Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido.	26
Tabela 5- Classificação de argamassas quanto à plasticidade (VARGAS & COMBA apud CALDEIRA, 1994).....	30
Tabela 6 - Classificação dos materiais constituintes das argamassas de revestimento.....	49
Tabela 7 - Composição mineralógica dos agregados miúdos (SELMO, 1986).....	51
Tabela 8 - Influência das características do agregado nas propriedades das argamassas. (SABBATINI, 1986 - modificado).	53
Tabela 9 - Classificação da cal virgem (NBR 6453/88)	55
Tabela 10 → Parâmetros que afetam a velocidade de carbonatação	57
Tabela 11 – Valores empregados em todos os modelos.....	78
Tabela 12 – Variações de espessuras de revestimento nos modelos	78
Tabela 13 – Variações de distância entre juntas de movimentação nos modelos ..	79
Tabela 14 - Tensão de cisalhamento máxima de referência na interface entre o revestimento e o substrato.....	83
Tabela 15 - Traços das argamassas mistas de cal e cimento	91
Tabela 16 - Traços das argamassas aditivadas com incorporador de ar.....	91
Tabela 17 - Ensaio e métodos para avaliação das argamassas no estado fresco.	92
Tabela 18 - Ensaio e métodos para avaliação das argamassas no estado endurecido.....	93
Tabela 19- Características dos revestimentos de argamassa	97
Tabela 20 – Testes de colagem das pastilhas para ensaio de arrancamento	101
Tabela 21 - Tabela para controle da taxa de carregamento.....	102
Tabela 22 – Estados higrométricos para ensaio de retração por secagem	103
Tabela 23 - Relações água/materiais secos; teor de aglomerante, teor de cimento, relação água/cimento e consistência das argamassas mistas (NBR 13276/95)...	105
Tabela 24 - Relações água/materiais secos; teor de cimento, relação água/cimento e consistência das argamassas aditivadas (NBR 13276/95).....	105

Tabela 25 - Teor de ar incorporado e massa específica das argamassas mistas (NBR 13278/95).....	106
Tabela 26 - Teor de ar incorporado e massa específica das argamassas aditivadas(NBR 13278/95).....	106
Tabela 27 - Retenção de água em argamassas mistas (NBR 13277/95).....	106
Tabela 28 - Retenção de água em argamassas aditivadas (NBR 13277/95).....	106
Tabela 29 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.	107
Tabela 30 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 3 d.....	115
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 7 d.....	116
Tabela 32 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 28 d.....	116
Tabela 33 – Resistência de aderência à tração aos 28 d (NBR13528/95)	123
Tabela 34 – Limites de resistência de aderência à tração (R_a) para emboço de camada única (NBR 13749/96).....	124
Tabela 35 – Características da argamassa M1.....	131
Tabela 36 – Características da argamassa M2.....	132
Tabela 37 – Características da argamassa M3.....	133
Tabela 38 – Características da argamassa M4.....	134
Tabela 39 – Características da argamassa A1.....	136
Tabela 40 – Características da argamassa A2.....	137
Tabela 41 – Características da argamassa A3.....	138
Tabela 42 – Características da argamassa A4.....	139
Tabela 43 – Parâmetros da curva de retração para argamassas aditivadas.....	146
Tabela 44 – Parâmetros para argamassas mistas.....	151
Tabela 45 – Densidade de massa aparente das argamassas mistas.....	156
Tabela 46 – Densidade de massa aparente das argamassas aditivadas.....	156
Tabela 47 – Proporção entre tensões de tração com e sem a consideração da relaxação.....	181
Tabela 48 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=40%.....	184
Tabela 49 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=60%.....	184
Tabela 50 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=80%.....	185
Tabela 51 - Características Físicas do Agregado Miúdo.....	191
Tabela 52 - Composição granulométrica das amostras de agregado miúdo.....	191
Tabela 53 - Resultado da composição granulométrica e classificação da areia... ..	192

Tabela 54 - Ensaio de caracterização da cal hidratada.....	192
Tabela 55 - Caracterização do substrato de bloco de concreto.....	192
Tabela 56 - Módulos de deformação para o traço A1 com 3 d.....	194
Tabela 57 - Módulos de deformação para o traço A1 com 7 d.....	195
Tabela 58 - Módulos de deformação para o traço A1 com 28 d.....	196
Tabela 59 - Módulos de deformação para o traço A2 com 3 d.....	197
Tabela 60 - Módulos de deformação para o traço A2 com 7 d.....	198
Tabela 61 - Módulos de deformação para o traço A2 com 28 d.....	199
Tabela 62 - Módulos de deformação para o traço A3 com 3 d.....	200
Tabela 63 - Módulos de deformação para o traço A3 com 7 d.....	201
Tabela 64 - Módulos de deformação para o traço A3 com 28 d.....	202
Tabela 65 - Módulos de deformação para o traço A4 com 3 d.....	203
Tabela 66 - Módulos de deformação para o traço A4 com 7 d.....	204
Tabela 67 - Módulos de deformação para o traço A4 com 28 d.....	205
Tabela 68 - Módulos de deformação para o traço M1 com 3 d.....	206
Tabela 69 - Módulos de deformação para o traço M1 com 7 d.....	207
Tabela 70 - Módulos de deformação para o traço M1 com 28 d.....	208
Tabela 71 - Módulos de deformação para o traço M2 com 3 d.....	209
Tabela 72 - Módulos de deformação para o traço M2 com 7 d.....	210
Tabela 73 - Módulos de deformação para o traço M2 com 28 d.....	211
Tabela 74 - Módulos de deformação para o traço M3 com 3 d.....	212
Tabela 75 - Módulos de deformação para o traço M3 com 7 d.....	213
Tabela 76 - Módulos de deformação para o traço M3 com 28 d.....	214
Tabela 77 - Módulos de deformação para o traço M4 com 3 d.....	215
Tabela 78 - Módulos de deformação para o traço M4 com 7 d.....	216
Tabela 79 - Módulos de deformação para o traço M4 com 28 d.....	217
Tabela 80— Anotação dos dados relativos ao ensaio de absorção de água por capilaridade nos corpos de prova das argamassas mistas e aditivadas.....	227
Tabela 81— Absorção de água por capilaridade média dos três cps.	228

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de dilatação térmica linear
δ	Distorção angular
ΔL	Variação de comprimento
ΔT	Variação de temperatura
ε	Deformação
ε_r	Deformação por retração por secagem, em % ou mm/mm
ε_{rup}	Deformação de ruptura na tração da argamassa
$\varphi(t, t_0)$	Coeficiente de fluência entre os tempos t e t_0
σ	Tensão normal
σ_1 σ_3	Tensões normais principais de um estado plano de tensões
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima de tração em uma argamassa de revestimento
$\sigma_{m\acute{a}x,ref}$	Tensão máxima de tração de referência em uma argamassa de revestimento
σ_t	Tensão normal de tração em argamassa
τ	Tensão de cisalhamento
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima de cisalhamento na interface entre uma argamassa de revestimento e o substrato
$\tau_{m\acute{a}x,ref}$	Tensão máxima de cisalhamento de referência na interface entre uma argamassa de revestimento e o substrato
ν	Coeficiente de Poisson
a/c	Relação água por cimento, em massa
C_{un}	Coeficiente de uniformidade de agregado
D	Distância entre juntas ou fissuras de argamassa de revestimento
$Desl_{ref}$	Deslocamento de referência da junta de movimentação ou fissura da argamassa de revestimento
E	Módulo de deformação longitudinal
e	Espessura de uma argamassa de revestimento

- E_0 Módulo de deformação longitudinal tangente inicial
- E_a Módulo de deformação longitudinal em argamassa
- $E_a(t)$ Módulo de deformação longitudinal da argamassa na idade t
- $E_{sec,x}$ Módulo de deformação longitudinal secante em na proporção x da carga de ruptura
- f_c Resistência à compressão da argamassa
- f_{c28} Resistência à compressão da argamassa a 28 d
- f_{c3} Resistência à compressão da argamassa a 3 d
- f_{c7} Resistência à compressão da argamassa a 7d
- f_{cm} Resistência à compressão média da argamassa a 28 d
- f_{cm0} Resistência de referência do modelo CEB1990, igual a 10 MPa
- G Módulo de deformação transversal
- h_0 Espessura fictícia da argamassa
- L Comprimento
- $L_{omáx}$ Posição em relação à junta de movimentação da tensão máxima de tração na argamassa
- $L_{\tau máx}$ Posição em relação à junta de movimentação onde a tensão de cisalhamento atinge valor nulo
- p Porosidade de um material
- $R(t, t_0)$ Coeficiente de relaxação entre o tempo t_0 , idade de aplicação da deformação, e o tempo t
- S Resistência de um material genérico
- S_0 Resistência intrínseca para porosidade zero
- UR Umidade relativa do ar, em %

1 INTRODUÇÃO

Com relevante importância, o tema relativo às argamassas de revestimento tem sido palco de uma forte e crescente demanda científica, observada através de volumosos trabalhos publicados, encontros científicos, grupos de pesquisa consolidados e a grande procura de tecnologia pelas empresas do setor.

Quando se busca a qualidade de um revestimento, ou de qualquer subsistema de uma construção, é necessário garantir o seu bom desempenho perante as exigências dos usuários. Isso implica na prevenção das manifestações patológicas, pois elas comprometem o bom desempenho de um subsistema. Essa relação é apresentada no primeiro tópico deste capítulo.

Os outros tópicos deste capítulo buscam mostrar algumas necessidades de conhecimento na área e levantar uma problemática que será estudada e desenvolvida.

1.1 QUALIDADE DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

Neste tópico, coloca-se a questão da qualidade do revestimento como satisfação do usuário. São apresentadas as exigências do usuário de uma construção, a partir das quais são traçados requisitos de desempenho mínimo para os revestimentos.

As necessidades dos usuários são vistas na forma de exigência -- norma ISO-DP-6241 -- e são aplicadas às edificações nos seguintes aspectos:

- segurança estrutural: estabilidade e resistência mecânica;
- segurança ao fogo: limitações ao risco de início e propagação de incêndio e segurança dos usuários;
- segurança à utilização: segurança dos usuários e segurança a intrusões;

- estanqueidade: aos gases, líquidos e sólidos;
- conforto higrotérmico: temperatura e umidade do ar e das paredes;
- atmosféricas: pureza do ar e limitação de odores;
- visual: aclaramento, aspecto dos espaços e das paredes, vista para o exterior;
- acústico: isolamento acústico e níveis de ruído;
- tátil: eletricidade estática, rugosidade, umidade e temperatura da superfície;
- antropodinâmico: acelerações, vibrações e esforços de manobra;
- higiene: cuidados corporais, abastecimento de água e eliminação de matérias usadas;
- adaptação à utilização: número, dimensões, geometria e relações de espaço e de equipamentos necessários;
- durabilidade: conservação e desempenho ao longo do tempo;
- economia: custo inicial, de manutenção e de reposição durante o uso.

No caso de um desempenho inferior ao mínimo preestabelecido, ocorre o que chamamos de manifestação patológica, indicando a falta de qualidade desse subsistema da construção.

1.2 PATOLOGIAS DOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

Dentre vários conceitos, a patologia das construções pode ser entendida como: disciplina da Ciência Engenharia que estuda as origens, causas, mecanismos de ocorrência, manifestações e conseqüências das situações em que as construções, ou suas partes, não apresentam um desempenho mínimo preestabelecido.

Os estudos de casos patológicos são ótimas indicações de como surgem os processos de deterioração dos revestimentos. Eles ilustram uma

grande variedade de ocorrência de materiais, técnicas de execução, agentes agressivos, e a relação destes com o tempo.

Uma análise sistemática de alguns casos com elaboração precisa de diagnósticos, buscando-se as principais variáveis envolvidas no fenômeno observado, fornece os subsídios necessários para traçar-se hipóteses de comportamento dos materiais e processos de ruptura.

A seguir, estão apresentadas as principais manifestações patológicas observadas nos revestimentos de argamassa, que surgem quando o seu desempenho é inadequado.

É importante uma visão abrangente das observações patológicas mais frequentes e, com isso, posicionar e justificar aquelas que serão focalizadas neste trabalho.

1.2.1 PATOLOGIAS DE ORIGEM MECÂNICA

1.2.1.1 Fissuração do revestimento de argamassa

As causas deste problema patológico podem ser: retração excessiva por secagem, contração térmica, dosagem inadequada da argamassa, falha na execução e condições climáticas rigorosas de baixa umidade relativa do ar, ou temperatura elevada.

Segundo BAUER (1994), para diminuir a fissuração, a argamassa não deve possuir alto teor de cimento. Isso não chegaria a aumentar significativamente a retração por secagem segundo ensaios documentados em FIORITO (1994), porém aumentaria a rigidez do material e conseqüentemente as tensões de tração devido à retração impedida.

Mais adiante, neste trabalho, é estudada a relação entre a retração por secagem e o teor de cimento de uma argamassa e as tensões que surgem no revestimento devido a esse fenômeno.

A fissuração de uma argamassa ocorre caso as tensões normais de tração superem a resistência do material em algum ponto. A partir daí, a fissura se propaga, aliviando as tensões, até que um novo equilíbrio mecânico seja atingido.

Quando o problema patológico vem de uma retração por secagem excessiva ou uma contração térmica, forma-se uma malha de fissuras que se cruzam em ângulos próximos a 90° e com espaçamento entre fissuras quase constantes.

A perda de água da argamassa durante a secagem também influencia a fissuração, pois acelera o processo de retração em idades onde argamassa ainda não apresenta boa resistência à tração.

Tal perda de água é aumentada para condições ambientais rigorosas de alta temperatura e baixa umidade relativa do ar e agrava-se no caso da argamassa possuir baixa capacidade de retenção de água, ou quando a sucção do substrato é elevada.

Neste caso, o substrato pode ser umedecido antes da execução do revestimento, diminuindo a perda de água da argamassa para o mesmo.

Resumidamente, as características deste fenômeno patológico são:

- manifestação: fissuras macroscópicas no revestimento de argamassa, formando uma malha de fissuras que se cruzam em ângulos próximos a 90° ;
- causas mais prováveis: retração excessiva por secagem da argamassa, solicitações térmicas em baixas temperaturas, alto teor de cimento, elevada sucção do substrato sem o seu pré-umedecimento e condições climáticas desfavoráveis no momento de execução, como baixa umidade relativa do ar e elevada temperatura. Também mais de uma dessas causas podem atuar simultaneamente, intensificando a manifestação patológica;
- processo envolvido: tensões normais de tração superam a resistência do material.

1.2.1.2 Descolamento da argamassa em forma de placas

O emboço descola-se da base, apresentando som cavo quando submetido à percussão, podendo chegar a cair do painel de alvenaria.

Quando uma argamassa sofre uma elevação de temperatura ou de umidade, tende a dilatar-se. Essa movimentação é impedida pela base, gerando-se esforços de compressão na argamassa, e de cisalhamento na interface desta com o substrato. Tais esforços são tanto maiores, quanto mais rica e espessa for a camada de argamassa de revestimento.

Surgem então, por instabilidade, esforços de tração perpendiculares ao plano do revestimento, cuja magnitude depende da rigidez da ligação da camada comprimida ao substrato.

Se tais esforços forem maiores do que a resistência de aderência à tração da argamassa, a sua ligação com a base se rompe e a camada de revestimento perde a sua estabilidade por completo, podendo descolar em placas. Esse fenômeno é conhecido como flambagem.

Portanto, influenciam neste fenômeno: a resistência de aderência à tração, a espessura e rigidez da camada de argamassa, a insolação e a temperatura do ambiente.

Freqüentemente, são observadas juntas em panos de revestimento com o objetivo de permitir sua movimentação. No caso de revestimentos de argamassa, a eficiência dessas juntas é questionável, sendo esse assunto tratado mais adiante em tópico específico.

Resumidamente, as características deste fenômeno patológico são:

- manifestação: o emboço descola-se da base, podendo desprender-se ou apresentar som cavo sob percussão;
- causa mais provável: movimentação higrotérmica;
- processo envolvido: a variação dimensional da argamassa é impedida pelo substrato, surgindo tensões nas camadas e nas interfaces e prejudicando a aderência.

1.2.2 PATOLOGIAS DE ORIGEM QUÍMICA

1.2.2.1 Descolamento por empolamento

Observa-se a superfície do reboco descolando do emboço, formando bolhas, cujos diâmetros aumentam-se progressivamente. Vale ressaltar que essa manifestação não se refere ao empolamento da pintura, cuja causa mais freqüente é a umidade.

A causa mais provável do empolamento na argamassa é a presença de cal livre, não hidratada, na argamassa. A cal livre são os óxidos de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) não hidratados que, em função da má qualidade da sua extinção em fábrica, podem existir em quantidades prejudiciais.

Segundo CINCOTTO (1989), o problema desses elementos é que podem hidratar-se após a sua aplicação, no contato com a água. Essa hidratação vem sempre acompanhada de um aumento de volume que pode chegar a 100% para o óxido de cálcio e 110% para o óxido de magnésio.

Esse fenômeno é mais freqüente nas cales dolomíticas, constituídas de óxido de magnésio, pois a hidratação desse elemento é mais demorada que a do óxido de cálcio.

A expansão não é uniforme, apresentando-se de forma mais acentuada em alguns pontos da argamassa.

Portanto, trata-se de uma patologia relacionada à instabilidade química do material. Pode ser evitada com o controle do material empregado na produção da argamassa, garantindo-se a qualidade mínima dos seus componentes.

Segundo a ASTM, o limite admissível de teor de óxidos livres na cal utilizada na construção civil corresponde a 8%.

Existem recomendações para que, no preparo da argamassa mista, a cal deva permanecer em cura no mínimo durante 48h para que, além de outros propósitos, ocorra a hidratação completa de seus componentes.

1.2.2.2 Descolamento da argamassa com pulverulência

Pode ser observado quando a película de tinta descola-se com facilidade da argamassa ou quando esta se desagrega.

Geralmente as causas estão relacionadas com a baixa resistência mecânica da argamassa de revestimento. Isso pode ocorrer devido a: presença de impurezas nos agregados, deficiente carbonatação da cal ou dosagem inadequada da argamassa, com excesso de finos e baixo teor de cimento.

Quanto às impurezas dos agregados destacam-se: os conglomerados argilosos que podem desagregar-se com o tempo, os argilo-minerais expansivos, cuja variação volumétrica na presença da água pode levar à desagregação da argamassa ao seu redor.

A utilização de elevada quantidade de saibro, em substituição da cal, também pode causar a pulverulência. Segundo GUIMARÃES (1985), o saibro é um material argiloso e não possui características aglomerantes, sendo que o seu endurecimento é proveniente da perda de água capilar e compactação da argila e, portanto, é fraco e temporário.

A presença de grande quantidade de finos aumenta a quantidade de água necessária ao amassamento e diminui a resistência mecânica. Segundo a NBR7200, o teor de finos presente nas areias para revestimentos é limitado em 5%.

1.2.2.3 Vesículas

As vesículas geralmente surgem no emboço, podendo apresentar-se na forma de empolamento da pintura, sendo suas partes internas na cor branca, preta ou vermelha acastanhada, ou ainda, na forma de bolhas contendo umidade no interior.

Algumas possíveis causas das vesículas, segundo BAUER (1994), são:

- existência de pedras de cal mal extintas. Quando elas se hidratam, logo nas primeiras idades, sua expansão não é absorvida pela argamassa, abrindo uma vesícula geralmente da cor esbranquiçada;
- matéria orgânica no agregado. As vesículas irão apresentar coloração escura no seu interior.

A pirita (FeS_2) e alguns compostos ferruginosos podem sofrer reações de oxidação e formar compostos expansivos. A pirita resulta em sulfatos, e as concreções ferruginosas resultam em óxido de ferro hidratado ou óxido de ferro. Daí, a coloração vermelha acastanhada de algumas vesículas.

Os processos envolvidos nesse fenômeno patológico são a desagregação ou expansão de uma porção da argamassa por alterações químicas.

1.2.2.4 Problemas decorrentes da umidade

A umidade nas construções acarreta as mais variadas manifestações patológicas, como: manchas, bolor, fungos, corrosão, lixiviação, eflorescências, fissuras, descolamento, desagregação, etc.

A umidade nas construções tem diversas origens, podendo ser classificada da seguinte maneira:

- umidade de obra, iniciada na construção e remanescente por certo período após essa etapa;
- umidade de absorção e capilaridade, advinda do solo, absorvida pelas fundações das paredes e migrando para outros componentes;
- umidade de infiltração, que penetra pelos componentes externos da edificação;
- umidade de condensação, proveniente do vapor de água que se condensa nas superfícies e no interior dos componentes.

Os componentes da edificação mais expostos à ação da água, segundo a ABCI (1990), são as fachadas e as coberturas. Nas fachadas, a penetração de umidade depende dos seguintes fatores:

- espessura e rugosidade da parede: a textura lisa facilita a formação das prejudiciais lâminas de água;
- tratamento superficial: revestimentos e pinturas impermeabilizantes ou hidrófugas;
- arquitetura da fachada: falta de frisos, pingadeiras, etc, facilitando a formação de lâminas de água;
- orientação da fachada em relação aos ventos predominantes;
- intensidade e duração das precipitações;
- tratamento de juntas no revestimento externo;
- propriedades dos materiais constituintes da fachada.

Segundo PEREZ (1980), os mecanismos de transferência de umidade dentro de um sólido são: difusão e convecção para o vapor de água; e a capilaridade, força da gravidade e pressões externas para a água.

As ações de gravidade e pressão externa são importantes nos materiais com grandes poros, fendas ou juntas, onde o efeito de capilaridade é pequeno.

Até se atingir a saturação do material, a percolação da água depende da pressão externa e da ação capilar. Estando o material saturado, a taxa de percolação irá depender apenas da pressão externa.

Algumas propriedades das argamassas que regulam esses transportes de água no interior dos materiais são: a permeabilidade (capacidade de ser atravessado por um fluido sob ação de um gradiente de pressão), a porosidade (aberta ou fechada, influenciando a facilidade do transporte de água) e o tamanho dos capilares (quanto menor o seu diâmetro, maior a força capilar).

A fissuração do revestimento devido à umidade ocorre com a expansão da argamassa de assentamento da alvenaria por dilatação higroscópica, por reações de hidratação de compostos mal extintos da cal ou por reações expansivas devido à interação sulfato-cimento. Isso, geralmente, surge na parte inferior das paredes, em contato com a umidade existente próxima ao chão.

A eflorescência significa formação de depósito salino, geralmente sais de metais alcalinos (sódio e potássio) e alcalinos terrosos (cálcio e magnésio), na superfície de revestimentos de argamassa.

Os danos causados pela eflorescência são vários: estético, alterando o aspecto visual do componente; higiênico, sendo um material decomposto e removível, podendo acumular sujeiras; agrava a situação de umidade do componente retendo água na superfície e pode causar desagregação da argamassa caso seus sais constituintes sejam agressivos.

Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA (1990), a eflorescência é causada pela combinação dos seguintes fatores:

- alto teor de sais solúveis nos materiais;
- presença de água para dissolver os sais solúveis;
- pressão hidrostática ou evaporação que faça a solução aflorar para a superfície;

1.2.3 PROBLEMAS DEVIDO ÀS FALHAS NA CONCEPÇÃO DO COMPORTAMENTO DE OUTROS COMPONENTES

Qualquer revestimento, por ser um componente muito visível em uma construção, sofre a influência das manifestações patológicas de vários outros componentes.

Por exemplo, no caso de fissuração de uma alvenaria, essa levaria à fissuração do revestimento de argamassa. Isso porque, quando camadas

adjacentes possuem perfeita aderência, a fissuração de uma implica na mesma falha na outra.

Analisando esse fenômeno, observamos que caso ocorra o surgimento de uma fissura na alvenaria, com abertura Δl , a camada adjacente de argamassa sofrerá uma deformação de valor:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

Onde:

L = comprimento deformado

ΔL = variação de comprimento ou abertura da fissura

ε = deformação

Como a fissura ocorre com deformação em comprimento nulo, a deformação da camada adjacente seria:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{0} = \infty \quad (2)$$

Para absorver tal deformação, o módulo de deformação do material deveria ser:

$$E = \frac{\sigma}{\infty} = 0 \quad (3)$$

Tal módulo de deformação não existe e, portanto, fica evidente que se houver solidarização perfeita entre as duas camadas, a fissuração de uma implicará na da outra.

Além disso, os subsistemas deveriam ser projetados para estarem imunes aos efeitos que as construções normalmente estão sujeitas ao longo de sua vida útil.

Um efeito freqüentemente observado é o recalque diferencial de fundação. Uma vez ocorrido, implica em distorção angular proporcional ao valor do recalque e à distância entre os pontos recalcados.

A partir daí, surge um estado de tensões no material para o qual as alvenarias e os revestimentos deveriam ser projetados de forma a não apresentarem fissuração visualmente perceptível.

Segundo ALONSO (1995), na face vertical de uma parede submetida à uma distorção angular, atua apenas tensão de cisalhamento τ , sendo a tensão normal σ igual a zero.

Na figura a seguir, o ponto **A** representa o estado de tensões atuante na face vertical da parede; e o ponto **B**, o estado de tensões na face horizontal. Conhecidos esses pontos é possível construir o círculo de Mohr, cujo pólo coincide com o ponto **A**.

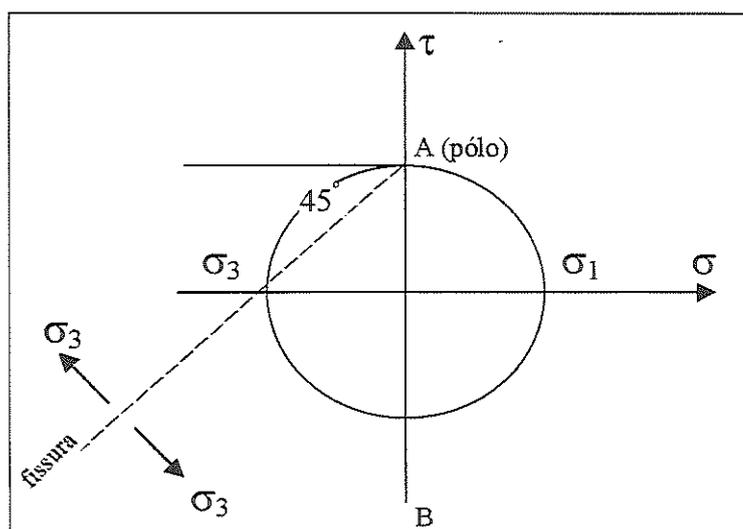


Figura 1 – Estado de tensões devido à distorção angular (ALONSO, 1995).

Verifica-se que a tensão de tração máxima σ_3 atua em planos inclinados a 45° com a horizontal e tem valor em módulo igual a τ .

De acordo com os princípios da Resistência dos Materiais, a distorção angular é obtida pelas expressões:

$$\delta = \tau / G \quad (4)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5)$$

Onde:

G = módulo de deformação transversal

E = módulo de deformação longitudinal

ν = coeficiente de Poisson

Pela Lei de Hooke:

$$\sigma_3 = \varepsilon \cdot E \quad (6)$$

Pelo círculo de Mohr:

$$\sigma_3 = \tau \quad (7)$$

Assim, tem-se que:

$$\tau = \varepsilon \cdot E \quad (8)$$

Substituindo-se, na expressão (4), os valores de $\delta = \Delta L/L$, e as expressões (5) e (8) obtém-se:

$$\Delta L = 2 \cdot \varepsilon \cdot (1 + \delta) \quad (9)$$

Para o caso particular de $\delta=0$, tem-se:

$$\Delta L = 2 \cdot \varepsilon \quad (10)$$

Com isso, relaciona-se a distorção angular com a deformação específica do material.

Assim, para uma distorção angular de 1/500, distorção esta considerada admissível nos recalques diferenciais de fundação, a deformação sofrida pelo material seria:

$$\Delta L/L = 1/500$$

$$1/500 = 2 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = 1/1000 = 0,1\%$$

Portanto, as paredes compostas de alvenaria e revestimento de argamassa deveriam ser projetadas para admitirem uma deformação de 0,1%, sem grandes aberturas de fissuras.

Outra situação natural em edificações é o caso da insolação nas faces externas de edifícios altos.

Por exemplo, em um edifício com altura de 100m submetido a uma variação de temperatura de 15°C, os pilares externos tentariam sofrer um acréscimo de comprimento, seguindo a expressão:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (11)$$

Assim, para os valores acima, teríamos o seguinte deslocamento no topo do edifício:

$$\Delta L = 10^{-5} \cdot 15 \cdot 100 = 0,015\text{m ou } 1,5\text{cm}$$

Esse deslocamento seria, em parte, resistido pelo restante da estrutura, resultando em deformações finais, às quais provocariam distorções angulares que também devem ser levadas em consideração.

Há, também, a questão do desaprumo de um edifício devido a imperfeições geométricas na fase de execução. Tal situação está sempre presente, em maior ou menor intensidade, e pode implicar em grandes espessuras de argamassas de revestimento na base do edifício.

Segundo o TEXTO BASE PARA A REVISÃO DA NB1/78 (1992), deve ser considerado, na análise estrutural do edifício, um desaprumo dado pela expressão:

$$\theta_a = \theta_1 \cdot \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{n}}{2}} \quad (12)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{L}} \geq 0,005\text{rad} \quad (13)$$

Onde:

n = número de pilares contínuos

L = altura da estrutura, em m

Supondo um edifício corrente de 12 pavimentos, altura de 35m, com 20 pilares contínuos, pode-se escrever:

$$\theta_1 = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

Como esse valor é menor que 0,005 rad, adotar $\theta_1 = 0,005$

$$\theta_a = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ rad}$$

Assim, a espessura do revestimento na base do edifício seria:

$$e(\text{base}) = e(\text{topo}) + \text{tg}\theta_a \cdot l$$

$$e(\text{base}) = 0,02 + 0,13 = 0,15\text{m ou } 15\text{cm}$$

Essa espessura de revestimento, apesar de parecer exagerada, pode ocorrer. A norma de projeto e execução de estruturas de concreto, que recomenda a consideração de tal desaprumo nos edifícios, o faz a partir de observações de obras correntes e, portanto, a possibilidade de tal situação deve ser considerada.

1.2.4 PROBLEMAS NOS REVESTIMENTOS DECORRENTES DE FALHAS NAS ALVENARIAS

O conhecimento das manifestações patológicas nos revestimentos decorrentes das falhas nas alvenarias é importante para identificar-se as patologias que estão ligadas unicamente aos revestimentos de argamassa, que são o principal objeto desta pesquisa.

Tanto na alvenaria estrutural, quanto na de vedação, as falhas se apresentam, em geral, na forma de fissuras, que estão relacionadas com aspectos intrínsecos do material, estabilidade física e química, e com agentes externos de deterioração.

Os agentes de deterioração desses componentes podem ser de natureza mecânica, térmica ou química.

Como agentes de natureza mecânica, podem-se destacar:

- componentes estruturais horizontais como vigas e lajes deformadas, em serviço, com flechas excessivas, impondo às alvenarias deformações de distorção angular, que podem gerar fissuras a 45°; ou causando tensões exageradas com o esmagamento do material, podendo surgir fissuras verticais ou inclinadas a partir do canto de aberturas;
- lajes carregadas, apoiadas em paredes onde surgem esforços fletores fora do seu plano, podendo causar fissuras horizontais na junção entre elas;
- recalques de fundação, gerando distorção angular, podendo causar fissuras a 45°;
- difusão de cargas concentradas e mudança de direção de esforços, em aberturas ou em regiões menos rígidas, podendo causar fissuras de tração acompanhando as isostáticas de compressão;
- movimentação da estrutura devido a ações horizontais de vento, solicitando os painéis de alvenaria, os quais trabalham como contraventamento.

Os agentes térmicos causam variações dimensionais nos componentes da edificação, de acordo com as suas propriedades térmicas. São eles:

- contração impedida da alvenaria, gerando esforços de tração, podendo causar fissuras verticais nas seções mais enfraquecidas, como as que contêm aberturas, nas amarrações ineficientes, na localização de instalações hidráulicas ou elétricas, embutidas com rasgos na alvenaria, e nas juntas verticais de assentamento da alvenaria;
- movimentação térmica de lajes de cobertura apoiadas sobre alvenaria, podendo causar fissuras horizontais ao longo da junção entre elas;

- dilatação térmica da estrutura, gerando grandes distorções angulares nas alvenarias do topo do edifício, podendo causar fissuras a 45°.

Existe também a ação patológica de efeitos da própria conformação do material, como no caso da retração por secagem das argamassas de assentamento da alvenaria e do concreto de moldagem de lajes.

Todas as falhas aqui tratadas manifestam-se através de fissuras geralmente abertas e profundas, as quais sempre causam, também, fissuras nos revestimentos.

Pode-se dizer que o grau de fissuração está relacionado com a capacidade das alvenarias absorverem deformações. Cabe ao projetista do revestimento, preocupar-se em conferir ao material de acabamento uma deformabilidade pelo menos igual à da alvenaria. Assim, evita-se que o revestimento fissure antes dela.

1.3 DIAGNÓSTICOS DAS PATOLOGIAS

Segundo LICHTENSTEIN (1985), os problemas patológicos são processos dinâmicos, sendo que as manifestações apresentam aspecto variado com o tempo, estando o quadro geral em constante alteração.

Como conseqüência disso, o processo de diagnóstico também deve ser dinâmico, alcançando todo o desenvolvimento do problema patológico e não simplesmente da situação instantânea.

Quase sempre, as patologias estão associadas a falhas de projeto, erros de concepção, desconhecimento de propriedades dos materiais de construção, fiscalização deficiente dos serviços, etc.

Tal fato, aliado à falta de acompanhamento da obra concluída pelos seus projetistas e construtores, assim como a própria ausência de um sistema de catalogação dos problemas patológicos, sua ocorrência, incidência, gravidade e medidas corretivas adotadas, fez com que a disciplina "Patologia das Construções", avançasse lentamente.

Um diagnóstico bem feito dos problemas patológicos é fundamental para o estabelecimento de medidas preventivas em outras obras e para decisão sobre os prováveis processos de correção.

No entanto, essas causas nem sempre podem ser combatidas, pois elas se tornam obscuras diante de algumas falhas no conhecimento existentes sobre o comportamento do sistema de revestimento.

Ou seja, os problemas ocorrem quando:

- outros subsistemas falham e se manifestam através do revestimento;
- as recomendações técnicas não são seguidas por incapacidade, por ignorância ou por negligência;
- as recomendações técnicas são trocadas por inovações tecnológicas não consagradas;
- as recomendações técnicas são seguidas corretamente e mesmo assim, naquele caso, elas não garantiram o desempenho do revestimento, o que significa que existe, aí, uma falha no conhecimento.

1.4 AS FALHAS DE CONHECIMENTO

Sobre os problemas que as falhas no conhecimento dos revestimentos de argamassa podem gerar, destaca-se o caráter ainda empírico das recomendações existentes.

Muitos são os casos em que se seguem as recomendações e, mesmo assim, o desempenho não é satisfatório, mostrando que o sistema de revestimento é mais complexo e envolve parâmetros nem sempre considerados nos critérios de recomendação.

Isso ocorre porque, direta ou indiretamente, todas as recomendações existentes são de dosagem dos materiais e não de propriedades das argamassas.

As poucas recomendações existentes de propriedades mecânicas provêm de uma associação feita com as argamassas consideradas “bem

dosadas”, onde suas propriedades, acredita-se, são as ideais, independente da sua situação de utilização, ou onde e para quem são empregadas.

Dessa forma, dificulta-se o emprego de materiais, dosagens ou processos alternativos, pois se torna quase impossível prever o desempenho que o revestimento irá apresentar.

Já com a compreensão do comportamento mecânico do revestimento de argamassa, como ocorre com o concreto armado, a madeira, o aço e os solos, poder-se-á traçar recomendações de propriedades às argamassas que serão diferentes para cada caso de aplicação do revestimento.

É inadmissível que os fenômenos ou manifestações observados nos revestimentos de argamassa sejam algo que pode ou não ocorrer, uma contingência, sem poder serem determinados a priori e, com isso, evitados.

1.5 OBJETO DA PESQUISA

Este trabalho estuda o comportamento mecânico do sistema de revestimento, considerando-se todos os parâmetros envolvidos, nos casos em que os revestimentos de argamassa são solicitados por agentes mecânicos intrínsecos ao material e pelo ambiente externo.

Não se inclui, no objeto desta pesquisa, falhas em outros componentes de uma edificação, cuja manifestação implicaria em problemas nos revestimentos; e nem os agentes patológicos de origem química, mesmo que intrínsecos ao material.

Para tanto, deverão ser identificados quais são os parâmetros significativos e a influência do seu domínio, ou seja, seus limites possíveis de ocorrência, no equilíbrio do sistema e no desempenho do revestimento.

Com relação às propriedades das argamassas, além da sua influência no comportamento mecânico do sistema, deve ser analisado como elas estão relacionadas entre si, com os tipos de materiais constituintes e com as proporções entre esses materiais.

O estudo das propriedades mecânicas das argamassas será sistemático em relação aos parâmetros que mais influenciam nos seus valores, buscando-se modelos matemáticos, para que elas possam ser previstas a partir dos seus materiais constituintes e sua proporção.

Também no comportamento mecânico, busca-se o determinismo através de modelos matemáticos, de forma que tais modelos possam ser utilizados na previsão do comportamento de um determinado revestimento a ser empregado em uma determinada situação, prevendo a possibilidade de uma manifestação patológica e, com isso, decidindo-se pela melhor dosagem da argamassa caso a caso.

2 QUADRO DE REFERÊNCIA ESPECÍFICO

Este capítulo busca reunir informações necessárias à montagem de um quadro de referência teórico que possibilite a compreensão dos fatores envolvidos no comportamento mecânico dos revestimentos de argamassa.

2.1 HISTÓRIA E CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS

A história das argamassas é bem antiga. Seu emprego, unindo componentes de alvenaria, data de milhares de anos. Em grande parte, a cultura atual de sua utilização e procedimentos de aplicação descendem desse passado milenar.

A produção das argamassas teve início com a descoberta de algumas propriedades das argilas.

Segundo OLIVEIRA (1959), os Mesopotâmios da cidade de Ur, em torno de 4.000 a.C., utilizavam argila molhada com função de unir componentes de alvenaria, os quais também eram fabricados com a argila. Esses blocos eram moldados com a argila molhada e depois eram secos ao sol.

Já no período neolítico, segundo BAUER (1994), o homem pré-histórico calafetava as cestas de vime com o barro, ou argila molhada, que apresentava propriedades de endurecimento quando secava a temperatura ambiente. Tais propriedades vinham de alterações físicas do material que ocorriam com a perda de água de amassamento e a retida nos capilares. Depois, com o tempo, passaram a dispensar o vime e utilizar o barro puro.

Posteriormente, constatou-se que, à medida que se elevava a temperatura de secagem da argila, ela tinha suas propriedades de endurecimento melhoradas. Foi então que surgiu a cerâmica.

Pouco mais tarde, em cerca de 3.000 a.C., começaram a surgir o gesso impuro calcinado e a cal, utilizados nas construções do Antigo Egito.

Em cerca de 2.000 a.C., o betume era utilizado para solidificar os componentes de alvenaria, destacando-se sua propriedade de impedir infiltração. Seu uso pode ser observado em edifícios da Babilônia. Esse material, segundo BAUER (1994), era empregado pelos assírios em seus palácios e estradas, em forma de argamassa.

Segundo NEVILLE (1982), os gregos e romanos usavam o calcário calcinado, que hoje chamamos de cal virgem, porque apresentava boas propriedades de endurecimento após o contato com a água.

Posteriormente, surgiu a idéia de usar a cal como aglomerante em materiais compostos com areia. Nasceram as argamassas.

Mais tarde, no Império Romano, observou-se que as argamassas de cal não endureciam debaixo d'água, necessitando-se buscar outro material para a realização das construções submersas.

Passaram então a triturar a cal com cinzas vulcânicas e telhas de argila queimadas, finamente moídas. O calcário combinava-se com a sílica ativa e a alumina da cinza e das telhas, formando o que veio a ser chamado de cimento pozolânico.

Após a Idade Média, um período sem grandes avanços na qualidade e uso do cimento, em 1756, John Smeaton misturou a pozolana ao calcário contendo elevado teor de argila, obtendo bons resultados para as argamassas. Smeaton foi também o primeiro a reconhecer as propriedades químicas da cal hidratada.

Em 1845, Isaac Johnson queimou uma mistura de argila e greda (giz) até a formação do clínquer. Foi então que se verificou, pela primeira vez, a formação de compostos de alta resistência no cimento. Este passou então a ser o componente fundamental das argamassas.

As argamassas de assentamento de alvenaria não são objeto deste trabalho, porém servem de subsídio à compreensão do surgimento das atuais argamassas de revestimento, uma vez que suas propriedades são semelhantes e o desenvolvimento de uma possibilitou a utilização da outra.

Com esse breve histórico, observa-se que o desenvolvimento desses materiais se deu ao longo de milênios. Somente nos últimos tempos, mais notadamente no último século, é que esses materiais foram estudados de forma mais científica e menos empírica, podendo-se inclusive aplicar-se a eles, conhecimentos de ciência dos materiais.

O que se fez, ao longo do tempo, nada mais foi do que se alterar as propriedades dos materiais através da micro e macroestrutura, utilizando-se materiais polifásicos ou compostos.

Segundo VAN VLACK (1970), o material composto pode provir da mistura de componentes com propriedades aditivas, cuja média ponderada das propriedades de cada um determina a propriedade final. Por exemplo, o coeficiente de dilatação térmica de um composto advém da soma dessa propriedade, ponderada em massa, para cada um dos materiais constituintes.

Os componentes de um material composto podem ter também propriedades interativas, onde as propriedades dos constituintes influem umas nas outras, formando um material com uma terceira propriedade, que não se apresenta nos componentes isolados.

Isso ocorre, por exemplo, em misturas de argila com areia ou pasta de cimento com areia, onde a pasta de cimento ou argila liga a areia, proporcionando coesão e maleabilidade a um elemento bem mais resistente.

2.2 USOS, FUNÇÕES E PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS.

Todas as preocupações, ao longo do tempo, de se melhorar as propriedades dos materiais, objetivaram a melhoria no desempenho das suas funções perante as necessidades do homem.

A tabela seguinte apresenta os principais usos, funções e propriedades das argamassas de assentamento e revestimento.

Tabela 1 - Usos, funções e propriedades das argamassas (MARTINELLI, 1991)

USOS	FUNÇÕES	PROPRIEDADES
assentamento convencional	unir os componentes da alvenaria; vedar juntas	trabalhabilidade; retenção de água; resistência mecânica; estabilidade volumétrica; tenacidade
assentamento de acabamentos	unir componentes de acabamento ao substrato	trabalhabilidade; retenção de água; aderência; estabilidade volumétrica; tenacidade
chapisco	unir camadas de revestimento ao substrato	trabalhabilidade; aderência
emboço	vedar a alvenaria; regularizar a superfície	trabalhabilidade; retenção de água; estanqueidade; aderência; estabilidade volumétrica.
reboco	vedar o emboço	trabalhabilidade; aderência; estabilidade volumétrica

2.3 PROPRIEDADES E NORMALIZAÇÕES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

São diversas as propriedades físicas que as argamassas de revestimento devem apresentar, para que possam desempenhar suas funções com economia e durabilidade.

As tabelas seguintes citam os métodos de ensaio para a determinação das propriedades das argamassas no estado fresco, estado endurecido aplicado à base e estado endurecido não aplicado à base, respectivamente.

Tabela 2 - Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado plástico.

CATEGORIA	PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO
Argamassa no estado plástico	Plasticidade	RILEM MR-13/1982
		NBR 7215/1991
	Consistência	NBR 13276/1995*
		BS 4551/1980
	Capacidade de retenção de água e de retenção de consistência	RILEM MR-1/1982
		ASTM C780/1991
		DIN 18555 p.2/82
		LNEC FE Pa 10/1980
		BS 4551/1980
		DIN 18555 p.7/87
		NBR 9287/1986
	Massa específica e teor de ar incorporado	NBR 13277/1995*
		DIN 18555 p.2/82
BS4551/1980		
ASTM C780/1991		
Exsudação	NBR 11686/1990	
	NBR 13278/1995*	
	RILEM MR-6/1982	

Tabela 3 - Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido aplicadas à base.

CATEGORIA	PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO
Corpos de prova de argamassa aplicada sobre substrato ou ensaio in loco	Resistência de aderência à tração	IPT ME-10-1981
		NBN 813/1969
		DIN 18555 P.6/87
		RILEM MR-21/1982
		NBR 13528/95*
	Resistência de aderência ao cisalhamento	LINEC FE PA 36/1986
		CSTB/CA. 2669-4/93
		RILEM MR-20/1982
	Permeabilidade à água	RILEM MR-14/1982
		CSTB/CA 2669-4/93
	Resistência de aderência à abrasão	CSTC NIT 140/1982
		RILEM MR-9/1982
	Resistência superficial	LINEC FE PA 28/1980
		RILEM MR-18/1982
	Resistência ao impacto	CSTB/CA 2669-4/93
LINEC FE PA 25/1980		
RILEM MR-19/1982		
LINEC FE PA 26/1980		
		LINEC FE PA 27/1980

Tabela 4- Métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento no estado endurecido.

CATEGORIA	PROPRIEDADE	MÉTODO DE ENSAIO
Corpos de prova de argamassa endurecida	Resistência à compressão	NBR 7215/1991
		NBR 13279/1995*
	Resistência à tração	ASTM C780/1991
		NF EN 196 P. 1/1990
		RILEM MR-7/1982
		DIN 18555 P. 3/82
		BS 4551/1980
		NBR 7222/1982
		ASTM C780/1991
		NF EN 196 P. 1/1990
		DIN 18555 P. 3/82
		BS 4551/1980
	Massa específica	NBR 9778/1986
	massa aparente	BS 4551/1980
		NBR 13280/1995*
	módulo de elasticidade	NF B 10-511/1975
		DIN 18555 P. 4/86
retração por secagem	NBR 8522/1983	
	RILEM MR-12/1982	
	CSTB/CA. 2669-4/93	
	ASTM C1148/1992A	
absorção de água por capilaridade	NBR 8490/1984	
	NBR 9779/1995	
	DIN 52617/1987	
Permeabilidade à água	NF B 10-511	
	CSTB/CA. 2669-4/93	
	RILEM MR-10/1982	
Permeabilidade ao vapor de água	CSTB/CA. 1779/1982	
	DIN 52615/1987	
Resistência química	CSTB/CA. 2669-4/93	
	ASTM CS67/1982	

2.3.1 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

2.3.1.1 Trabalhabilidade

Mede a facilidade com que uma argamassa pode ser trabalhada e aplicada. É quantitativamente imensurável, sendo que está relacionada a todas as outras propriedades da argamassa no estado fresco.

Um outro aspecto que define a dificuldade de sua mensuração é que essa não é uma propriedade absoluta, quer dizer, depende da condição humana relacionada com o trabalho de aplicação e outras particularidades, como o processo de execução, tempo demorado entre o preparo e aplicação da argamassa e das condições ambientais.

Para ROSELLO (1976), para que a argamassa tenha boa trabalhabilidade, três exigências devem ser atendidas:

- sua consistência deve ser apropriada para uma aplicação com facilidade, preenchendo todos os vazios do substrato;
- deve ter capacidade de retenção de água suficiente para evitar sua perda de consistência muito rapidamente ou perda de água excessiva para o substrato;
- não deve ter alta densidade de massa, para não cansar o operário demasiadamente com o tempo.

Segundo SELMO (1989), a RILEM conclui que compete ao pedreiro a determinação da quantidade de água de amassamento necessária para conferir a adequada trabalhabilidade à argamassa.

De acordo com vários autores, como GOMES et al. (1995), a trabalhabilidade está mais relacionada com as propriedades conhecidas como consistência e plasticidade; sendo que a partir da avaliação destas, pode-se concluir a respeito daquela.

2.3.1.2 Coesão e Tixotropia

Coesão é uma propriedade resultante da ação de forças físicas de atração entre as partículas sólidas da argamassa e às ligações químicas da pasta de aglomerante.

A tixotropia refere-se às transformações do estado sólido para o estado fluido, que acontece com os aglomerantes quando em contato com a água, formando a pasta.

2.3.1.3 Consistência

Consistência é a propriedade que a argamassa no estado fresco possui de resistir a deformações.

A classificação usual da consistência, em função de como a pasta de aglomerante envolve os grãos de agregado miúdo, é a seguinte:

- consistência seca, onde a pasta aglomerante apenas preenche os vazios entre os grãos de agregado ou parte deles, sendo que os sólidos permanecem em contato, com um elevado coeficiente de atrito. São pouco trabalháveis, pesadas e de fácil desagregação;
- consistência plástica, onde a pasta preenche os vazios e forma uma película fina na superfície dos grãos. Assim, os grãos apresentam-se bem aderidos uns aos outros e lubrificados, numa estrutura coesa e trabalhável, sendo baixo o coeficiente de atrito entre eles. Essa é a consistência que as argamassas de revestimento devem apresentar;
- consistência fluida, onde os grãos encontram-se imersos em pasta aglomerante, originando uma argamassa sem coesão e com tendência a exsudação, não se aderindo bem à colher de pedreiro ou ao substrato.

Os fatores que interferem na consistência são: relação entre água e materiais secos, granulometria da areia, teor de finos, natureza e qualidade do aglomerante.

A granulometria da areia define o volume de vazios a ser preenchido pela pasta e a área superficial dos sólidos a serem envolvidos por ela. Assim, para se obter uma determinada consistência, será necessária uma maior quantidade de pasta aglomerante com uma granulometria mais descontínua, um módulo de finura menor (areia mais fina) ou a forma dos grãos mais angulosa.

Quanto à natureza do aglomerante, tem-se um exemplo de que a cal, apesar de melhorar a coesão da argamassa, exige uma maior quantidade de água na dosagem para a obtenção de uma mesma consistência, uma vez que se trata de um material muito fino e com grande área superficial para ser umedecida.

Um método de ensaio utilizado para medir o índice de consistência é normalizado pela NBR 7215/91, que descreve o ensaio destinado à avaliação de cimento.

A NBR 13276/95, própria para argamassas de assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos, define um método de determinação do teor de água necessário para a obtenção de um índice de consistência padrão, fixado em 255mm (± 10 mm) no espalhamento do tronco de cone na mesa cadente.

2.3.1.4 Plasticidade

A plasticidade é a propriedade que define a capacidade da argamassa no estado fresco de manter as deformações que lhe são impostas, deformando-se sem romper.

Isso quer dizer que ela define a moldabilidade da argamassa, permitindo que ela assuma a forma desejada pelo operário.

Segundo VARGAS & COMBA apud CALDEIRA (1994), a plasticidade das argamassas pode ser classificada de acordo com o teor de finos, partículas sólidas de diâmetro inferior a 0.075mm, em relação à sua massa total seca de cimento, cal e areia.

Tabela 5- Classificação de argamassas quanto à plasticidade (VARGAS & COMBA apud CALDEIRA, 1994).

CLASSIFICAÇÃO DE PLASTICIDADE DA ARGAMASSA	TEOR DE FINOS < 0.075mm
Gorda	Superior a 25%
Normal	Entre 15% e 25%
Magra	Inferior a 15%

Segundo CINCOTTO (1995), essa propriedade é influenciada pelo teor de ar incorporado, natureza e teor de aglomerantes e pela intensidade da mistura. É também influenciada pelo teor de finos dos materiais sólidos, como apresentado acima.

Alguns autores recomendam o método de ensaio MR-13, da RILEM, para avaliar a plasticidade. O procedimento é a determinação da energia necessária para provocar uma certa deformação a uma amostra de argamassa em um molde específico.

2.3.1.5 Retenção de água

A retenção de água exprime a capacidade da argamassa manter sua água, sem perdê-la para o ambiente por evaporação ou para uma superfície com a qual entra em contato.

Essa perda de água, que é inevitável, deve ser tal que não prejudique a trabalhabilidade da argamassa antes de sua aplicação, ou seja, que gere perda de consistência.

Outras conseqüências prejudiciais da perda excessiva de água seriam a incompleta hidratação do cimento e os efeitos de uma rápida retração por secagem, o que pode comprometer a estabilidade do revestimento.

Alguns fatores que afetam a capacidade de retenção de água são:

- área específica dos materiais constituintes. Uma argamassa tende a conservar a água que envolve a superfície das partículas sólidas, das bolhas de ar e das macromoléculas presentes como micelas coloidais, sendo que a água em excesso se perderá facilmente. Daí o alto poder de

retenção de água dos finos, como a cal, devido à sua elevada área superficial;

- maturação prévia da pasta de cal ou da argamassa, aumentando a adsorção superficial de água pelos seus componentes, em especial pela cal.

A perda de água na interface entre a argamassa e o substrato não parece ser uma ocorrência preocupante. CARASEK (1996) pesquisou alguns trabalhos que estudaram a influência da capacidade de retenção de água das argamassas na resistência de aderência delas aos substratos. Não foi observada perda de resistência de aderência no caso de argamassas de baixa retenção de água, ou 45% de retenção pelo método ASTM C-270.

O método de ensaio normalizado pela ABNT para a avaliação da capacidade de retenção de água é descrito pela NBR 13277/95, que se aplica exclusivamente às argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos.

Nesse método são empregados discos de papel de filtro, assim como no método da norma britânica BS 4551/1980.

Outro método para avaliação da retenção de água é dado pela NBR 9287/86. Nesse método, é a retenção de consistência que é avaliada, pois a medida é feita em função da consistência antes e depois da sucção de água pelo funil de "Büchner" modificado.

Quanto às exigências, a ASTM exige as seguintes retenções mínimas de água:

- ASTM C-91 (1991): para cimento de alvenaria, retenção mínima de 70%;
- ASTM C-270 (1993): para argamassa de assentamento, retenção mínima de 75%;
- ASTM C-1142 (1992): para argamassa dosada em central, retenção mínima de 75%.

No Brasil, a NBR 13281/95, de especificação de argamassas industrializadas, exige retenção mínima de 70%, não existindo outras exigências nacionais normalizadas.

2.3.1.6 Exsudação

É um fenômeno de separação das fases da argamassa.

A manifestação desse fenômeno é o aparecimento de água na superfície da argamassa após ficar em repouso por um tempo.

Ocorre em maior intensidade em argamassas de consistência muito fluida, onde existe água em excesso e a coesão interna é baixa, e em argamassas com deficiência de finos.

A RILEM propõe um método de avaliação da exsudação (MR-6), onde amostras são colocadas em repouso e após intervalos de tempo a água exsudada é medida.

2.3.1.7 Teor de ar incorporado

O volume de ar presente na argamassa fresca pode ser adicionado naturalmente, durante o processo de mistura, ou ser incorporado, intencionalmente, através de aditivos incorporadores.

Existem dois métodos para a quantificação do ar incorporado: o gravimétrico e o pressométrico.

O método gravimétrico consiste na determinação da massa unitária da argamassa medida experimentalmente; e comparando-a com a massa unitária calculada teoricamente, a partir das massas específicas dos seus componentes e suas proporções, como se não houvesse ar incorporado. Esse método é descrito pela NBR 13278/95, destinada a argamassas de assentamento e revestimento.

O método pressométrico é baseado na lei de "Boyle" para gases, e avalia o teor de ar incorporado pela relação da pressão e do volume, em uma determinada temperatura. A norma de ensaio NBR 11686/90 prescreve

esse método para determinação da propriedade em concreto. Já a ASTM C-780, que emprega o mesmo processo, aplica-se às argamassas.

2.3.1.8 Massa específica

Sua determinação para das argamassas em estado fresco está descrita na NBR 13278/95, que descreve um recipiente, de volume calibrado, a ser preenchido e pesado para o cálculo da massa específica.

2.3.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

São essas propriedades que definem o comportamento mecânico das argamassas durante a sua utilização e o desempenho das suas funções frente aos agentes de deterioração.

As propriedades aqui apresentadas serão: resistência mecânica, elasticidade e capacidade de deformação, resistência química, retração por secagem, permeabilidade, e resistência de aderência.

2.3.2.1 Resistência mecânica

Por definição, a resistência de um material é a sua capacidade de resistir à tensão, sem ruptura. Em um corpo-de-prova, é a carga máxima que ele pode suportar.

A resistência à compressão uniaxial é universalmente empregada como um índice geral das propriedades mecânicas, podendo as outras resistências, como à tração, ao cisalhamento ou compressão em estado múltiplo de tensões, serem diretamente a ela relacionadas. Por isso, esse é um parâmetro facilmente encontrado na bibliografia.

São diversos os fatores dos quais a resistência mecânica depende. Eles podem ser inerentes às características dos materiais empregados e de seu proporcionamento, às condições de cura da argamassa e a certos parâmetros de ensaio.

No caso dos fatores inerentes aos materiais constituintes das argamassas, pode-se citar a relação água/cimento, teor de cimento, teor de cal, tipo de cimento, porosidade, ar incorporado, granulometria e mineralogia dos agregados, aditivos e adições.

Existe uma relação fundamental inversa entre a porosidade e a resistência dos sólidos, como é retratado em MEHTA & MONTEIRO (1994), a qual, para materiais homogêneos simples, pode ser descrita pela expressão:

$$S = S_0 \cdot e^{-k \cdot p} \quad (14)$$

Onde:

S = resistência do material

p = porosidade do material

S₀ = resistência intrínseca para a porosidade zero

k = constante

POWERS apud MEHTA & MONTEIRO (1994), observando três diferentes tipos de argamassas, encontrou a seguinte relação:

$$f_c = a \cdot x^3 \quad (15)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão aos 28 d

a = resistência intrínseca do material para a porosidade zero

x = fração de sólidos do sistema

Como os agregados possuem resistência mecânica muito superior à da pasta aglomerante empregada nas argamassas de revestimento, a ruptura geralmente ocorre nessa região enfraquecida.

Dessa forma, a porosidade da pasta aglomerante é o fator determinante da resistência, e os principais fatores dos quais essa

porosidade depende são: a relação água/cimento e o grau de hidratação do cimento.

No processo de endurecimento da argamassa à base de cimento, a distância inicial das partículas sólidas de aglomerante, dependente da relação água/cimento, define um espaço do qual a água irá sair e os produtos de hidratação do cimento irão ocupar, em parte e com o tempo, no decorrer do processo de hidratação.

São os espaços não ocupados, ou vazios, que constituirão os poros da argamassa, sendo que os de dimensão superior a 50nm, ou macroporos, influenciarão sobremaneira na resistência mecânica.

Pela antiga lei de Abrams:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (16)$$

Onde:

a/c = fator água/cimento

f_c = resistência mecânica

k₁ e **k₂** = constantes empíricas

O teor de cimento também pode ser considerado fator de influência na resistência. Não é uma correlação tão importante, quanto à relação água/cimento, mas é válida à medida que uma argamassa composta com os mesmos materiais, mesma relação água/cimento, porém com diferente consistência ou quantidade de pasta aglomerante, apresenta variação na resistência.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), em uma pesquisa, onde as condições acima foram respeitadas, foi encontrada uma relação inversa entre a resistência à compressão de corpos de prova de concreto e suas consistências, mesmo com relações a/c iguais. O mesmo parece ocorrer com as argamassas.

No caso das argamassas dosadas com cal, a resistência depende também do processo de carbonatação. Nesse processo, o hidróxido de cálcio, que é o constituinte da cal hidratada, reage com o anidrido carbônico do ar, originando o carbonato de cálcio, uma espécie química insolúvel e que confere resistência à argamassa.

Trata-se de um processo de endurecimento mais lento do que o da hidratação do cimento, e que tem suas particularidades, as quais estão descritas mais adiante, em item específico.

Em argamassas com razoável teor de cimento, a resistência conferida pela cal é quase desprezível diante do poder aglomerante do cimento. Nesse caso, a influência da cal na resistência fica restrita ao aumento da propriedade de retenção da água que ela confere à argamassa e, com isso, favorece as condições de hidratação do cimento.

Com relação aos agregados, sua granulometria tem influência na quantidade de água de amassamento necessária para conferir a trabalhabilidade adequada, interferindo na relação água/cimento ou no teor de cimento.

Na sua mineralogia, o agregado não deve possuir alto teor de grãos friáveis, como micas, fragmentos orgânicos, ou torrões de argila.

Outro aspecto que influencia na resistência mecânica das argamassas é a sua condição de cura, ou seja, os procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento. São eles: o controle de temperatura e umidade relativa do ar, imediatamente após a aplicação da argamassa de revestimento. Sendo assim, a cura corresponde, principalmente, ao controle do grau de hidratação do cimento.

No caso de argamassas com cimento, quanto maior o tempo de cura úmida maior será a resistência.

A temperatura pode acelerar as reações de hidratação do cimento, atingindo resistências mais altas mais rapidamente. Porém, pode também

aumentar a perda de água, caso a cura não seja úmida, a partir da qual a hidratação do cimento seria prejudicada.

Quando as argamassas são dosadas com cal, o mecanismo é diferente.

A cal é um aglomerante aéreo e, portanto, necessita de contato com o ar, durante um longo período de tempo, para carbonatar-se e endurecer. Isso só ocorre depois que a argamassa seca, ficando os poros preenchidos com ar e trocando concentrações de anidrido carbônico com o ambiente.

Dessa forma, a cura úmida seria prejudicial ao seu endurecimento, embora pequenas umidades são necessárias às reações de carbonatação.

Quanto à influência dos parâmetros de ensaio, a resistência à compressão depende das características do corpo-de-prova e das condições de carregamento.

De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), dentre os parâmetros do corpo-de-prova, tem-se a influência do tamanho, geometria e a umidade do material. Os parâmetros de carregamento compreendem o nível e duração da tensão e a velocidade com que a tensão é aplicada.

Para a determinação da resistência à compressão em corpos de prova de argamassa, pode-se empregar o método da NBR 13279/95, destinada exclusivamente às argamassas de assentamento e revestimento.

2.3.2.2 Elasticidade e módulo de deformação

Elasticidade é a capacidade de um material se deformar sem apresentar ruptura, retornando à dimensão original quando cessam as solicitações que lhe são impostas.

A capacidade de deformação da argamassa supera o seu limite de elasticidade, entrando em um estado de deformação plástica, irreversível, onde as fissuras surgem de maneira microscópica e ainda não são prejudiciais.

Essa capacidade de deformação é superada quando as fissuras na argamassa passam a comprometer o bom desempenho de suas funções. É o caso das fissuras visíveis, comprometendo conforto visual, fissuras que aumentem a permeabilidade dos revestimentos a níveis que comprometam a sua estanqueidade ou fissuras que possam comprometer a capacidade de aderência dos revestimentos.

A elasticidade, sendo uma medida da rigidez do material, é normalmente avaliada por meio de um diagrama que relaciona tensão e deformação. Esse diagrama corresponde a uma curva de caráter não linear.

Quanto a esse comportamento, é interessante observar que, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), tanto a pasta de aglomerante endurecida, quanto o agregado, quando analisados isoladamente, apresentam características elásticas lineares.

Tal ambigüidade é possível, pois a argamassa é um material composto, cujas propriedades se devem a uma interação entre os seus componentes, possuindo cada componente uma determinada propriedade e o material composto uma terceira propriedade diferente das demais.

Uma explicação para esse comportamento elasto-plástico não linear, pode ser a microfissuração da pasta endurecida, cuja intensidade depende do estágio de carregamento, existindo inclusive antes de qualquer solicitação externa.

Como solução simplificada para representar o comportamento da argamassa pode-se associar um módulo a trechos dessa curva, aproximando-os de uma reta. Esses são os módulos de deformação, que segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), podem ser calculados de algumas maneiras:

- módulo de deformação estático à tração ou à compressão, dado pela declividade da curva tensão-deformação, sob carregamento uniaxial. Esse módulo pode ser de três tipos: módulo tangente, módulo secante, módulo corda;

- módulo dinâmico de deformação, que corresponde a uma deformação instantânea muito pequena, sendo maior que o módulo de deformação estático;
- módulo de deformação à flexão, que pode ser determinado pelo ensaio de flexão em uma viga de argamassa carregada no meio do vão e apoiada nas extremidades, determinando-se a sua flecha.

O módulo de deformação até aqui comentado, refere-se ao módulo de deformação longitudinal, contudo é também importante para as argamassas o módulo de deformação transversal.

Por definição, o módulo de deformação longitudinal é a tensão normal necessária para provocar uma deformação longitudinal unitária.

O transversal é a tensão cisalhante necessária para provocar uma distorção angular unitária.

Esse módulo de deformação transversal, da resistência dos materiais, pode ser associado ao módulo de deformação longitudinal pela seguinte expressão:

$$G = \frac{E}{2} \cdot (1 + \nu) \quad (17)$$

Onde:

G = módulo transversal

E = módulo longitudinal

ν = coeficiente de Poisson

Para um material sujeito à carga axial simples de compressão, a razão entre a deformação lateral e a deformação axial, dentro do intervalo elástico, é definido como o coeficiente de Poisson.

Com relação aos fatores que afetam o módulo de deformação em materiais heterogêneos como a argamassa, pode-se dizer que a fração

volumétrica, a massa específica e o módulo de deformação dos seus componentes determinam o comportamento elástico do compósito.

Sendo a massa específica da matriz de aglomerante, inversamente proporcional à porosidade, os fatores que afetam a porosidade também afetarão a elasticidade. Por isso, a usual correlação entre a resistência mecânica e o módulo de deformação.

Mais detalhadamente, os principais fatores que afetam a elasticidade da argamassa, segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), são relativos aos agregados, à matriz de pasta aglomerante e aos parâmetros de ensaio.

Dentre as características dos agregados, destaca-se o seu próprio módulo de deformação. Pela sua alta rigidez, é o agregado que limita as deformações da argamassa e, portanto, seu módulo de deformação.

Quanto à matriz da pasta aglomerante, seu módulo de deformação dependerá da relação água/cimento, a qual irá definir a porosidade da matriz.

Já os parâmetros de ensaio têm importância fundamental nessa propriedade, pois o aparecimento e o grau de não linearidade na curva tensão deformação, dependerá da velocidade de aplicação do carregamento. Pode-se dizer que, quanto maior a velocidade de aplicação de carga, maior será o módulo de deformação.

Outro parâmetro que parece ter influência nos resultados de ensaio é a umidade do corpo-de-prova. Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), em corpos de prova de concreto testados em condições úmidas, o módulo de deformação se apresenta cerca de 15% maior que o módulo obtido em condições secas.

A elasticidade da argamassa é fundamental ao comportamento dos revestimentos frente aos agentes de deterioração que ele deverá suportar. Ela definirá a intensidade das tensões nas camadas do revestimento e nas suas interfaces, quando uma determinada deformação lhe for imposta.

A importância do módulo de deformação transversal está justamente na natureza das tensões que ocorrem nas interfaces das diversas camadas do revestimento.

São tensões de cisalhamento que geram deformações transversais ou distorções na interface e na argamassa, e são essas deformações que tendem a aliviar as suas tensões normais.

Com relação aos procedimentos de ensaio para determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação, pode ser utilizado o método de ensaio prescrito para concretos da NBR 8522/84, através de carregamento estático, à compressão simples.

Segundo CINCOTTO (1995), a norma DIN 18555 - Part 4, de 1986, apresenta um método para a determinação dos módulos de deformação estático longitudinal e transversal e do coeficiente de Poisson de corpos de prova de argamassa.

2.3.2.3 Retração por secagem

É um fenômeno de contração volumétrica, observado quando a argamassa, em estado fresco, é exposta a ambientes com umidades relativas abaixo da saturação.

Nesse processo de secagem da argamassa, a perda de água capilar presente nos vazios de diâmetros maiores que 50nm, não causa qualquer variação de volume.

É, sim, a perda de água adsorvida fisicamente na superfície dos sólidos da pasta, constituindo poros com menos de 50nm de diâmetro, a grande responsável pela retração por secagem.

Existem condições externas e características intrínsecas à própria argamassa que influenciam a retração por secagem.

As condições externas podem ser entendidas como: a perda de água para a base onde é aplicada a argamassa, por sucção, que depende do grau de absorção da mesma; e as condições climáticas de irradiação solar, temperatura, umidade relativa e ventilação.

Quanto às características intrínsecas ao material, destacam-se a granulometria, finura e forma geométrica do agregado, os quais irão determinar a quantidade de água ou pasta aglomerante necessária para conferir a trabalhabilidade adequada à argamassa. Evidentemente, quanto maior o teor de água e aglomerantes e menor o teor de agregados, maior será a variação volumétrica durante a retração.

Outra propriedade inerente ao material é a sua capacidade de retenção de água, a qual pode diminuir os efeitos negativos de uma secagem acelerada da argamassa. Por isso, observa-se a importância da cal no processo de retração, sendo ela grande retentora de água.

Os aditivos incorporadores de ar também conferem capacidade de retenção de água às argamassas, apesar de não tão notadamente como a cal.

FIORITO (1994), estudando a retração de diversas argamassas de cimento e areia, de cimento, cal e areia e de pasta de cimento, segundo a norma ASTM C-157/80, faz as seguintes observações:

- a retração aos 28 d é aproximadamente a mesma para todas as argamassas (0,06%), sendo apenas maior para a pasta de cimento (0,15%);
- a retração aos 7 d é cerca de 65% a 80% da retração aos 28 d, para secagem ao ar;
- aos 28 d, ocorreu 50% a 60% da retração total, medida após a secagem das argamassa em estufa por 48 horas.

A importância da retração está relacionada com a possibilidade de fissuração da argamassa e, conseqüentemente, perda de estabilidade e estanqueidade.

De acordo com a intensidade da variação volumétrica devido à retração e da capacidade da argamassa de absorver deformações é que surgirão as fissuras. A velocidade em que ocorre a retração também influencia o nível de fissuração.

A retração por secagem, assim como qualquer contração ou expansão volumétrica das argamassas, pode ser medida através do método prescrito pela NBR 8490/84, de argamassas endurecidas para alvenaria estrutural.

2.3.2.4 Permeabilidade

É a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso. Esse fluxo pode ocorrer por meio de infiltração sobre pressão, capilaridade ou difusão de vapor de água.

A permeabilidade da pasta de cimento está relacionada à sua porosidade, mas não de maneira linear.

Segundo MEHTA & MONTEIRO (1994), quando a porosidade capilar de uma pasta de cimento diminui de 40% para 30%, o coeficiente de permeabilidade cai em uma proporção muito maior (de aproximadamente de 110×10^{-12} para 20×10^{-12} cm/s). Entretanto, um decréscimo adicional da porosidade de 30% para 20% geraria apenas uma pequena queda de permeabilidade.

Isso acontece porque com alta porosidade a argamassa, em geral, apresenta uma rede de porosidade aberta, com os poros interligados. Porém, à medida que o processo de hidratação do cimento progride, e os grandes poros começam a se diminuir, segmentando os canais de fluxo na pasta de cimento, a permeabilidade cai rapidamente.

Quando a porosidade atinge os 30%, a interconexão entre os poros já se tornou tortuosa, sendo que mais decréscimos na porosidade não são acompanhados de decréscimos substanciais na permeabilidade.

Nos revestimentos, a principal fonte de umidade é a chuva, e a sua forma de penetração é a absorção capilar, a qual é recomendável ser inferior à absorção da base.

A permeabilidade é influenciada pela porosidade da pasta de aglomerante (relação água/cimento), pelo teor de cal, a presença de ar incorporado e a fissuração.

A porosidade é influenciada pela granulometria, finura e forma geométrica dos grãos, os quais definem a quantidade de água de amassamento e, portanto, a relação água/cimento.

No caso do ar incorporado, bolhas esféricas interrompem as ligações dos capilares, proporcionando uma porosidade fechada e diminuindo a permeabilidade da argamassa.

A absorção de água por capilaridade pode ser determinada a partir do método prescrito pela NBR 9779/95, em corpos de prova de argamassa.

A permeabilidade à água pode ser determinada pelos métodos da RILEM (MR-10), e CSTB (Cahier 1779, Livraison 230, de 1982). Um outro método de determinação é proposto por BAUER (1993), destinado às argamassas de revestimento, onde a permeabilidade medida pela penetração de uma coluna de água sobre o substrato revestido.

A permeabilidade ao vapor de água pode ser determinada pelo método prescrito na norma DIN 52615/87, que avalia a propriedade nos materiais de construção e materiais isolantes.

2.3.2.5 Resistência de aderência

É a tensão máxima suportada por um corpo-de-prova de revestimento, quando submetido a um esforço normal de tração (resistência

de aderência à tração) ou um esforço cisalhante (resistência de aderência ao cisalhamento).

A resistência de aderência tem tido uma grande demanda científica, onde, geralmente, são estudados os fatores que influenciam nos valores desta propriedade.

Uma vez que esta propriedade trata-se de uma resistência, sua função restringe-se a resistir a esforços; e é a determinação, dentre outros, desses esforços, através do estudo do comportamento mecânico do sistema de revestimentos, o objeto desta pesquisa.

Esta propriedade é influenciada pelas características do substrato (tipo de componente, sua umidade e seu tratamento superficial), da própria argamassa de revestimento, dos procedimentos de execução e dos parâmetros de ensaio.

A) FATORES RELATIVOS AOS SUBSTRATOS QUE INTERFEREM NA ADERÊNCIA

Os principais fatores relativos aos substratos intervenientes na aderência são: a sua capacidade de sucção de água, o pré-umedecimento de sua superfície na execução do revestimento, os tratamentos superficiais e a textura da superfície do substrato.

Quando se fala em capacidade de sucção de água do substrato, está sendo tratado o mecanismo que influencia diretamente na formação da ligação da argamassa à base. Por isso, este sempre foi um aspecto muito observado.

Geralmente, adota-se um ensaio para avaliar a absorção inicial de água pelo componente do substrato. A ASTM C-67/86 define o método mais empregado nesse tipo de avaliação, também conhecido como IRA - "Initial Rate Absorption". Outro método é o IRS - "Initial Rate of Suction", proposto pela RILEM LUM A.5, onde a face do bloco ou tijolo é imersa durante 1 minuto a uma profundidade de 1cm, sendo o resultado expresso em $g/m^2/min$.

Quando um substrato apresenta uma elevada capacidade de sucção, provoca a retirada excessiva da água da argamassa de revestimento nas primeiras horas, ocasionando a má hidratação do cimento ou a formação de fissuras na interface devido à retração por secagem. Tal fato, além de outros problemas, pode causar perda na resistência de aderência.

Neste caso, pode-se proceder com um pré-umedecimento do substrato, previamente à execução do revestimento, para diminuir a sua capacidade de sucção de água.

Já no caso de um substrato com baixa capacidade de sucção, o seu pré-umedecimento pode causar perda de resistência de aderência. Isso porque é importante uma capacidade de absorção mínima da base, para que, a pasta de cimento possa penetrar nos seus poros e ancorar de maneira eficiente esta ligação mecânica.

Outro problema do pré-umedecimento incorreto pode ser a elevação da relação água/cimento da argamassa na interface com o substrato, e a conseqüente diminuição de resistência mecânica nesta região.

Segundo CARASEK (1996), que estudou a aderência de seis tipos de argamassa aplicados a seis tipos de substratos, com diferentes capacidades de absorção de água e pré-umedecidos com diferentes níveis de umidade, os substratos secos resultam nos mais altos valores de resistência de aderência, sendo que tais valores diminuem à medida que aumenta-se o teor de umidade do substrato.

Portanto, parece existir uma capacidade de sucção ideal do substrato, sendo que se a sucção for maior ou menor, haverá perda de resistência de aderência.

Esta capacidade de sucção ideal do substrato depende de características da argamassa que será empregada como revestimento, como a sua trabalhabilidade, capacidade de retenção de água e retração por secagem.

Com relação tratamento superficial do substrato, para reduzir custos, há uma tendência em se empregar argamassas de revestimento em camada única, dispensando-se a aplicação da camada de chapisco.

Por esse motivo, alguns trabalhos têm estudado qual o real ganho de resistência de aderência proporcionado por esta camada de tratamento superficial.

O chapisco é uma argamassa com elevado teor de cimento, geralmente dosada na proporção de 1:3 de cimento e areia, em volume, ^{alta}baixa relação água/cimento e, portanto, ^{baixa}elevada resistência mecânica (cerca de 15MPa de resistência à compressão).

O seu emprego, realmente, tende a aumentar a resistência de aderência do revestimento, pois aumenta a extensão de aderência, sendo uma camada rugosa, de alta resistência mecânica e fortemente aderida à base.

Com ele, a camada de emboço não necessita de um elevado teor de cimento para ter boa resistência de aderência, pois já existe um ganho de extensão de aderência.

Já nos revestimentos de camada única, há necessidade do emprego de uma argamassa com um teor de cimento mais elevado, para compensar a perda de extensão de aderência.

B) FATORES RELATIVOS ÀS ARGAMASSAS QUE INFLUEM NA ADERÊNCIA

As principais propriedades das argamassas que interferem na resistência de aderência são: resistência mecânica e retenção de água; e as que interferem na extensão e durabilidade da aderência são: trabalhabilidade, capacidade de absorver deformações e retenção de água.

A resistência mecânica é a propriedade da argamassa que mais influencia na resistência de aderência e, para compósitos de cimento, é proporcional à relação água/cimento. Desta forma, de maneira geral, as

argamassas mais ricas em cimento apresentam uma resistência de aderência maior.

Pode-se dizer que a resistência de aderência à tração tem seu valor próximo ao da resistência à tração da camada mais fraca do revestimento.

A retenção de água é necessária para evitar a perda de água da argamassa muito rapidamente, em prejuízo às reações de hidratação do cimento e à perda de trabalhabilidade.

Esta propriedade também influencia na durabilidade da aderência, uma vez que, contendo a velocidade de perda de água da argamassa, controlando a retração por secagem e diminuindo a possibilidade de fissuração.

C) NORMALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADERÊNCIA

A determinação da resistência de aderência à tração ou resistência de arrancamento é prescrito pela NBR 13528/95 - "Revestimento de paredes e tetos em argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração."

Segundo esse método de ensaio da ABNT, o corpo-de-prova é obtido cortando-se o revestimento perpendicularmente ao seu plano, que pode ser feito de forma circular com serracopo diamantada com diâmetro de 50mm, ou de forma quadrada com lado igual a 10cm. Sobre o mesmo é colada, com cola a base de epóxi, uma pastilha metálica, na qual é afixado um equipamento tracionador.

Para a determinação da resistência de aderência ao cisalhamento, a RILEM propõe dois métodos para a sua avaliação. O método MR-20, onde o revestimento é submetido a um esforço de torção, mediante a rotação de um anel metálico colado sobre a sua superfície previamente cortada perpendicularmente ao seu plano. De acordo com o esforço de torção que leva à ruptura, pode ser calculada a sua respectiva tensão de cisalhamento máxima.

O outro método proposto pela RILEM é o MR-14, onde o corpo-de-prova é composto por dois blocos de substrato revestidos em suas duas faces. Duas placas metálicas são coladas, após a cura dos corpos de prova, sobre ambas as faces dos blocos revestidos, ligando-os, porém deixando entre eles um espaço livre. Esses são então submetidos a um carregamento na direção paralela ao plano dos revestimentos até a ruptura.

2.4 MATERIAIS CONSTITUINTES

Este capítulo apresenta os materiais empregados na confecção de argamassas inorgânicas convencionais. É feita uma abordagem sucinta, relacionando-se as principais influências desses materiais nas propriedades mais importantes.

A tabela seguinte apresenta a variedade de materiais que podem ser empregados na confecção das argamassas de revestimento.

Tabela 6 - Classificação dos materiais constituintes das argamassas de revestimento.

TIPO	CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO
cal hidratada	Aglomerantes
cal virgem	
cimento de alvenaria	
cimentos Portland	
cimento Portland branco	
agregado miúdo	Agregados
agregado miúdo leve	
filito cerâmico	Adições
material pozolânico	
pó calcário	
saibro	
solo fino	
solo fino beneficiado	Aditivos
redutores de permeabilidade	
retentores de água	
incorporadores de ar	
hidrofugantes	
água de amassamento	Água

2.4.1 AGREGADOS

Nas argamassas, o agregado miúdo diminui o consumo de materiais aglomerantes e melhora algumas de suas propriedades, como a resistência e estabilidade volumétrica.

Os agregados miúdos são partículas menores do que 4,8mm e maiores do que 75 μ m (peneira #ABNT200). Porém, normalmente, depósitos de solos contêm quantidades variáveis de silte e argila, os quais são partículas menores do que 75 μ m, além de impurezas orgânicas e inorgânicas que influenciam nas propriedades das argamassas.

Segundo METHA (1994), as argilas são constituídas principalmente de argilominerais, os quais são silicatos de estrutura laminada com menos de 2 μ m de tamanho. Eles consistem principalmente de silicatos hidratados de alumínio, magnésio e ferro. São de baixa dureza e se desintegram pela ação da água. Algumas argilas, conhecidas como montmorilonitas, apresentam grandes expansões na presença da água.

Segundo SELMO (1986), nos grandes centros de consumo a tendência é a oferta crescente de areias residuais pelo distanciamento dos depósitos aluviais.

A seguir são abordadas as características dos agregados que influenciam as propriedades das argamassas.

2.4.1.1 Composição química e mineralógica

Pela sua composição mineralógica, os grãos dos agregados podem ser classificados em inócuos, deletérios e friáveis, cujas características estão apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 7 - Composição mineralógica dos agregados miúdos (SELMO, 1986)

Tipo de grão	Características	Exemplos	Efeitos prejudiciais nos revestimentos
Grãos inócuos	estáveis, de boa resistência física e química	quartzo, feldspato	não tem
Grãos deletérios	instáveis quimicamente	sulfetos de ferro (pirita, marcassita) e concreções ferruginosas	vesículas vermelho acastanhado, provocadas pela formação expansiva de sulfatos, óxidos e hidróxidos de ferro
		argilominerais expansivos (montmoriloníticos)	variações volumétricas que podem causar desagregação
Grãos friáveis	baixa resistência mecânica	micas	esfoliação e/ou perda de aderência ao substrato
		fragmentos orgânicos (materiais carbonosos)	intumescimento e/ou formação de vesículas
		torrões de argila	desagregação, vesículas (com matéria orgânica)

Quanto à sua composição química, os agregados são em sua maior parte de natureza silicosa, podendo ainda ocorrer:

- impurezas orgânicas: materiais carbonosos e materiais em decomposição (humus vegetal ou poluição de rios);
- impurezas inorgânicas: sulfetos, concreções ferruginosas, argilominerais expansivos, mica e torrões de argila, ou ainda, sais solúveis, que podem causar diminuição no endurecimento das argamassas ou eflorescências por qualquer fluxo de umidade.

2.4.1.2 Forma geométrica dos grãos

Esta característica refere-se à esfericidade e arredondamento dos grãos, podendo considerar que:

- grãos angulosos aumentam o volume de vazios, resultando em menor trabalhabilidade para uma mesma quantidade de pasta de aglomerante;

- grãos arredondados diminuem o volume de vazios e o atrito interno entre as partículas, conferindo melhor trabalhabilidade e compacidade às argamassas.

2.4.1.3 Tamanho dos grãos

Usualmente, as areias são classificadas em areia grossa, média, fina ou muito fina.

O módulo de finura é calculado conforme a NBR 7217 - "Agregados - Determinação da composição granulométrica". A norma NBR 7211 - "Agregados para concreto", classifica os agregados miúdos segundo limites granulométricos nas diferentes peneiras.

2.4.1.4 Distribuição granulométrica

Refere-se à distribuição dos diferentes tamanhos dos grãos. Segundo SELMO (1986), esta granulometria pode ser contínua, descontínua ou uniforme.

Quanto mais contínua, e menos uniforme, menor será o volume de vazios do agregado para ser preenchido com pasta aglomerante. Com isso, menor será o consumo de aglomerantes e água de amassamento para a obtenção de uma consistência adequada, assim como, menor será a retração por secagem.

Segundo TRISTÃO et al (1995), o Coeficiente de Uniformidade (C_{un}) é a relação entre os diâmetros correspondentes à abertura de malha que passa 60% e 10% dos agregados, em massa. Considera-se como granulometria muito uniforme aquela com $C_{un} < 5$, uniformidade média com $5 < C_{un} < 15$, e desuniforme quando $C_{un} > 15$.

2.4.1.5 Teor de materiais pulverulentos

Os materiais pulverulentos correspondem à parcela siltosa do agregado ($5\mu\text{m} < \text{diâmetro} < 75\mu\text{m}$) e à parcela argilosa do mesmo

(diâmetro < 5µm). A fração siltosa pode conferir à argamassa uma melhor trabalhabilidade, diminuindo o volume de vazios entre os grãos de areia. A fração argilosa confere maior plasticidade à argamassa, porém a conveniência de sua utilização é assunto de grande controvérsia na bibliografia.

Tanto as normas nacionais quanto as estrangeiras, limitam o teor de materiais pulverulentos nas argamassas de revestimento, no máximo 5%.

Em várias regiões do país, esses minerais são empregados como alternativa econômica à cal.

Sem dúvida, os benefícios que tais materiais conferem às argamassas no estado fresco são inegáveis.

Porém, são as propriedades no estado endurecido que garantem a durabilidade das argamassas, e os materiais pulverulentos podem prejudicar as suas propriedades físicas e químicas; estas, devido às impurezas orgânicas e inorgânicas; aquelas, por diminuírem a resistência mecânica e aumentarem a retração.

Na tabela seguinte, baseada em SABBATINI (1986), é mostrada uma sinopse da influência dos agregados nas principais propriedades das argamassas.

Tabela 8 - Influência das características do agregado nas propriedades das argamassas. (SABBATINI, 1986 - modificado).

Propriedades	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos	Quanto maior o teor de materiais pulverulentos
Trabalhabilidade	melhor	pior	pior	melhor
Retenção de água	melhor	pior	melhor	melhor
Resiliência	variável	pior	pior	melhor
Retração na secagem	aumenta	aumenta	variável	aumenta
Porosidade	aumenta	aumenta	variável	aumenta
Aderência	variável	pior	melhor	pior
Resistência mecânica	variável	pior	variável	pior
Impermeabilidade	pior	pior	variável	pior

2.4.1.6 Especificações e ensaios normalizados

Os ensaios de qualidade dos agregados são sempre recomendáveis para garantir o bom desempenho e durabilidade das argamassas de revestimento. Evita-se, assim, diversos problemas patológicos que se relacionam a esses materiais.

As normas e os respectivos ensaios de agregados miúdos estão apresentados mais adiante, no programa experimental.

2.4.2 CALES

A cal é um derivado de calcários e dolomitos, amplamente utilizado na construção civil.

Os calcários são rochas, onde o carbonato predominante é o de cálcio (CO_3Ca), podendo ser chamado de calcita e aragonita. Nos dolomitos, o carbonato predominante é duplo, de cálcio e de magnésio ($\text{CO}_3\text{Ca}.\text{CO}_3\text{Mg}$), sendo também chamado de dolomita.

Algumas impurezas também são encontradas nessas rochas; são elas: os minerais de ferro, de alumínio, de sódio, de potássio e de silício ou quartzo.

Essas rochas, quando calcinadas a temperaturas próximas a 1000°C , produzem a cal virgem, desprendendo o anidrido carbônico (CO_2). Segundo a norma brasileira que especifica a cal virgem, a NBR 6453/88, ela pode ser definida como:

“Cal resistente de processo de calcinação da qual o constituinte principal é o óxido de cálcio ou óxido de cálcio em associação natural com o óxido de magnésio, capaz de reagir com a água. Em função dos teores de seus constituintes pode ser classificada como cálcica (ou alto cálcio), dolomítica e magnesiana.”

Essa classificação da norma segue a tabela a seguir.

Tabela 9 - Classificação da cal virgem (NBR 6453/88)

CLASSIFICAÇÃO	PERCENTAGEM DE CAL EM RELAÇÃO AOS ÓXIDOS TOTAIS
Cálcica	≥ 90
Magnesiânica	≥ 65 a < 90
Dolomítica	≤ 65

A cal virgem, assim obtida, pode passar por um outro processo, chamado de hidratação ou extinção, onde se adiciona água e seus óxidos transformam-se em hidróxidos. Com isso, obtêm-se as cales hidratadas. A norma NBR 7175/92, define cal hidratada como:

“Pó seco obtido pela hidratação de cal virgem, constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.”

Ainda segundo aquela norma, a cal hidratada é designada de acordo com os teores de óxidos não hidratados e de carbonatos, pelos seguintes tipos:

- CH I - cal hidratada especial;
- CH II - cal hidratada comum;
- CH III - cal hidratada comum com carbonatos.

Essa norma de especificação difere da publicada anteriormente, onde as cales eram classificadas em tipo “E” ou tipo “C”, devido uma alteração no processo de fabricação da cal que aumentou o teor de carbonatos ou anidrido carbônico (CO_2), exigindo assim uma revisão da norma.

Segundo SIQUEIRA (1995), a indústria de cal reduziu o consumo de combustível na calcinação da matéria-prima, com a diminuição do tempo de permanência da carga no forno. Com isso, o teor de carbonatos passou de 5% para 15%, significando um teor de matéria inerte elevado de 11,3% para 34% no produto ensacado, o que vem a reduzir a capacidade aglomerante da cal.

A utilização da cal virgem, nas argamassas, exige um processo que assegure a sua hidratação adequadamente. Dependendo do teor de água adicionada, pressão e temperatura, desenvolvidas no processo de hidratação da cal virgem, irá resultar a qualidade do produto final, tanto quimicamente, quanto fisicamente.

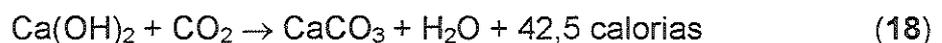
Atualmente, tem-se preferido empregar as cales hidratadas nas argamassas de revestimento, dispensando a necessidade de hidratação da cal em obra, e evitando-se os problemas que a cal virgem pode ocasionar.

A cal influencia nas propriedades reológicas da argamassa por ser um material muito fino, com área superficial em torno de $1000\text{m}^2/\text{kg}$, enquanto que o cimento CII-E32 possui cerca de $320\text{m}^2/\text{kg}$.

Dáí surgem algumas propriedades das argamassas de revestimento conferidas pela cal:

- maior trabalhabilidade, devido à facilidade da pasta molhar os grãos de agregado, além de atuar como lubrificante sólido entre os grãos;
- maior retenção de água, devido à sua elevada superfície específica, onde a água fica adsorvida. A retenção de água ameniza os efeitos de retração e confere melhor hidratação do cimento;
- adesão no estado fresco, devido à capacidade de molhamento das superfícies em contato, melhorando o preenchimento de reentrâncias dessas superfícies.

No estado endurecido, ocorre a carbonatação da cal. Esse processo ocorre com a reação entre o hidróxido de cálcio da cal hidratada, o Ca(OH)_2 , e o dióxido de carbono do ar (CO_2):



Algumas características desse processo são:

- ocorre lentamente, da superfície para o interior da argamassa;
- necessita de uma pequena umidade para ocorrer;

- gera um aumento de volume dos sólidos formados em cerca de 12%. Esse aumento é acomodado nos poros existentes, diminuindo a permeabilidade ao gás e dificultando a carbonatação no interior da argamassa.

A tabela seguinte indica alguns fatores que influenciam na carbonatação.

Tabela 10 – Parâmetros que afetam a velocidade de carbonatação

FATOR		VARIAÇÃO	EFEITO NA VELOCIDADE DE CARBONATAÇÃO
CO ₂	pressão do gás (total)	aumento	aumenta
	concentração do gás	aumento	aumenta
	temperatura do gás	aumento	diminui
	velocidade do fluxo	aumento	pequena variação
Sólido compacto	espessura	aumento	diminui
	permeabilidade	aumento	aumenta
	conteúdo de Ca(OH) ₂	aumento	diminui
	conteúdo de H ₂ O	aumento	umidade ótima para velocidade máxima
	temperatura	aumento	diminui acima de 60°C

As principais propriedades que a cal confere às argamassas no estado endurecido são:

- aumenta a resistência mecânica da argamassas devido ao seu poder aglomerante e devido à melhora nas condições de hidratação do cimento, proporcionado pela sua capacidade de retenção de água no estado fresco;
- evita eflorescências por possuir pequeno teor de álcalis solúveis;
- reconstituição autógena: capacidade de refazer muitas das pequenas fissuras que decorrem com o tempo. No processo, os hidróxidos da cal remanescentes, livres na massa, na presença da água que circula pelos espaços inter-granulares, reagem sendo dissolvidos. São então transportados para outros vazios, onde se precipitam, fixam-se após recarbonatarem, e preenchem as discontinuidades;

- é asséptico, devido à sua alta alcalinidade ($\text{pH} > 11,5$);
- dá um bom acabamento visual, devido à sua finura.

Quanto aos ensaios de caracterização referentes à cal hidratada, estes estão apresentados mais adiante, no programa experimental.

2.4.3 ADITIVOS INCORPORADORES DE AR

O aditivo incorporador de ar tem sido muito empregado em substituição à cal. É um produto industrializado, de baixo custo relativo (baixo consumo na dosagem) e que vem sendo cada vez mais escolhido como solução tecnológica alternativa.

Segundo a norma de especificação NBR 11768, os aditivos podem ser definidos como produtos que, adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.

Nota-se que, algumas das observações deste tópico foram retiradas de bibliografia referente aos concretos. No entanto, a forma de atuação dos aditivos nos concretos é, algumas vezes, semelhante nas argamassas inorgânicas, uma vez que os dois materiais são compósitos de cimento.

Mais a diante, na pesquisa experimental, nota-se que os conceitos aqui tratados sobre os aditivos incorporadores de ar, de fato, podem ser aplicados às argamassas.

Os incorporadores de ar são tensoativos orgânicos, iônicos ou sintéticos, e têm como característica a cadeia longa do carbono, uma molécula orgânica que possui uma extremidade hidrófoba (radical apolar) e outra hidrófila, geralmente aniônica (radical polar). De acordo com MEHTA & MONTEIRO (1994), a extremidade hidrófila contém um ou mais grupos polares, tais como $-\text{COO}^-$, $-\text{SO}_3^-$, ou $-\text{NH}_3^+$.

Os tensoativos empregados como aditivos incorporadores de ar geralmente consistem de sais de resinas da madeira, materiais protéicos e ácidos graxos, e alguns detergentes sintéticos.

As bolhas de ar incorporadas têm características diferentes do ar introduzido naturalmente, durante o preparo da argamassa ou evaporação da água de amassamento. Elas têm a forma esférica, são estáveis, elásticas, e têm uma granulometria típica com diâmetros compreendidos entre 50 μ m e 1mm.

Quanto aos mecanismos de ação, o tensoativo age sobre as bolhas de ar e sobre as partículas finas, incluindo o cimento. Agindo sobre as bolhas de ar, as moléculas do tensoativo são fixadas tal que a extremidade polar (hidrófila) fica orientada para a água. Com isso, as bolhas de ar se afastam umas das outras pelas cargas de igual polaridade na sua superfície.

Essas bolhas de ar, que normalmente tendem a subir, quando chegam à superfície, estabilizam-se sem se romperem. Isso porque, para se romperem, elas teriam que vencer a tensão superficial da água, e para tanto, teriam que crescer, unindo-se umas às outras, o que não ocorre.

Quando agem sobre as partículas de cimento e finos do agregado, o aditivo une-se a elas pela sua extremidade polar. Através de uma ação conjunta com as bolhas de ar, ele fixa-as sobre as superfícies das partículas sólidas. Dessa forma, as bolhas de ar incorporado agem como lubrificantes, diminuindo o atrito entre as partículas sólidas.

Com isso, o ar incorporado possibilita uma grande melhoria na trabalhabilidade da argamassa, podendo-se reduzir a quantidade de água de amassamento.

Outra forma de ação do ar incorporado, ocorre quando as bolhas aderem fortemente ao agregado fino, como se fossem grãos elásticos e proporcionando um aumento de coesão na argamassa. Nos pontos de contato entre as bolhas e os grãos de areia, a coesão é mantida pela tensão superficial da água na interface água/ar.

Ainda no estado fresco da argamassa, o aumento de coesão entre as partículas e a diminuição da quantidade de água de amassamento devido suas características plastificantes, a incorporação de ar dificulta a exsudação de água da argamassa.

Quanto à influência do aditivo incorporador de ar nas propriedades das argamassas no estado endurecido, destaca-se, por um lado, a diminuição da permeabilidade, a deformabilidade, a resistência ao congelamento; e por outro, a perda de resistência mecânica e de resistência de aderência.

A impermeabilidade ocorre devido a interrupção da continuidade dos capilares proporcionada pelas bolhas de ar incorporado. Graças à forte coesão interna da argamassa no estado fresco, quando da evaporação da água de amassamento excedente e formação da rede de capilares, esta rede é interrompida pelas bolhas de ar estáveis e firmemente aderidas às partículas sólidas. Com isso, a rede resulta em uma rede de capilaridade mais fechada, transformando a argamassa em uma argamassa bem menos permeável.

Em regiões de temperaturas negativas, como no sul do país, a incorporação de ar consiste em uma solução à durabilidade de revestimentos.

Nessas temperaturas, a água, que sempre está presente na pasta de cimento endurecida, pode congelar-se e passar a ocupar um volume maior. Caso ela não tenha liberdade de expansão, originar-se-ão tensões elevadas na argamassa, que podem provocar a sua desagregação.

As bolhas de ar incorporado constituem um espaço para a livre expansão da água, que irá comprimir o ar.

No caso da perda de resistência mecânica, esta ocorre devido ao aumento da porosidade da argamassa endurecida, causado pelo ar incorporado. Essa perda de resistência é amenizada pela possibilidade de redução da água de amassamento, e da relação água/cimento, graças às características plastificantes do ar incorporado.

A perda de resistência de aderência está relacionada com a perda de resistência mecânica e à diminuição da área efetiva de contato entre o substrato e a pasta de aglomerante, devido à presença das bolhas de ar incorporado.

2.5 TENSÕES NAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA

Como visto, a retração é um fenômeno de contração volumétrica, observada geralmente quando a argamassa, após sua aplicação, é exposta a umidades ambientais abaixo da saturação, sofrendo o processo de secagem.

Se a argamassa não está impedida de deformar-se, a perda de água causa uma variação volumétrica de contração por retração, que aumenta ao longo do tempo.

Nesse caso, de deformação livre da argamassa, não surgem esforços de tensão ao longo do tempo, como ilustra o esquema a seguir.

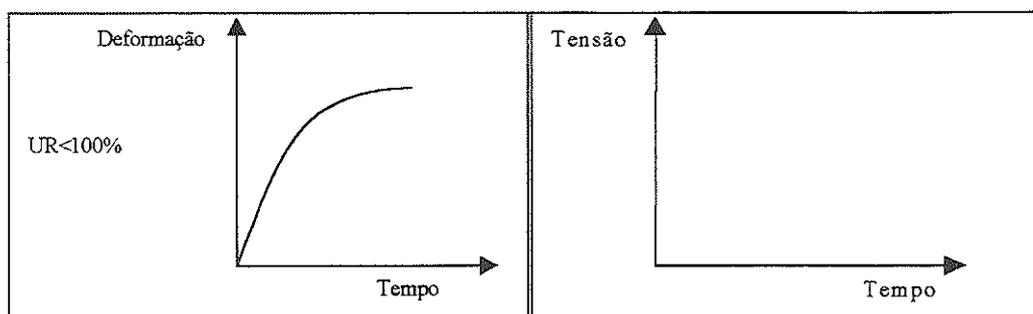


Figura 2 – Esquema de tensões para deformação livre.

Entretanto, se a peça estiver impedida, a deformação será nula, e tensões de tração surgirão ao longo do tempo.

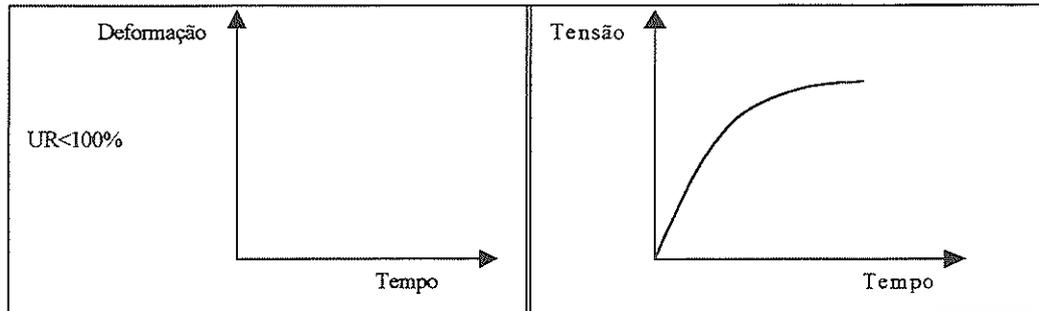


Figura 3 – Esquema de tensões para deformação impedida.

Devido ao comportamento viscoelástico da argamassa, a magnitude das tensões de tração causadas pela retração por secagem é reduzida pela relaxação da tensão.

Relaxação é um fenômeno de diminuição gradual de tensão ao longo do tempo, sob um certo nível de deformação constante.

COUTINHO (1954), descreve um método para a medição das tensões em concreto e argamassa provocadas pela retração impedida. A técnica consiste em medir as tensões impostas por um anel de argamassa ou de concreto, moldados em torno de um anel metálico.

Com esse ensaio, Coutinho conseguiu observar, nitidamente, a evolução das retrações e das tensões no caso da retração impedida em pastas de cimento e argamassas, conservadas em atmosferas de 55% e 75% de umidade relativa, e sem trocas de umidade.

Para a pasta de cimento, mesmo sendo curada em ambiente sem trocas de umidade, a relaxação foi suficiente para fazer baixar as tensões. Sem o fenômeno da relaxação, aos 90 d, surgiriam tensões da ordem de 80kgf/cm^2 (8MPa), enquanto que o valor realmente encontrado foi de 12kgf/cm^2 (1.2MPa).

Em seu trabalho, Coutinho também nota que as tensões tendem bem mais depressa à estabilização do que as retrações. Nas argamassas de traço 1:3, à UR de 75%, a tensão devido retração impedia sobe regularmente nos primeiros 15 d, mantendo depois um valor constante enquanto a retração, somente após 65 d, estabiliza-se.

Para 55% de UR, essas argamassas atingem sua tensão máxima na primeira semana, e depois essa tensão desce até atingir um valor praticamente constante, após 75 d.

Em KOPSCHITZ et al. (1997), é avaliada a evolução da retração em argamassas nos traços 1:0,5:4,5 ; 1:1:6 e 1:2:9, em volume de cimento, cal e areia, para as quais também foram determinados: o módulo de deformação e a resistência à tração de 1 a 28 d.

Em tal trabalho, é avaliada a possibilidade de fissuração das argamassas devido às tensões que surgiriam no caso de uma retração impedida.

Para tanto, as tensões de tração σ_t foram calculadas a partir do módulo de deformação da argamassa E_a e da deformação de retração ε_r ao longo do tempo, pela expressão:

$$\sigma_t = \varepsilon_r \cdot E_a \quad (19)$$

Dessa forma, não se considerando o fenômeno da relaxação, os valores calculados para a tensão de tração devido à retração impedida foram, em média, seis vezes maiores do que a resistência à tração das respectivas argamassas, o que levaria todas à fissuração, o que, de fato, não ocorre.

FIORITO (1994), propõe uma formulação para o cálculo da tensão devido à retração impedida, que considera a solidariedade entre a argamassa de revestimento e um substrato.

Nela, a argamassa e a base sofrem deformação de igual valor, causada pela retração da primeira, e a tensão de tração fica:

$$\sigma_t = -(\varepsilon_r \cdot E_a) / [1 + (E_a \cdot e_a) / (E_c \cdot e_c)] \quad (20)$$

Onde:

σ_t = tensão de tração na argamassa

E_a = módulo de deformação da argamassa

E_c = módulo de deformação de uma base

e_a = espessura da camada de argamassa aplicada

e_c = espessura da base

ε_r = deformação de retração da argamassa

KOPSCHITZ et al. (1997) analisa a formulação proposta por Fiorito para suas argamassas, e encontra valores para σ_t praticamente iguais àqueles calculados em seu trabalho, ou seja, cerca de seis vezes a resistência à tração da argamassa, valores esses, considerados irrealis pelo próprio autor do referido trabalho.

3 HIPÓTESES DO COMPORTAMENTO DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Para o estudo do comportamento mecânico do sistema de revestimento, considera-se que ele é obtido a partir de um equilíbrio mecânico que envolve os seguintes parâmetros:

- os agentes patológicos, que podem ser externos ao sistema, como a variação de temperatura, ou intrínsecos à argamassa, como a retração por secagem;
- as condições de contorno, que representam as condições de vinculação do sistema e suas características geométricas; dependem, também, do processo executivo do revestimento;
- as propriedades dos componentes, sendo, para o caso do revestimento de argamassa, da própria argamassa.

Dessa forma, considera-se que não se pode estabelecer uma relação direta entre uma propriedade e o desempenho do sistema. Isso porque, o desempenho do sistema não depende apenas de uma propriedade da argamassa, mas sim, de uma interação desta com outras, com as características do sistema e com as ações patológicas incidentes.

Alem disso, as propriedades estão correlacionadas, e a modificação de uma, implica em alterações nas outras.

As tensões devido retração impedida são sensivelmente influenciadas por alguns fatores que, se não considerados, faz com que sejam esperados esforços absurdos advindos desse fenômeno. Esses fatores são:

- a evolução das tensões de tração na argamassa de maneira incremental, onde essas tensões vão se somando, ao longo do tempo, proporcionalmente ao módulo de deformação e à retração, em cada idade da argamassa;

- fenômeno de relaxação da argamassa, mantida à deformação constante, o que vem a dissipar, ao longo do tempo, grande parte das tensões acumuladas.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS DE PESQUISA TEÓRICA DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO

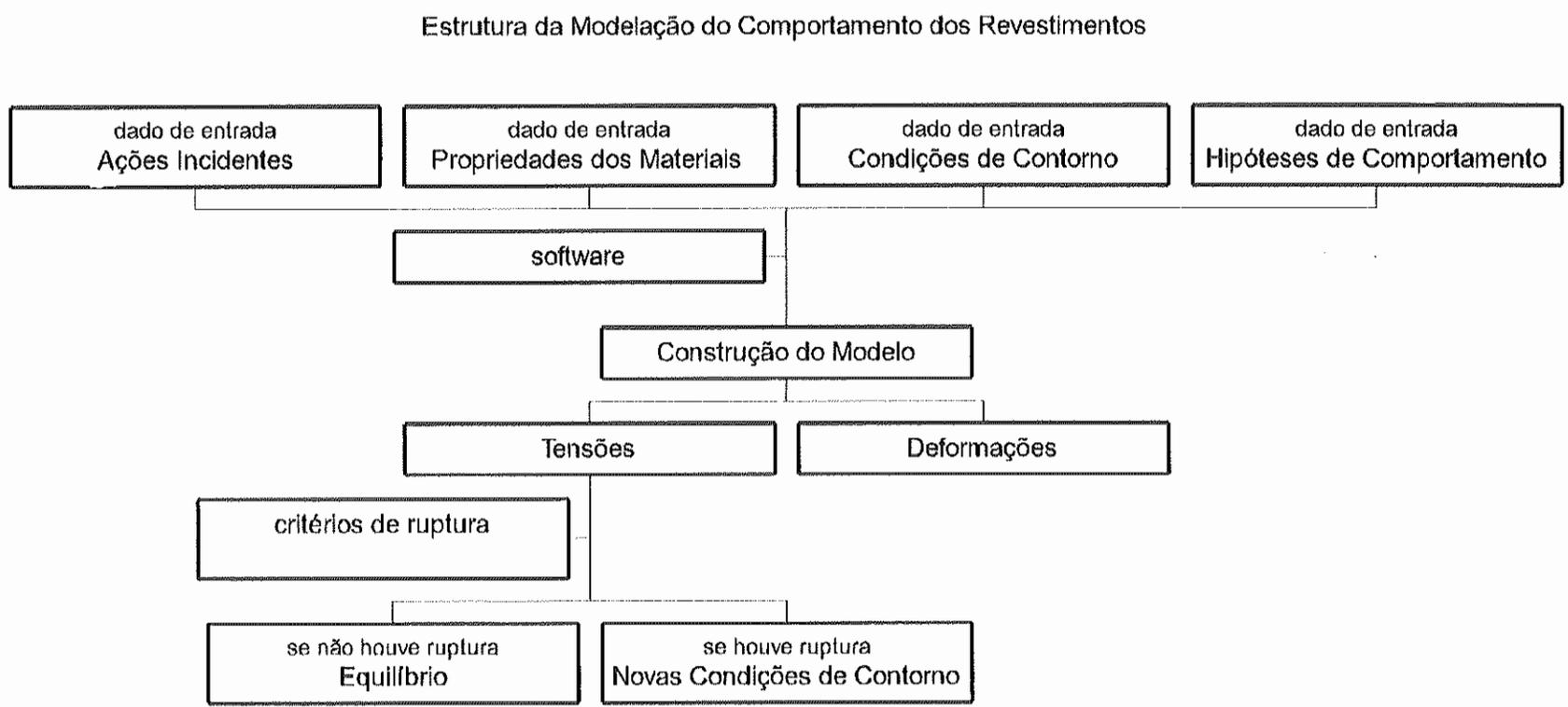
Constituindo a primeira etapa desta pesquisa, esta seção busca um modelo de comportamento mecânico que represente o sistema de revestimento.

Pretende-se, também, identificar os parâmetros que influenciam no seu equilíbrio mecânico do sistema, como as características geométricas e as propriedades da argamassa. Isso permitirá que a pesquisa experimental enfatize as propriedades que mais influenciam no comportamento mecânico do revestimento.

A criação do modelo que represente o comportamento mecânico do sistema de revestimento, envolvem o relacionamento das ações incidentes, com as condições de contorno do problema e com as condições de rigidez do sistema, representando as propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.

O fluxograma a seguir ilustra tal modelo de comportamento.

Figura 4 – Fluxograma do modelo de comportamento do sistema de revestimento.



Os modelos são idealizados a partir de hipóteses de comportamento dos materiais e do sistema como um todo, que dependem das ações incidentes em estudo.

Para que os modelos possam ser o mais simplificado, real e claro possível, cada ação incidente será avaliada separadamente.

Além disso, os modelos devem buscar, dentro da realidade, minimizar o número de variáveis envolvidas, isolando-se os fenômenos e deixando a sua avaliação, em conjunto, para depois da perfeita compreensão de cada um, isoladamente.

A partir dessas hipóteses, o comportamento mecânico do sistema é modelado via programa computacional específico que possa relacionar as propriedades mecânicas do revestimento, suas condições de contorno e as ações incidentes que serão analisadas.

Tais modelações foram realizadas no Departamento de Engenharia de Estruturas, da Escola de Engenharia de São Carlos, utilizando o programa de análise por elementos finitos: "ANSYS".

4.1 MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

Neste tipo de análise, por elementos finitos, um modelo geométrico é criado para representar o sistema físico a ser analisado. Esse modelo pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional, sendo preferível adotar-se modelos com o menor número de dimensões possível.

Tal modelo geométrico é então dividido em uma malha de pequenos elementos, sendo que para cada um, após a resolução do problema pelo método de elementos finitos, são determinados os deslocamentos e as tensões atuantes.

Existem diversos tipos de elementos que podem ser empregados na análise por elementos finitos, sendo que cada um determinará os movimentos de translação ou rotação a que estão sujeitos os pontos de referência das análises, chamados de nós.

As deformações no interior de um elemento são obtidas em função dos valores obtidos nos nós desse elemento, por uma aproximação matemática. Essa aproximação pode ser uma função linear ou quadrática, sendo que a última conduz a resultados mais precisos.

Para simplificação da análise a ser empregada, decidiu-se por representar o sistema de revestimento pela sua seção transversal de corte em uma direção.

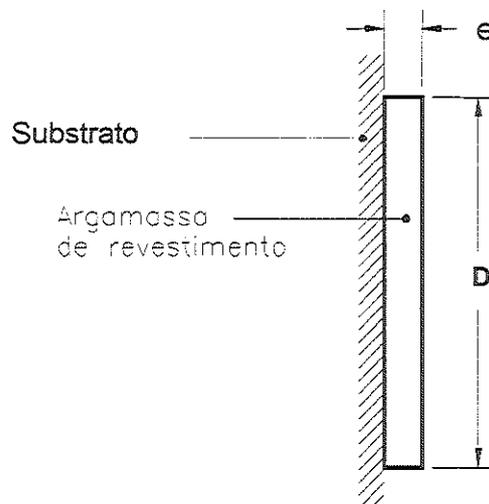


Figura 5 – Esquema da simplificação geométrica do modelo a ser empregado na análise dos revestimentos de argamassa.

Nessa figura, e significa a espessura da argamassa de revestimento e D representa o tamanho do pano de revestimento na direção em análise, geralmente, delimitado por juntas de movimentação ou por fissuras.

Com relação ao tipo de elemento empregado na análise, optou-se pelos elementos estruturais laminares planos e recorreu-se à consideração de estado plano de tensões (“Plain Stress”).

Quanto à sua forma, o elemento escolhido na presente modelação é o quadrilátero, podendo ser retangular ou não. Esse elemento fornece melhores resultados do que elementos triangulares.

Quanto ao tipo de função aproximadora dos deslocamentos nodais, foi empregada uma função de ordem quadrática, sendo, portanto, presente um nó intermediário entre os vértices do elemento, ficando com três pontos

para determinar a função quadrática. Esse tipo de função também conduz a melhores resultados do que a aproximação linear dos deslocamentos nodais.

No programa de análise de elementos finitos empregado para a modelação dos revestimentos, o ANSYS, o elemento escolhido é chamado "Plane 82", cujo esquema de coordenadas locais e graus de liberdade são descritos pelo próprio programa segundo a figura a seguir.

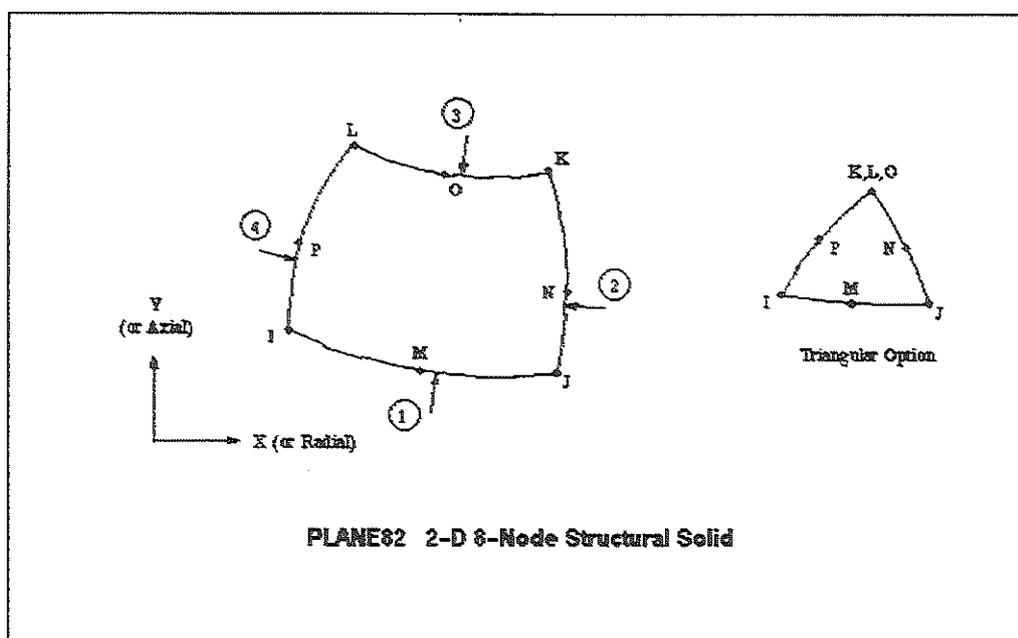


Figura 6 - Esquema ilustrando o tipo de elemento empregado na análise por elementos finitos no programa ANSYS.

Com relação ao comportamento idealizado para os materiais componentes do sistema de revestimento, também algumas considerações devem ser feitas.

Os materiais foram considerados isotrópicos, ou seja, de mesma propriedades nas duas direções ortogonais. Além disso, a argamassa foi considerada com comportamento mecânico fisicamente linear, ou seja, com relação linear entre as tensões e as deformações.

4.2 1ª FASE DE MODELAÇÃO

A pesquisa dos modelos de comportamento do sistema de revestimento foi realizada em duas fases.

Inicialmente, foi realizada uma bateria de modelos observatórios, variando-se os valores de todos os parâmetros do modelo, com a finalidade de observar a maneira como o comportamento do sistema alterava-se.

Posteriormente, com base nas observações da primeira fase, foram montados modelos, para a construção de curvas, a partir dos resultados obtidos com a variação dos parâmetros de forma sistemática.

4.2.1 PARÂMETROS DE CONTROLE DOS MODELOS

São os parâmetros de controle que dão suporte à construção do modelo, envolvendo as propriedades dos materiais, as condições de contorno, características geométricas e ações incidentes.

Variando-se esses parâmetros, pode-se avaliar a maneira como eles estão relacionados com o equilíbrio mecânico do sistema.

4.2.1.1 Ações incidentes

Cada ação atuante nos revestimentos é avaliada separadamente, com o objetivo de conferir simplicidade e clareza aos modelos. Dessa forma, pode-se compreender melhor como cada uma é equilibrada, a grandeza das tensões e deformações que surgem nas camadas e interfaces do sistema de revestimento, e a forma de manifestação patológica no caso de ruptura da argamassa.

As ações incidentes podem ser divididas nos tipos descritos a seguir.

A) AÇÃO DE PESO PRÓPRIO

Depende apenas da densidade de massa dos materiais. É uma ação que tem, como única direção, a do vetor de aceleração da gravidade, e causará um estado plano de tensões no material. Seu equilíbrio é estabelecido pelo substrato que oferece reação vertical a essa ação.

Como o valor da aceleração da gravidade é constante, 9.81m/s^2 , essa ação varia apenas com a espessura da argamassa, a sua densidade de massa e o tamanho do pano de revestimento.

B) AÇÃO DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Depende das propriedades térmicas do material e das condições ambientais.

A diferença entre a temperatura de análise e a temperatura de referência, na qual o revestimento foi executado, constituirá a ação incidente.

Esse efeito causa um estado plano de tensões no material, e seu equilíbrio é estabelecido pelo substrato, cuja movimentação é restrita pela estrutura da construção.

Foram considerados efeitos de variação de temperatura equivalentes a $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T=-10^{\circ}\text{C}$. Tais valores podem ser considerados como valores de referência, uma vez que, graças à linearidade do modelo, qualquer outro valor pode ser extrapolado a partir desses.

C) AÇÃO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

Depende das propriedades reológicas da argamassa, do tempo e dos fatores ambientais, principalmente a umidade relativa ar.

Esse fenômeno corresponde à ação de uma deformação impedida do material. Também causa um estado plano de tensões e seu equilíbrio é estabelecido pelo substrato, que não sofre tal ação.

Tratando-se de uma tentativa de variação dimensional, a deformação de retração pode ser representada por uma variação negativa de temperatura, que causaria a mesma deformação, caso não fosse impedida.

Considerando-se o coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa é igual a $1.00E-5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, então uma variação de temperatura $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ equivale a uma retração $\varepsilon_r = 0,01\%$.

4.2.1.2 Propriedades dos materiais

O comportamento dos materiais envolvidos no sistema do revestimento depende de algumas propriedades.

Os seus valores e variações, relativos às argamassas de revestimento, adotados nessa fase de modelação são:

- densidade de massa: 1.90kgf/dm^3 ;
- módulo de deformação longitudinal: $E_a = 0.25\text{GPa}$, $E_a = 0.50\text{GPa}$ e $E_a = 1.00\text{GPa}$;
- coeficiente de Poisson: 0.20;
- coeficiente de dilatação térmica linear: $\alpha = 1.00E-5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

O valor do módulo de deformação transversal é calculado, automaticamente, pela equação elástica apresentada na expressão 17.

4.2.1.3 Condições de contorno do problema

As condições de contorno compreendem as características geométricas de todas as camadas que compõem o revestimento e os tipos de vinculação entre elas.

Com relação aos tipos de vinculação, consideram-se todas as camadas perfeitamente solidárias entre si, e o substrato como um vínculo indeformável para a camada de argamassa de revestimento.

Tal vinculação representa que o substrato está restrito pela estrutura suporte da construção e, dessa forma, pode ser considerado indeformável quando comparado à rigidez do revestimento.

Os valores das características geométricas do sistema de revestimento, consideradas nesta fase de modelação, são:

- **D** (representa o tamanho do pano de revestimento): 8cm, 50cm e 290cm;
- **e** (espessura da argamassa de revestimento): 2,0cm, 4,0cm e 8,0cm.

4.2.2 RESULTADOS DOS MODELOS DA 1ª FASE

Foram realizados cinco modelos que receberam incidência da ação de peso próprio, observando-se valores de tensão desprezíveis em relação à resistência da argamassa endurecida. Dessa forma, essa ação não parece ser importante ao desempenho do revestimento.

Outros doze modelos foram realizados com a incidência da ação de variação de temperatura. Cada um desses modelos apresenta alguma variação quanto às características geométricas do revestimento, propriedade mecânica da argamassa ou valor da ação considerada. Com isso, buscou-se definir a forma com que essas variáveis influenciam nos esforços resultantes do equilíbrio.

A partir dos resultados obtidos, procede-se com as seguintes observações.

Em dois modelos, variou-se o parâmetro ΔT de -10°C para $+10^{\circ}\text{C}$ respectivamente, e observou-se:

- variação de sinal de todos os esforços resultantes, mantendo-se iguais, os módulos dos valores.

Em outros três modelos, variou-se o módulo de elasticidade da argamassa de 0,50GPa para 0,25GPa e para 1,00GPa, e observou-se:

- variação linear e diretamente proporcional de todos os esforços resultantes.

Em mais três modelos, variou-se a espessura do revestimento de 2,0cm para 4,0cm e para 8,0cm, e manteve-se a mesma ação de variação de temperatura, observando-se:

- diminuição das tensões de tração nas extremidades próximas às juntas de movimentação, porém valores iguais para estas tensões na região central. Valores maiores para as tensões de cisalhamento na interface entre o revestimento e o substrato com o aumento da espessura da camada de argamassa.

Em outros três modelos, variou-se a distância entre juntas de movimentação de 290cm para 50cm e para 8cm, e manteve-se a mesma ação de variação de temperatura, observando-se:

- o valor da tensão máxima de tração foi o mesmo para a distância de 290cm e 50cm entre juntas, porém foi bem menor para a distância de 8cm. Os valores das tensões máximas de cisalhamento aumentaram com a diminuição da distância entre juntas, ou do tamanho do pano de revestimento.

A partir dessas variações observadas, as seguintes conclusões irão orientar os modelos da segunda fase de modelação:

- variação linear e diretamente proporcional entre os valores das ações incidentes e os esforços resultantes do equilíbrio e entre as propriedades mecânicas da argamassa e tais esforços;
- a variação de qualquer característica geométrica do revestimento, seja ela de espessura ou distância entre juntas de movimentação, causa alterações nos esforços, que só podem ser quantificadas através da análise do modelo por elementos finitos.

4.3 2ª FASE DE MODELAÇÃO

A partir dos resultados da 1ª FASE de análise dos modelos foram identificados quais parâmetros exercem influência significativa no sistema, e a forma como isso ocorre. Com isso, procede-se a uma nova bateria de modelações, medindo-se sistematicamente os parâmetros realmente intervenientes.

Para servir de base à construção de gráficos e tabelas que permitam a rápida avaliação de um caso hipotético, foram elaborados 30 modelos, nos quais variou-se a espessura do revestimento e o tamanho do pano de revestimento.

4.3 2ª FASE DE MODELAÇÃO

A partir dos resultados da 1ª FASE de análise dos modelos foram identificados quais parâmetros exercem influência significativa no sistema, e a forma como isso ocorre. Com isso, procede-se a uma nova bateria de modelações, medindo-se sistematicamente os parâmetros realmente intervenientes.

Para servir de base à construção de gráficos e tabelas que permitam a rápida avaliação de um caso hipotético, foram elaborados 30 modelos, nos quais variou-se a espessura do revestimento e o tamanho do pano de revestimento.

4.3.1 PARÂMETROS DE CONTROLE DOS MODELOS

Para as propriedades dos materiais e ações incidentes foram empregados valores base únicos, pois, devido às observações de linearidade do sistema feitas na primeira fase de modelação, conclui-se que, quaisquer outros valores podem ser extrapolados a partir destes.

Assim, para o módulo de elasticidade, variação de temperatura, retração por secagem e coeficiente de dilatação térmica linear, foram utilizados os mesmos valores em todos os modelos. Vale observar que o valor de módulo de elasticidade aqui aplicado representa tanto o módulo de deformação na tração quanto na compressão.

Tabela 11 – Valores empregados em todos os modelos

PARÂMETRO	VALOR
Módulo de Elasticidade (E)	1.00GPa
Poisson	0.20
Coefficiente de Dilatação Térmica (α)	1.00E-5 ou 0,00001°C ⁻¹
Varição de Temperatura (ΔT)	-10°C
Retração (ϵ_r) equivalente a $\Delta T = -10^\circ\text{C}$	0,01% ou 0,0001mm/mm

Tabela 12 – Variações de espessuras de revestimento nos modelos

PARÂMETRO	VALORES
Espessura (e)	0.5cm
	1.0cm
	2.0cm
	4.0cm
	8.0cm

Tabela 13 – Variações de distância entre juntas de movimentação nos modelos

PARÂMETRO	VALORES
Distância (D)	5cm
	10cm
	20cm
	40cm
	80cm
	160cm

4.3.2 RESULTADOS DOS MODELOS DA 2ªFASE E CRIAÇÃO DE UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS REVESTIMENTOS ARGAMASSADOS

Como resultado do modelo, tem-se o esquema de esforços apresentado na figura a seguir.

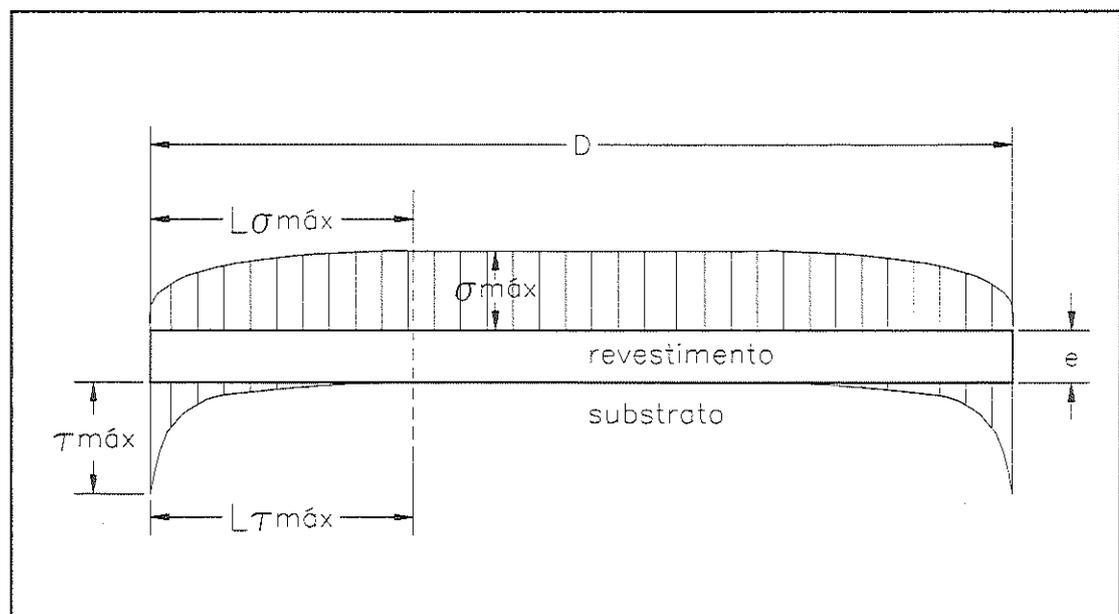


Figura 7 – Esquema de equilíbrio dos esforços.

As notações que aparecem na figura acima têm os significados e importâncias descritas a seguir.

4.3.2.1 Tensão máxima de tração e posição de ocorrência

Na extremidade do pano de revestimento, que pode ser uma junta de movimentação ou uma fissura, e na face superior da argamassa, a tensão de tração é aliviada pela deformação livre desse ponto e seu valor é nulo.

Na medida em que se afastam da extremidade do pano de revestimento, as tensões de tração vão sofrendo um alívio menor e vão aumentando de valor até que, a partir da distância $L_{\sigma_{\text{máx}}}$, essas tensões assumem seu valor máximo $\sigma_{\text{máx}}$.

Esse valor de tensão máxima pode corresponder a uma restrição total da argamassa à deformação, caso a distância entre as extremidades do pano de revestimento seja tal que, em uma região central desse pano, não haja qualquer alívio de tensões na argamassa.

A tensão máxima pode ocorrer, também, em um único ponto, caso o alívio proporcionado pela sua extremidade atinja todo o pano de revestimento, não correspondendo, nesse caso, a uma restrição total da argamassa à deformação.

Observa-se que a deformação é livre ao longo da espessura da argamassa, nas extremidades do pano de revestimento. Porém, no ponto de encontro da camada de revestimento com a base, ela está restrita à deformação pela aderência entre elas. Dessa forma, ocorre também uma variação da tensão ao longo da espessura do revestimento.

Todos os valores das tensões de tração empregados, daqui por diante, referenciar-se-ão à posição média da espessura, ou seja, se a camada de revestimento tiver 2cm de espessura, as tensões de tração associadas a esse revestimento ocorrerão a 1cm de espessura.

4.3.2.2 Tensão máxima de cisalhamento e posição de ocorrência

A tensão máxima de cisalhamento $\tau_{\text{máx}}$ na interface da argamassa de revestimento com o substrato ocorre na extremidade do pano de revestimento.

As tensões de cisalhamento nessa interface vão diminuindo de valor no sentido da extremidade para o interior do pano de revestimento e atingem valor nulo a uma distância de $L_{\tau_{\text{máx}}}$ dessa extremidade. Nesse ponto de tensão de cisalhamento nula, o valor da tensão de tração na argamassa atinge seu valor máximo $\sigma_{\text{máx}}$.

No sistema de revestimento, as tensões de cisalhamento da interface constituem a ancoragem das tensões de tração da argamassa, sendo que quando estas diminuem, ou começam a ser dissipadas, àquelas aumentam. Dessa forma, o produto das tensões de cisalhamento pela área da interface onde elas atuam, assume o mesmo valor que a força máxima de tração na argamassa.

4.3.2.3 Distância D

É o tamanho do pano de revestimento, que pode ser delimitado pelas juntas de movimentação que atravessam a camada do revestimento por inteiro ou pelas fissuras na argamassa, caso ocorram.

4.3.2.4 Resultados das tensões de tração máxima de referência

Para possibilitar uma avaliação rápida dos resultados da segunda fase de modelação, foram elaborados alguns gráficos e tabelas, com valores de referência. Dessa forma, as tensões que surgem no revestimento podem ser calculadas sem a necessidade de recursos computacionais mais complexos.

Esses valores foram obtidos a partir dos parâmetros de controle do modelo, já apresentados para esta segunda fase de modelação, e são

considerados de referência, pois podem ser extrapolados para quaisquer outros valores.

A figura seguinte apresenta a relação entre a tensão de tração máxima de referência, a espessura e o tamanho do pano do revestimento.

Pode-se notar que, para qualquer espessura da argamassa, a partir de uma certa distância D , os valores da tração máxima de referência convergem para $1,00E-1$ MPa. Esse valor corresponde a uma restrição total da movimentação imposta ao revestimento, ou seja, sem alívio de tensão.

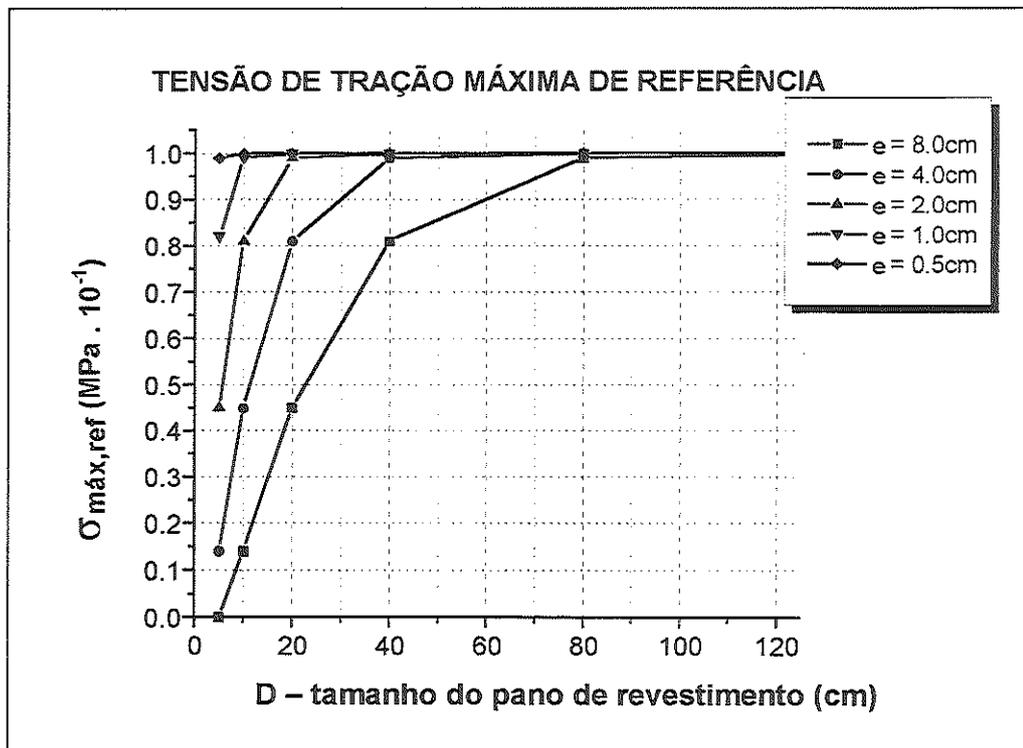


Figura 8 - Tensão de tração máxima de referência em função da espessura e do tamanho do pano do revestimento.

4.3.2.5 Resultados das tensões de cisalhamento máximas de referência

As tensões de cisalhamento máximas, observadas nos modelos, apareceram em uma região bem pequena e extrema da argamassa de revestimento, onde ocorreu uma grande concentração de tensões. Esses valores estão demonstrados na tabela a seguir.

Tabela 14 - Tensão de cisalhamento máxima de referência na interface entre o revestimento e o substrato.

Espessura (cm)	$\tau_{\text{máx,ref}}$	$\tau_{\text{máx,ref}}$	$\tau_{\text{máx,ref}}$	$\tau_{\text{máx,ref}}$	$\tau_{\text{máx,ref}}$	$\tau_{\text{máx,ref}}$
	D=5cm (MPa)	D=10cm (MPa)	D=20cm (MPa)	D=40cm (MPa)	D=80cm (MPa)	D=160cm (MPa)
0,5	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104	0,104
1,0	0,123	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
2,0	0,128	0,140	0,140	0,124	0,124	0,124
4,0	0,128	0,149	0,140	0,140	0,140	0,140
8,0	0,128	0,149	0,149	0,160	0,162	0,140

4.3.2.6 Resultados dos deslocamentos de referência da argamassa nas extremidades do pano de revestimento

Quando ocorre uma contração da argamassa de revestimento, seja devido à diminuição da temperatura ou à retração por secagem, os pontos da seção da argamassa, na extremidade do pano de revestimento, apresentam deslocamentos diferenciados.

No ponto que está em contato com o substrato, o deslocamento é nulo, considerando o revestimento aderido à sua base indeformável. No entanto, o ponto que está localizado na superfície externa do revestimento irá deslocar-se.

O gráfico a seguir apresenta esses valores.

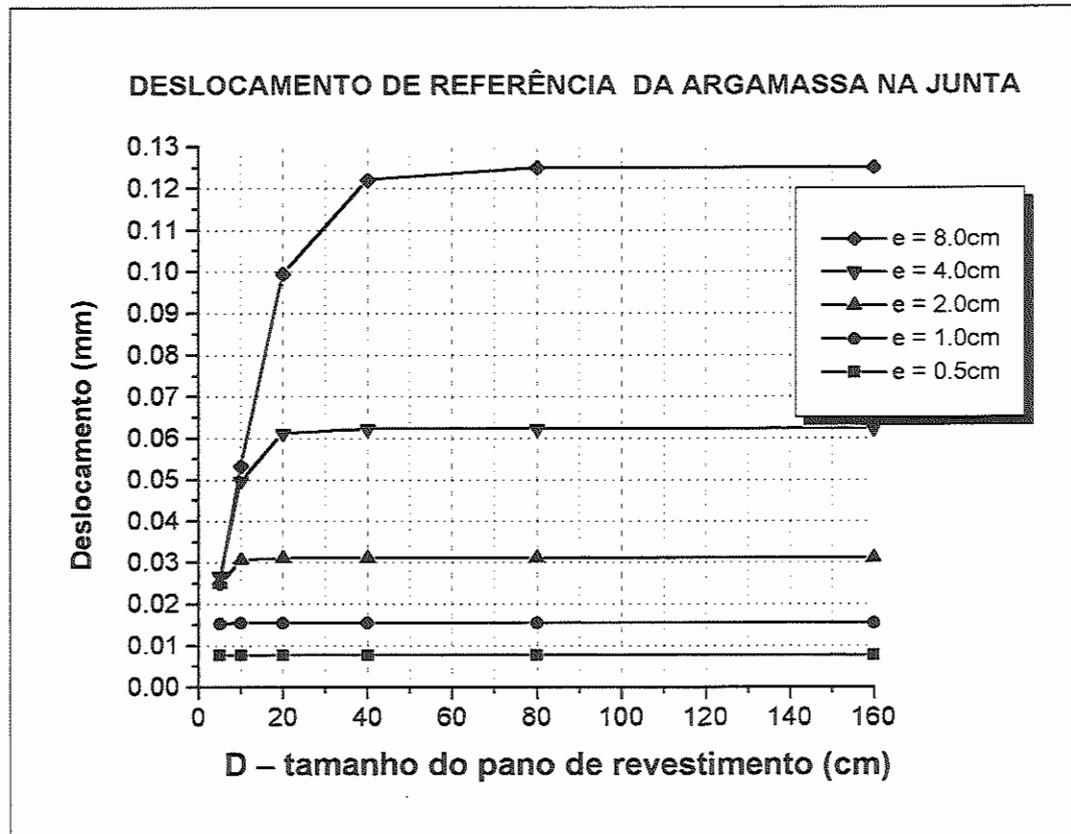


Figura 9 – Deslocamento de referência da argamassa na sua extremidade em função da espessura e o tamanho do pano de revestimento.

4.3.2.7 Discussão dos resultados

Como mencionado, $L_{\sigma_{m\acute{a}x}}$ representa a posição onde as tensões de tração deixam de ser aliviadas pela junta e passam a assumir seu valor máximo, o que equivale à restrição total da sua deformação.

Foi observada, em todos os modelos estudados, uma relação clara entre a espessura e da camada de argamassa a posição da tensão de tração máxima:

$$L_{\sigma_{m\acute{a}x}} = 5 \cdot e \quad (21)$$

A figura a seguir ilustra tal observação.

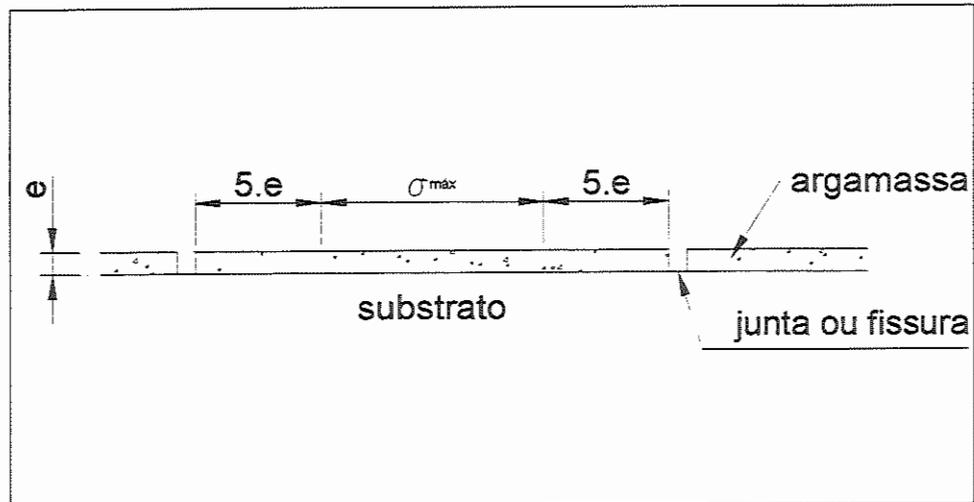


Figura 10 – Esquema da posição das tensões máximas na argamassa.

Essa afirmação pode ser deduzida do gráfico da tensão máxima de tração de referência em relação ao tamanho do pano de revestimento.

A partir do gráfico, observa-se que, quando o pano de revestimento é maior que 10 vezes a espessura da argamassa, a restrição à deformação é total. Isso porque o alívio das tensões de tração somente ocorre a partir da distância correspondente a 5 vezes a espessura do revestimento, contados da sua extremidade, de cada lado do pano de revestimento, totalizando, assim, 10 vezes a espessura.

Pode-se dizer, portanto, que as juntas de movimentação executadas nos revestimentos de argamassa somente causariam alívio nas tensões de tração máximas caso a distância entre elas fosse inferior à 10 vezes a espessura da argamassa. Porém, isso significaria valores extremamente baixos para essa distância, o que seria impraticável.

Sendo assim, pode-se afirmar que a tensão de tração máxima que ocorre na argamassa de revestimento não depende da distância entre as juntas de movimentação e nem da espessura da argamassa de revestimento, considerando distâncias convencionais entre as juntas de movimentação.

Isso porque, nesses casos de restrição total, a tensão de tração máxima depende apenas do módulo de deformação da argamassa e do valor da deformação que foi impedida.

A tensão de cisalhamento máxima, na interface entre a argamassa e o substrato, também não depende do tamanho do pano de revestimento, para valores convencionais do mesmo. No entanto, essa tensão depende da espessura da argamassa de revestimento, sendo que quanto maior essa espessura também será maior a tensão máxima de cisalhamento.

Outra observação importante é que, admitindo-se o comportamento elástico linear para a argamassa na tração, os valores das tensões de tração e de cisalhamento são linearmente proporcionais aos seguintes parâmetros: coeficiente de dilatação térmica, módulo de deformação da argamassa, variação de temperatura imposta e retração por secagem.

Dessa forma, as tensões que ocorrem em um caso genérico podem ser calculadas pelas expressões:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_{m\acute{a}x,ref} \cdot E_a \cdot \left(\frac{\varepsilon_r}{0,01} - \frac{\Delta T}{10} \right) \cdot \frac{\alpha}{10^{-5}} \quad (22)$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \tau_{m\acute{a}x,ref} \cdot E_a \cdot \left(\frac{\varepsilon_r}{0,01} - \frac{\Delta T}{10} \right) \cdot \frac{\alpha}{10^{-5}} \quad (23)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão de tração máxima real, em MPa

$\sigma_{m\acute{a}x,ref}$ = tensão de tração máxima de referência obtida na [Figura 8](#), em MPa

$\tau_{m\acute{a}x}$ = tensão de cisalhamento máxima real, em MPa

$\tau_{m\acute{a}x,ref}$ = tensão de cisalhamento máxima de referência obtida na [Tabela 14](#), em MPa

E_a = módulo de deformação da argamassa na tração, em GPa

ε_r = valor da deformação de retração por secagem que foi impedida, em %

ΔT = variação de temperatura imposta, em °C

α = coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa em °C⁻¹

Caso a tensão de tração máxima na argamassa assim calculada for maior do que a sua resistência à tração, então deverá iniciar-se um processo

de fissuração no revestimento, até que um novo equilíbrio seja estabelecido no sistema.

Uma primeira análise do estado de fissuração pode ser feita a partir dos resultados dos modelos. Para tanto, deve-se determinar, pela [Figura 8](#), a distância **D** necessária para que $\sigma_{m\acute{a}x,ref}$ seja igual ou menor que a relação entre a resistência à tração da argamassa e a tensão de tração máxima real σ_t calculada.

O valor de **D**, assim determinado, passa a representar o espaçamento entre fissuras que causará o alívio necessário ao equilíbrio. A partir desse valor, recorre-se à [Figura 9](#) para se determinar o deslocamento de referência da argamassa na extremidade do pano de revestimento, que agora passa a representar a fissura. O valor real da abertura de fissuras para o caso em análise deve ser obtido pela seguinte equação:

$$Abertura = 2 \cdot Desl_{ref} \cdot E_a \cdot \left(\frac{\varepsilon_r}{0,01} - \frac{\Delta T}{10} \right) \cdot \frac{\alpha}{10^{-5}} \quad (24)$$

Onde:

Abertura = abertura das fissuras, em mm

Desl_{ref} = deslocamento de referência da argamassa na extremidade do pano de revestimento, em mm; e os outros parâmetros têm o mesmo significado da equação anterior

Uma observação importante é que, ocorrendo um estado de fissuração da argamassa de revestimento, quanto maior for a sua espessura, maior será o espaçamento das fissuras, como pode ser observado na [Figura 8](#), que mostra a distância para atingir-se o alívio necessário ao equilíbrio. Em contrapartida, a abertura das fissuras também seria maior, como demonstrado na [Figura 9](#).

Portanto, com espessuras de revestimento maiores, caso ocorra um estado de fissuração, as fissuras seriam mais espaçadas e de maior abertura, causando problemas patológicos mais intensos.

Com relação às tensões de cisalhamento máximas atuantes, essas deverão ser inferiores à resistência de aderência ao cisalhamento da argamassa, caso contrário, haverá um deslocamento da argamassa na interface com a base, o que provocaria aberturas de fissuras ainda maiores, em um novo estado de equilíbrio do sistema, onde o espaçamento de fissuras também seria maior.

5 METODOLOGIA DA PESQUISA EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

A partir dos modelos de comportamento mecânico de revestimentos estudados, evidenciaram-se as propriedades mais influentes no processo de equilíbrio do sistema de revestimento.

O estudo dessas propriedades, experimentalmente, deve possibilitar a quantificação precisa dos seus valores, uma vez que o intuito não é o de, simplesmente, compara-los para diversos tipos de argamassa, mas sim, utiliza-los em modelos matemáticos que prevejam a possibilidade de ocorrência de fissuração nos revestimentos de argamassa.

Dessa forma, não se constitui objetivo deste trabalho a comparação entre diferentes materiais utilizados na confecção de argamassas, nem o estudo de argamassas inovadoras; mas sim, o estudo aprofundado das propriedades mecânicas mais importantes, quantificando as relações entre elas e as características de dosagem das argamassas.

Para a base desse estudo, foram utilizados alguns tipos convencionais de argamassa, os quais estão descritos mais adiante.

Procurou-se, também, deduzir o máximo de informações que os ensaios realizados pudessem fornecer, mesmo além das observações inicialmente pretendidas.

5.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais empregados referem-se à confecção de uma argamassa mista de cal e cimento e de uma argamassa aditivada com incorporador de ar.

Escolheu-se o cimento CII-E 32 como aglomerante hidráulico e a cal hidratada comum com carbonatos, designada como CH-III, como aglomerante aéreo.

O bloco empregado para a confecção do substrato, que servirá de base para os ensaios de resistência de aderência das argamassas, foi o bloco de concreto estrutural produzido pelo fabricante ITALPAVER.

Os ensaios de caracterização dos materiais empregados constam no ANEXO.

5.2 ARGAMASSAS EMPREGADAS

Quanto aos traços empregados, foi abrangida uma gama variável de resistências mecânicas, de traços pobres a traços ricos em cimento, dentro da qual incluem-se os traços mais usuais e recomendados por associações, inclusive a ABNT (NBR 7200).

Na argamassa mista de cimento, cal e areia, manteve-se uma relação aglomerante/areia fixada em 1/3, em volume, de forma que a quantidade de finos foi suficiente para garantir boas propriedades da argamassa no estado fresco.

Para a obtenção de quatro traços distintos, variou-se a proporção entre cal e cimento, variando-se a resistência mecânica da argamassa. Foram assim determinados os traços em volume de cimento:cal:areia, correspondendo a 1:0.5:4.5; 1:1:6; 1:2:9 e 1:3:12. Estas argamassas serão designadas pelos códigos M1, M2, M3 e M4, respectivamente.

Com relação às argamassas aditivadas, a escolha dos traços procurou reproduzir os convencionais, com boa variedade de teor de cimento, não sendo para essas argamassas o teor de finos tão relevante, ficando algumas de suas características a cargo do aditivo incorporador de ar.

Foram assim definidos os traços em volume de cimento:areia, correspondendo a 1:3; 1:6; 1:9 e 1:12. Estas argamassas serão designadas daqui para frente pelos códigos A1, A2, A3 e A4, respectivamente.

Observa-se que os traços escolhidos abrangem uma gama de resistências maior que as das argamassas convencionais de revestimento.

Isso porque, como será verificado mais adiante, é necessária tal abrangência para a obtenção de funções matemáticas, com precisão, que representem algumas propriedades mecânicas.

Tabela 15 - Traços das argamassas mistas de cal e cimento

CÓDIGO	TRAÇO (CIMENTO : CAL : AREIA)	
	em volume	em massa
M1	1 : 0,5 : 4,5	1 : 0,21 : 4,69
M2	1 : 1 : 6	1 : 0,43 : 6,25
M3	1 : 2 : 9	1 : 0,86 : 9,37
M4	1 : 3 : 12	1 : 1,28 : 12,50

Tabela 16 - Traços das argamassas aditivadas com incorporador de ar

CÓDIGO	TRAÇO (CIMENTO : AREIA) + ADITIVOS*	
	em volume	em massa
A1	1 : 3	1 : 3,12
A2	1 : 6	1 : 6,25
A3	1 : 9	1 : 9,37
A4	1 : 12	1 : 12,50

* o teor de aditivo é dado pelo fabricante em relação ao volume de areia. Neste caso, como a areia é muito fina, o teor é 0.50ml de aditivo/litro de areia.

5.3 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

As propriedades das argamassas no estado fresco determinam grande parte das suas características de dosagem, como o teor de finos, para conferir plasticidade e coesão à argamassa, e o teor de água, para conferir a adequada consistência à mesma.

Dessa forma, as propriedades no estado fresco acabam influenciando nas propriedades no estado endurecido e, portanto, no comportamento mecânico do revestimento. No entanto, essa influência se fará sentir quando da determinação dessas propriedades no estado endurecido.

A avaliação das argamassas no estado fresco, irá compreender a determinação de curvas de dosagem correspondentes a um nível de

consistência padrão que, de acordo com a NBR 13276/95, deve ser fixado em (255 ± 10) mm na mesa de espalhamento, e a realização dos ensaios apresentados na tabela seguinte.

Tabela 17 - Ensaios e métodos para avaliação das argamassas no estado fresco.

TIPO DE ARGAMASSA	ENSAIO	METODOLOGIA
Argamassa mista ou aditivada	Teor de água para consistência padrão	NBR 13276/95
	Retenção de água	NBR 13277/95
	Massa específica	NBR 13278/95
	Teor de ar incorporado	NBR 13278/95

Em todos os traços de argamassa mista, a cal foi misturada à água com 24 horas de antecedência aos ensaios.

Tal processo não prejudicou a precisão da dosagem, uma vez que a quantidade de água recém-misturada com a cal era medida antes do ensaio e complementada até a quantidade exata de dosagem.

5.4 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A elaboração de modelos de comportamento dos revestimentos necessitará de valores numéricos para essas propriedades e, portanto, a sua determinação deve possuir o maior refinamento possível, ou seja, devem bem representar as condições reais que apresentam fora do laboratório e isolar as imperfeições de ensaio.

Os ensaios e seus respectivos métodos de avaliação que serão utilizados constam na tabela seguinte.

Tabela 18 - Ensaios e métodos para avaliação das argamassas no estado endurecido.

TIPO DE ARGAMASSA	ENSAIO	METODOLOGIA
Argamassa mista e aditivada	Retração hidráulica	NBR 8490/84 ou ASTM C1148/1992A
	Módulo de deformação	NBR 8522/84
	Absorção de água	NBR 9779/95
	Resistência à compressão	NBR 13279/95
	Densidade de massa aparente	NBR 13280/95
	Resistência de aderência à tração	NBR 13528/95

Assim como no estudo das propriedades no estado fresco, em todos os traços de argamassa mista a serem ensaiados no estado endurecido, a cal foi misturada à água com 24 horas de antecedência aos ensaios.

5.4.1 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A NBR 8522/84 prescreve o procedimento para o ensaio de módulo de deformação estática e o traçado do diagrama tensão-deformação, em concretos.

Essa norma tem sido empregada, como referência para o mesmo ensaio, em argamassas de revestimento. No entanto, devido à argamassa ser um material com algumas particularidades em relação ao concreto, como não apresentar zona de transição entre pasta de cimento e agregado graúdo e resistência mecânica muito inferior, o emprego da NBR 8522/84 requer algumas adaptações em suas prescrições.

Foram ensaiados 5 corpos de prova cilíndricos, com 5cm de diâmetro e 10cm de altura, para o traçado do diagrama tensão-deformação de cada determinação; além de mais um corpo-de-prova, ensaiado previamente, para a previsão da carga de ruptura.

A velocidade de carregamento foi de 5% da carga de ruptura por segundo. Os limites, superior e inferior, dos ciclos de carregamento e descarregamento foram 30% e 10% da carga de ruptura, respectivamente.

Foi empregado o plano de carga Tipo II da referida norma, simulando carregamentos e descarregamentos previamente à ruptura do material, o que realmente ocorre com os revestimentos graças à natureza das suas solicitações, em geral de intempéries.

Os ensaios nas idades de 3 e 7 d dos corpos de prova foram realizados no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira, da Escola de Engenharia de São Carlos. O equipamento empregado no ensaio foi uma máquina universal de marca DARTEC, com controle automático de ensaio e monitoramento via “software”. A máquina registra, automaticamente, a força aplicada e a deformação do corpo-de-prova, medida através de extensômetros internos, do tipo LVDT, que medem o deslocamento relativo dos pratos da máquina.

Os ensaios na idade de 28 d dos corpos de prova foram realizados no Departamento de Geotecnia, da Escola de Engenharia de São Carlos. O equipamento empregado no ensaio foi uma prensa cervocontrolada, de marca MTS e modelo 815, controle automático de ensaio e monitoramento via “software”. A máquina registra, automaticamente em arquivo, a força aplicada e a deformação do corpo-de-prova, medida por meio de extensômetros internos que medem o deslocamento relativo dos seus pratos.

O fato da realização dos ensaios de módulo de deformação ter sido feita em um determinado equipamento nas idades de 3 e 7 d, e em outro na idade de 28 d, trouxe maior confiabilidade aos resultados. Isso porque, mesmo empregando-se dois equipamentos de modelo e fabricação diferente nos ensaios, os resultados, comparando-se as idades, foram extremamente coerentes. Além disso, os equipamentos de ensaio são reconhecidos mundialmente pela sua qualidade nas medidas de precisão.

5.4.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

O método de ensaio é prescrito pela norma NBR 13528/95 – “Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração”. Essa norma abrange revestimentos aplicados “in situ” ou em laboratório, sobre substratos inorgânicos não metálicos.

O ensaio foi realizado em todos os traços das argamassas mistas e aditivadas estudados nessa pesquisa, aos 28 d.

Foi representada a situação real de execução de um revestimento de argamassa em paredes, desde a execução da alvenaria, o tratamento da base e a aplicação da argamassa de revestimento.

Também, foi controlada a influência das condições climáticas. Como o objetivo desse ensaio não se constitui na avaliação da influência desse parâmetro nos resultados de aderência, bastaria isolar os efeitos dessa variável foram isolados, através de uma situação de condições ambientais amenas e que possibilitassem um processo de cura da argamassa de revestimento.

Para responder a essas questões, decidiu-se pela construção de uma parede de alvenaria de blocos de concreto, no interior do Laboratório de Construção Civil, da Escola de Engenharia de São Carlos, para serem realizados os ensaios de aderência.

Um esquema da parede onde foram executados os revestimentos é apresentado na próxima figura.

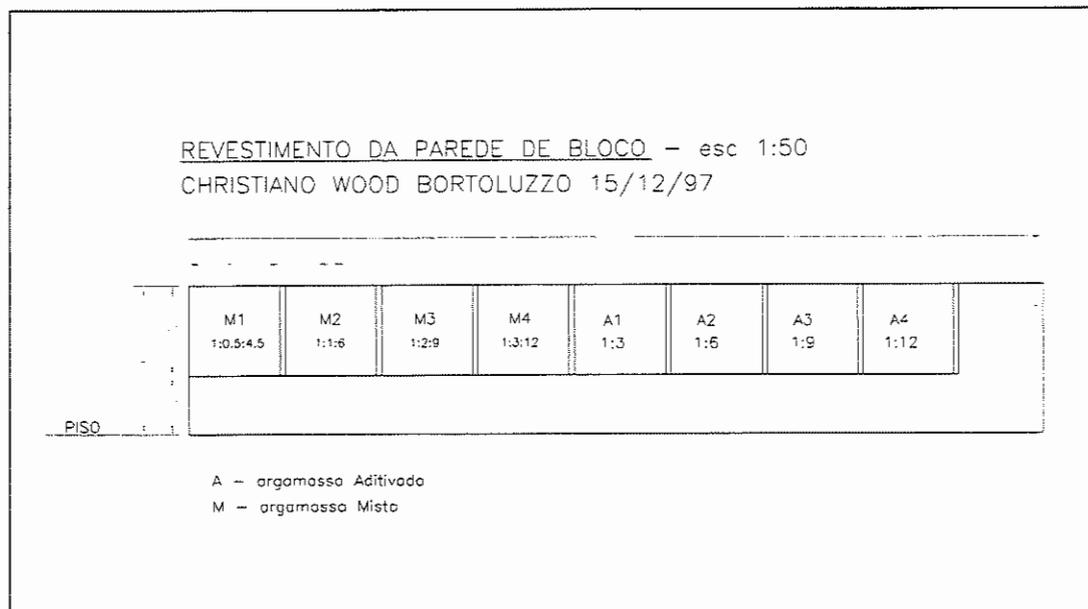


Figura 11 – Esquema da parede que serviu de base para o revestimento.

Essa parede recebeu tratamento superficial de chapisco comum, composto de areia grossa e cimento, no traço 1:3 em volume. O revestimento foi executado um mês após à execução do tratamento da base.

As argamassas foram dosadas em massa, com controle de umidade dos agregados e preparadas em argamassadeira vertical. A cal foi previamente misturada com água, em recipientes diferenciados para cada traço, ficando assim por 24 horas. Posteriormente, a massa de água perdida por evaporação durante o repouso da cal foi corrigida, garantindo-se, dessa forma, a reprodução perfeita do traço empregado.

Na parede, foram executadas 8 faixas de revestimento, de aproximadamente 1 m² cada, sendo uma para cada traço estudado. Os revestimentos foram executados por pedreiro experiente, em uma camada com espessura de 2 cm.

A argamassa, após o preparo, foi armazenada em caixa metálica e sua aplicação começou imediatamente. O substrato não foi umedecido previamente à aplicação do revestimento. Essa aplicação foi feita com ferramentas comuns de construção civil, como colher de pedreiro e régua de alumínio. As argamassas foram sarrafeadas, aproximadamente, duas horas após a sua aplicação, dependendo da avaliação do pedreiro.

Resumidamente, as características dos revestimentos executados constam na tabela seguinte.

Tabela 19- Características dos revestimentos de argamassa

ITEM	CARACTERÍSTICA
Substrato	Bloco de concreto estrutural
Tratamento	Chapisco comum de cimento e areia (1:3)
Umidade da base durante a aplicação	Seca
Posição da superfície revestida	Vertical
Profissional	Pedreiro
Ferramentas	Colher de pedreiro, caixa metálica e sarrafo de alumínio
Espessura do revestimento	2cm
Área revestida	1m ² para cada traço
Ambiente durante a execução	Laboratório (T=28°C e UR=60%)
Cura da argamassa	Molhagem 3 vezes ao dia durante os três primeiros dias

Quanto à aparelhagem, materiais empregados, execução do ensaio e apresentação dos resultados, temos o seguinte:

5.4.2.1 Equipamento de tração

Empregou-se equipamento mecânico, que funciona pelo princípio de alavanca, possibilitando uma grande força de arrancamento através de aplicação de uma carga bem menor (cerca de 10% da força de arrancamento).

Foram fabricados dois equipamentos de tração, um mais robusto para cargas elevadas, e outro mais leve, para os casos em que o peso próprio do dispositivo fosse significativo.

Esses dispositivos são dotados de vários pontos de aplicação de carga, possibilitando uma variedade de escala entre a carga aplicada e a força de arrancamento, de acordo com a alavanca.

A força de arrancamento é aplicada através de um cabo de aço, que não transmite momento ao corpo-de-prova. Ainda assim, para garantir tensões de tração uniformes no corpo-de-prova, laçou-se mão de um dispositivo que mantinha a direção perpendicular do cabo em relação ao

plano da superfície externa do revestimento e a centralização do ponto de aplicação da força, ou seja, sem excentricidades.

Tal dispositivo é composto por uma trave e uma roldana na ponta, que garantem sempre a horizontalidade do cabo de aplicação da força de arrancamento, independentemente do giro que o dispositivo sofra durante o carregamento. Isso é possível, fixando-se a trave na parte de apoio do dispositivo na parede, parte essa que permanece fixa enquanto o corpo do equipamento gira.

Esses detalhes podem ser visualizados nos projetos dos dispositivos, apresentados na figura seguinte.

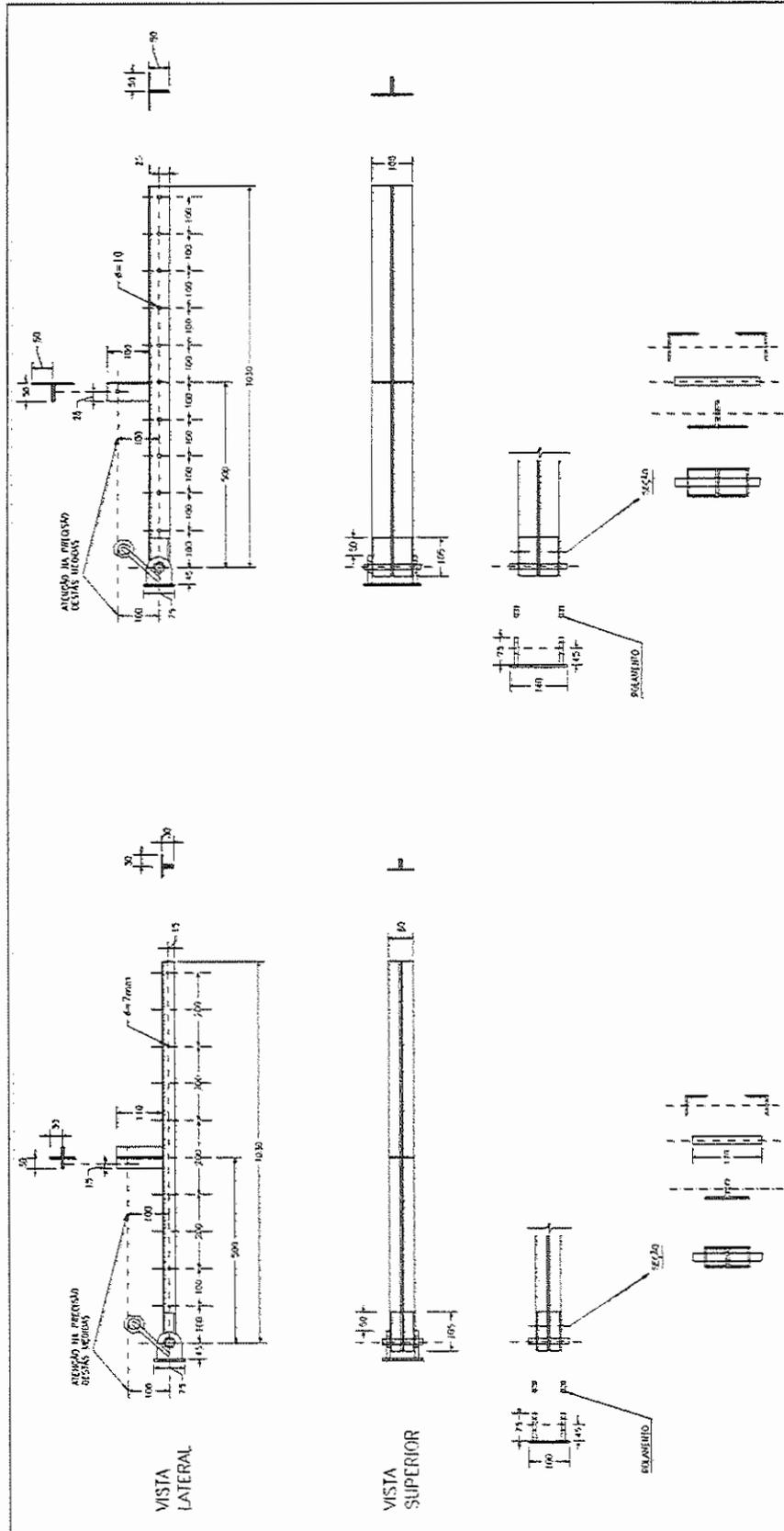


Figura 12 – Projeto dos dispositivos de arrancamento construídos.

Após a sua fabricação, os equipamentos foram aferidos com anel dinâmico de capacidade total de 5 kN. O anel foi conectado ao cabo de aplicação da força de arrancamento. Com isso, todos os furos dos dispositivos foram aferidos.

5.4.2.2 Pastilhas de arrancamento

Foram fundidas pastilhas de alumínio com 50 mm de diâmetro, nas quais foram rosqueados olhais para acoplamento do equipamento de tração.

5.4.2.3 Dispositivo de corte do revestimento

Empregou-se serra de copo diamantada, acoplada a um equipamento de extração de testemunhos, que foi fixado em um suporte metálico que permitiu o seu curso na horizontal, com grande precisão. Com isso, proporcionou-se um conjunto de corte do revestimento bem rígido, com excelente perpendicularidade entre o eixo de corte e o plano da superfície externa do revestimento.

5.4.2.4 Adesivos

Para a colagem da pastilha no substrato, a norma NBR 13528/95 prescreve cola à base de resina epóxi. Além disso, a norma indica que deve ser colocada uma tira de papelão na metade inferior do corte, para impedir o escorrimento da cola e o deslizamento da pastilha.

Foram feitos alguns testes de colagem nas argamassas revestidas no período de tempo que antecedeu ao ensaio propriamente dito (aos 28 d).

Observou-se algumas dificuldades em encontrar uma cola que garantisse a resistência de aderência dos traços mais resistentes. Vale mencionar que as forças de arrancamento variaram de 47 kgf a 330 kgf, o que equivale a tensões de tração desde 0,25 MPa até cerca de 1,70 MPa.

Finalmente, a cola que forneceu resultados satisfatórios de aderência foi a *Sikadur 31*, da fabricante Sika. Mais tarde, durante a realização dos ensaios, observou-se que não houve caso de ruptura na cola.



Devido à alta viscosidade da cola empregada, não houve necessidade da colocação da tira de papelão na metade inferior do corte.

Na tabela seguinte, apresentam-se as colas testadas e os problemas observados.

Tabela 20 – Testes de colagem das pastilhas para ensaio de arrancamento

NOME OU MARCA DA COLA	OBSERVAÇÕES
Araldite	Falta de aderência ao alumínio
Compound adesivo	Falta de resistência da cola em 72horas, com baixa polimerização e pequena aderência tanto no alumínio quanto na argamassa
Compound injeção	Boa polimerização e penetração nos poros da argamassa, porém devido sua baixa viscosidade, ela escorre e causa falha de colagem
Resina de mamona	Problema de escorrimento pela sua baixa viscosidade.
Superbonder	Falta de aderência ao alumínio
Massa Plástica - Iberê	Boa aderência ao alumínio, porém sua alta viscosidade prejudica sua penetração nos poros da argamassa e sua aderência à ela
Sikadur 31	Boa aderência ao alumínio e argamassa em 48horas

5.4.2.5 Execução do ensaio

A aplicação de carga foi feita através do enchimento de um recipiente metálico, pendurado no equipamento de tração, com areia seca. Essa aplicação foi de maneira progressiva, buscando-se a taxa de carregamento especificada pela NBR 13528/95.

Para obter-se uma determinada taxa de carregamento, calculou-se o tempo total de carregamento até a ruptura, a partir da carga prevista e dos próprios resultados observados ao longo do ensaio. Para tanto, foi empregada uma tabela de forma a auxiliar este processo, durante a realização do ensaio.

Para cada determinação, foram ensaiados 10 corpos de prova.

Tabela 21 - Tabela para controle da taxa de carregamento.

TAXA DE CARREGAMENTO PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO									
Força de Arrancamento	Resistência de Aderência	Taxa de Carregamento	Tempo de Ensaio	carga furo1	carga furo2	carga furo3	carga furo4	carga furo5	
(Kg)	(MPa)	(Kg/s)	(s)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)
30	0.150	0.5	60	1.2	1.5	2.1	2.9	5.9	
35	0.175	0.5	70	1.7	2.2	3.0	4.3	8.5	
40	0.200	0.5	80	2.2	2.9	4.0	5.6	11.2	
45	0.225	2.5	18	2.8	3.7	5.0	6.9	13.9	
50	0.250	2.5	20	3.3	4.4	5.9	8.3	16.5	
55	0.275	2.5	22	3.8	5.1	6.9	9.6	19.2	
60	0.300	2.5	24	4.4	5.8	7.8	10.9	21.9	
65	0.325	2.5	26	4.9	6.5	8.8	12.3	24.5	
70	0.350	2.5	28	5.4	7.2	9.7	13.6	27.2	
75	0.375	2.5	30	6.0	7.9	10.7	14.9	29.9	
80	0.400	2.5	32	6.5	8.6	11.6	16.3	32.5	
85	0.425	2.5	34	7.0	9.3	12.6	17.6	35.2	
90	0.450	2.5	36	7.6	10.0	13.5	18.9	37.9	
95	0.475	2.5	38	8.1	10.7	14.5	20.3	40.5	
100	0.500	2.5	40	8.6	11.4	15.4	21.6	43.2	
110	0.550	10	11	9.7	12.8	17.3	24.3	48.5	
120	0.600	10	12	10.8	14.2	19.2	26.9	53.9	
130	0.650	10	13	11.8	15.6	21.1	29.6	59.2	
140	0.700	10	14	12.9	17.0	23.0	32.3	64.5	
150	0.750	10	15	14.0	18.4	25.0	34.9	69.9	
160	0.800	10	16	15.0	19.8	26.9	37.6	75.2	
170	0.850	10	17	16.1	21.2	28.8	40.3	80.5	
180	0.900	10	18	17.2	22.6	30.7	42.9	85.9	
190	0.950	10	19	18.2	24.0	32.6	45.6	91.2	
200	1.000	10	20	19.3	25.4	34.5	48.3	96.5	
225	1.125	20	11	22.0	28.9	39.2	54.9	109.9	
250	1.250	20	13	24.7	32.4	44.0	61.6	123.2	
275	1.375	20	14	27.3	36.0	48.8	68.3	136.5	
300	1.500	20	15	30.0	39.5	53.5	74.9	149.9	
325	1.625	20	16	32.7	43.0	58.3	81.6	163.2	
350	1.750	20	18	35.3	46.5	63.0	88.3	176.5	
375	1.875	20	19	38.0	50.0	67.8	94.9	189.9	
400	2.000	20	20	40.7	53.5	72.6	101.6	203.2	

5.4.3 RETRAÇÃO POR SECAGEM

Para este ensaio, foram feitos alguns testes e adaptações aos procedimentos prescritos na única norma nacional a respeito: a NBR8490/84, que avalia a retração por secagem em argamassas de assentamento de alvenaria estrutural.

O número de corpos de prova empregado foi de dois por medida, inferior à prescrição de três corpos de prova feita pela norma. O ensaio foi realizado para oito tipos de traço em três ambientes diferentes de secagem e, portanto, precisava-se minimizar a quantidade total de corpos de prova. Isso foi possível, pois alguns estudos observatórios já haviam constatado uma baixa variabilidade nas medidas, mesmo com dois corpos de prova, o que também poderá ser observado nos resultados apresentados mais a diante.

As dimensões empregadas, para os corpos de prova, foram de 3x3x28cm. Em testes realizados com os traços mais fracos, observou-se que a seção de 2,5x2,5cm, prescrita pela norma, favorecia a ruptura accidental dos corpos de prova. Com a seção aumentada para 3x3cm, esse problema diminuiu. O comprimento de 28cm foi adotado devido à precisão necessária às medidas.

As medições foram diárias, uma vez que, para uma posterior avaliação de fissuração de revestimentos, o fenômeno é mais importante nas primeiras idades. Foi medido o comprimento dos CPs, com precisão de 0,002mm.

Para as condições de secagem, a tabela seguinte apresenta os estados higrométricos, e demais condições de ensaio.

Tabela 22 – Estados higrométricos para ensaio de retração por secagem

UMIDADE RELATIVA	TEMPERATURA	OBTENÇÃO DO ESTADO HIGROMÉTRICO
40%	20°C	Caixa metálica vedada e com um desumidificador interno
60%	20°C	Controle de sala climatizada com ar condicionado
80%	20°C	Caixa de madeira com uma solução saturada de cloreto de amônio

Além disso, os corpos de prova tiveram duas, das suas quatro faces, vedadas com silicone logo após a desforma, para que a relação entre a área da sua seção transversal e o seu perímetro exposto fosse semelhante à de um revestimento.

Para a realização desse ensaio, foi construído um molde visando a confecção de 24 CPs de cada vez e sua desforma após um dia, evitando perdas accidentais por ruptura.

Esse molde foi construído com madeira compensada plastificada, revestida com papel plastificado. Mesmo assim, alguns CPs dos traços A3 e A4 foram danificados na desforma.

5.4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Este ensaio é prescrito pela NBR 9779/95 – “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade”.

Ele foi realizado para todas as argamassas estudadas na presente pesquisa, aos 28 d. Foi determinada, para três corpos de prova de cada traço, a absorção de água a 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação dos mesmos em contato com a água.

Os corpos de prova foram curados em ambiente de laboratório, no qual a umidade relativa do ar variou de 55% a 80%, e a temperatura de 17°C a 28°C.

5.4.5 DENSIDADE DE MASSA APARENTE

Este ensaio é prescrito pela norma NBR 13280/95 – “Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido”.

Não houve modificação nos procedimentos prescritos pela norma, para esse ensaio.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

6.1 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Os resultados de dosagem das argamassas e dos ensaios: consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água; estão apresentados nas tabelas seguintes.

Tabela 23 - Relações água/materiais secos; teor de aglomerante, teor de cimento, relação água/cimento e consistência das argamassas mistas (NBR 13276/95)

Argam. mista	Traço	Água/mater secos	Teor de aglom (%)	Teor de cim. (%)	a/c (kg/kg)	Consistência (mm)
	Em volume	Em massa	Em massa	Em massa	Em massa	
M1	1:1,5:4,5	0,185	20,5	16,9	1,09	260
M2	1:1:6	0,188	18,6	13,0	1,44	260
M3	1:2:9	0,195	16,6	8,90	2,19	257
M4	1:3:12	0,202	15,4	6,77	2,99	257

Tabela 24 - Relações água/materiais secos; teor de cimento, relação água/cimento e consistência das argamassas aditivadas (NBR 13276/95)

Argamassa aditivada	Traço	Água/mater secos	Teor de cimento (%)	a/c (kg/kg)	Consistência (mm)
	Em volume	Em massa	Em massa	Em massa	
A1	1:3	0,156	24,3	0,64	261
A2	1:6	0,159	13,8	1,15	255
A3	1:9	0,173	9,64	1,80	249
A4	1:12	0,176	7,41	2,37	248

Tabela 25 - Teor de ar incorporado e massa específica das argamassas mistas (NBR 13278/95).

Argamassa Mista	Teor de ar Incorporado (%) Em volume	Densidade de massa (kg/dm ³)
M1	0	2,14
M2	0,7	2,11
M3	0,9	2,08
M4	0,3	2,08

Tabela 26 - Teor de ar incorporado e massa específica das argamassas aditivadas(NBR 13278/95).

Argamassa Aditivada	Teor de ar Incorporado (%) Em volume	Densidade de massa (kg/dm ³)
A1	9	2,02
A2	17	1,82
A3	18	1,77
A4	17	1,76

Tabela 27 - Retenção de água em argamassas mistas (NBR 13277/95).

ARGAMASSA MISTA	RETENÇÃO DE ÁGUA (%)
M1	85
M2	86
M3	87
M4	88

Tabela 28 - Retenção de água em argamassas aditivadas (NBR 13277/95).

ARGAMASSA ADITIVADA	RETENÇÃO DE ÁGUA (%)
A1	84
A2	80
A3	78
A4	78

Pelos resultados apresentados, observa-se que as argamassas mistas apresentam maior retenção de água que as aditivadas. Além disso, nota-se que, quanto maiores os teores de cal das argamassas estudadas, maiores foram os valores de retenção de água.

Nas argamassas aditivadas, as retenções de água foram maiores nos traços mais ricos em cimento. Nesses traços, o teor de finos é maior e o teor de ar incorporado é menor.

6.2 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

6.2.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Os resultados da resistência à compressão são a média das cargas de ruptura obtidas do ensaio de módulo de deformação na compressão. Esses resultados de ensaio, para todos os corpos de prova, constam em anexo.

A tabela seguinte apresenta os valores de resistência máxima à compressão para as idades de 3, 7 e 28 d.

Tabela 29 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

ARGAMASSA	TRAÇO EM VOLUME	f_{c3} (MPa)	f_{c7} (MPa)	f_{c28} (MPa)
A1	1:3	9,52	10,07	18,55
A2	1:6	2,22	3,31	4,85
A3	1:9	0,74	0,88	1,50
A4	1:12	0,40	0,35	0,82
M1	1:1,5:4,5	4,52	7,68	11,71
M2	1:1:6	2,38	4,29	6,77
M3	1:2:9	0,97	1,98	2,84
M4	1:3:12	0,53	1,17	1,51

Usualmente, a resistência à compressão está relacionada com a relação água/cimento, como ilustram os gráficos a seguir, para as argamassas ensaiadas.

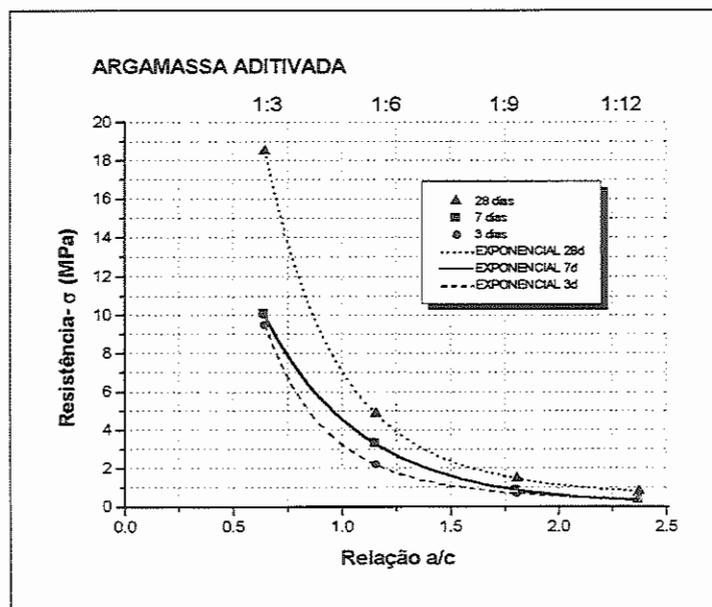


Figura 13 – Relação entre resistência à compressão uniaxial e relação a/c para argamassas aditivadas.

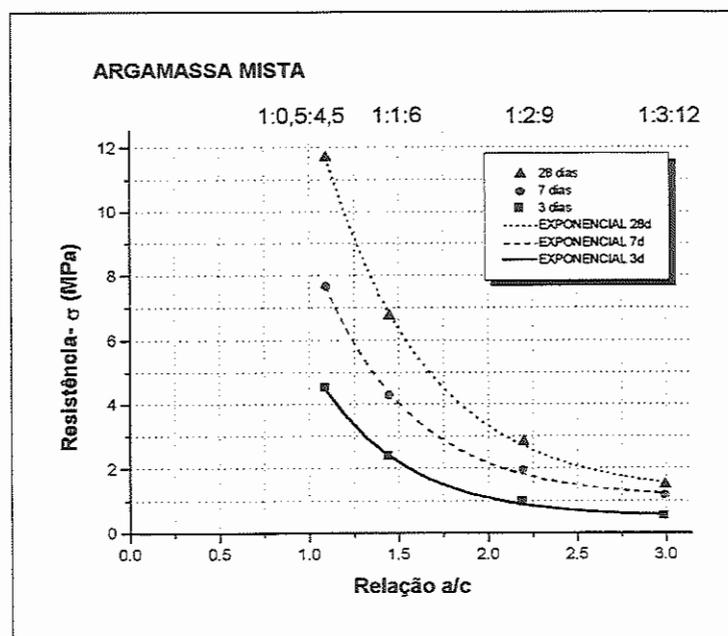


Figura 14 - Relação entre resistência à compressão uniaxial e relação a/c para argamassas mistas

A figura seguinte apresenta as curvas de correlação entre resistência à compressão uniaxial em corpos de prova cilíndricos de argamassa e sua

correspondente relação água/cimento (a/c) aos 28 d, comparando-se as argamassas mistas e as aditivadas.

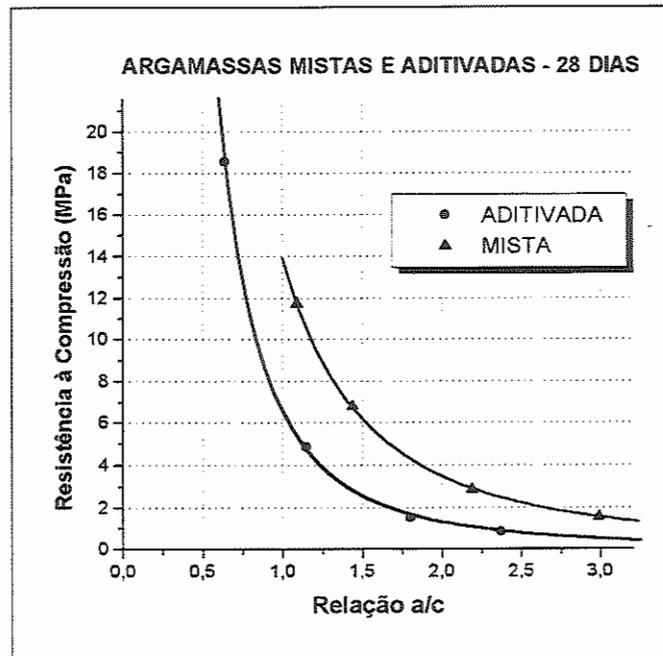


Figura 15– Relação entre resistência à compressão aos 28 d e relação a/c

A partir dos resultados de resistência à compressão aos 3, 7 e 28 d, que totalizaram 120 resultados de ensaio, foram determinadas as equações que se seguem.

Correlação para as argamassas mistas:

$$f_c = 4,15 \cdot \ln(t + 1) \cdot (a/c)^{-2} \quad (25)$$

Correlação para as argamassas aditivadas:

$$f_c = 2 \cdot \ln(t + 1) \cdot (a/c)^{-2,3} \quad (26)$$

Onde:

f_c = resistência à compressão da argamassa, em MPa

t = idade da argamassa, em d

a/c = relação água / cimento

Essas correlações da resistência mecânica das argamassas com o tempo e com a relação água/cimento são relativamente simples, e se mostraram extremamente coerentes com os resultados obtidos nos ensaios.

Observa-se que, para uma mesma relação água/cimento e idade, a argamassa mista apresenta, praticamente, o dobro da resistência mecânica da aditivada. No entanto, isso não implica que a argamassa aditivada consuma o dobro da quantidade de cimento da argamassa mista, para apresentar a mesma resistência, pois, devido à propriedade plastificante do aditivo incorporador de ar, ela necessita de uma quantidade menor de água em sua dosagem.

O gráfico a seguir relaciona a resistência das argamassas aditivadas e mistas, aos 28 d, com o consumo de cimento.

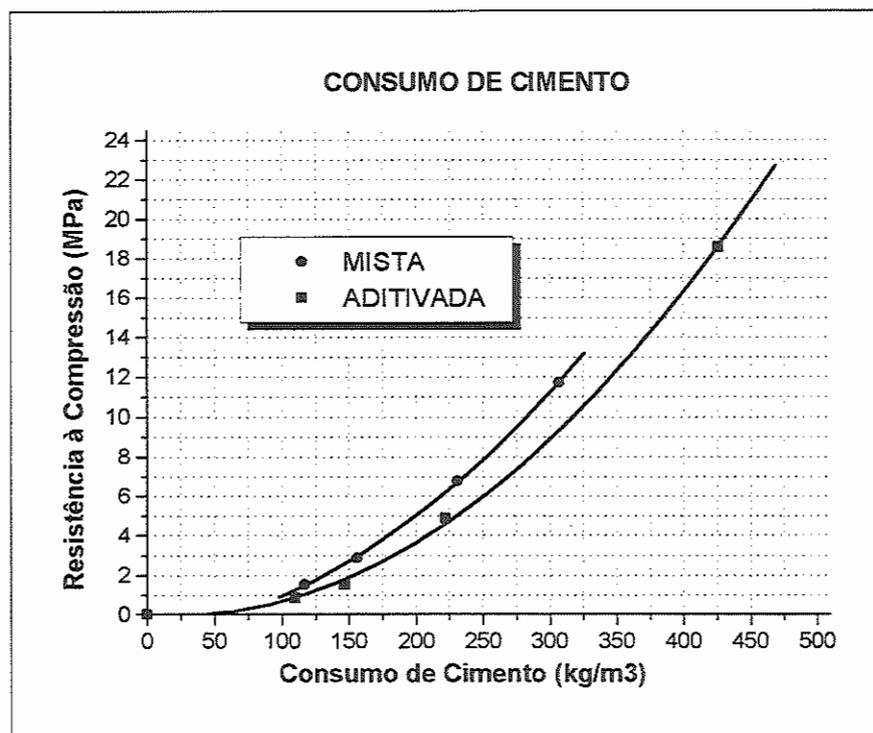


Figura 16 - Relação entre resistência à compressão uniaxial e o consumo de cimento.

Observa-se que, para uma dosagem com o mesmo consumo de cimento, uma argamassa mista apresentara uma resistência cerca de 30% maior do que uma argamassa aditivada.

O ganho de resistência conferido pelo uso da cal deve-se a diversos fatores, dentre eles: a capacidade aglomerante da cal, a hidratação mais completa do cimento devido ao aumento da capacidade de retenção de água e pelo fato do aditivo incorporador de ar aumentar a porosidade da argamassa aditivada.

As figuras a seguir apresentam curvas traçadas a partir das equações obtidas para a resistência à compressão, observando-se a sua evolução ao longo do tempo, para diferentes relações a/c .

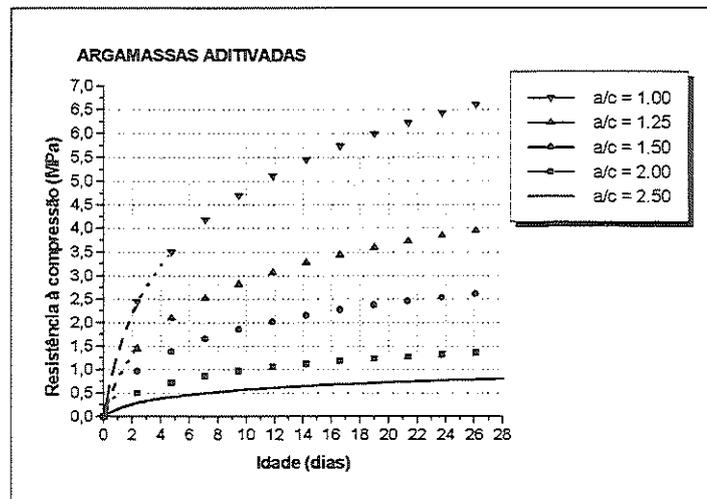


Figura 17 – Curvas da resistência ao longo do tempo para argamassas aditivadas.

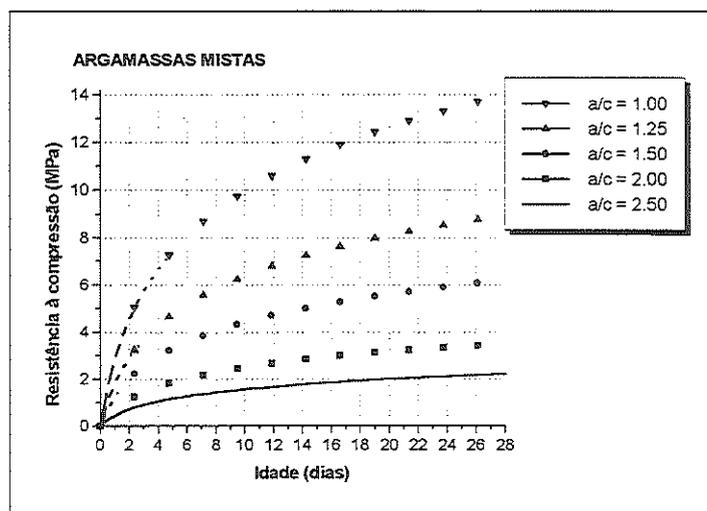


Figura 18 – Curvas da resistência ao longo do tempo para argamassas mistas.

Outra correlação pode ser feita entre a resistência à compressão uniaxial e o teor de cimento.

No caso das argamassas aditivadas, onde o único aglomerante é o cimento, pode-se adicionar um ponto à curva, correspondente ao teor de cimento e resistência à compressão igual a zero. Já no caso das argamassas mistas, a mesma dedução não pode ser feita por haver um outro aglomerante no traço, que é a cal.

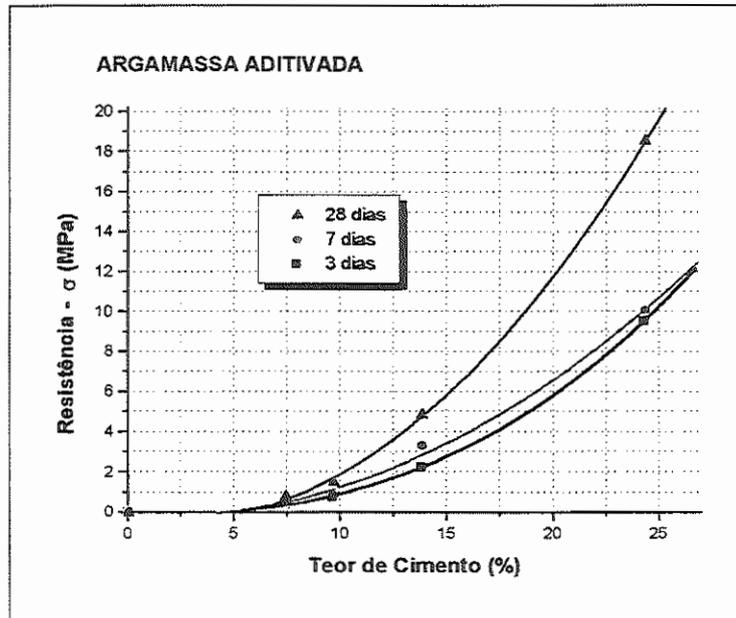


Figura 19 – Correlação entre resistência à compressão e teor de cimento para argamassas aditivadas

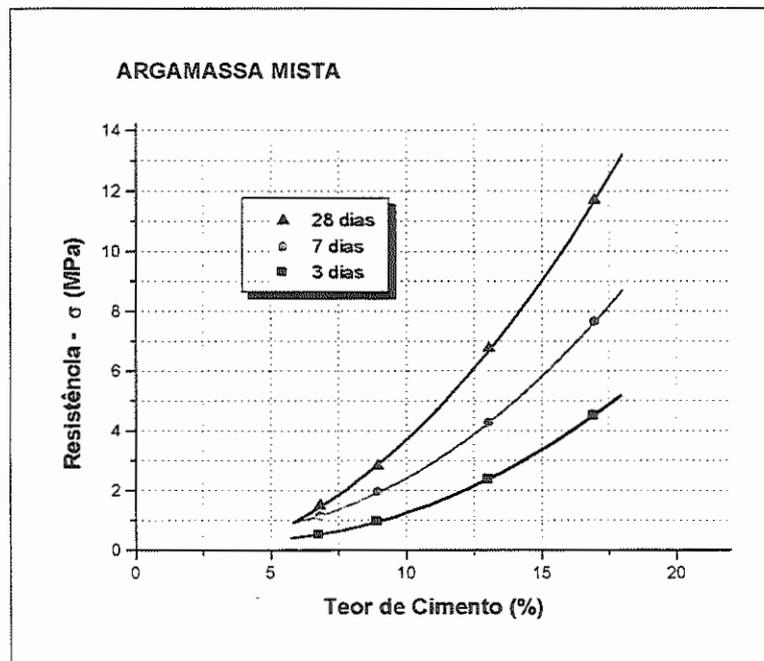


Figura 20 - Correlação entre resistência à compressão e teor de cimento para argamassas mistas

6.2.2 ENSAIOS DE MÓDULO DE DEFORMAÇÃO ESTÁTICA NA COMPRESSÃO

A apresentação dos resultados desse ensaio é feita na forma de um diagrama tensão-deformação médio de três corpos de prova, selecionados dentre os cinco corpos de prova ensaiados, para cada determinação. Esse diagrama médio é obtido a partir da média de uma grande quantidade de pontos (cerca de 80) de cada diagrama.

Além disso, são apresentados o módulo de deformação tangente inicial médio e os módulos secantes entre 40% e 100% da carga de ruptura na curva média de tensão–deformação.

Para elaborar-se esse tipo de análise e apresentação, recorre-se a um tratamento das curvas obtidas através dos dados de ensaio de acordo com os procedimentos descritos a seguir.

A próxima figura ilustra os pontos registrados pela máquina de ensaio para uma determinação.

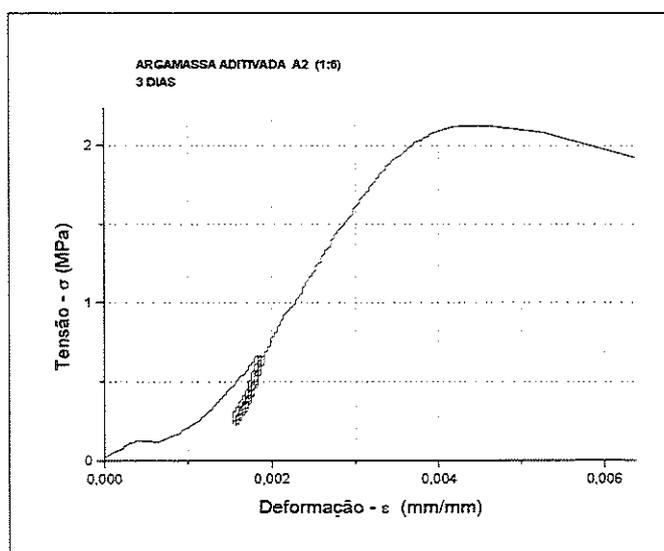


Figura 21 - Exemplo de uma curva obtida com o traçado dos dados de ensaio.

Para cada curva, foi calculado o módulo tangente inicial, no último trecho dos ciclos de carregamento e descarregamento. Esse módulo corresponde à inclinação da reta obtida por aproximação linear dos pontos do trecho citado, conforme ilustra a figura a seguir.

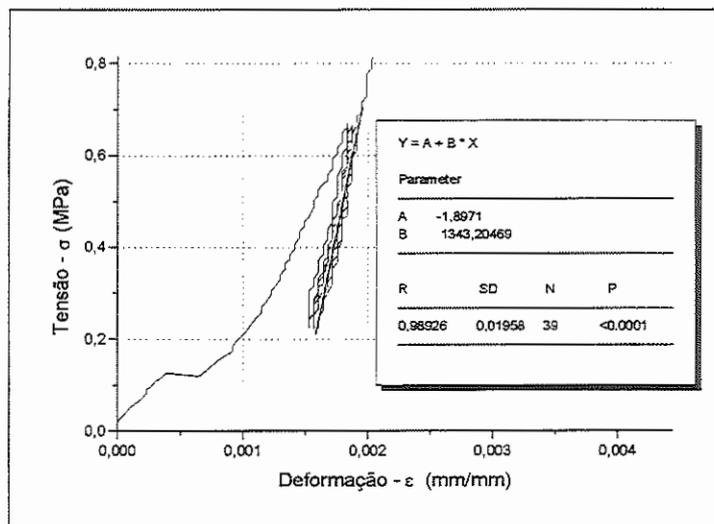


Figura 22 - Exemplo do cálculo do módulo tangente inicial

Após esse procedimento, através da equação da reta ajustada no último ciclo de carregamento, eliminaram-se os dados anteriores a esse ciclo, onde ocorrem deformações de acomodação nos dispositivos de ensaio.

Depois disso, os valores das deformações foram corrigidos, subtraindo-se dos mesmos o valor correspondente à relação A / B dos coeficientes da equação da reta encontrada, eliminando-se as deformações de acomodação e restando apenas as do corpo-de-prova.

Dessa forma, foi possível a comparação dos diagramas dos cinco corpos de prova ensaiados, em um mesmo gráfico, de onde foram selecionados três para o cálculo da curva média.

A apresentação desses gráficos para cada traço de argamassa consta no **Anexo**, assim como algumas tabelas que mostram a composição das dosagens dessas argamassas, os valores de resistência máxima à compressão e os módulos de deformação tangente e secante extraídos dos gráficos.

De maneira geral os diagramas tensão – deformação apresentaram um comportamento praticamente linear até cerca de 80% da carga de ruptura, quando, então, as deformações aumentam mais rapidamente e a curva perde a sua linearidade.

Dentre os diversos corpos de prova de um mesmo traço, os diagramas se mostraram muito semelhantes, principalmente no início das curvas, ocorrendo variações nos trechos próximos à ruptura, depois que a argamassa ultrapassa seu limite de elasticidade e inicia um estado de plastificação.

Nos diagramas traçados, também foi possível acompanhar-se o comportamento da argamassa até sua completa plastificação, medindo-se o módulo de deformação secante até a ruptura.

As tabelas seguintes apresentam, para as idades de 3, 7 e 28 d, os valores do módulo tangente inicial, resistência máxima à compressão e deformação de ruptura na compressão, ou a deformação do corpo-de-prova no instante da carga máxima por ele suportada.

Tabela 30 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 3 d.

TRAÇO	MÓDULO TANGENTE INICIAL (GPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (%)
A1	3.24	9.52	0.53
A2	1.25	2.22	0.32
A3	0.62	0.74	0.28
A4	0.26	0.40	0.26
M1	1.84	4.52	0.51
M2	1.37	2.38	0.36
M3	0.69	0.97	0.44
M4	0.40	0.53	0.48

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 7 d.

TRAÇO	MÓDULO TANGENTE INICIAL (GPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (%)
A1	2.64	10.07	0.65
A2	1.56	3.31	0.33
A3	0.76	0.88	0.44
A4	0.31	0.35	0.58
M1	2.66	7.68	0.47
M2	1.98	4.29	0.47
M3	1.20	1.98	0.40
M4	0.69	1.17	0.42

Tabela 32 – Resultados dos ensaios de módulo, resistência e deformação de ruptura aos 28 d.

TRAÇO	MÓDULO TANGENTE INICIAL (GPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA (MPa)
A1	3.83	18.55	0.55
A2	1.95	4.85	0.42
A3	1.02	1.50	0.29
A4	0.65	0.82	0.31
M1	3.10	11.71	0.56
M2	2.36	6.77	0.45
M3	1.33	2.84	0.43
M4	0.93	1.51	0.36

As próximas figuras ilustram os diagramas tensão–deformação, para uma determinada idade, comparando-se os diversos traços estudados.

Observa-se a variação no valor do módulo através da inclinação do trecho inicial das curvas, e a variação nas deformações de ruptura entre os diversos traços.

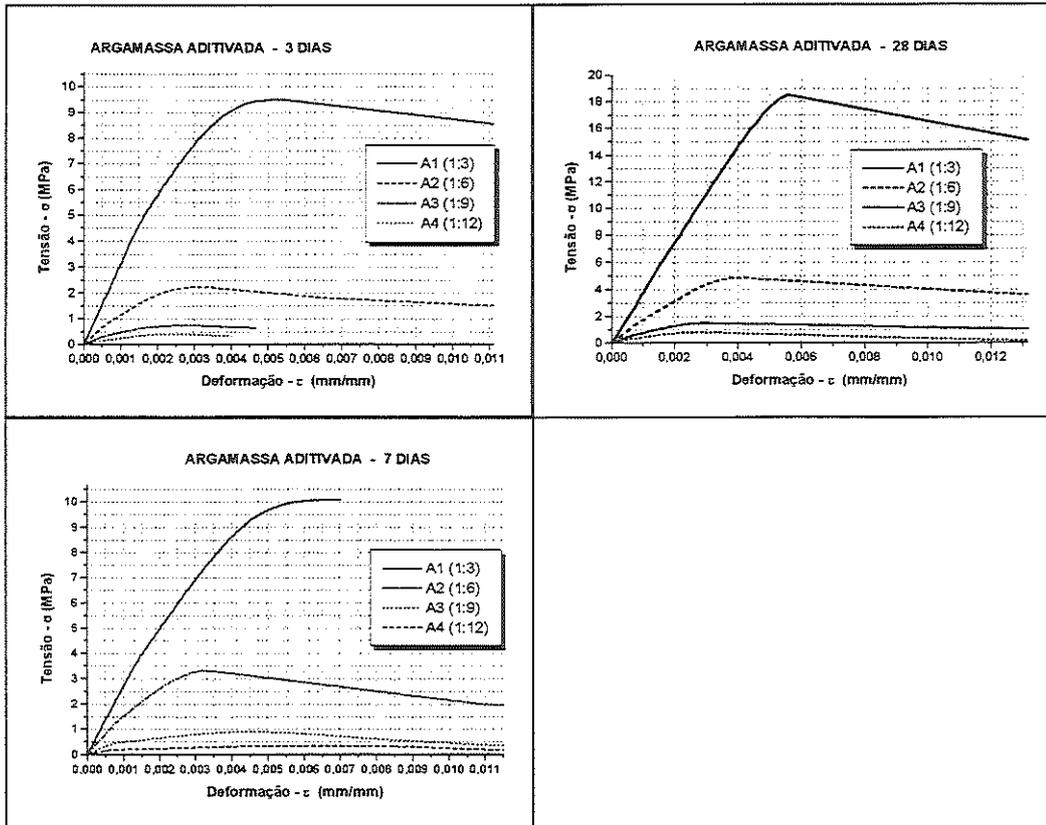


Figura 23 - Diagramas tensão - deform das aditivadas, comparando-se os traços.

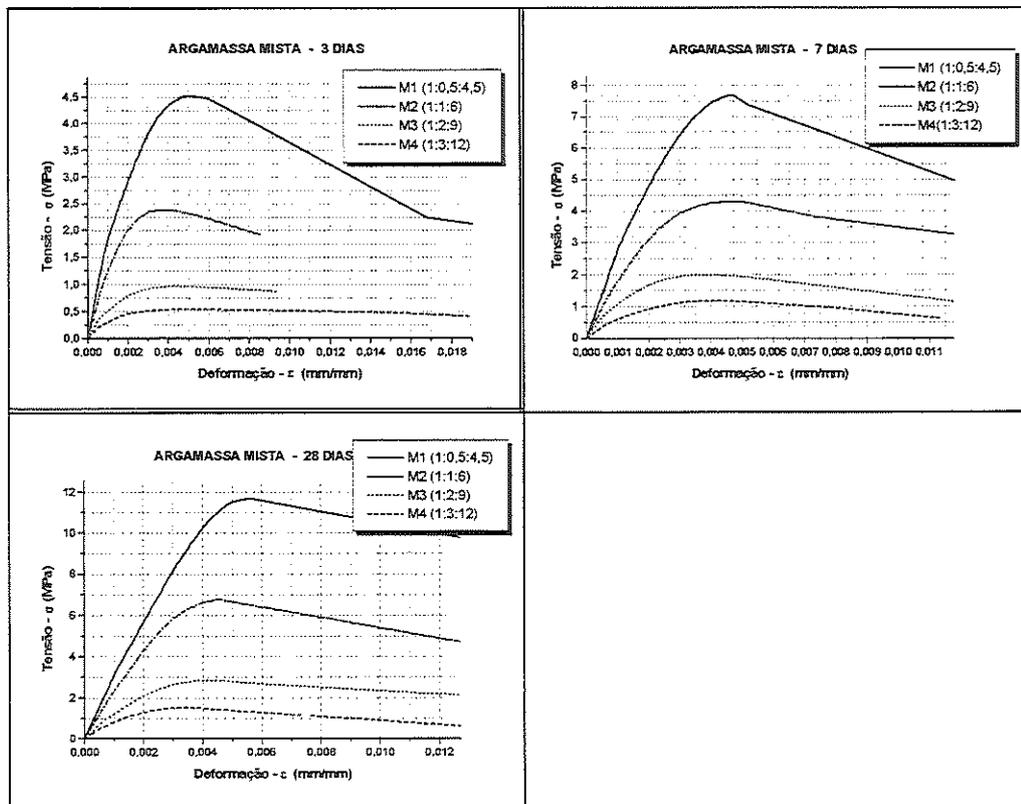


Figura 24 - Diagramas tensão - deform das mistas, comparando-se os traços.

A partir desses diagramas, pode-se observar que as argamassas de maior resistência apresentam também maior módulo de deformação tangencial e maior deformação máxima no instante da ruptura.

Isso ocorre porque o módulo de deformação é função da raiz quadrada da resistência à compressão e, portanto, um aumento de resistência provoca um aumento proporcionalmente menor do módulo de deformação, levando a um aumento na deformação máxima de ruptura. Correlações como essa serão apresentadas mais adiante nesta pesquisa, em item específico.

Essa constatação pode parecer contraditória com o conhecimento existente sobre o tema de que as argamassas de menor resistência são mais deformáveis. Essas argamassas necessitam sim, de menor energia para promover a sua deformação. No entanto, a deformação máxima suportada por elas é menor do que nas argamassas de maior resistência.

As figuras seguintes apresentam a evolução dos diagramas tensão-deformação para cada argamassa, ao longo do tempo, acompanhando a evolução da resistência dessas argamassas.

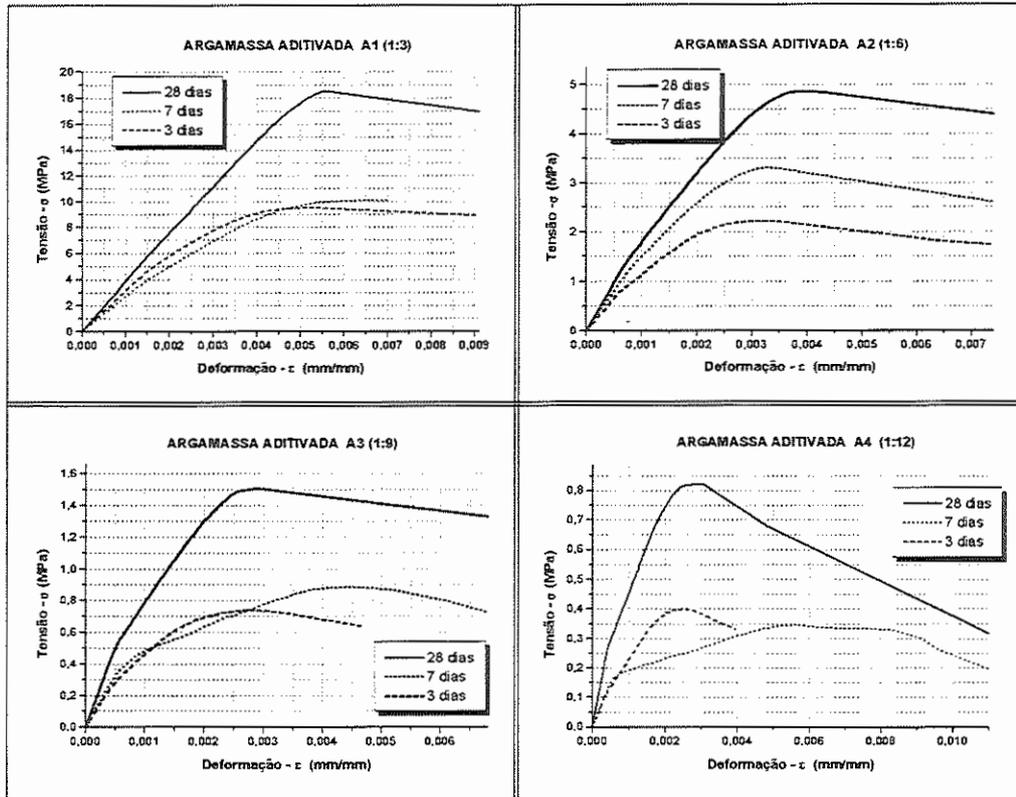


Figura 25 - Diagramas tensão – deform. das aditivadas, comparando-se as idades.

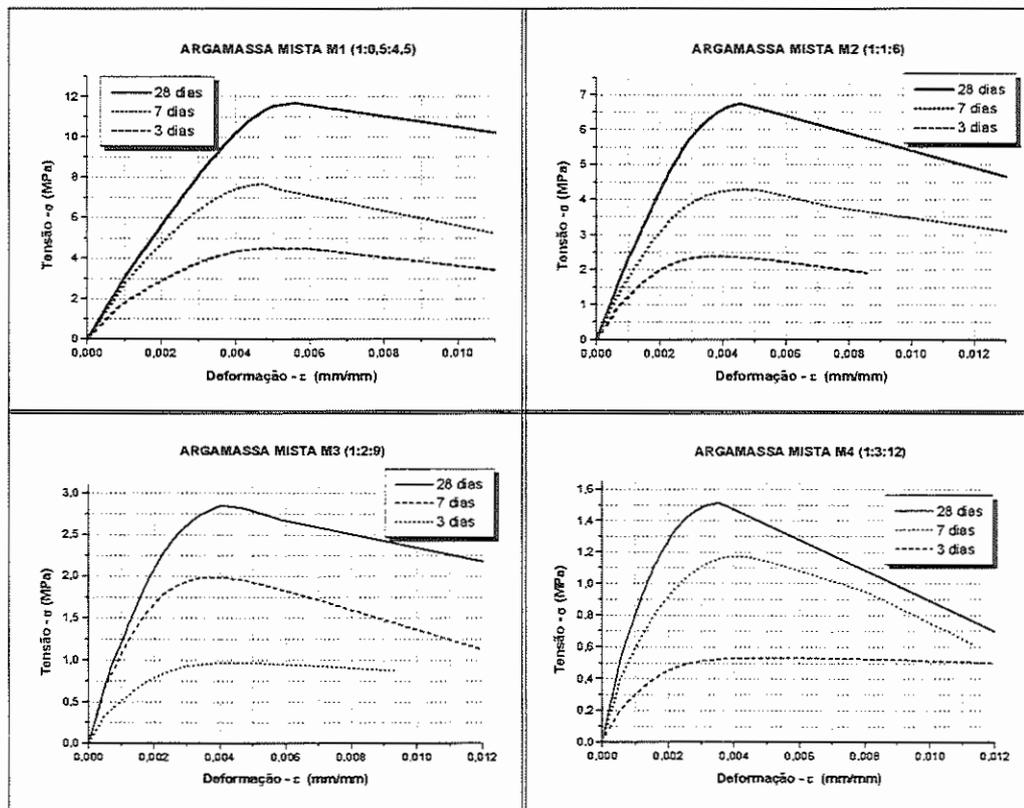


Figura 26 - Diagramas tensão – deform. das mistas, comparando-se as idades.

Os gráficos seguintes mostram a evolução do módulo de deformação tangente inicial ao longo do tempo. Vale lembrar que esse módulo corresponde ao valor da inclinação da reta tangente ao trecho inicial do diagrama tensão-deformação dessas argamassas.

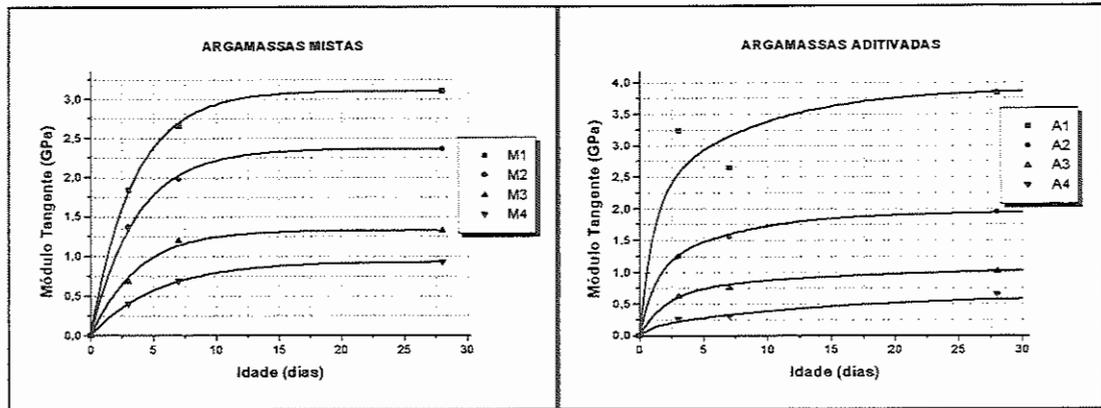


Figura 27 - Evolução do módulo tangente inicial com o tempo.

As correlações mais usuais dos módulos de deformação referem-se às resistências mecânicas das argamassas. Os próximos gráficos apresentam tal correlação para as argamassas ensaiadas.

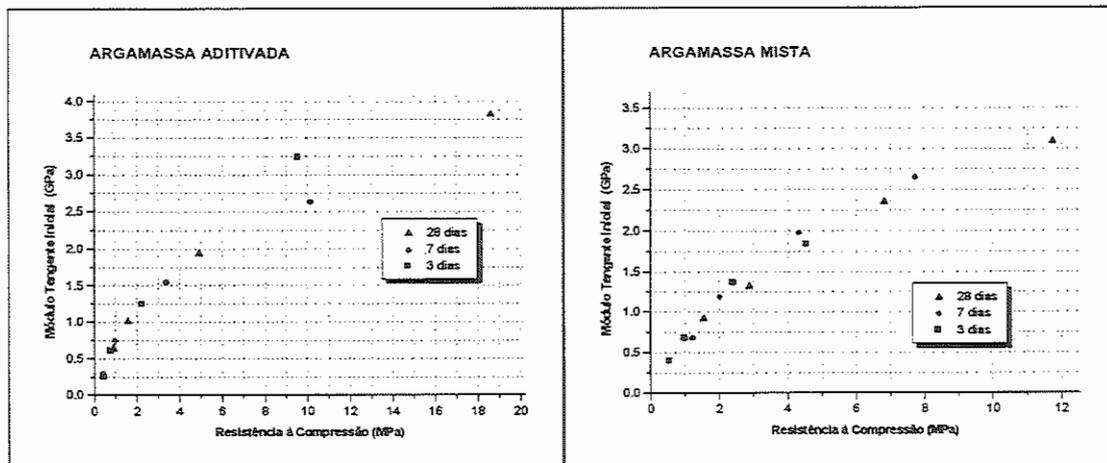


Figura 28 - Correlação do módulo de deformação inicial com a resistência à compressão.

Observa-se, nos gráficos das figuras acima, que os resultados de diversos traços nas 3 idades determinam, em um mesmo gráfico, uma curva nítida de correlação entre o módulo de deformação e a resistência, tanto para as argamassas mistas quanto para as aditivadas.

Na figura a seguir, além de diversas idades e traços, são mostrados em conjunto os resultados dos dois tipos de argamassa estudados: aditivada e mista.

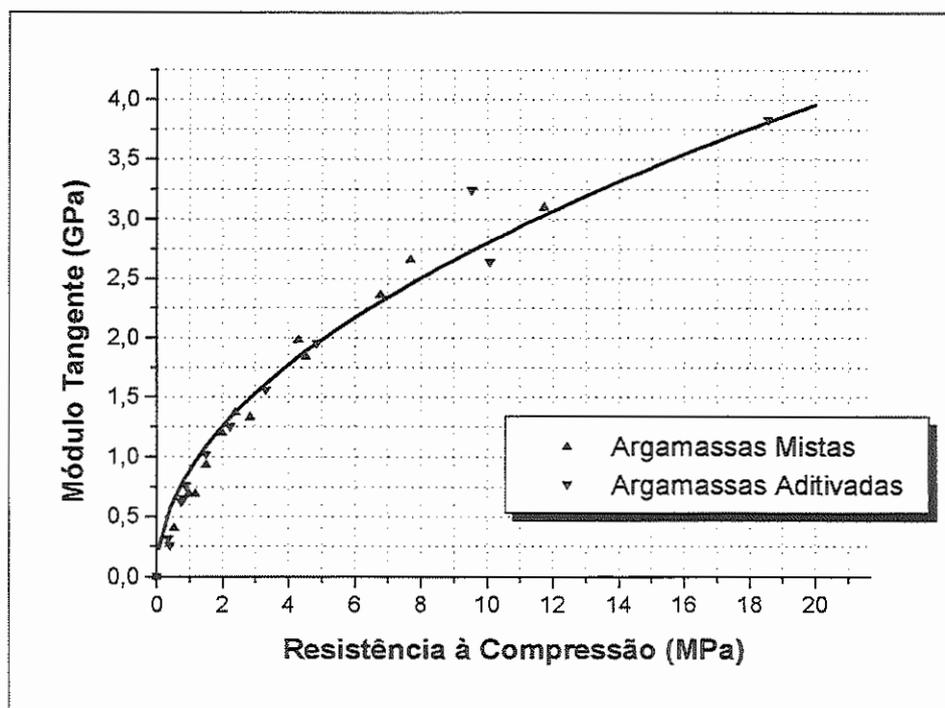


Figura 2 – Correlação entre o módulo de deformação tangente inicial na compressão e a resistência à compressão.

Observa-se que a correlação continua nítida e não depende do traço ou da natureza dos materiais constituintes.

A partir dos resultados das curvas obtidas na correlação do módulo de deformação com a resistência mecânica de todos os traços e idades, foi deduzida a seguinte equação:

$$E_a = 0,885 \cdot \sqrt{f_c} \quad (27)$$

Onde:

E_a = módulo de deformação tangente inicial da argamassa, em GPa

f_c = resistência à compressão da argamassa, em MPa

Vale salientar a importância da grandeza que a expressão acima determina, o módulo de deformação tangente inicial. Esse módulo é o que

melhor representa o comportamento mecânico das argamassas, uma vez que, sendo elas um material frágil, apresentam um comportamento praticamente linear, entre tensão e deformação, na compressão. Já na tração, o comportamento de uma argamassa inorgânica é mais linear que na compressão, pois, neste caso, o material é ainda mais frágil do que na compressão.

6.2.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Os resultados deste ensaio estão apresentados no ANEXO, mostrando, para cada traço das argamassas mistas e aditivadas, as tensões e forma de ruptura dos corpos de prova, a resistência média de aderência, coeficiente de variação e a representação gráfica da ocorrência dos resultados, dentre outros.

A maior parte das rupturas ocorreu na própria argamassa de revestimento. Uma parcela pequena das rupturas ocorreu na interface entre a argamassa e o substrato e, mesmo ocorrendo, não ocorria 100% dessa forma.

Isso indica que tal resistência de aderência é maior do que a própria resistência à tração das argamassas, graças à alta eficiência da aderência do revestimento ao substrato, o que pode ser atribuído à cura da argamassa e ao bom tratamento da base.

Não ocorreram rupturas na interface entre a cola e a pastilha, o que se deve aos testes de eficiência com diversos tipos de cola, como descrito na metodologia do ensaio.

A tabela seguinte apresenta, de forma resumida, os valores dos resultados de resistência de aderência para todos os traços de argamassa, aos 28 d.

Tabela 33 – Resistência de aderência à tração aos 28 d (NBR13528/95)

TRAÇO	RESISTÊNCIA MÉDIA (MPa)	DESVIO MÉDIO (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)
A1	1.23	0.09	0.13	11
A2	1.07	0.12	0.15	16
A3	0.63	0.07	0.10	16
A4	0.34	0.04	0.06	16
M1	1.38	0.17	0.24	18
M2	1.06	0.14	0.17	16
M3	0.58	0.08	0.11	20
M4	0.45	0.05	0.07	15

Em alguns casos, principalmente nas argamassas mais resistentes, a ruptura ocorreu no próprio substrato, como no traço A1, onde 80% dos corpos de prova apresentaram essa forma de ruptura.

Nesse caso, o valor da resistência de aderência foi inferior ao esperado, e devido a essa forma de ruptura, os valores de aderência para o traço A1 não puderam ser considerados representativos e foram desprezados nas correlações da resistência de aderência com outras propriedades das argamassas.

Uma observação interessante foi o fato de que as rupturas no substrato, no caso da argamassa A1, conduziram a uma variabilidade extremamente baixa dos resultados de ensaio, ficando o coeficiente de variação inferior a 5%, para os resultados desse tipo de ruptura.

Isso significa que, apesar de baixa, a variabilidade dos resultados nos outros traços deve-se principalmente à heterogeneidade da própria argamassa de revestimento.

De acordo com essas observações, pode-se concluir que o sistema de arrancamento adotado, envolvendo aparelhagem e execução do ensaio, é de grande confiabilidade e pequena variabilidade.

Quanto à aceitação dos revestimentos executados, as condições são fixadas pela norma NBR 13749/96 – “Revestimento de paredes e tetos em argamassas inorgânicas – Especificação.”, estão apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 34 – Limites de resistência de aderência à tração (R_a) para emboço de camada única (NBR 13749/96)

LOCAL		ACABAMENTO	R_a (MPa)
Parede	Interna	Pintura ou base de reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica e laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou base de reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto			$\geq 0,20$

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que todos os traços satisfazem às exigências da tabela acima, estando, assim, em conformidade com a normalização de revestimentos de argamassa.

Evidentemente que tal observação, para as argamassas estudadas, é válida somente para a metodologia empregada nessa pesquisa, mas demonstra a resistência de aderência potencial dos traços estudados.

A partir dos resultados de resistência de aderência obtidos, foram estudadas algumas correlações desses com outras propriedades, como: relação a/c, teor de cimento e resistência à compressão.

Nessas correlações, os pontos correspondentes ao traço 1:3, da argamassa aditivada A1, foram desprezados pela forma de ruptura que apresentaram.

A primeira correlação é da relação a/c das argamassas, a 28 d.

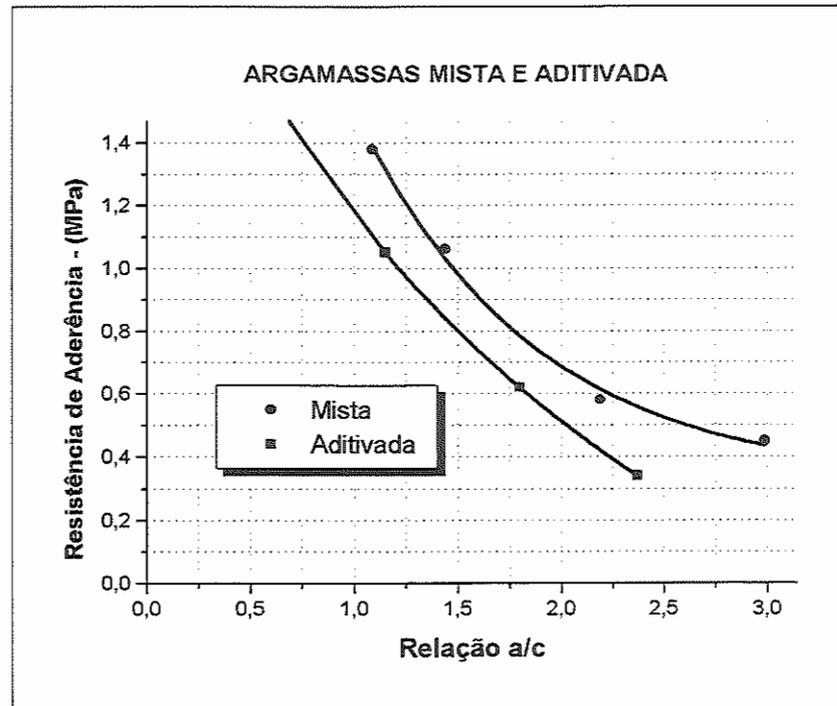


Figura 29 – Relação entre resistência de aderência e relação a/c.

A próxima correlação é entre a resistência de aderência e o teor de cimento das argamassas, a 28 d. Mais uma vez, o ponto correspondente ao traço 1:3 da argamassa aditivada, com 24,3% de teor de cimento, não será considerado no traçado das curvas.

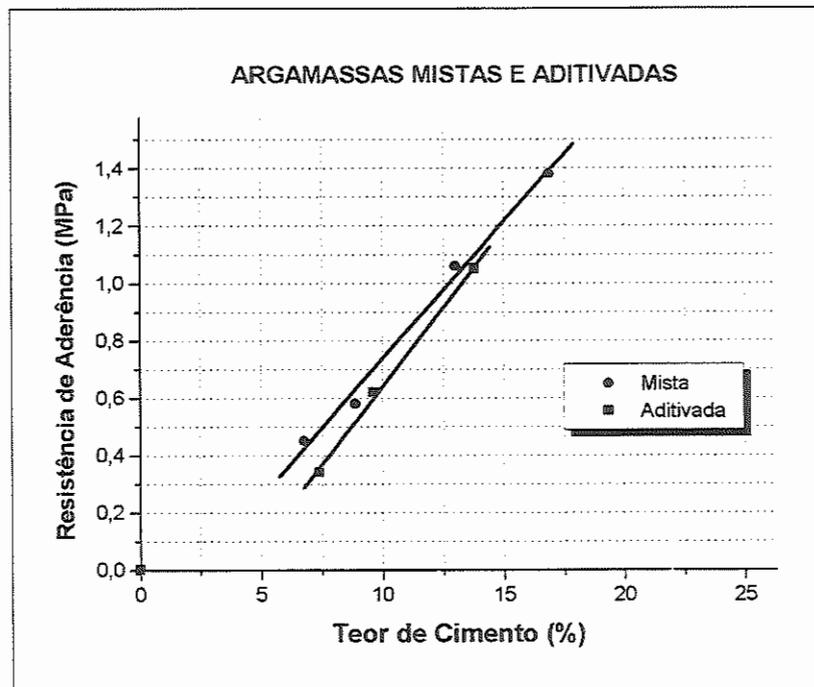


Figura 30 – Relação entre resistência de aderência e teor de cimento.

Relaciona-se também a resistência de aderência com a resistência à compressão da argamassa. Trata-se de uma correlação importante pois a resistência à compressão uniaxial costuma ser empregada, na bibliografia corrente, para expressar as características mecânicas dos compósitos à base de cimento. Os pontos do gráfico a seguir correlacionam as duas propriedades.

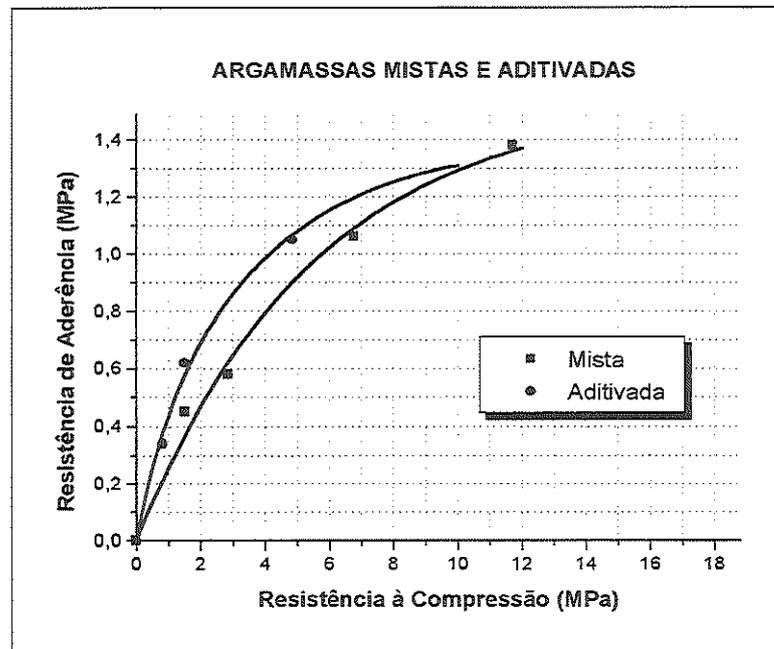


Figura 31 – Correlação entre resistência de aderência e resistência à compressão.

Esperava-se que os valores da resistência de aderência ensaiados não fossem maiores do que 1/10 da resistência à compressão das argamassas, o que corresponde, com bom nível de aproximação, à sua resistência à tração.

No entanto, esses valores foram bem maiores do que os esperados, em todas as argamassas, exceto no traço A1 (1:3). Nos traços mais fracos, os resultados foram, proporcionalmente, bem maiores que o esperado.

É natural que a argamassa revestida apresente propriedades não exatamente iguais àquelas determinadas em laboratório, por meio de corpos de prova cilíndricos ensaiados em condições ideais. Porém, os resultados surpreenderam na medida em que as dosagens tiveram controle em massa apurado, inclusive controle de umidade dos agregados.

Tal fato permite sugerir que exista uma relação entre as propriedades mecânicas medidas em corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório e as propriedades mecânicas do mesmo material, quando empregado como revestimento.

Aqui, sugere-se que essa relação dependa basicamente de dois parâmetros:

- a perda de água de amassamento da argamassa para o ar, antes da execução do revestimento, sem que tal perda prejudique sobremaneira a sua trabalhabilidade, a ponto de ter que ser repostada pelo profissional. Nesse caso, há uma redução da relação água / cimento e um conseqüente aumento da resistência mecânica da argamassa. Essa perda de água varia com o traço empregado, em função da capacidade de retenção de água e do teor de água da mistura. Esse parâmetro deve assumir valores maiores do que a unidade, ou seja, quanto maior, maior será a resistência mecânica da argamassa;
- o rigor das condições climáticas, às quais o revestimento está submetido durante seu processo de secagem e endurecimento. Em condições mais severas trariam uma diminuição da resistência mecânica da argamassa. Essas condições severas seriam: substrato de elevada absorção de água, altas temperaturas, elevada irradiação solar sobre o revestimento, incidência de ventos fortes, baixa umidade relativa do ar e ausência de cura para amenizar as condições citadas. Esse fator deve assumir valores menores do que a unidade.

No caso dos resultados obtidos na presente pesquisa, pode-se estabelecer um coeficiente de correlação entre as propriedades mecânicas da argamassa determinadas em corpos de prova e aplicadas.

Pode-se dizer que nos revestimentos executados, o rigor das condições climáticas não é significativo. Isso porque eles foram executados no interior do laboratório, à sombra e sem ventos fortes, além de serem submetidos a um processo de cura. Essa cura foi feita através da molhagem

das argamassas três vezes ao dia por um período de três dias a partir da sua execução.

Dessa forma, considera-se que as condições climáticas e de cura dos revestimentos são ideais, e que o parâmetro de rigor climático, nesse caso, é igual à unidade.

Com isso, o coeficiente de correlação que será determinado pode ser considerado como o fator de perda de água de amassamento que traz aumento da resistência mecânica.

Para a determinação desse coeficiente de perda de água, pode-se basear no mesmo argumento que levou à observação sobre a diferença entre a resistência de aderência esperada e medida. Esse argumento se refere à lógica de que a resistência à tração da argamassa revestida é, no mínimo, igual à resistência de aderência medida.

Dessa forma, adota-se o seguinte critério, para a determinação do coeficiente de perda de água:

- para cada traço, determina-se a resistência real à tração para a argamassa aplicada, com base nos resultados de resistência de aderência;
- para isso, calcula-se a média dos resultados que tiveram ruptura na argamassa de revestimento;
- caso outras formas de ruptura correspondam a valores de resistência de aderência acima dessa média calculada, esses valores devem fazer parte do cálculo de uma nova média. Assim, a resistência da argamassa aplicada à tração assume o valor dessa última média calculada;
- estima-se a resistência à compressão da argamassa a partir da resistência à tração calculada. Para tanto, utiliza-se uma relação bem reconhecida entre essas duas propriedades, ou seja, a resistência à compressão é 10 vezes maior que à tração;

- o coeficiente é a relação entre essa resistência à compressão calculada para a argamassa aplicada e a resistência à compressão ensaiada em corpos de prova cilíndricos.

A figura a seguir apresenta esses coeficientes em função da relação água cimento das argamassas.

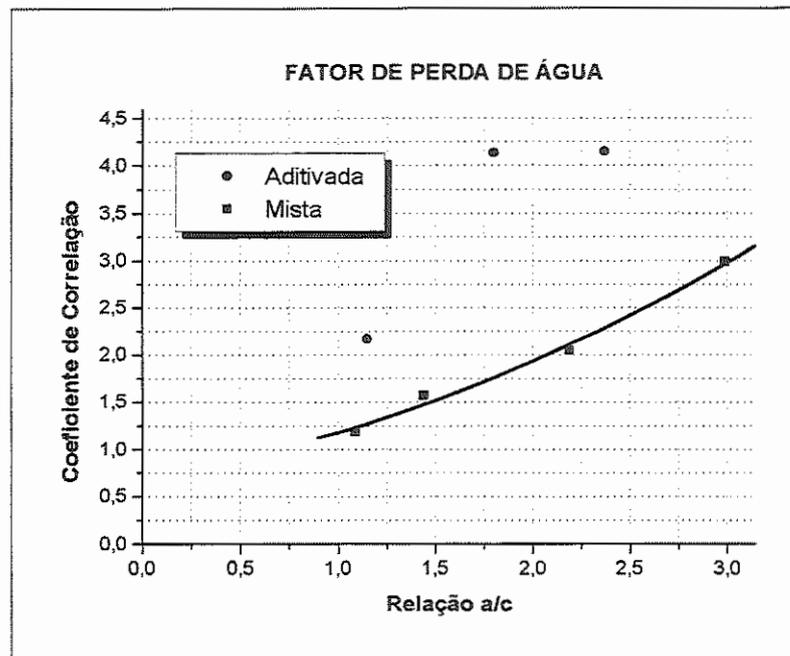


Figura 32 - Relação entre a relação a/c e o coeficiente que expressa o fator de perda de água nas argamassas revestidas.

Para as argamassas mistas, uma aproximação exponencial tendendo ao coeficiente de correlação igual a 1, ajusta-se bem aos pontos observados.

Para a argamassa aditivada, os três pontos que restam, desprezando-se os resultados obtidos para o traço 1:3 (A1), não são suficientes para a definição de uma curva de correlação.

6.2.4 ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM

Os ensaios com dois corpos de prova para cada traço e umidade relativa apresentaram pequena variabilidade. Os resultados dessas deformações de retração ao longo do tempo estão apresentados nas figuras a seguir.

6.2.4.1 Argamassas mistas

ARGAMASSA MISTA M1

Tabela 35 – Características da argamassa M1.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	M1
Traço em volume	1:0,5:4,5
a/c	1,09
f_{c28}	11,71MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

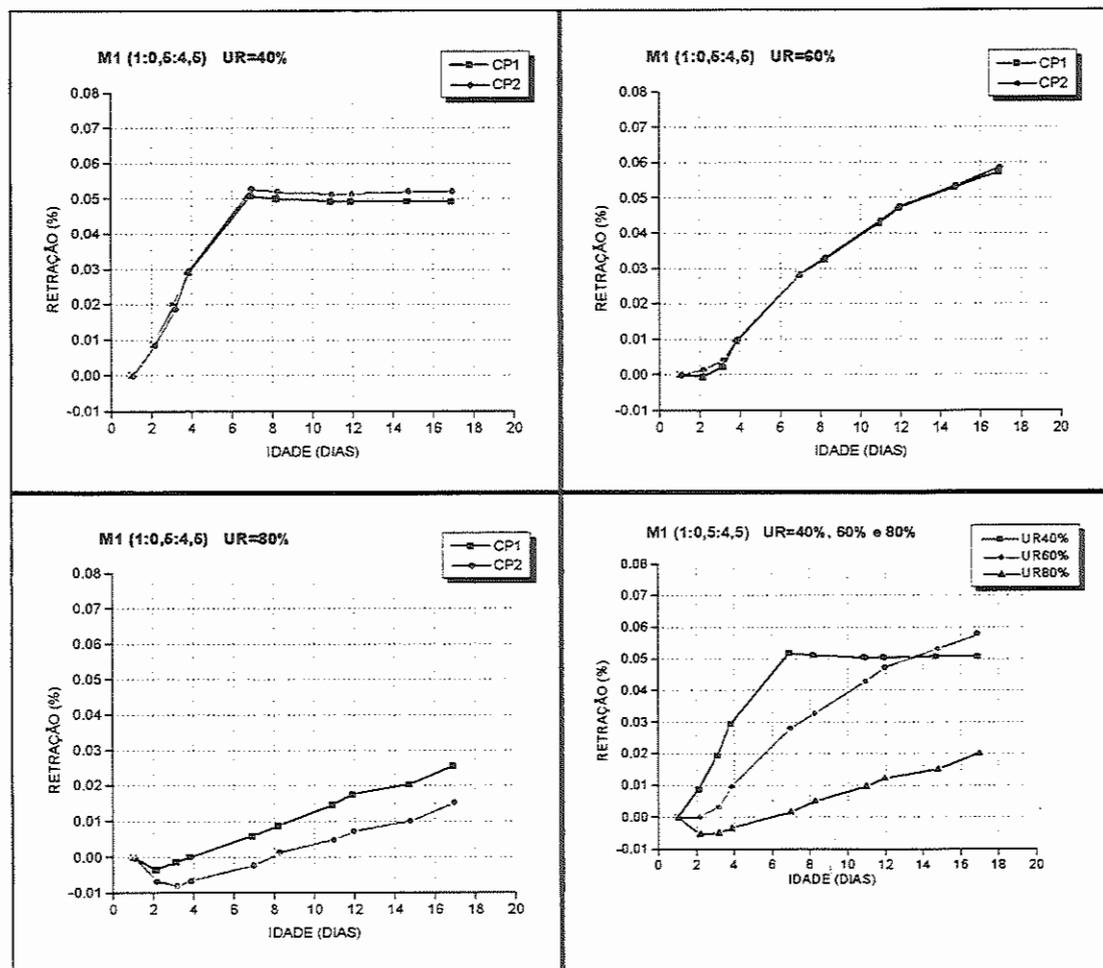


Figura 33 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M1.

ARGAMASSA MISTA M2

Tabela 36 – Características da argamassa M2.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	M2
Traço em volume	1:1:6
a/c	1,44
f_{c28}	6,77MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

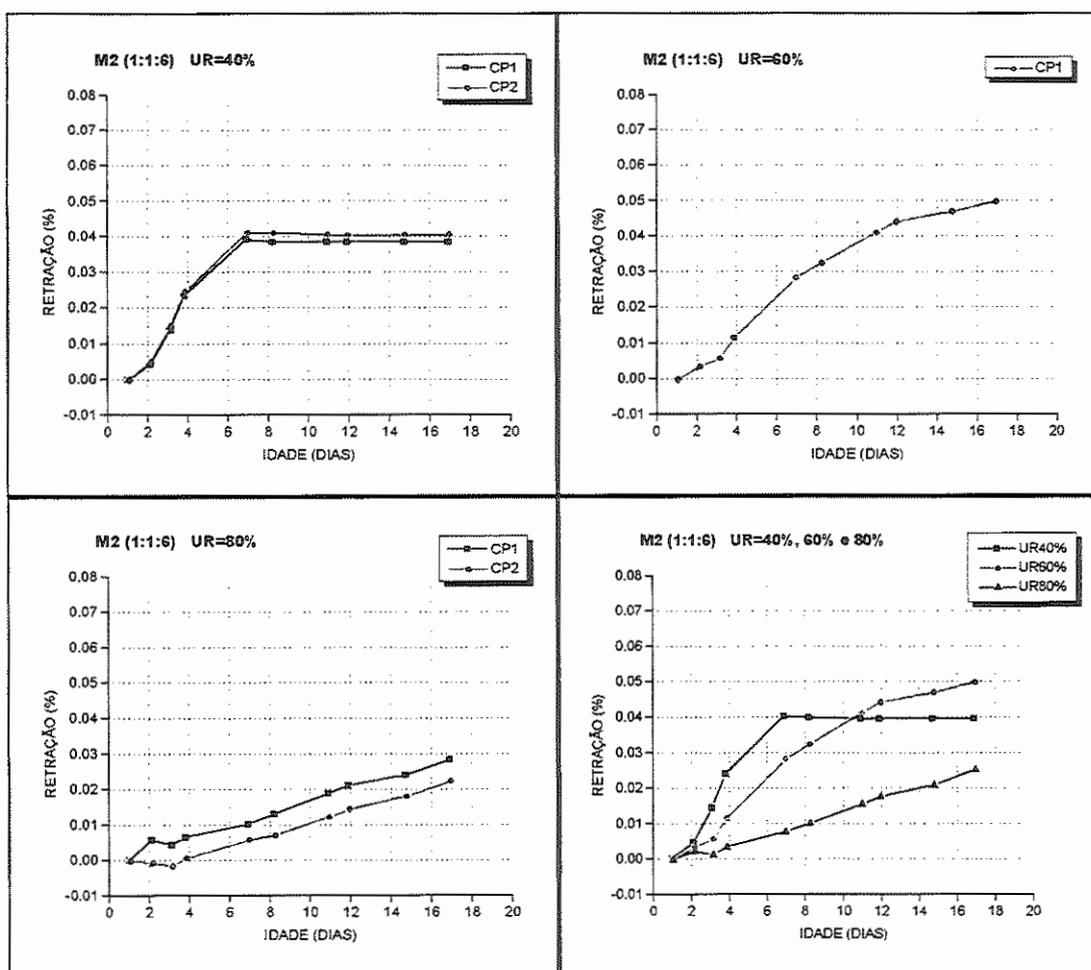


Figura 34 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M2.

ARGAMASSA MISTA M3

Tabela 37 – Características da argamassa M3.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	M3
Traço em volume	1:2:9
a/c	2,19
f_{c28}	2,84MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

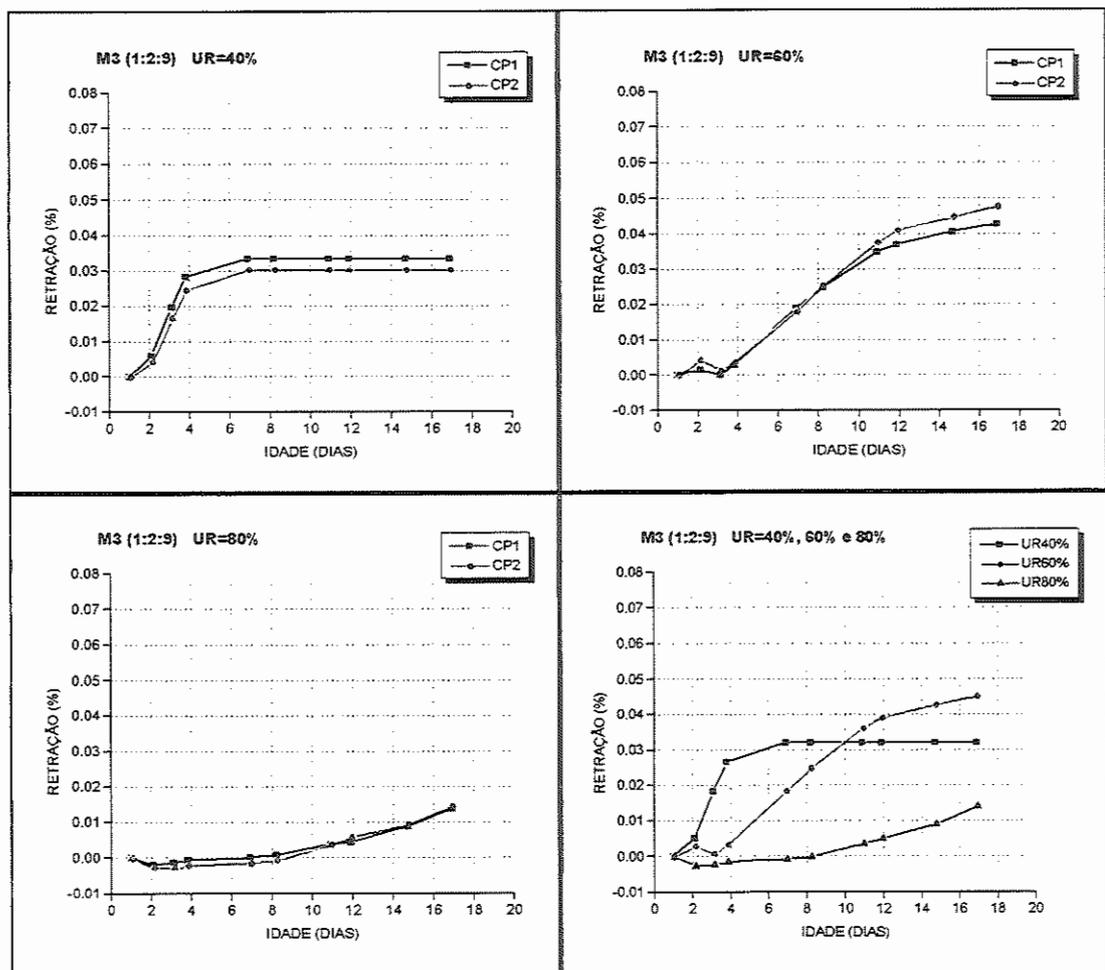


Figura 35 – Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M3.

ARGAMASSA MISTA M4

Tabela 38 – Características da argamassa M4.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	M4
Traço em volume	1:3:12
<i>a/c</i>	2,99
f_{c28}	1,51MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

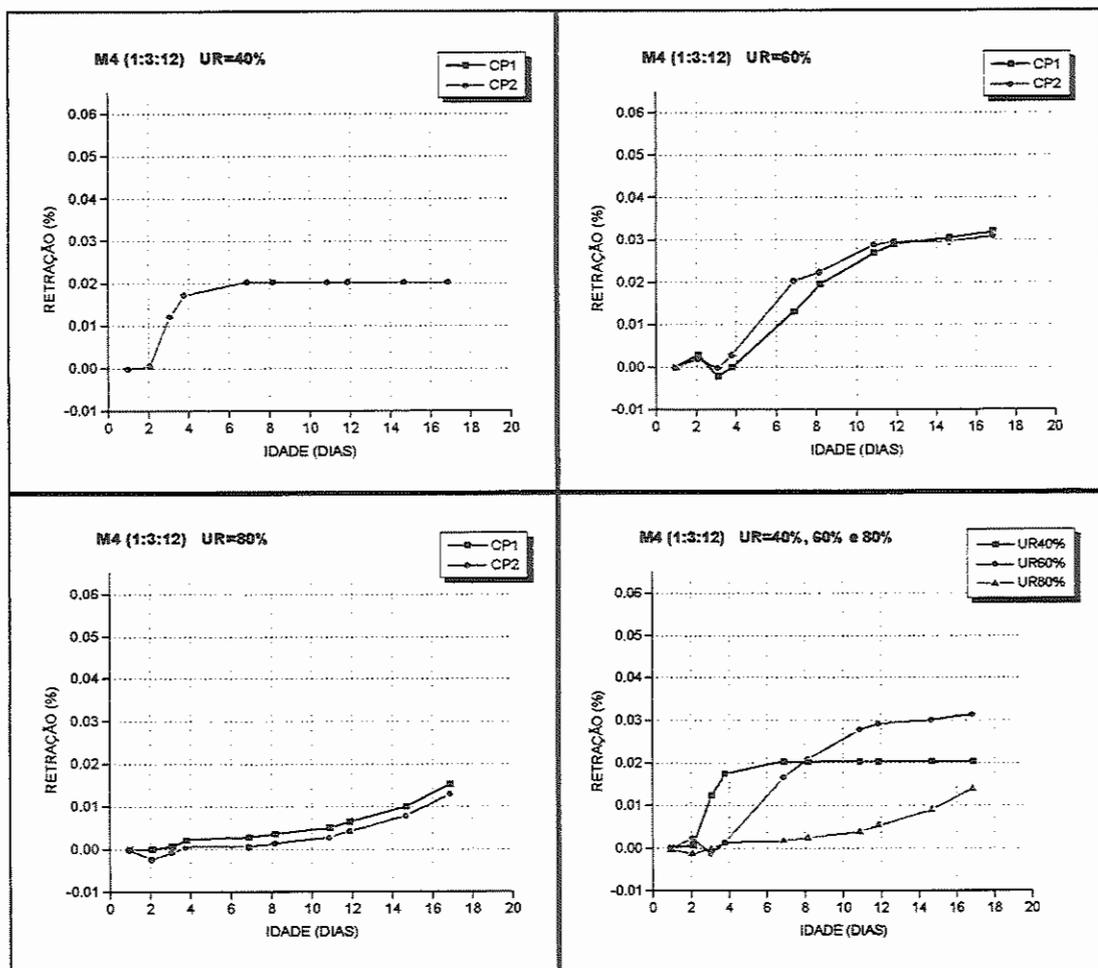


Figura 36 — Curvas experimentais de retração para a argamassa mista M4.

RESUMO DE TODAS AS ARGAMASSAS MISTAS

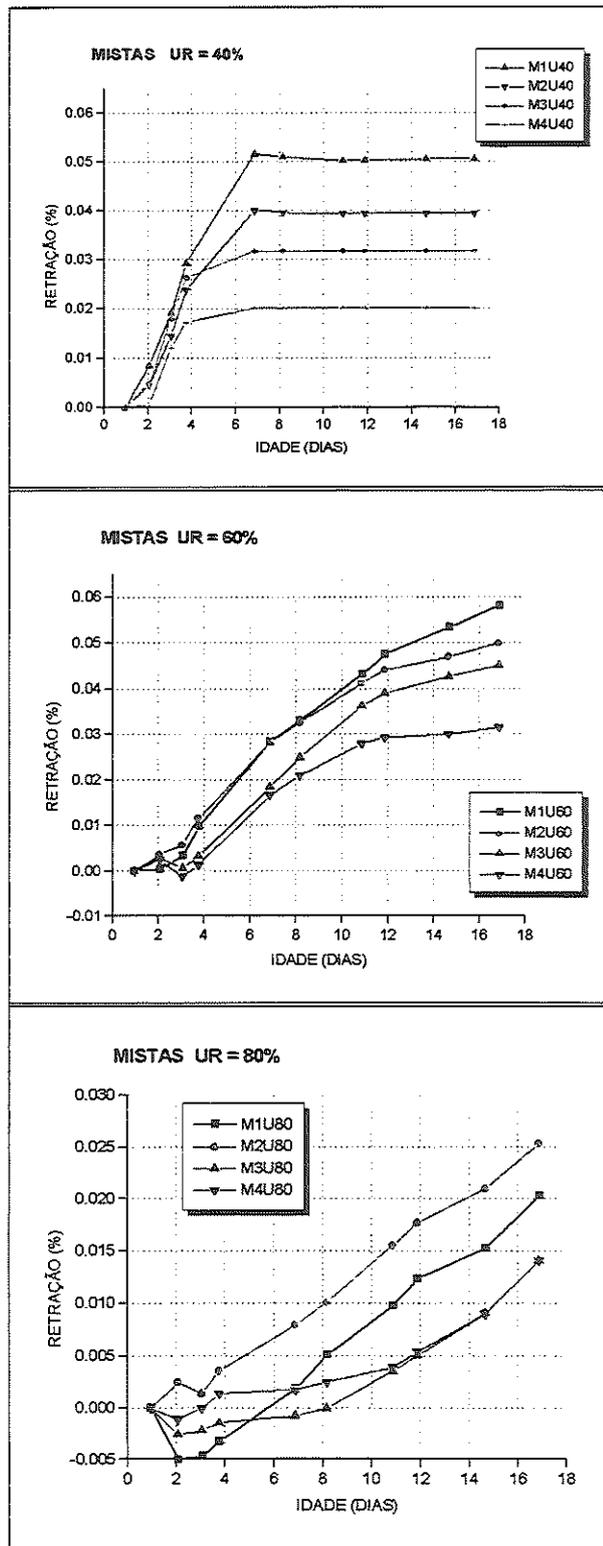


Figura 37 – Curvas experimentais de retração para todas as argamassas mistas.

6.2.4.2 Argamassas aditivadas

ARGAMASSA ADITIVADA A1

Tabela 39 – Características da argamassa A1.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	A1
Traço em volume	1:3
a/c	0,64
f_{c28}	18,55MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

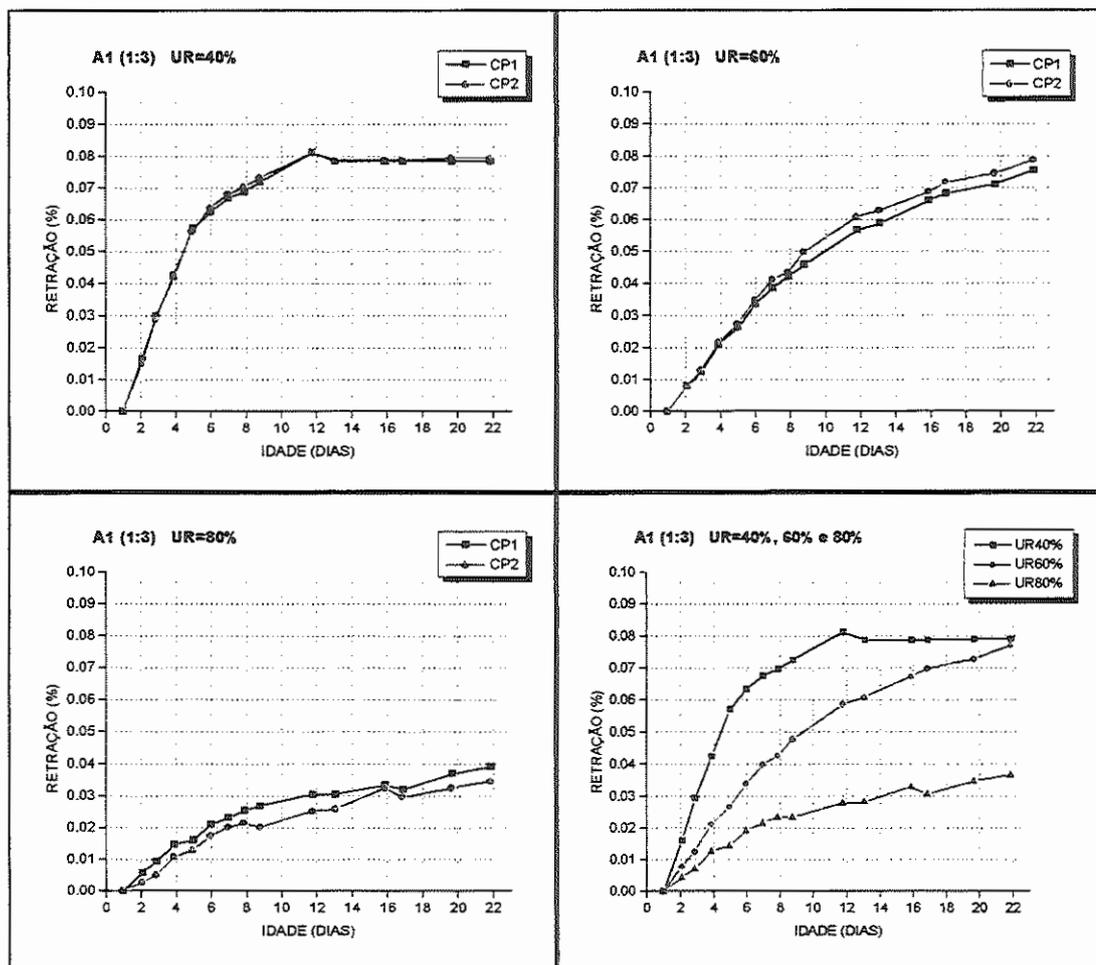


Figura 38 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A1.

ARGAMASSA ADITIVADA A2

Tabela 40 – Características da argamassa A2.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	A2
Traço em volume	1:6
a/c	1,15
f_{c28}	4,85MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

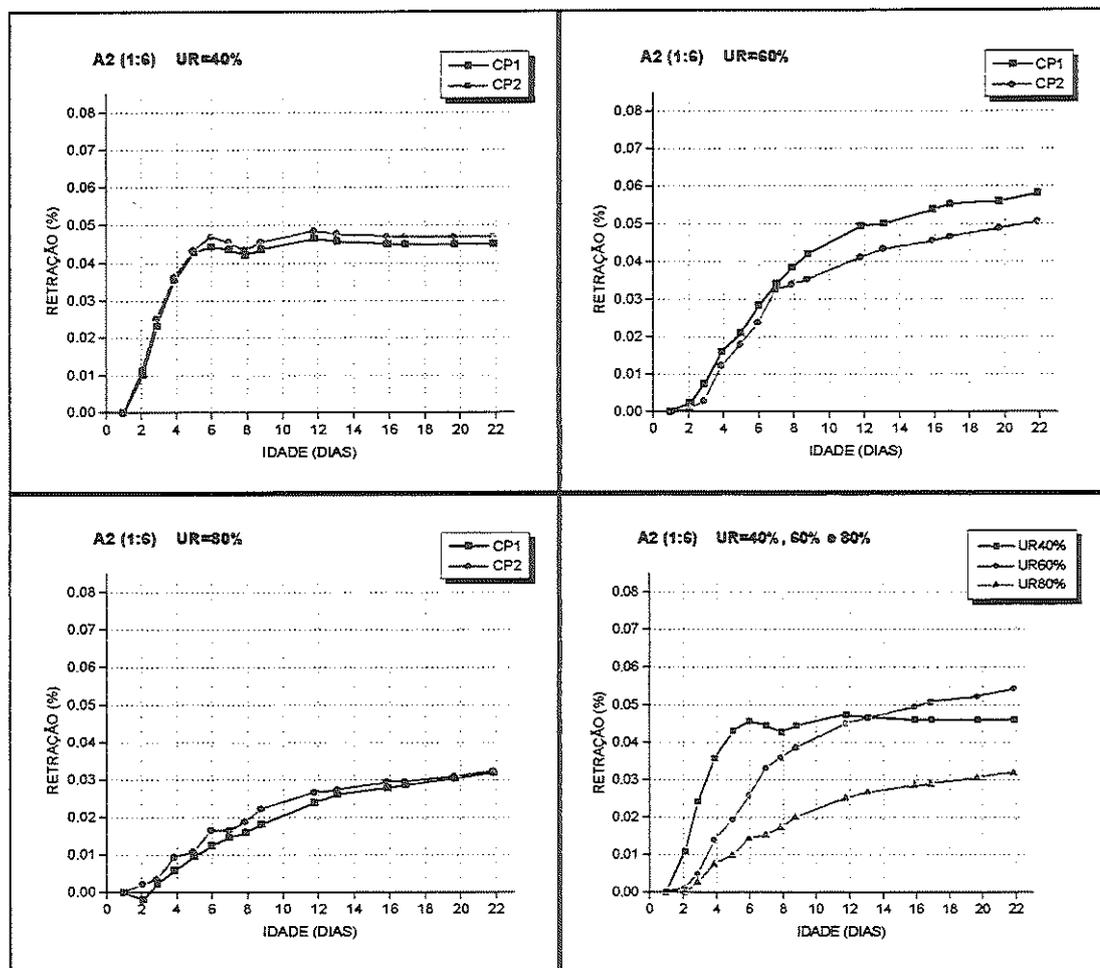


Figura 39 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A2.

ARGAMASSA ADITIVADA A3

Tabela 41 – Características da argamassa A3.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	A3
Traço em volume	1:9
a/c	1,80
f_{c28}	1,50MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

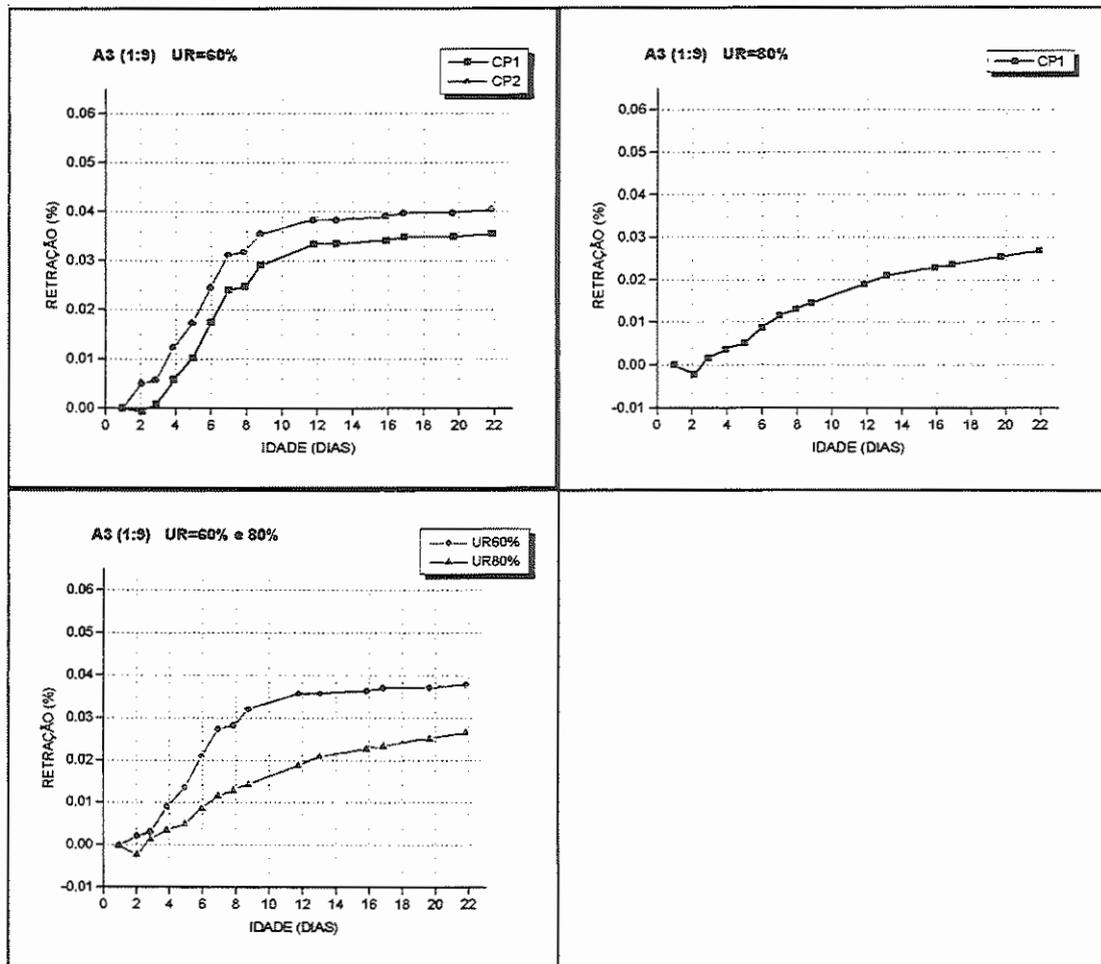


Figura 40 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A3.

ARGAMASSA ADITIVADA A4

Tabela 42 – Características da argamassa A4.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Argamassa	A4
Traço em volume	1:12
a/c	2,37
f_{c28}	0,82MPa
Área do cp / Perímetro exposto	1,50cm

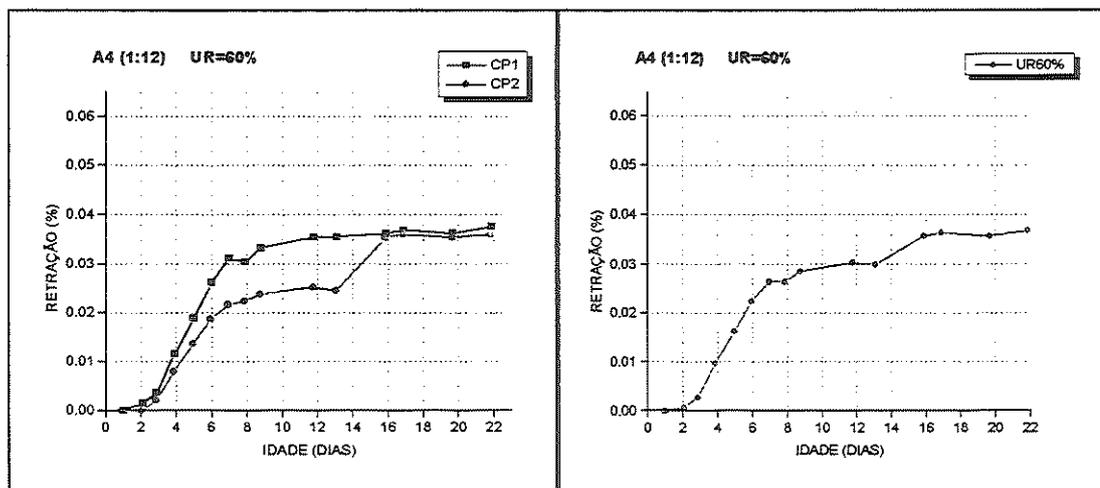


Figura 41 - Curvas experimentais de retração para a argamassa aditivada A4.

RESUMO DE TODAS AS ARGAMASSAS ADITIVADAS

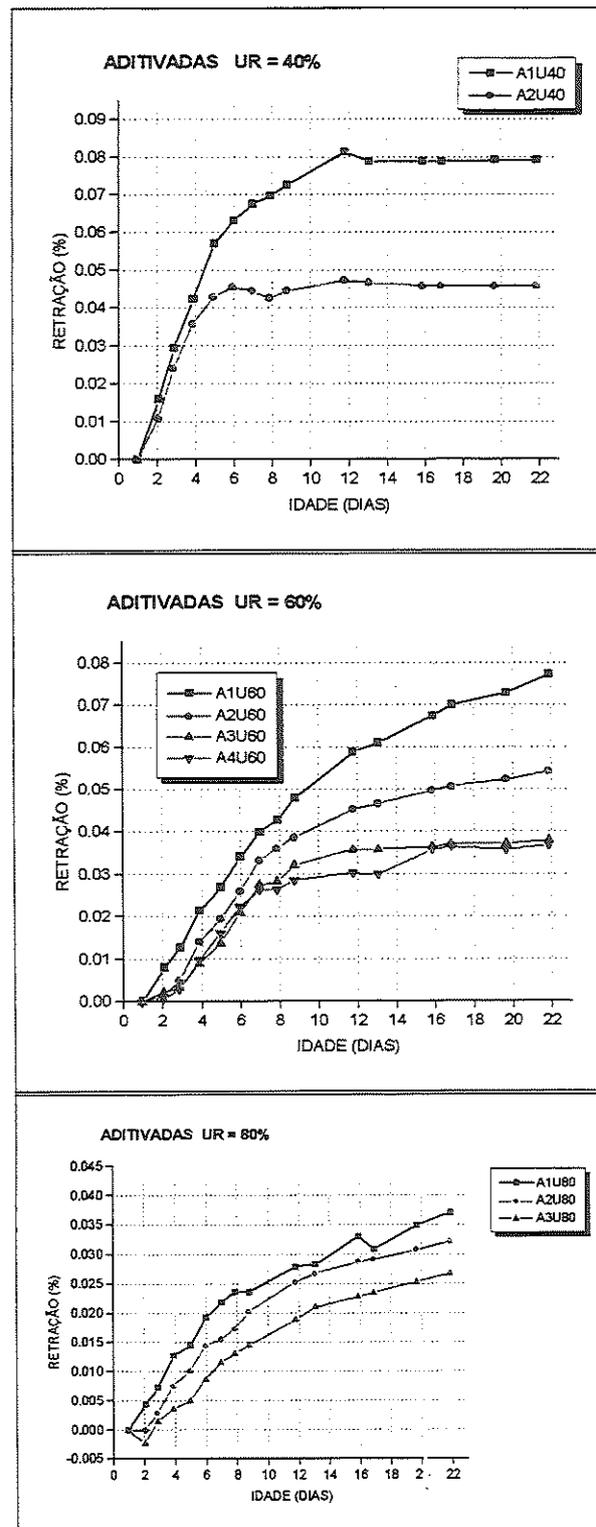


Figura 42 – Curvas experimentais de retração para todas as argamassas aditivadas.

A partir dos resultados, pode-se observar nitidamente que a retração por secagem depende sobremaneira do estado higrométrico de secagem e do traço da argamassa.

Outro fator de variabilidade nos valores da retração é a relação entre a sua área e o seu perímetro exposto ao ambiente. Aqui, a influência desse fator não foi estudada, buscando-se isolar tal parâmetro mantendo-o constante. Além disso, os corpos de prova tiveram duas de suas quatro faces vedadas com silicone, logo após a desmoldagem, para que a relação entre a sua área e o seu perímetro exposto fosse semelhante a de um revestimento de argamassa.

Com relação à influência da umidade relativa na retração por secagem, as seguintes observações podem ser feitas:

- nas primeiras idades da argamassa, a retração é bem maior para umidades relativas mais baixas. Com até 5 d, a retração com UR=40% é cerca do dobro da retração com UR=60%, em todos os traços. Isso se deve ao fato de que a retração por secagem depende da perda de água da argamassa para o ambiente, e com umidades relativas menores, tal perda é maior;
- em umidades relativas mais baixas, a retração estabiliza-se antes. Com UR=40% a retração já é praticamente constante aos 7 d, em todos os traços. Nessa umidade relativa, a perda de água é tão intensa que, em poucos dias, a argamassa já está quase seca e, então, pára de perder água para o ambiente;
- a retração com UR=60% ultrapassa a retração com UR=40% após cerca de 10 d. Observa-se que a perda de água pelos capilares da argamassa com diâmetro inferior a 50nm é a grande responsável pela retração por secagem, e que os capilares têm seu diâmetro diminuído com o tempo, graças à evolução do processo de hidratação do cimento. Como a perda de água dessa argamassa é mais lenta, ela continuará ocorrendo com boa intensidade em uma idade mais avançada, quando os capilares da argamassa já apresentam diâmetros menores;

- a retração com UR=80% é bem menor do que com UR=60% ou UR=40%, até as idades estudadas. Isso porque, em tal estado higrométrico, a umidade no interior do corpo-de-prova tende a equilibrar-se com a do ambiente e, então, a argamassa pára de perder água.

Com relação à influência do teor de cimento na retração por secagem, as seguintes observações podem ser feitas:

- a retração é maior nos traços mais resistentes, com maior teor de cimento, para todas as argamassas, idades e umidades relativas. Isso é atribuído, principalmente ao fato de que essas argamassas possuem uma maior quantidade de pasta de cimento. Sendo a retração por secagem proporcional à perda de água pelos capilares da pasta de cimento, quanto maior o volume desta pasta, maior será a quantidade de capilares e de água perdida por eles. Além disso, em um traço mais resistente, a argamassa apresenta uma porosidade composta por capilares mais finos, e é a perda de água pelos capilares com diâmetro inferior a 50nm, a grande responsável pela retração por secagem;
- a diferença da retração entre os traços mais resistentes e menos resistentes tende a aumentar com o tempo. Observa-se, mais uma vez, que a perda de água pelos capilares com diâmetro inferior à 50nm é a grande responsável pela retração por secagem, e que os capilares têm seu diâmetro diminuído com o tempo, graças à evolução do processo de hidratação do cimento. Portanto, nas idades em que a diferença nos valores de retração aumenta, ocorre o surgimento de uma grande quantidade de poros com diâmetro inferior a 50nm, intensificando o processo de retração;
- a diferença de retração entre os mais resistentes e menos resistentes é maior em umidades relativas menores. Essa observação indica que a retração por secagem é mais influenciada pela perda de água dos poros da argamassa para o ambiente do que pelo consumo dessa água no fenômeno de hidratação do cimento, o qual ocorre com mais intensidade em umidades relativas mais altas;

- para um mesmo teor de cimento, a retração é menor nas argamassas mistas do que nas argamassas aditivadas, provavelmente à capacidade de retenção de água dessas argamassas.

Na figura seguinte, apresenta-se uma comparação entre a retração por secagem observada em traços de diferentes teores de cimento, para as umidades relativas estudadas, aos 7 d.

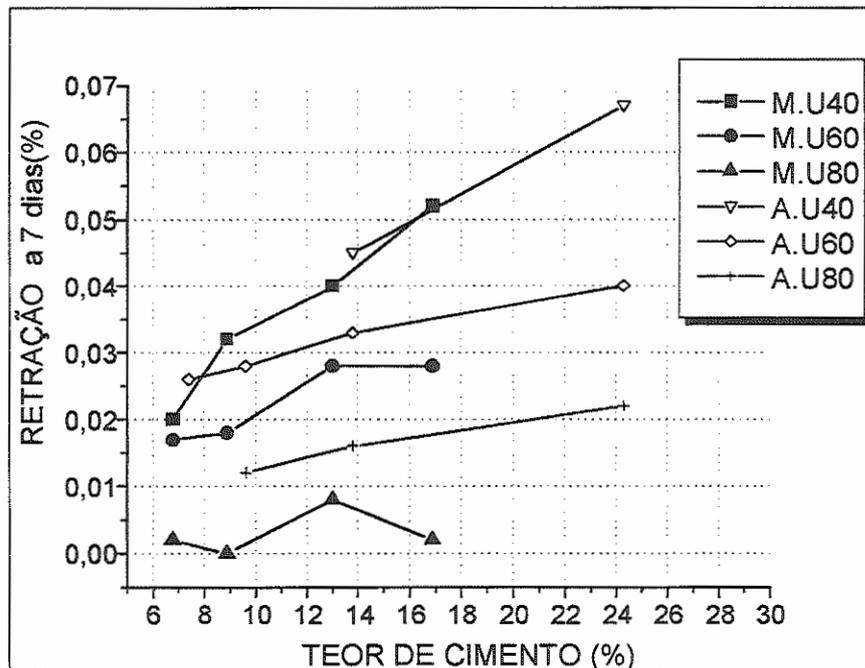


Figura 4 – Valores de retração aos 7 d em função do teor de cimento e umidade relativa.

6.2.4.3 Formulação para cálculo da retração por secagem

A partir dos resultados experimentais dos ensaios de retração por secagem, foram desenvolvidas equações para previsão da evolução da retração com o tempo, para as argamassas mistas ou aditivadas.

Essas equações relacionam a retração por secagem, em uma determinada idade, com a resistência da argamassa e a umidade relativa do ar, onde a argamassa é submetida à secagem.

A função que melhor representa a curva de retração com o tempo, observando-se as curvas obtidas dos ensaios, segue o modelo matemático conhecido como modelo de “Chapman”.

Tal modelo é composto por uma expressão com três parâmetros, uma variável independente e uma variável dependente. Segue a expressão em sua forma genérica:

$$y = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot x}\right)^c \quad (28)$$

Onde:

a, b e c = parâmetros do modelo

y = variável dependente

x = variável independente

Aplicada a expressão ao fenômeno de retração por secagem, o parâmetro **a** representa a retração final; **b** e **c** são constantes que dependem da umidade relativa do ar e da resistência mecânica da argamassa e interferem nas concavidades da curva; **y** é o valor da retração por secagem; e **x** é a idade da argamassa.

Dessa forma, aplicada ao fenômeno de retração por secagem, a expressão fica:

$$\varepsilon_r = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot t}\right)^c \quad (29)$$

Onde:

a, b e c = parâmetros do modelo

ε_r = retração por secagem, em %

t = idade da argamassa, em d

O gráfico seguinte apresenta uma curva genérica da expressão acima.

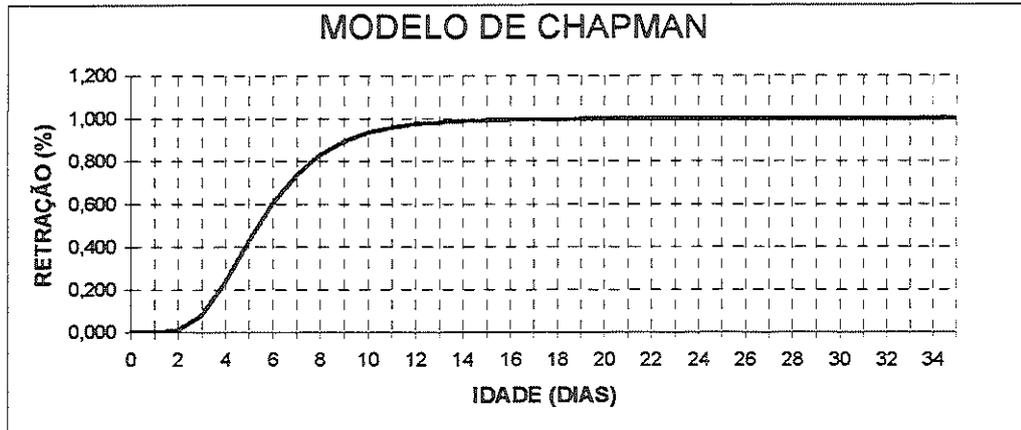


Figura 43 – Curva genérica do modelo que representa a retração por secagem.

Os valores dos parâmetros a , b e c , são calculados em função da resistência à compressão da argamassa e da umidade relativa do ambiente da seguinte maneira:

$$a = a1 \cdot f_{c28} + a2 \quad (30)$$

$$a1 = a11 \cdot UR^2 + a12 \cdot UR + a13 \quad (31)$$

$$a2 = a21 \cdot UR^2 + a22 \cdot UR + a23 \quad (32)$$

$$b = b1 \cdot f_{c28} + b2 \quad (33)$$

$$b1 = b11 \cdot UR^2 + b12 \cdot UR + b13 \quad (34)$$

$$b2 = b21 \cdot UR^2 + b22 \cdot UR + b23 \quad (35)$$

$$c = c1 \cdot f_{c28} + c2 \quad (36)$$

$$c1 = c11 \cdot UR^2 + c12 \cdot UR + c13 \quad (37)$$

$$c2 = c21 \cdot UR^2 + c22 \cdot UR + c23 \quad (38)$$

Onde:

f_{c28} = resistência à compressão uniaxial da argamassa, aos 28 d, em MPa

UR = umidade relativa do ar, em %

a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{21} , a_{22} , a_{23} , b_{11} , b_{12} , b_{13} , b_{21} , b_{22} , b_{23} , c_{11} , c_{12} , c_{13} , c_{21} , c_{22} e c_{23} = constantes adimensionais, determinadas experimentalmente, que dependem do tipo de argamassa: mista ou aditivada. Os seus valores estão apresentados mais adiante.

A) PARÂMETROS PARA AS ARGAMASSAS ADITIVADAS

Na tabela seguinte, estão apresentados os parâmetros do modelo calculados matematicamente, a partir dos resultados experimentais, para as argamassas aditivadas.

Tabela 43 – Parâmetros da curva de retração para argamassas aditivadas.

PARÂMETRO	VALOR
a11	-2,697E-06
a12	2,771E-04
a13	-4,320E-03
a21	-1,421E-05
a22	1,551E-03
a23	-5,310E-03
b11	-1,791E-05
b12	3,002E-03
b13	-1,301E-01
b21	6,841E-04
b22	-1,046E-01
b23	4,192E+00
c11	5,537E-05
c12	-5,580E-03
c13	1,040E-02
c21	-6,500E-04
c22	4,250E-02
c23	3,168E+00

Foram traçadas as curvas calculadas teoricamente com os parâmetros acima, para as argamassas estudadas, em conjunto com as curvas obtidas experimentalmente. Dessa forma, foi possível observar que as expressões e os parâmetros se mostraram altamente confiáveis. As curvas estão apresentadas a seguir:

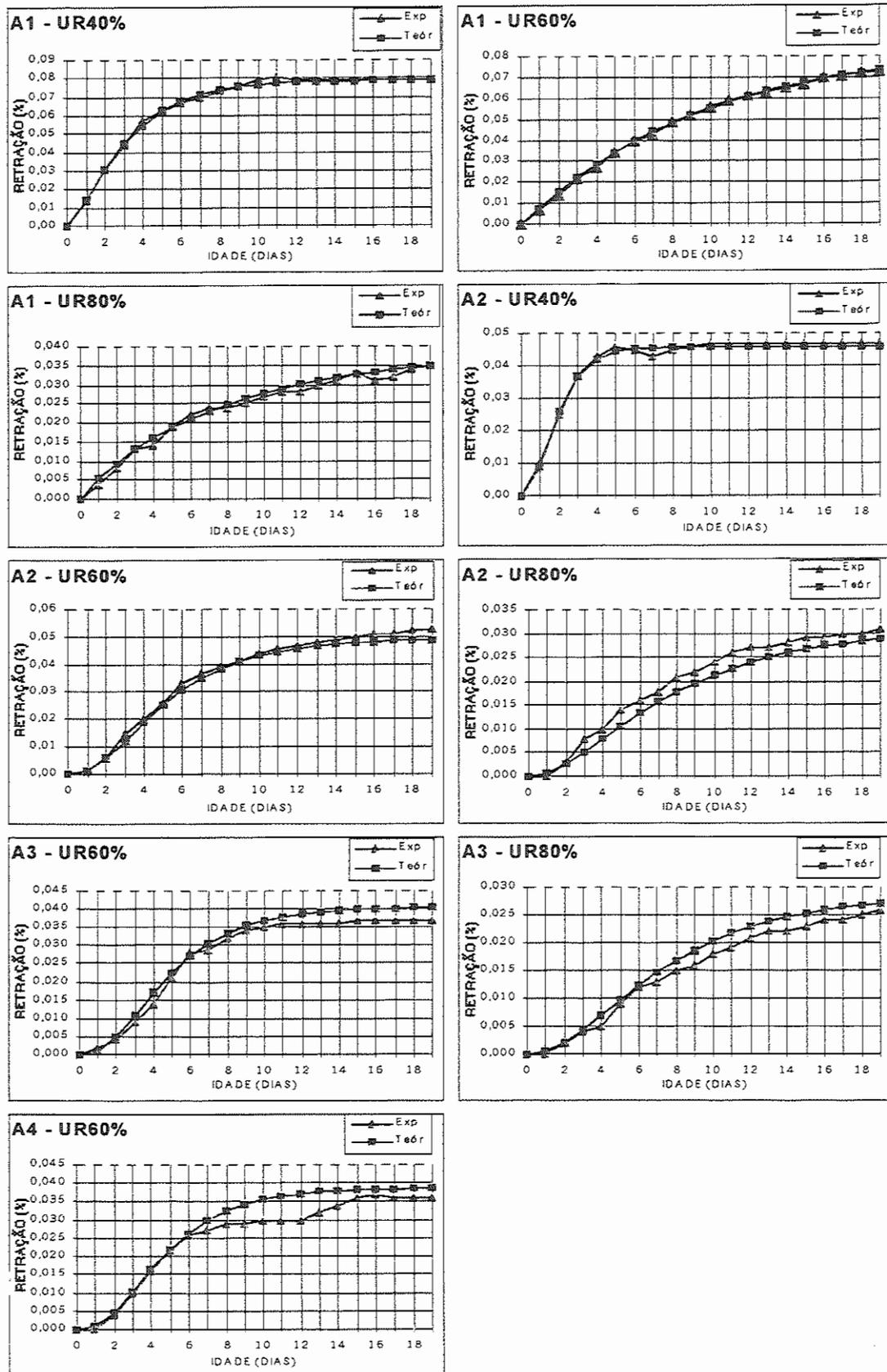


Figura 44 –Curvas teóricas e experimentais de retração das argamassas aditivadas.

O parâmetro a , da expressão apresentada para o cálculo da retração, representa a retração final da argamassa. Isso pode ser facilmente visualizado, ao se calcular a retração para uma idade hipoteticamente infinita. Nesse caso, para $t \rightarrow \infty$, a expressão fica:

$$\varepsilon_r = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot \infty}\right)^c \Rightarrow a \quad (39)$$

Dessa forma, observa-se que a retração tende ao valor do parâmetro a da expressão.

Pode-se avaliar a relação entre a retração final das argamassas aditivadas com a sua resistência mecânica e a umidade relativa do ar, a partir da equação do parâmetro a . A figura a seguir mostra essa relação.

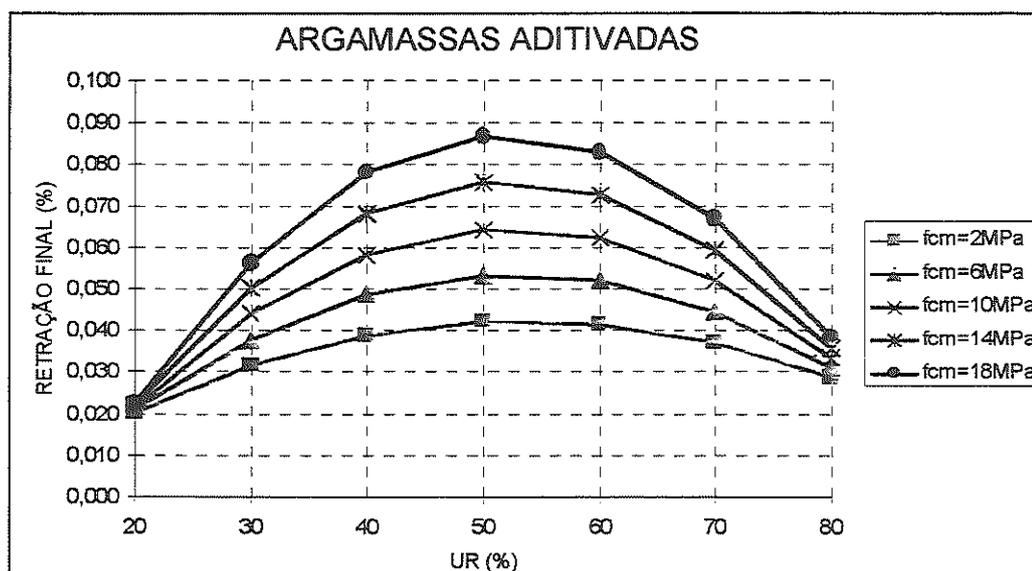


Figura 45 – Retração final teórica das argamassas aditivadas.

A partir dessa figura, observa-se que existe uma umidade relativa para a qual a retração final é máxima, e que a mesma situa-se em torno de 50%. Tal fato deve-se pelo seguinte:

- quando uma argamassa é exposta, nas primeiras idades, a umidades relativas muito baixas, a perda de água é intensa, e isso ocorre enquanto a sua porosidade ainda é composta por capilares de grande diâmetro, que não causam muita retração na argamassa. Mais tarde, com a evolução do processo de hidratação do cimento, os diâmetros desses

capilares vão diminuindo, o que iria intensificar o fenômeno de retração por secagem. No entanto, como a argamassa já perdeu, até esse momento, a maior parte da sua água, a retração final crescerá muito pouco;

- em umidades relativas do ar muito elevadas, a argamassa encontrará um equilíbrio higroscópico com menor perda de água e, portanto, a retração final não será muito alta.

Também se observa que, quanto maior a resistência mecânica da argamassa, maior será sua retração final. Os motivos de tal fato já foram comentados.

Com base na formulação proposta, foram calculadas as curvas de retração com o tempo para os traços de argamassa aditivada A3 com umidade relativa de 40% e A4 com umidades relativas de 40% e 80%, curvas essas que não puderam ser determinadas experimentalmente, pela danificação dos corpos de prova.

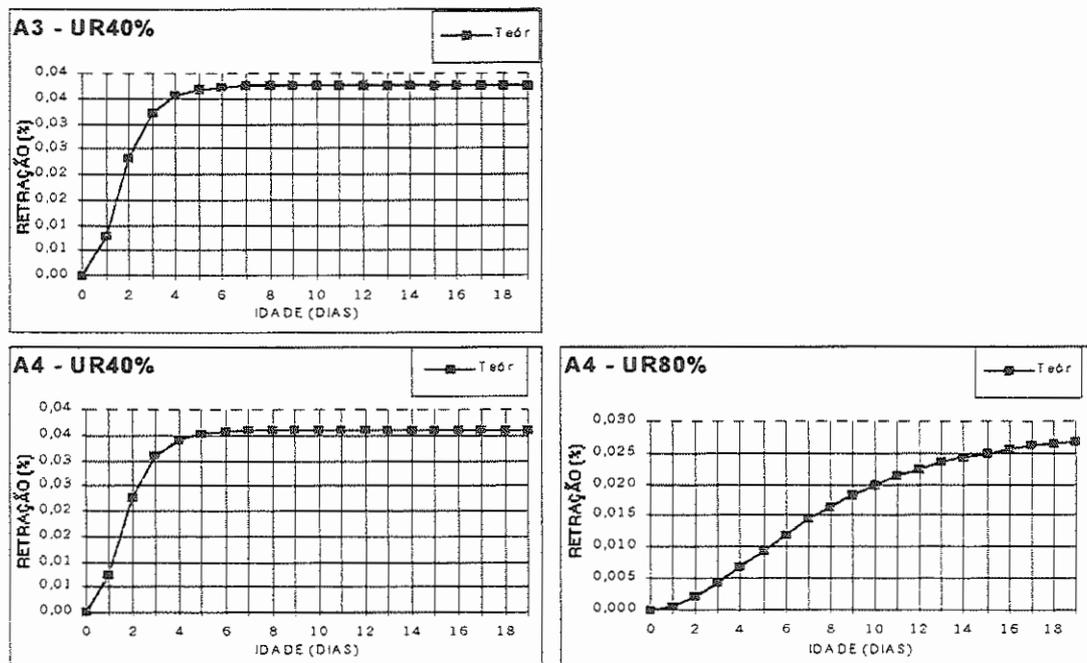


Figura 46 – Curvas teóricas da retração com o tempo para as argamassas

B) PARÂMETROS PARA AS ARGAMASSAS MISTAS

Na tabela seguinte estão apresentados os parâmetros, para as argamassas mistas.

Tabela 44 – Parâmetros para argamassas mistas.

PARÂMETRO	VALOR
a11	-1,914E-06
a12	1,789E-04
a13	-1,266E-03
a21	-2,741E-05
a22	3,340E-03
a23	-7,220E-02
b11	-2,595E-05
b12	4,070E-03
b13	-1,666E-01
b21	7,861E-04
b22	-1,196E-01
b23	4,732E+00
c11	-4,853E-04
c12	4,720E-02
c13	-1,345E+00
c21	7,570E-03
c22	-8,101E-01
c23	2,617E+01

As curvas que comparam a evolução da retração teórica e experimental estão apresentadas a seguir:

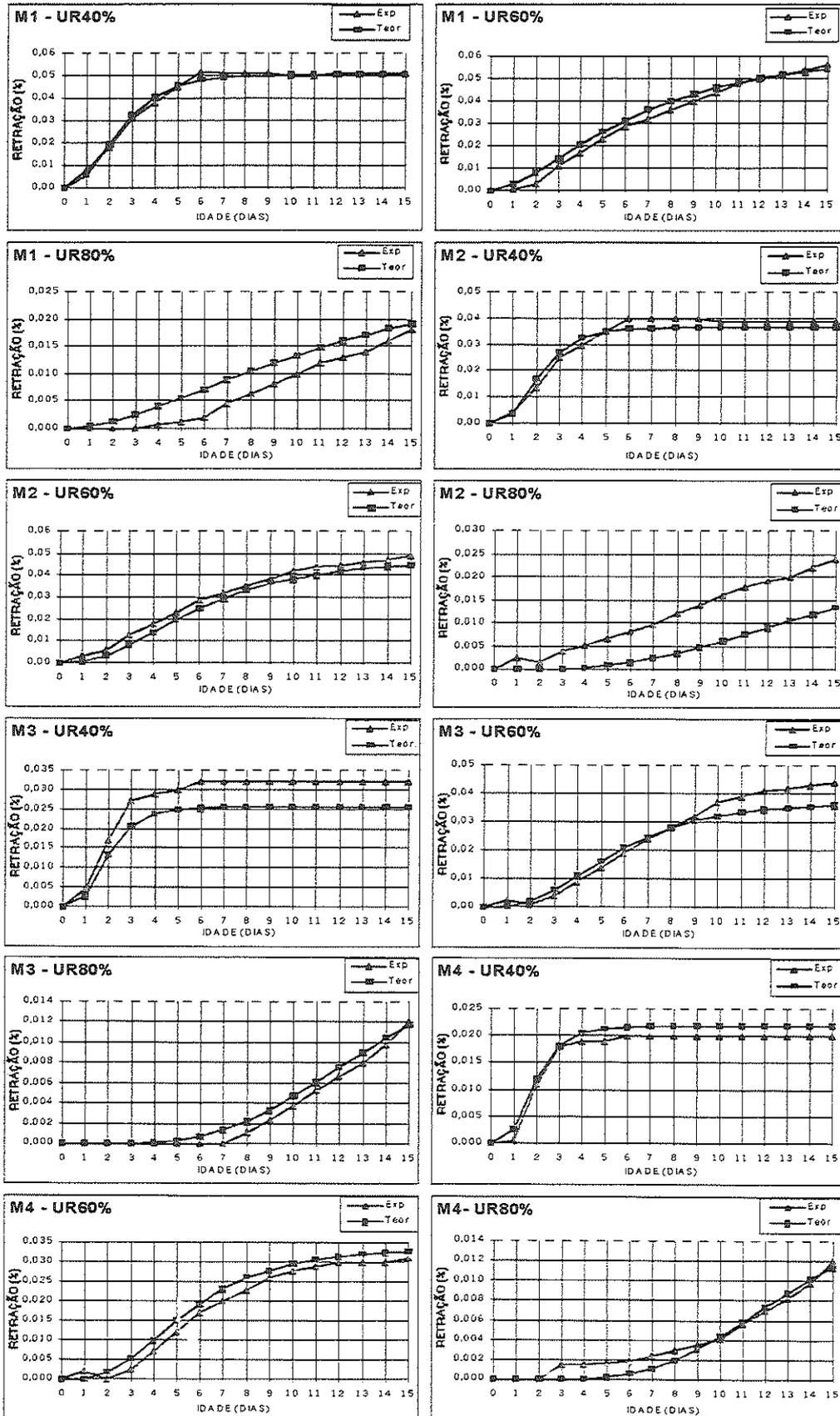


Figura 47 - Curvas teóricas e experimentais de retração das argamassas mistas.

A relação entre a retração final das argamassas aditivadas, representada pelo parâmetro a , a sua resistência mecânica e a umidade relativa do ar, é mostrada na figura que segue.

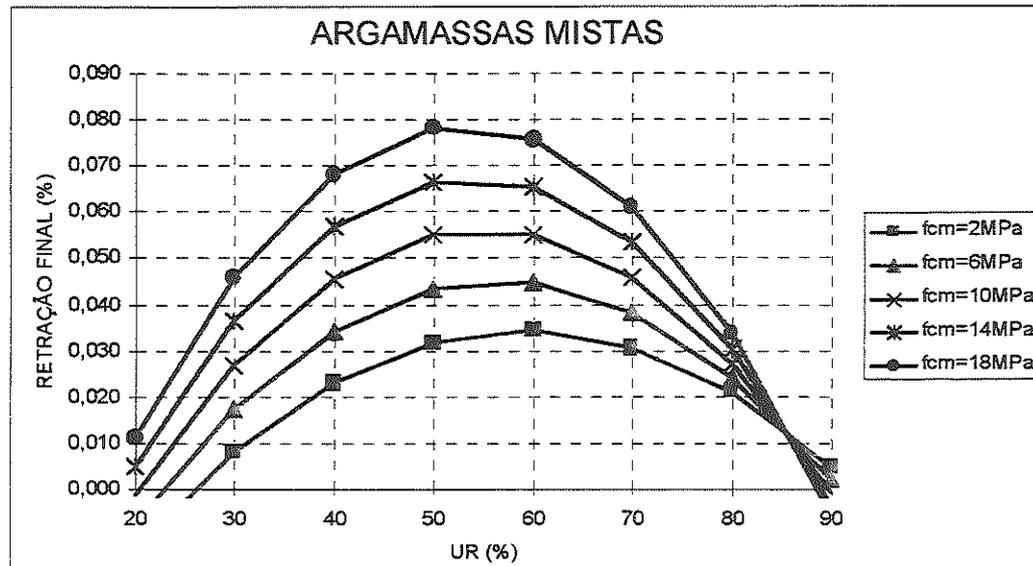


Figura 48 - Retração final teórica das argamassas mistas.

Aqui, valem as mesmas observações feitas para as argamassas aditivadas.

6.2.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados das medidas de absorção de água por capilaridade estão apresentados no ANEXO.

A partir da média das medidas da absorção dos três corpos de prova ensaiados para cada traço, foram construídos os gráficos das figuras a seguir.

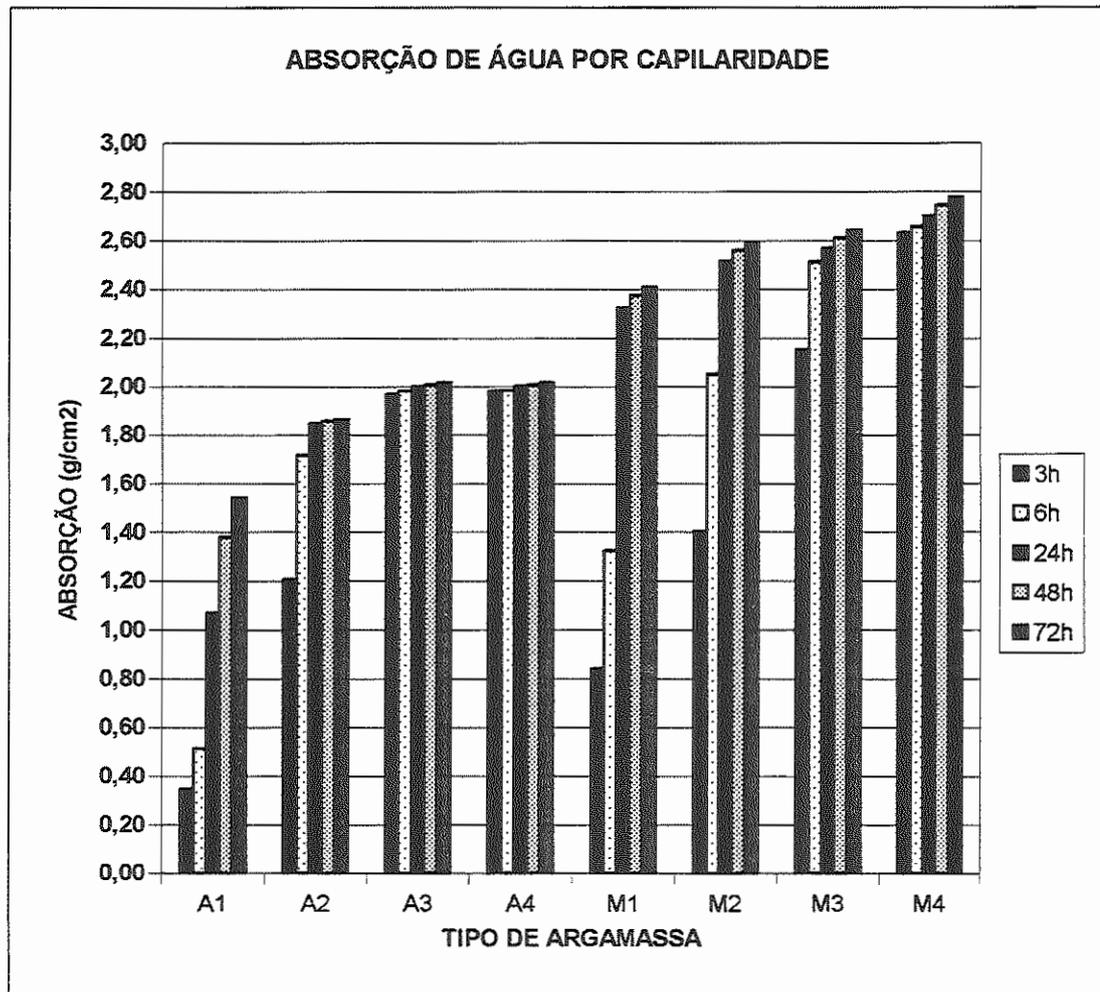


Figura 49 - Variação da absorção de água por capilaridade com o traço e tipo de argamassa.

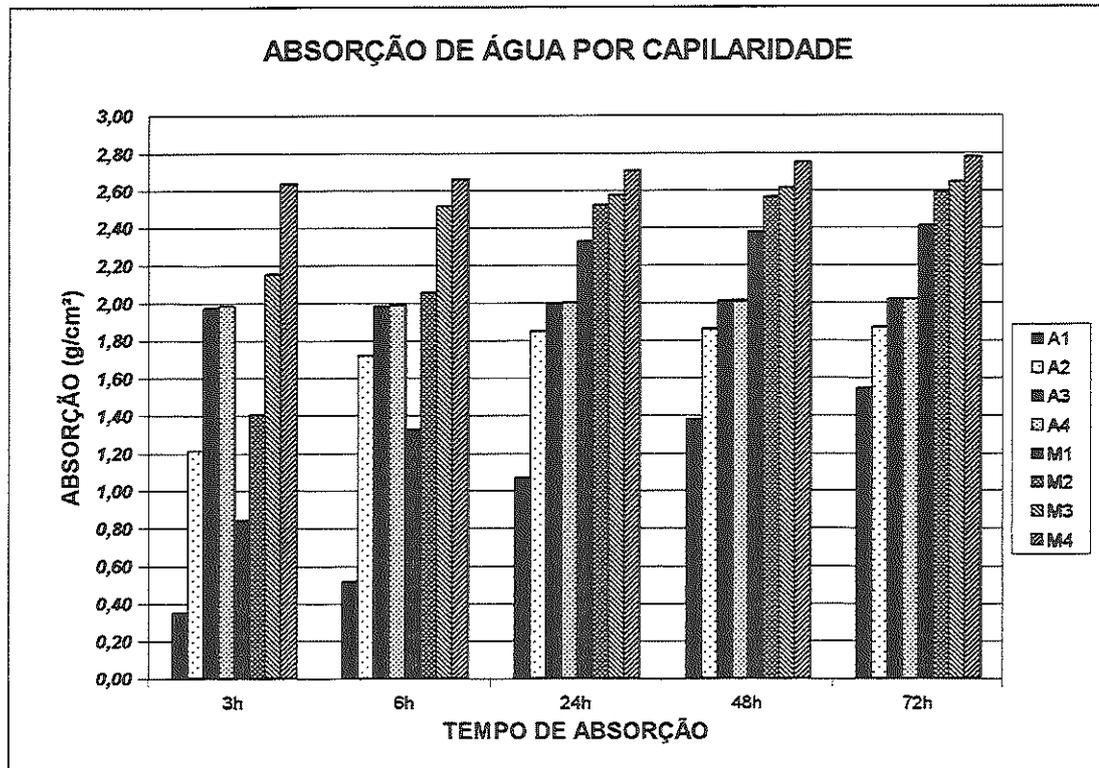


Figura 50 - Variação da absorção de água por capilaridade com o tempo para todos os traços das argamassas mistas e aditivadas

A partir dessas figuras, pode-se fazer as seguintes observações:

- todas as argamassas mistas tiveram uma maior absorção do que qualquer uma das aditivadas. Isso porque as argamassas aditivadas são dosadas com incorporador de ar, o qual interrompe a continuidade dos capilares, ocasionando uma rede de capilaridade mais fechada. Além disso, ocorre que as densidades de massa das argamassas mistas foram bem maiores que as das aditivadas, e como a absorção de água é expressa pela relação entre a massa de água absorvida e a área do corpo-de-prova, tal fato não é considerado. Isso significa que, se analisarmos a relação entre a massa de água absorvida e a massa da argamassa que absorveu tal massa de água, a absorção das argamassas mistas já não seriam tão maiores que as das aditivadas;
- os traços de menor resistência apresentam absorção de água maior que nos traços mais resistentes, tanto nas argamassas aditivadas quanto nas mistas. Isso porque nesses traços a porosidade é maior;

- nos traços de menor resistência, a absorção atinge o seu valor final mais rapidamente. Para os traços A4 e A3, a absorção final ocorre com 3h de contato com a água. Na argamassa A2, isso ocorre com 24h de absorção e na A1 não ocorre dentro das 72h de duração do ensaio. No caso das argamassas mistas M4 e M3, estas atingem sua absorção final depois de 6h e as argamassas M2 e M1 com 24h. Isso se deve ao fato de que, nos traços de menor resistência, a porosidade é maior e a rede de capilares encontra-se mais aberta e interligada, o que facilita o caminho da água no seu interior.

6.2.6 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

Este ensaio é prescrito pela norma NBR 13280/95 – “Argamassa para assentamento de paredes e revestimentos de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido”.

As tabelas seguintes apresentam os resultados desse ensaio para os traços de argamassa mista e aditivada, respectivamente.

Tabela 45 – Densidade de massa aparente das argamassas mistas.

Argamassa Mista	Traço Em volume	Volume do corpo-de-prova (cm ³)	Massa do corpo-de-prova (g)	Densidade de massa (kg/m ³)
M1	1 : 0,5 : 4,5	195,37	365,18	1869
M2	1 : 1 : 6	197,53	366,85	1857
M3	1 : 2 : 9	191,10	351,02	1837
M4	1 : 3 : 12	194,78	344,56	1769

Tabela 46 – Densidade de massa aparente das argamassas aditivadas.

Argamassa Aditivada	Traço Em volume	Volume do corpo-de-prova (cm ³)	Massa do corpo-de-prova (g)	Densidade de massa (kg/m ³)
A1	1 : 3	196,73	357,50	1817
A2	1 : 6	196,35	323,60	1648
A3	1 : 9	195,37	306,12	1567
A4	1 : 12	193,98	299,13	1542

De maneira geral, as argamassas aditivadas apresentaram densidades de massa inferiores às densidades das argamassas mistas, o que se atribui ao teor de ar incorporado das argamassas aditivadas que é bem maior.

Além disso, observou-se que as argamassas de maior resistência mecânica possuem densidade maior. Isso se deve ao fato de que essas argamassas são mais compactas, com teores de ar incorporado e de água menores, e com teor de cimento maior.

6.3 IDENTIFICAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DA QUANTIFICAÇÃO DAS TENSÕES DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA

A retração por secagem é um fenômeno de contração volumétrica da argamassa que, se for impedida, como no caso de um revestimento aplicado, gera tensões de tração nessa argamassa. Tal efeito equivale a aplicar-se uma deformação de tração na argamassa, que geraria as mesmas tensões de tração. Caso essas tensões sejam maiores do que a resistência à tração da argamassa, ou caso a deformação imposta seja maior que a deformação de ruptura dessa argamassa, ocorre a manifestação patológica de fissuração.

No gráfico da figura seguinte apresentam-se valores estimados das deformações de ruptura na tração, aos 28d de idade, em função do teor de cimento das argamassas. Esses valores foram calculados considerando-se o módulo na tração de igual valor que o módulo na compressão, e a resistência à tração sendo 1/10 da resistência à compressão.

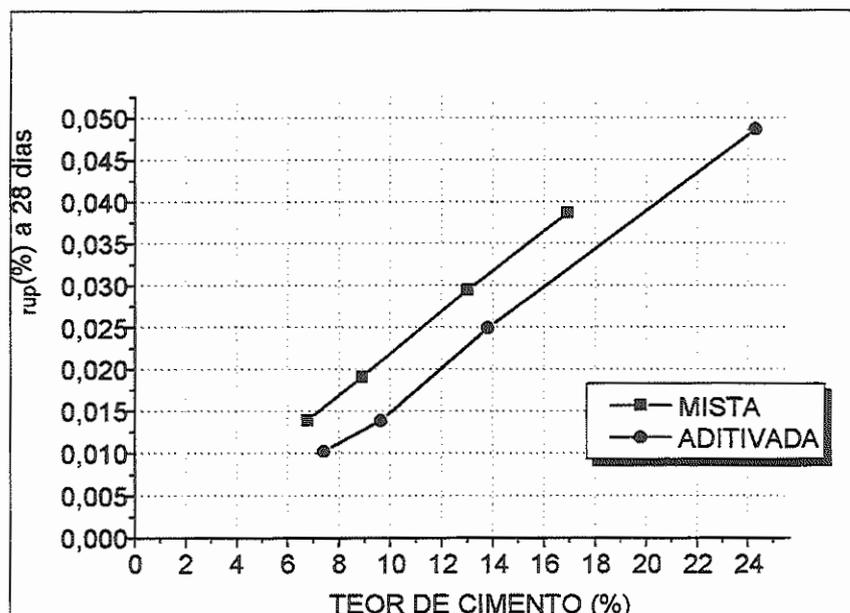


Figura 51 – Deformação de ruptura na tração em função do teor de cimento das argamassas.

Pode-se observar que as argamassas de maior resistência apresentam também maior deformação máxima no instante da ruptura.

Como já explicado anteriormente, o que ocorre é que o módulo de deformação é função da raiz quadrada da resistência à compressão. Portanto, um aumento de resistência não provoca um aumento na mesma proporção no módulo de deformação, mas sim menor e, com isso, um aumento na deformação máxima de ruptura.

Dessa forma, uma análise simples levaria à conclusão de que as argamassas de maior resistência mecânica têm menor propensão à fissuração.

No entanto, as bibliografias especializadas encontradas na literatura, geralmente consideram as argamassas de menor resistência mecânica como sendo mais deformáveis que as mais fortes. Tais considerações talvez estejam enraizadas no meio técnico pelos seguintes fatos:

- essas argamassas; necessitam de uma menor energia para promover a sua deformação. No entanto, isso não as fazem mais deformáveis sob o ponto de vista de deformação máxima de ruptura;

- as argamassas mais fortes apresentam retração por secagem bem mais acentuada do que as argamassas mais fracas, o que pode levá-las mais facilmente a um estado patológico de fissuração e, portanto, fazendo parecer que são menos deformáveis.

Essa última observação leva a uma outra problemática. Com os valores de retração por secagem e módulo de deformação medidos nos ensaios desta pesquisa, e com as observações a respeito do alívio de tensões estudados no tópico que trata dos modelos de comportamento mecânico dos revestimentos, todos os traços de argamassa estudados estariam submetidos a um estado pleno de fissuração devido às tensões que surgiriam com a retração impedida.

Exemplificando, seja a formulação usual para o cálculo elástico das tensões devido à retração impedida a seguir:

$$\sigma_t = \varepsilon_r \cdot E_a \quad (40)$$

Onde:

σ_t = tensão de tração na argamassa

E_a = módulo de deformação da argamassa

ε_r = deformação de retração da argamassa no caso de retração livre

Considerando-se que o alívio de tensões causado pela junta de movimentação do revestimento somente tem efeito em uma região que dista de cinco vezes a espessura da camada de argamassa, ele pode ser desprezado. Tal consideração pode ser visualizada, por exemplo, supondo uma argamassa com 2 cm de espessura, esse alívio se daria nos primeiros 10 cm próximos à extremidade do pano de revestimento, sendo que em todo seu restante, ocorreria a tensão máxima de restrição total às deformações de retração.

Para exemplificar a expressão apresentada acima, pode-se analisar a argamassa M2 de traço 1:1:6, com UR=60%, aos 7 d, a retração medida foi

$\varepsilon_r = 0,03\% = 0,0003\text{mm/mm}$. O módulo de deformação medido foi $E_a = 1,98\text{GPa}$.

Dessa forma, a tensão de tração σ_t na argamassa, oriunda da restrição dessa retração seria:

$$\sigma_t = 0,0003 \times 1980 = 0,59\text{MPa}$$

Considerando a resistência à tração da argamassa igual a 1/10 da resistência à compressão medida nos ensaios, teríamos uma resistência da argamassa de 0,43MPa.

Assim, de acordo com os modelos de comportamento, essa argamassa estaria submetida a um estado de fissuração onde o equilíbrio seria atingido com fissuras espaçadas, no máximo, em 10cm.

No entanto, a prática demonstra que, evidentemente de maneira geral, a argamassa M2 utilizada como exemplo, quando submetida a uma condição climática de secagem amena, como UR=60%, dificilmente estaria submetida a esse estado de fissuração.

Portanto, existe uma incoerência na equação elástica apresentada anteriormente. Essa incoerência já tem sido tratada por alguns autores, como os mencionados no quadro de referência específico desta pesquisa, sendo que a hipótese geralmente apresentada trata do fenômeno de relaxação que alivia as tensões que as argamassas estão submetidas, no caso de retração impedida.

Essa hipótese, assim como outras, será estudada no próximo capítulo para que, com isso, possa-se quantificar a correta possibilidade de ocorrência de fissuração das argamassas devido ao fenômeno de retração por secagem, e também, concluir se a retração impedida pode aumentar a incidência de patologias de fissuração nas argamassas de traços de maior resistência mecânica.

7 METODOLOGIA DA PESQUISA DAS TENSÕES DE RETRAÇÃO IMPEDIDA

Este capítulo tem o objetivo de determinar, teoricamente, as tensões devido à retração impedida, levando-se em consideração os seguintes fatores:

- a evolução das tensões de tração na argamassa de maneira incremental, onde a tensão, em uma determinada idade, é considerada a soma dos incrementos de tensão que surgem ao longo do tempo até aquela idade de acordo com a evolução do fenômeno de retração por secagem e do crescimento do módulo de deformação;
- o fenômeno de relaxação da argamassa mantida a deformação constante, o que vem a dissipar parte das tensões acumuladas ao longo do tempo.

7.1 ESTUDO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES

Considera-se aqui, que a formulação representada pela equação 39 para o cálculo elástico das tensões devido à retração impedida não tem coerência física, se for aplicada pura e simplesmente em uma determinada idade da argamassa.

Deve-se perceber que, quando se recorre a tal formulação, faz-se com que a tensão em uma determinada idade devido à retração que vem ocorrendo desde as primeiras idades seja proporcional à rigidez da argamassa somente nessa idade.

Dessa forma, multiplicam-se as parcelas de retração que ocorrem ao longo do tempo por um único módulo de elasticidade, o da idade de análise.

Na realidade, o que ocorre é que uma parcela da retração que ocorreu na primeira semana de idade de uma argamassa não pode ser multiplicada pelo módulo de deformação a 28 d, por exemplo, quando se calcula a tensão de tração a 28 d.

Para visualizar melhor essas afirmações imaginemos uma situação análoga de duas pessoas, A e B, esticando uma corda elástica em seus extremos com uma determinada força.



Figura 52 – Dois indivíduos esticam a corda com uma força que só depende da rigidez da corda.

Depois, surge uma terceira pessoa, C, para segurar a corda como se quisesse impedir que ela se movimentasse. Como a corda já está deformada, o fato dela segurá-la não obrigará os indivíduos A e B a terem que aumentar a sua força para mantê-la esticada na mesma proporção.

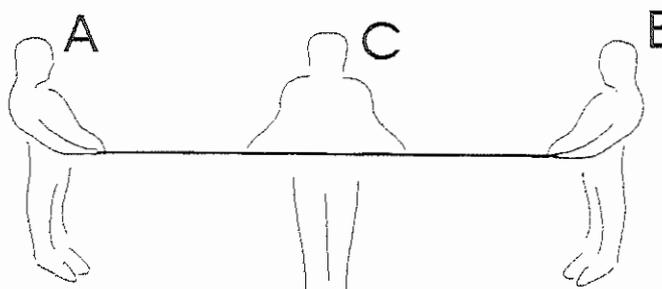


Figura 53– Enquanto A e B não movimentam a corda, a presença de C em nada interfere no sistema de forças.

Agora, se os indivíduos A e B desejarem esticar um pouco mais a corda, ou seja, impor uma nova deformação a ela, eles terão que vencer, além da rigidez da corda, a força do indivíduo C que a está segurando.

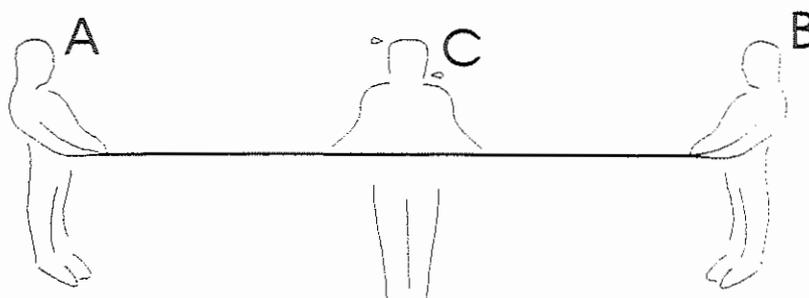


Figura 54 – A e B esticam mais a corda e sentem o aumento de rigidez ocasionado por C.

Caso outras pessoas, D, ou E, apareçam para segurar a corda e ajudarem a impedir que ela se movimente, ocorrerá a mesma coisa. Nada mudará no sistema de força, e A e B nem perceberão que outros indivíduos estão segurando a corda se eles não tentarem esticá-la um pouco mais. Porém, se eles tentarem aplicar uma nova deformação à corda, eles notarão o aumento de rigidez ocasionado agora por C, D e E.

Analogamente, quando a argamassa sofre um aumento de rigidez graças ao fenômeno de endurecimento que ocorre com o tempo, somente as deformações que ocorrerem dali em diante é que causarão tensões proporcionais a essa rigidez maior.

Assim, propõe-se que, para pequenos intervalos de tempo, sejam calculados a variação de retração nesse intervalo e o valor do módulo de deformação na tração na idade média desse intervalo.

O produto desses valores corresponderá a uma parcela de tensão de tração que surge na argamassa. A somatória das parcelas de tensão até uma determinada idade trará como resultado a tensão de tração efetiva na argamassa nessa idade.

Para tal análise, foi elaborada uma rotina programada em FORTRAN, que divide a idade de análise em um grande número de intervalos e calcula a somatória das parcelas de tração de cada intervalo, por processo incremental.

Os dados de entrada dessa rotina são pontos de curvas da retração e do módulo de deformação com o tempo.

Considera-se aceitável um mínimo de 5 pontos de cada uma das curvas citadas para que a aproximação dos pontos intermediários tenha uma imprecisão desprezível. A programação dessa rotina está apresentada no ANEXO.

7.2 INFLUÊNCIA DO FENÔMENO DE RELAXAÇÃO NA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES

Para a representação do fenômeno de relaxação, foi elaborada outra rotina computacional, já englobando também o efeito da evolução das tensões de maneira incremental.

Com relação ao fenômeno de relaxação, pode-se dizer que o mesmo significa a diminuição de tensão em um corpo, sob deformação constante.

Quando se aplica uma deformação ε a uma argamassa, surge uma tensão correspondente a $\sigma(t_0) = E \cdot \varepsilon$. Caso essa deformação seja mantida constante, com o tempo a tensão tende a diminuir e somente estabiliza-se em um tempo infinito. Portanto, em um determinado tempo t após t_0 , a tensão $\sigma(t)$ será menor que a tensão inicial $\sigma(t_0)$.

O coeficiente de relaxação R é definido como a relação entre a tensão relaxada e a tensão inicial, assim:

$$R(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{\sigma(t_0)} \quad (41)$$

Esse coeficiente de relaxação pode ser calculado a partir do coeficiente de fluência, pela expressão:

$$R(t, t_0) = \frac{1}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (42)$$

Para o cálculo do coeficiente de fluência, nesta pesquisa, recorreu-se ao CÓDIGO MODELO DO CEB DE 1990.

7.2.1 MODELO EMPREGADO PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA

Segundo o CEB (1990), o modelo apresentado é válido para os concretos estruturais com resistência característica à compressão variando de 12 MPa a 80 MPa, no domínio linear, isto é, para tensões de compressão menores que 40% da resistência média à compressão do dia correspondente ao carregamento, umidade ambiente entre 40 e 100% e temperatura entre 5°C e 30°C. O modelo também é válido para as solicitações de tração.

Nesta pesquisa, o modelo do CEB1990, apesar de criado para análise de concretos, foi empregado para a análise de argamassas por se tratar também de um material composto de cimento, cujas características reológicas são muito parecidas.

No modelo, são considerados os seguintes parâmetros: resistência, espessura equivalente, idade da argamassa, temperatura e umidade relativa ambiente, tipo de cimento e outros.

A seguinte expressão leva ao cálculo do coeficiente de fluência:

$$\varphi_{28}(t, t_0) = \phi_0 \beta_c (t - t_0) \quad (43)$$

Onde:

ϕ_0 = valor de referência do coeficiente de fluência para a idade t_0

$\beta_c(t-t_0)$ = coeficiente que mede o desenvolvimento da fluência ao longo do tempo

A umidade relativa do ambiente, a espessura equivalente, a resistência do concreto, o tipo do cimento e o instante da aplicação do carregamento são os parâmetros que influenciam no valor do coeficiente de referência, determinado conforme as expressões seguintes:

$$\phi_0 = \phi_{UR} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (44)$$

$$\phi_{UR} = 1 + \frac{1 - UR/100}{0,46 \cdot (h_0/100)^{1/3}} \quad (45)$$

$$h_0 = \frac{2 \cdot A}{u} \quad (46)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5,3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0,5}} \quad (47)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + (t_0)^{0,2}} \quad (48)$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{\beta_H + (t - t_0)} \right]^{0,3} \quad (49)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1,2 \cdot \frac{UR}{100} \right)^{18} \right\} \frac{h_0}{100} + 250 \leq 1500 \quad (50)$$

Onde:

UR = umidade relativa, em %

h₀ = espessura fictícia, em mm

A = seção transversal da peça, em mm²

u = perímetro da peça em contato com a atmosfera, em mm

f_{cm} = resistência média à compressão aos 28 d, em MPa

t₀ = idade do carregamento modificada de acordo com o tipo de cimento, em d

A espessura fictícia, no caso de argamassas de revestimento, é igual a duas vezes a sua espessura.

O efeito do tipo de cimento no cálculo da fluência é considerado por meio da correção da idade de carregamento t_0 , da seguinte maneira:

$$t_0 = t_{0T} \cdot \left[\frac{9}{2 + t_{0T}^{0.50}} \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ dia} \quad (51)$$

$$t_{0T} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[\frac{4.000}{273 + T(\Delta t_i)} - 13,65 \right] \quad (52)$$

Onde:

$\alpha = -1$ para cimentos de endurecimento lento; 0 para cimento de endurecimento normal; e 1 para cimentos de alta resistência inicial e rápido endurecimento

$T(\Delta t_i)$ = temperatura média [°C] durante um intervalo de tempo igual a Δt_i , em d

Dessa forma, obtemos o coeficiente de fluência em relação à deformação aos 28 d, ou seja, $\varphi_{28}(t, t_0)$.

Para ser empregado no cálculo do coeficiente de relaxação, o coeficiente de fluência deve ser calculado em relação a um tempo inicial qualquer, e para tanto, deve ser feita a seguinte conversão:

$$\varphi_0(t, t_0) = \varphi_{28}(t, t_0) \cdot \frac{E_a(t_0)}{E_a(28)} \quad (53)$$

Onde

$E_a(t_0)$ = módulo de elasticidade longitudinal da argamassa na idade do carregamento

$E_a(28)$ = módulo de elasticidade longitudinal da argamassa aos 28 d

7.2.2 MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES DEVIDO À RETRAÇÃO IMPEDIDA

Na análise, dividem-se as curvas de retração e módulo de deformação longitudinal em pequenos intervalos.

Cada um, desses pequenos intervalos, causa um incremento de tensão na argamassa, o qual deve ser multiplicado pelo coeficiente de relaxação desde a idade em que surge, até a idade de análise.

A tensão de tração final na argamassa a uma determinada idade será a somatória das parcelas de tensão já relaxadas até essa idade.

A seguinte expressão representa tal procedimento:

$$\sigma_i(t) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_r(t_i) - \varepsilon_r(t_{i-1})] \cdot E_a(t_i) \cdot R(t, t_i) \quad (54)$$

Onde:

n = número de intervalos em que a idade de análise t é dividida

$\varepsilon_r(t_i)$ = retração por secagem da argamassa na idade t_i , em mm/mm

$E_a(t_i)$ = módulo de deformação longitudinal da argamassa na idade t_i , em MPa

$R(t, t_i)$ = coeficiente de relaxação para uma deformação aplicada na idade t_i e mantida constante até a idade t

Este método foi programado no "software" de planilha eletrônica EXCEL, que apresenta uma boa interface de entrada e saída de dados, de forma que se possa visualizar a influência das variações de cada parâmetro no resultado da análise.

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS TENSÕES DE RETRAÇÃO IMPEDIDA

8.1 CONSIDERAÇÃO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES

Os gráficos seguintes mostram as tensões devido à retração impedida, empregando-se o método usual de determinação, onde se multiplica a deformação de retração em uma idade pelo módulo de deformação final nesta idade, e o método proposto de consideração da evolução das tensões de tração na argamassa de maneira incremental.

São apresentados resultados somente para alguns dos traços estudados, com a finalidade de comparar os métodos de avaliação.

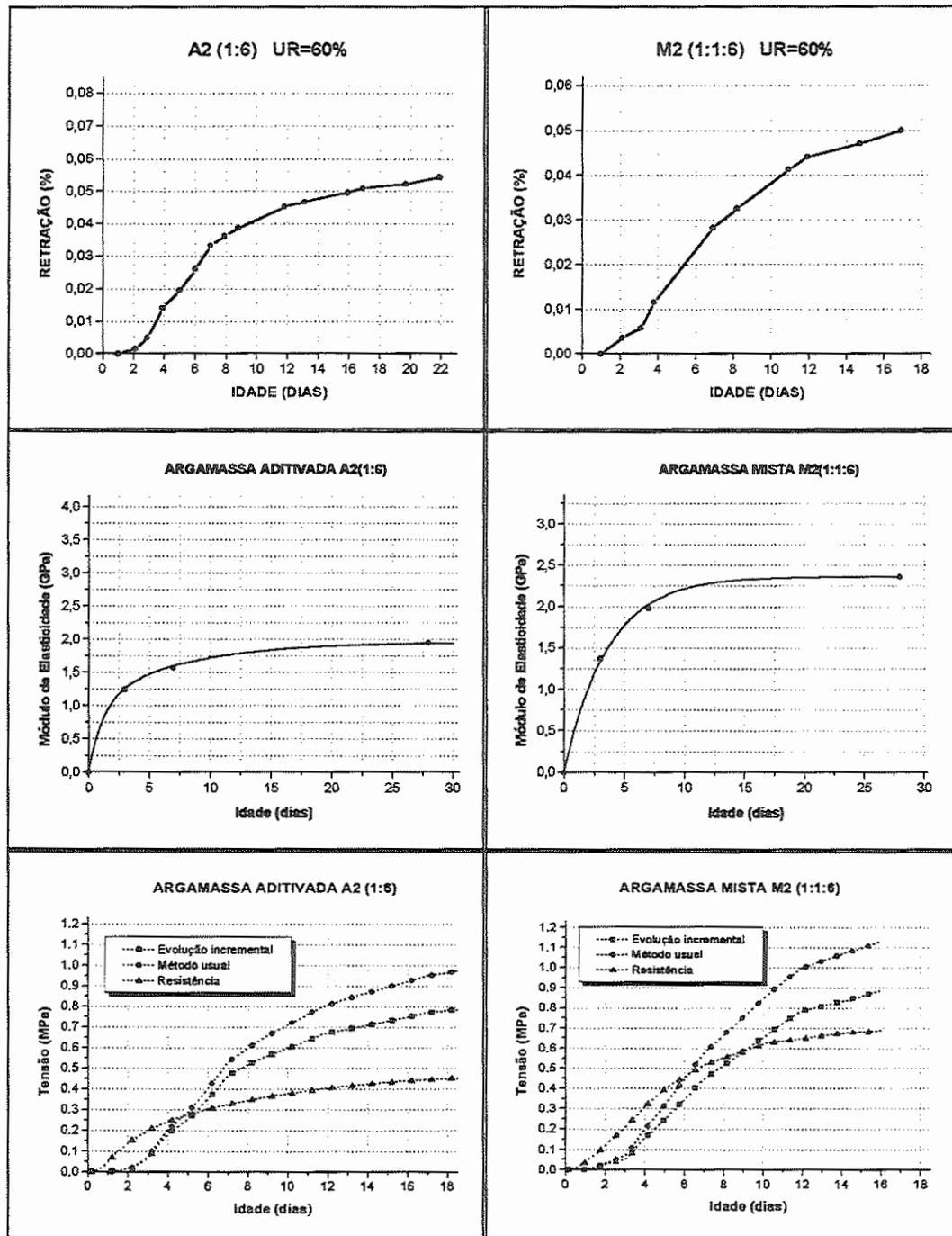


Figura 55 Gráficos exemplo de cálculo de tensões devido à retração impedida com evolução incremental das tensões.

Observa-se que a magnitude das tensões assim calculadas é cerca de 80% dos valores obtidos, empregando-se simplesmente a formulação usual de elasticidade direto na idade de análise.

8.2 CONSIDERAÇÃO INCREMENTAL DA EVOLUÇÃO DAS TENSÕES ASSOCIADA AO FENÔMENO DE RELAXAÇÃO

O modelo descrito no capítulo da metodologia de pesquisa das tensões devido à retração impedida engloba a consideração da evolução das tensões de maneira incremental, além do próprio fenômeno de relaxação das tensões.

O coeficiente de relaxação é o fator de diminuição, após um período de tempo, de uma tensão que surge devido a uma deformação imposta e mantida constante durante esse tempo.

A figura a seguir mostra o coeficiente de relaxação, calculado pela expressão 41, para diferentes idades de carregamento, considerando-se a umidade relativa do ar de 40%, espessura fictícia de 40mm, o que equivale a uma espessura de revestimento de 20mm, e resistência à compressão aos 28d de 5MPa.

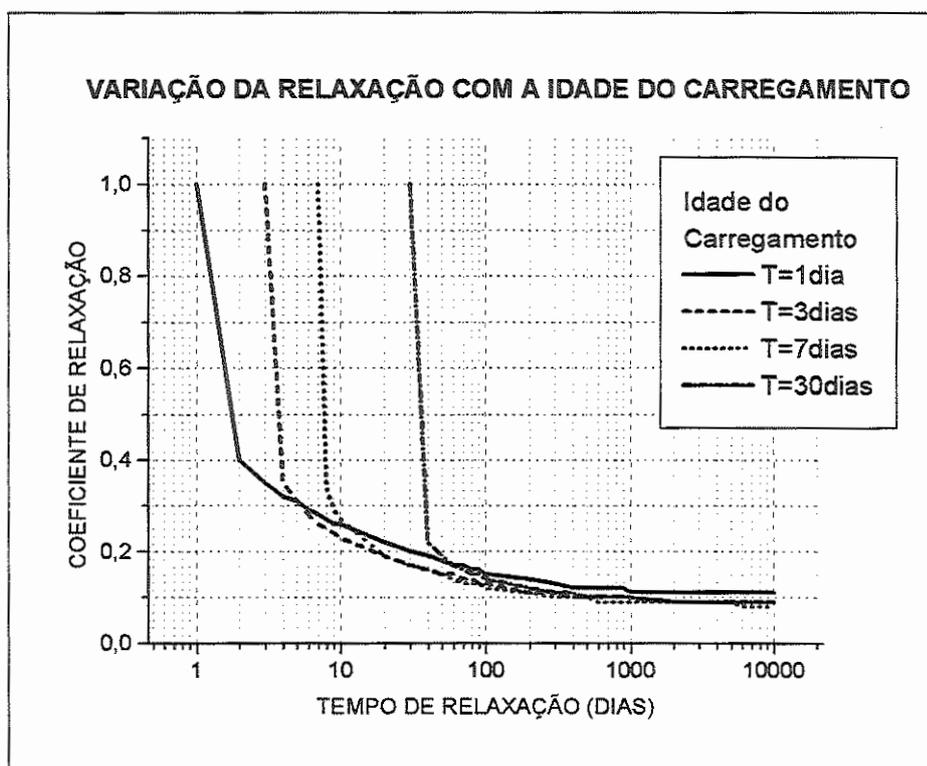


Figura 56 – Coeficiente de relaxação para diversas idades de carregamento.

Observa-se, pela figura anterior, que, em situações de mesma umidade relativa do ar, resistência mecânica da argamassa e espessura fictícia da peça, o coeficiente de relaxação tende a um mesmo valor, independente da idade da argamassa em que ocorre o carregamento.

Tal valor, para a situação descrita, tende a aproximadamente 0,1, ou seja, a tensão, considerando-se o fenômeno de relaxação, cai para cerca de 10% da tensão inicial que ocorre no momento do carregamento, sendo que no primeiro dia, ela já cai para menos da metade de seu valor inicial.

A próxima figura apresenta o coeficiente de relaxação para diferentes umidades relativas do ar, considerando-se a idade de carregamento igual a 3 d, espessura fictícia de 40mm o que equivale à uma espessura de revestimento de 20mm, e resistência à compressão aos 28d de 5MPa.

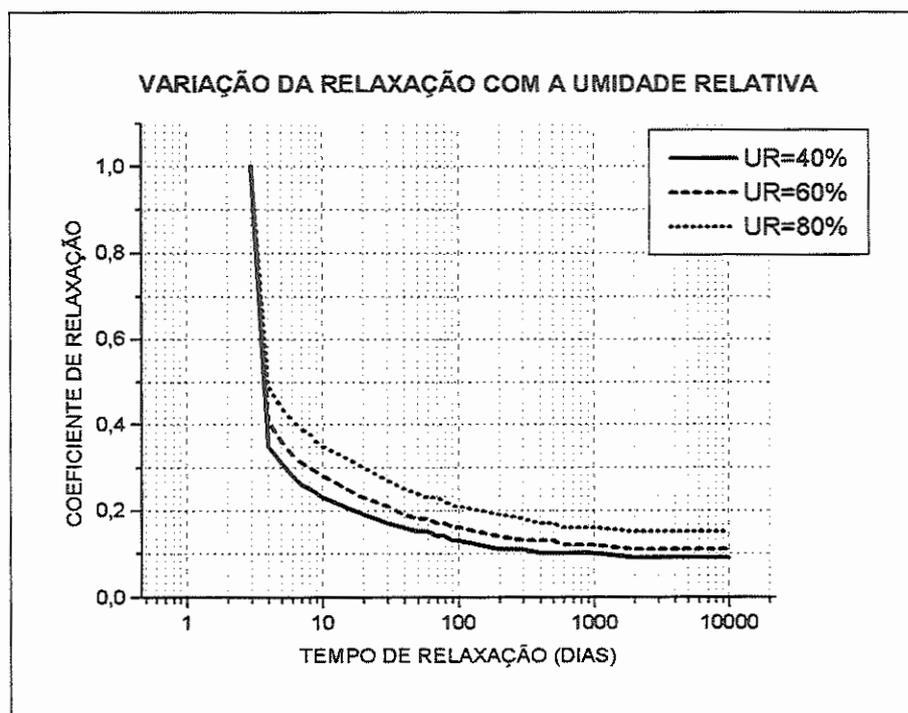


Figura 57 – Coeficiente de relaxação para diversas umidades relativas do ar.

Observa-se que, quanto mais baixa a umidade relativa do ar, mais acentuado é o fenômeno de relaxação, conduzindo a valores menores para o coeficiente de relaxação.

Isso pode ser atribuído ao fato de que os fenômenos de fluência e relaxação estão relacionados com o movimento de umidade no interior da

pasta de cimento endurecida. Dessa forma, quanto mais baixa a umidade relativa do ar, mais intensa é a movimentação de água da argamassa em direção ao exterior da mesma.

A próxima figura apresenta o coeficiente de relaxação para diferentes espessuras fictícias de um revestimento de argamassa analisado. Considera-se a idade do carregamento igual a 3 d, umidade relativa do ar de 40%, e resistência à compressão a 28 d de 5 MPa. Vale lembrar, que a espessura do revestimento é igual à metade do valor das espessuras fictícias analisadas na figura a seguir.

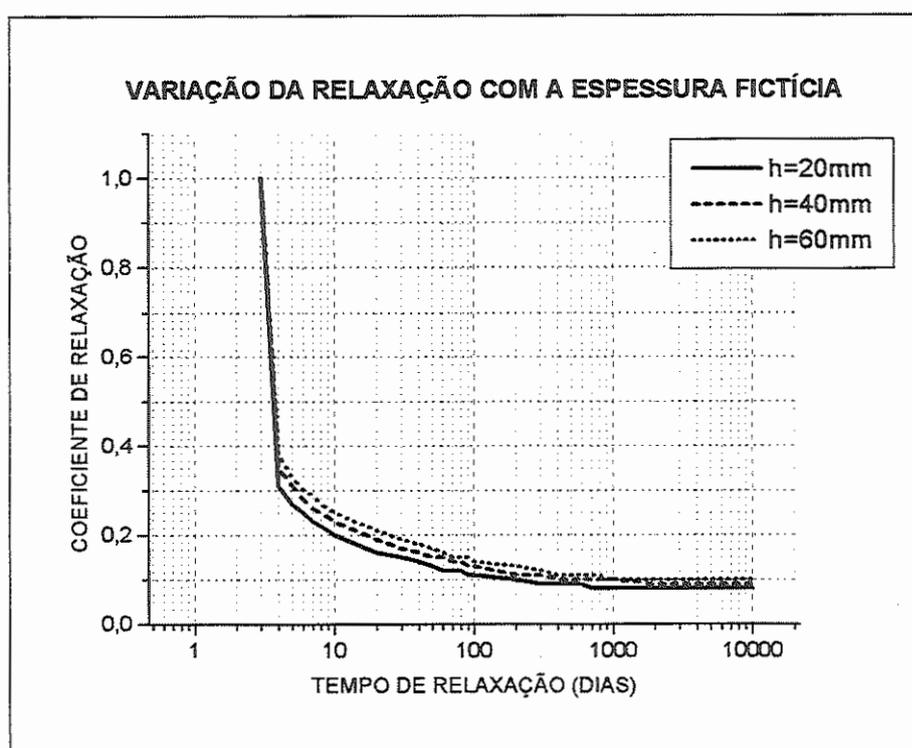


Figura 58 - Coeficiente de relaxação para diferentes espessuras fictícias.

Verifica-se que a espessura fictícia e a espessura da camada de argamassa pouca influência têm sobre o coeficiente de relaxação.

Mesmo o coeficiente de relaxação sendo dependente do movimento de água do interior da argamassa para o ambiente, observa-se influências diferentes por parte da umidade relativa do ar e da espessura fictícia da argamassa na relaxação. Isso deve-se ao fato de que, em ambientes de umidades relativas diferentes, o equilíbrio higrométrico entre a argamassa e

o exterior é diferente, assim como o movimento de água, independentemente da idade. Já no caso de espessuras fictícias diferentes, se a secagem ocorrer em ambientes de mesma umidade relativa, o movimento de água atingiria o mesmo equilíbrio para idades avançadas, ou seja, acima de 28 d.

Na figura a seguir, apresenta-se o coeficiente de relaxação para diferentes resistências à compressão de argamassas aos 28 d. Considera-se a idade de carregamento igual a 3 d, umidade relativa do ar de 40% e espessura fictícia de 40 mm.

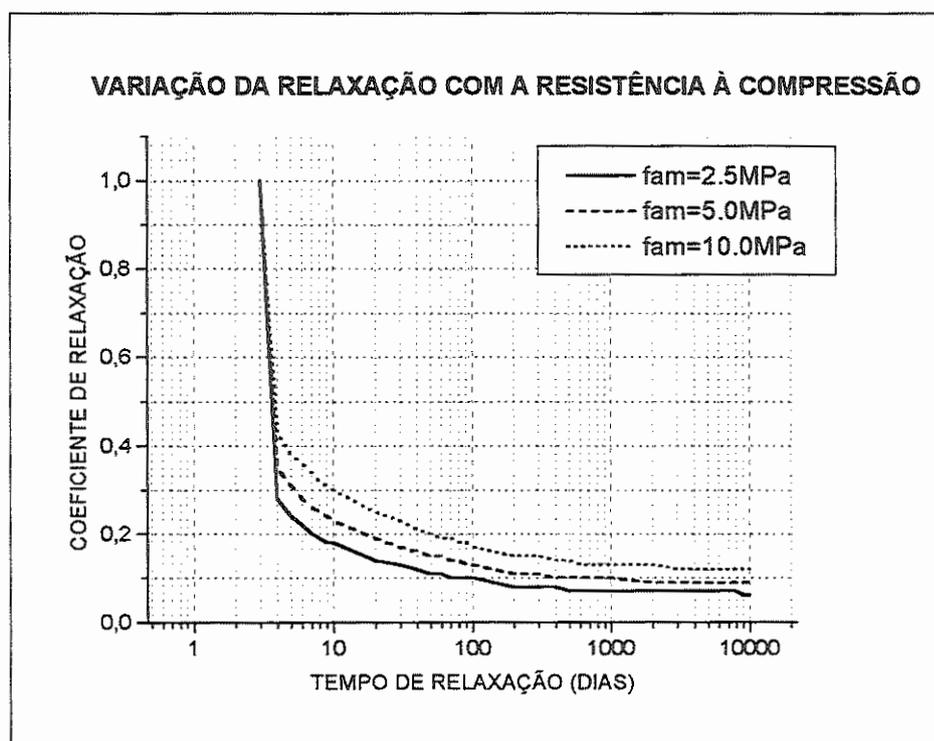


Figura 59 - - Coeficiente de relaxação para diferentes resistências mecânicas de argamassa.

Pode-se observar que, para argamassas de menor resistência mecânica, o coeficiente de relaxação é menor e, portanto, o fenômeno de relaxação é mais intenso.

Os próximos tópicos relacionam resultados das tensões devido à retração impedida para as argamassas estudadas, com base nos resultados experimentais de retração por secagem, resistência à compressão e módulo de deformação longitudinal.

8.2.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS TENSÕES DE TRAÇÃO CALCULADAS COM E SEM A CONSIDERAÇÃO DO FENÔMENO DA RELAXAÇÃO.

Aqui, apresentam-se as tensões de tração que surgem nas argamassas estudadas devido à retração impedida, e compara-se sua magnitude com e sem a consideração do fenômeno de relaxação das tensões. São mostrados também os valores das resistências mecânicas à tração das argamassas estudadas, extrapoladas a partir da resistência à compressão.

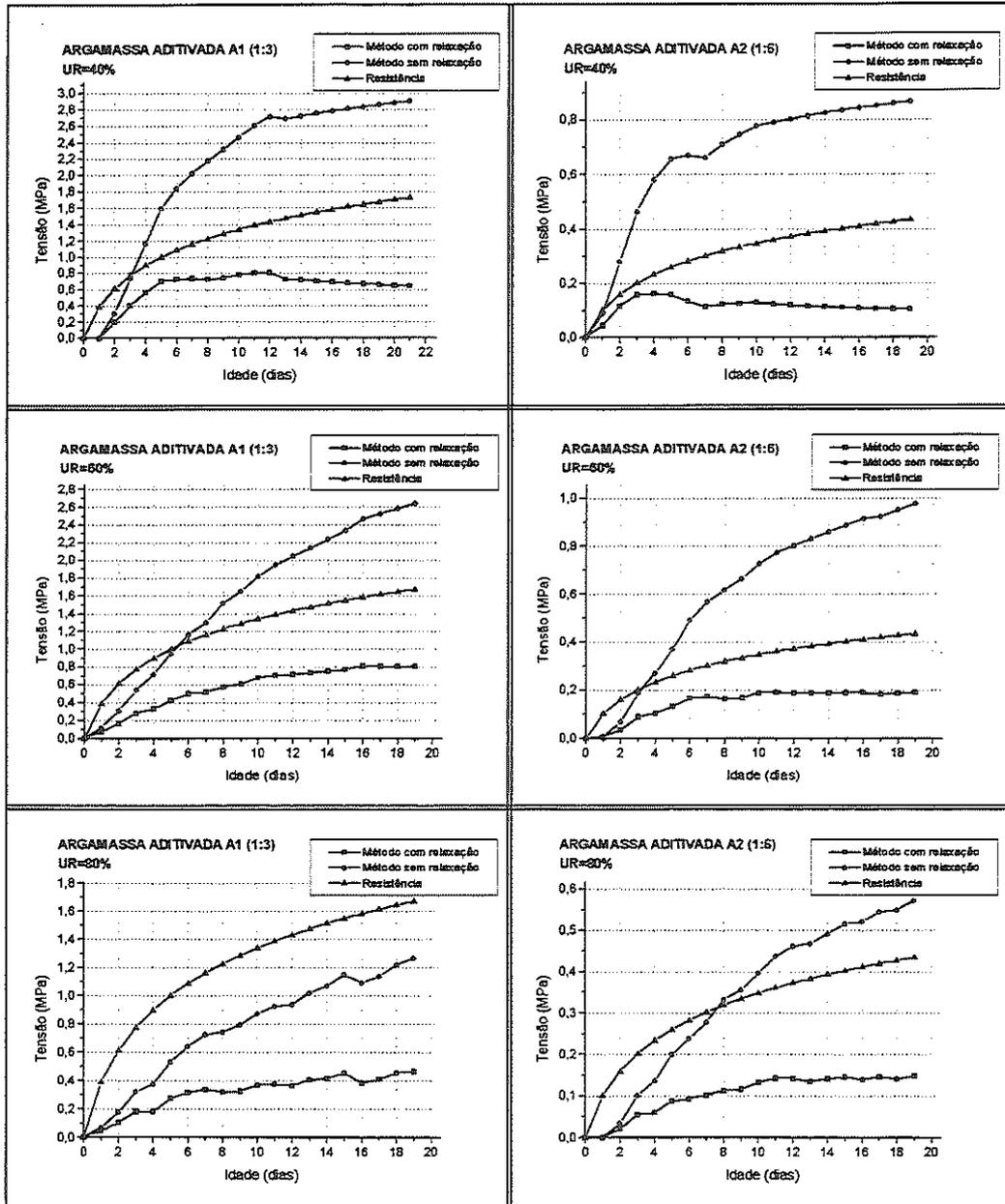


Figura 60 – Tensões de tração calculadas para os traços A1 e A2.

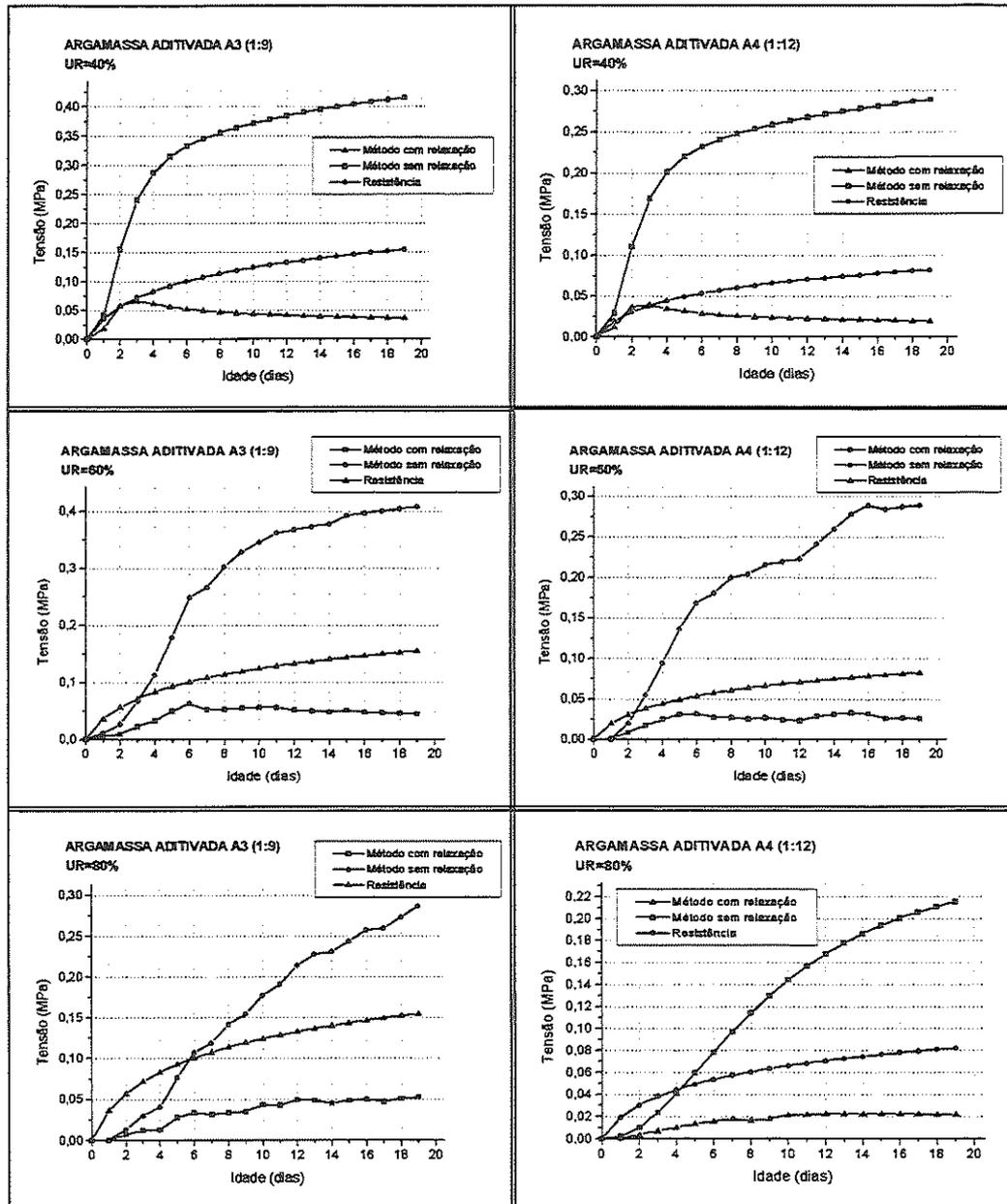


Figura 61 – Tensões de tração calculadas para os traços A3 e A4.

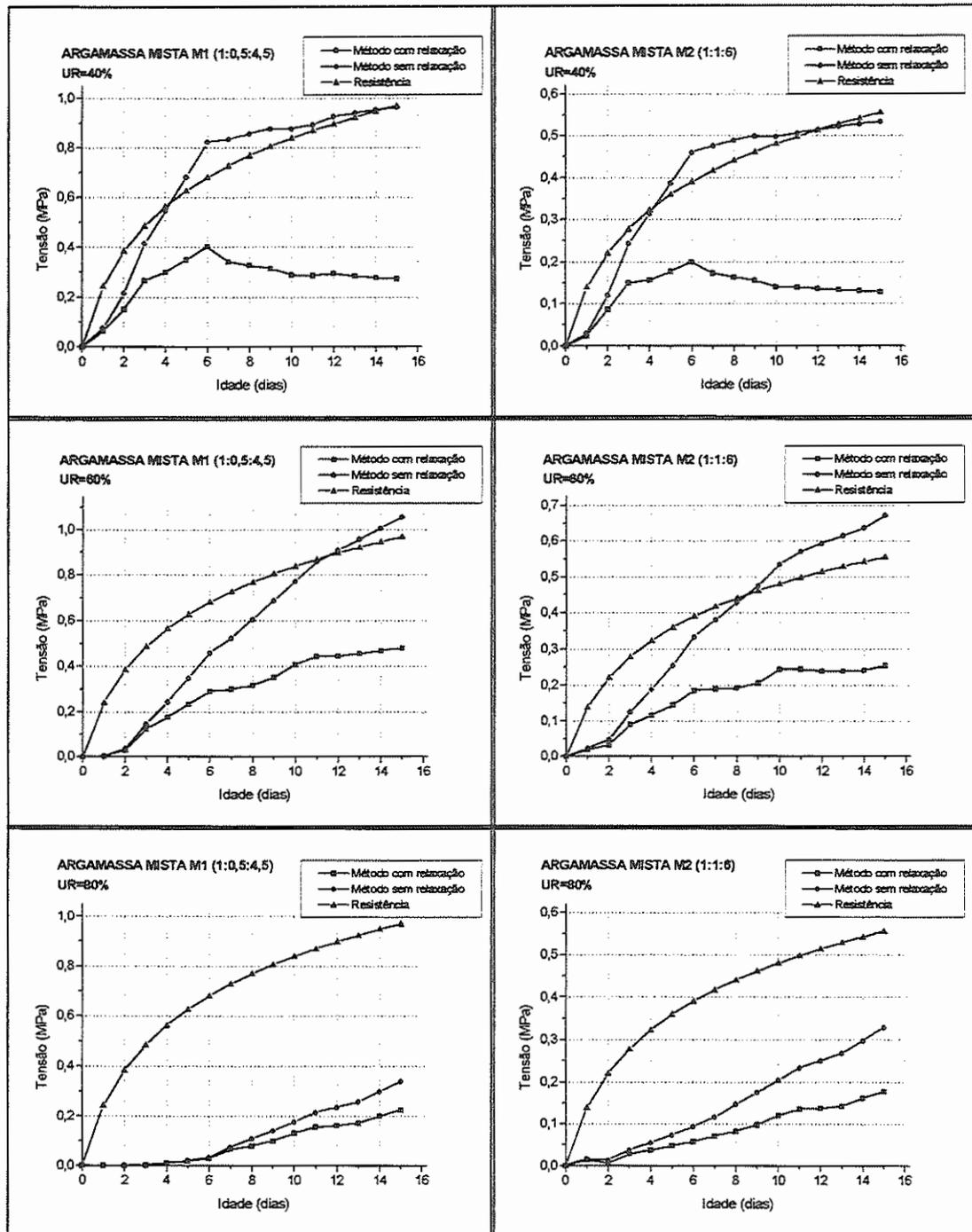


Figura 62 – Tensões de tração calculadas para o traços M1 e M2.

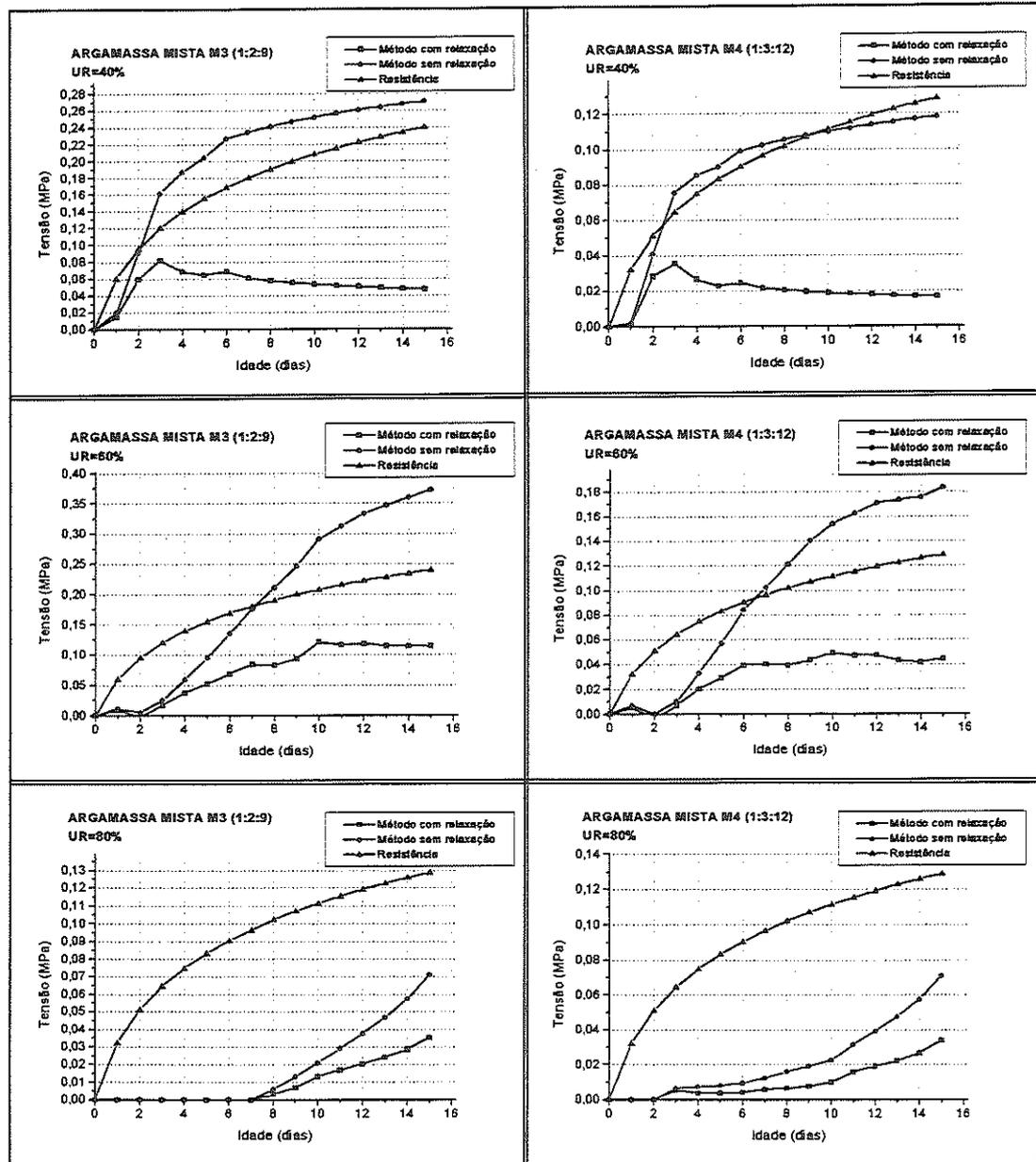


Figura 63 – Tensões de tração calculadas para o traços M3 e M4.

Observa-se que para as umidades relativas do ar de 40% e 60%, sem a consideração do fenômeno de relaxação que alivia as tensões de tração devido à retração impedida, ocorreria ruptura da argamassa em todos os traços estudados.

Isso pode ser notado nos gráficos em que a curva de tensão atuante cruza com a curva de resistência, momento em que se daria o início do fenômeno de fissuração da argamassa.

No entanto, considerando-se o fenômeno da relaxação, nenhum dos traços estudados apresentaria tensões acima da resistência da argamassa e, portanto, a mesma não apresentaria fissuração.

Para as umidades relativas do ar de 80%, situação em que a retração por secagem é relativamente baixa, somente algumas argamassas aditivadas apresentariam fissuração, caso o fenômeno de relaxação não fosse considerado.

Observa-se também que, no método que considera a relaxação, nas situações em que a umidade relativa do ar é de 40%, com 7 d e em muitos casos com até 3 d apenas, as tensões de tração na argamassa começam a diminuir.

Isso ocorre porque, com essa idade e a 40% de umidade relativa do ar, a retração por secagem da argamassa praticamente já se estabilizou. Mas como a relaxação é um fenômeno que não pára com o tempo, as tensões continuam a se dissiparem e, por isso, diminuem.

Essa observação está de acordo com os resultados experimentais obtidos por COUTINHO (1954), que desenvolveu um método para a medição das tensões em concreto e argamassa, moldados sobre anéis metálicos, e que indicaram a mesma forma de evolução das tensões em argamassas submetidas à secagem em ambientes de baixa umidade relativa.

Outra observação relevante é que, para umidades relativas mais baixas, o fenômeno de relaxação é mais intenso, como já apresentado anteriormente e, conseqüentemente, a diferença dos valores das tensões de tração na argamassa, considerando-se ou não tal fenômeno, também é mais significativa.

Também se observa que a diferença entre as tensões calculadas com e sem relaxação aumenta com o tempo, pois o fenômeno de relaxação não pára de dissipar as tensões da argamassa.

A tabela seguinte ilustra o quanto as tensões diminuem considerando-se o fenômeno de relaxação. Isso foi calculado pela média da relação entre as tensões de tração que ocorreriam com e sem a consideração da relaxação, encontrada para todos os traços, nas três umidades relativas e nas idades de 3, 7 e 14 d.

Tabela 47 – Proporção entre tensões de tração com e sem a consideração da relaxação

Idade (d)	σ_t com relaxação / σ_t sem relaxação		
	UR=40%	UR=60%	UR=80%
3	52%	56%	73%
7	30%	37%	58%
14	21%	28%	44%

8.2.2 RESULTADOS DAS TENSÕES CALCULADAS PELO MÉTODO PROPOSTO PARA TODOS OS TRAÇOS

A figura a seguir apresenta os valores das tensões de tração devido à retração impedida para todos os traços de argamassa em diferentes umidades relativas, evoluindo ao longo do tempo, e sua respectiva resistência à tração.

A resistência à tração da argamassa foi considerada igual a 10% da resistência à compressão obtida experimentalmente.

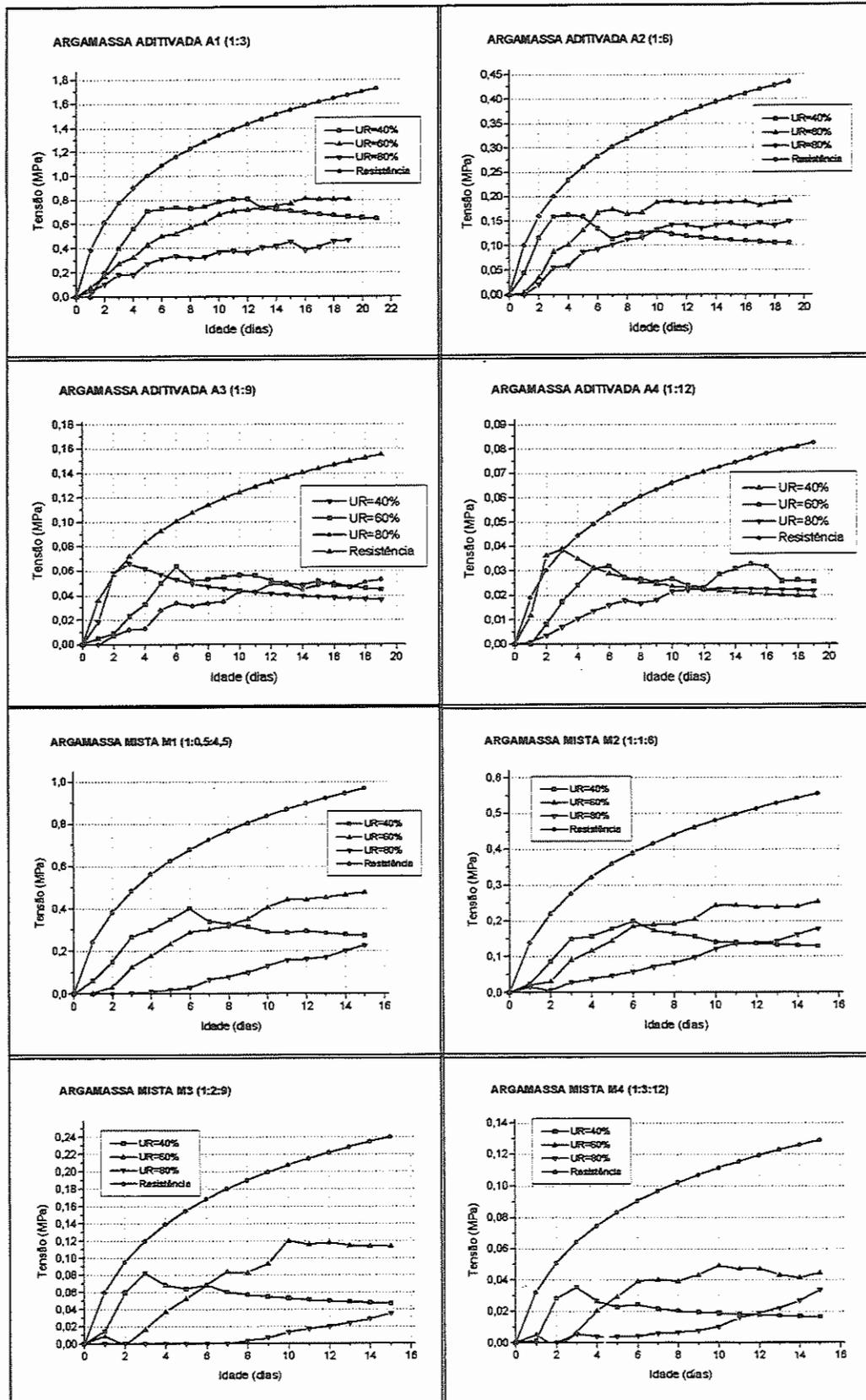


Figura 64 – Tensões de tração em todos os traços para diferentes UR%.

A relação entre a tensão de tração atuante para cada argamassa e sua respectiva resistência irá indicar a maior ou menor possibilidade de fissuração da argamassa em uma situação real, onde outros fenômenos também incidem como, por exemplo, uma contração térmica.

Os traços mais ricos em cimento apresentam valores de retração maiores que os mais fracos. Além disso, também possuem valores de módulo de deformação maiores. Isso poderia levar à conclusão precipitada de que eles estariam mais próximos da fissuração que os traços mais fracos.

No entanto, deve-se observar que esses traços apresentam uma resistência à tração maior, e numa proporção que cresce mais do que o seu módulo de deformação. Também o fenômeno de relaxação interfere na possibilidade de fissuração dessas argamassas, e deve ser levado em consideração antes de qualquer conclusão.

Dessa forma, sugere-se que em qualquer caso prático seja feita uma avaliação apurada de todos os parâmetros que interferem no processo.

Avaliando-se a influência da umidade relativa nesse processo, observa-se que quando ela é mais baixa, o fenômeno de relaxação é mais significativo.

Portanto, nas umidades relativas mais baixas, as tensões tendem a subir mais depressa, sendo maiores nas primeiras idades, mas depois se estabilizam rapidamente e podem até cair em idades mais avançadas.

Já para umidades relativas mais altas, as tensões nas idades mais avançadas tendem a ser maiores.

Tabela 48 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=40%.

ARGAMASSA	IDADE		
	3 D	7 D	14 D
A1	51%	63%	42%
A2	79%	37%	29%
A3	92%*	46%*	28%*
A4	102%*	47%*	29%*
M1	55%	47%	29%
M2	54%	42%	24%
M3	68%	34%	20%
M4	55%	22%	13%

*para o cálculo desses valores foram utilizadas curvas de retração com o tempo, calculadas teoricamente.

Tabela 49 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=60%.

ARGAMASSA	IDADE		
	3 D	7 D	14 D
A1	35%	44%	50%
A2	43%	57%	48%
A3	32%	48%	34%
A4	45%	48%	41%
M1	26%	41%	49%
M2	32%	45%	44%
M3	14%	47%	49%
M4	10%	42%	33%

Tabela 50 – Relação entre as tensões de tração atuantes e as resistentes, considerando-se a relaxação, em UR=80%.

ARGAMASSA	IDADE		
	3 D	7 D	14 D
A1	23%	29%	27%
A2	27%	34%	36%
A3	17%	29%	32%
A4	18%*	31%*	30%*
M1	0%	9%	21%
M2	10%	17%	30%
M3	0%	0%	23%
M4	7%	7%	21%

*para o cálculo desses valores foram utilizadas curvas de retração com o tempo calculadas teoricamente.

Pelas tabelas apresentadas, pode-se observar que, nas umidades relativas mais baixas, ocorrem as tensões mais próximas da ruptura. Nesses casos, a tensão atuante ultrapassa 50% da tensão resistente em todos os traços, fato que ocorre logo nos primeiros dias, com cerca de 3 d.

Outra observação importante é que as argamassas mistas apresentaram uma relação entre tensão atuante e tensão resistente menor que as argamassas aditivadas. Isso indica que as argamassas aditivadas são mais susceptíveis à fissuração que as argamassas mistas, quanto ao fenômeno de retração impedida.

Através das tabelas, também se observou que os traços com menor resistência mecânica apresentam uma relação tensão atuante e tensão resistente mais elevada, o que significa que eles são mais propensos à fissuração devido à retração impedida que os traços mais resistentes.

Tal afirmação pode ser visualizada nos gráficos mostrados anteriormente onde as curvas de tensão atuante dos traços mais pobres ficam mais próximas das curvas de resistência e, em alguns casos, como para os traços A3 e A4, as curvas se cruzam, indicando que ocorreria a fissuração.

9 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foram traçadas hipóteses de que as patologias físicas nos revestimentos de argamassa dependiam de um complexo equilíbrio mecânico do sistema de revestimento.

Isso procurava indicar que a simples avaliação de uma propriedade da argamassa, como resistência de aderência ou módulo de deformação, não bastaria para prever a possibilidade de ocorrência de uma manifestação patológica e, portanto, as recomendações de dosagem de argamassa, que não levam em conta as situações de utilização do revestimento, seriam insuficientes para garantir a qualidade do revestimento.

De fato, verificou-se que o comportamento de um revestimento de argamassa depende do equilíbrio mecânico de um sistema que envolve as propriedades dos materiais, os agentes patológicos que incidirão no sistema e as suas condições de contorno.

O método proposto para modelar tal comportamento mecânico da argamassa é relativamente simples de ser compreendido e empregado. Talvez não, na prática das obras e nas decisões a serem tomadas nos canteiros durante a execução de um revestimento. Mas certamente, para o desenvolvimento de recomendações de uso dos variados materiais encontrados no mercado, e para as diversas situações de utilização dos mesmos, como por exemplo, uma especificidade climatológica.

Os resultados dos modelos de comportamento estudados indicaram que a região de alívio de tensões causadas pela junta de movimentação da argamassa de revestimento é da ordem de cinco vezes a sua espessura. Portanto, sendo essa região extremamente pequena, a distância e a própria existência das juntas de movimentação pouco, ou nada, irá influenciar nos valores máximos de tensão de tração na argamassa e na possibilidade de fissuração.

Com relação à importância da resistência de aderência no desempenho mecânico do revestimento, constatou-se que a mesma não é essencial ao equilíbrio dos esforços que surgem, seja por movimentação térmica, seja por retração por secagem. Isso ocorre porque não surge nenhum tipo de tensão que force a argamassa de revestimento para fora.

Dessa forma, essa propriedade é importante, sim, para o caso de outras manifestações patológicas que possam interferir no equilíbrio do sistema, como por exemplo, a fissuração de uma argamassa que demore a receber reparo. Neste caso, isso iria permitir que penetrasse água pelas fissuras, que a água caminhasse na interface da argamassa com o substrato lixiviando-a, causando movimentações higroscópicas, tudo isso associado às movimentações térmicas e à ação contínua e cíclica dessas intempéries por longo tempo, poderiam acabar desfazendo a ligação da argamassa com a base e, então, ela se desprenderia manifestando a falta de aderência.

O conhecimento da inter-relação entre as propriedades de uma argamassa facilita a previsão do seu comportamento mecânico. Dessa forma, através do ensaio de algumas poucas propriedades, pode-se extrapolar o valor das outras.

As correlações das propriedades que influenciam no comportamento do revestimento, estudadas nesta pesquisa, conduziram a resultados confiáveis. Isso devido à gama de resistências estudadas, com valores máximos e mínimos bem distantes, às baixas variabilidades de ensaio e à possibilidade de modelação matemática dessas correlações.

Pelos resultados dos ensaios de retração por secagem, constatou-se que ela é maior para argamassas de maior resistência mecânica e, nas primeiras idades, para umidades relativas do ar menores.

Com relação ao estudo das tensões de tração devido à retração impedida, constatou-se que o fenômeno da relaxação das tensões faz com que as mesmas tenham alívio de até 80% das tensões que ocorreriam sem tal fenômeno, dependendo da resistência da argamassa, sua idade, superfície exposta e da umidade relativa do ar.

Ainda com relação às tensões de tração, nos oito traços de argamassas de revestimento estudados, observou-se que, apesar dos traços mais fortes sofrerem uma retração maior, com a consideração do fenômeno de relaxação de tensões e do módulo de deformação dessas argamassas, em baixas umidades relativas do ar, os traços mais fracos se apresentam mais susceptíveis à fissuração. E é justamente nas baixas umidades relativas do ar que a possibilidade de fissuração é maior.

10 PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Grande parte das correlações, entre as propriedades das argamassas apresentadas, possui representação matemática, sobretudo nas de relevante importância para os modelos de comportamento mecânico do sistema de revestimento.

Tais expressões valem para os materiais constituintes das argamassas mistas e aditivadas estudadas nesta pesquisa. Para outros materiais, alguns parâmetros devem ser alterados para valores que podem ser obtidos experimentalmente; e o formato matemático das expressões não precisa necessariamente ser modificado.

Dessa forma, pode-se proceder à determinação de parâmetros experimentais que permitam as seguintes relações:

- resistência à compressão de acordo com o tipo de cimento;
- resistência à compressão de acordo com o tipo de aditivo;
- resistência à compressão de acordo com a umidade relativa;
- retração por secagem de acordo com o teor de água;
- retração por secagem de acordo com a superfície argamassa exposta ao ambiente;
- o teor de água necessário à consistência padrão de acordo com a granulometria do agregado;

Outros estudos que podem ser feitos para o prosseguimento da pesquisa são:

- aferição, experimentalmente, do modelo do CEB1990 utilizado para o cálculo do coeficiente de fluência, adaptando-se esse modelo desenvolvido para concretos à realidade dos compósitos de cimento de baixa resistência, como é o caso das argamassas de revestimento;

10 PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Grande parte das correlações, entre as propriedades das argamassas apresentadas, possui representação matemática, sobretudo nas de relevante importância para os modelos de comportamento mecânico do sistema de revestimento.

Tais expressões valem para os materiais constituintes das argamassas mistas e aditivadas estudadas nesta pesquisa. Para outros materiais, alguns parâmetros devem ser alterados para valores que podem ser obtidos experimentalmente; e o formato matemático das expressões não precisa necessariamente ser modificado.

Dessa forma, pode-se proceder à determinação de parâmetros experimentais que permitam as seguintes relações:

- resistência à compressão de acordo com o tipo de cimento;
- resistência à compressão de acordo com o tipo de aditivo;
- resistência à compressão de acordo com a umidade relativa;
- retração por secagem de acordo com o teor de água;
- retração por secagem de acordo com a superfície argamassa exposta ao ambiente;
- o teor de água necessário à consistência padrão de acordo com a granulometria do agregado;

Outros estudos que podem ser feitos para o prosseguimento da pesquisa são:

- aferição, experimentalmente, do modelo do CEB1990 utilizado para o cálculo do coeficiente de fluência, adaptando-se esse modelo desenvolvido para concretos à realidade dos compósitos de cimento de baixa resistência, como é o caso das argamassas de revestimento;

- avaliação experimental da possibilidade de ocorrência de fissuração nos revestimentos de argamassa, comparando-se os resultados com os métodos teóricos propostos nesta pesquisa para tal avaliação;

Tal avaliação experimental deve envolver um conjunto de ensaios de observação do comportamento de um revestimento, cujas propriedades mecânicas, reológicas e térmicas sejam conhecidas experimentalmente, e sujeito a uma controlada ação patológica incidente. Exemplos de tal avaliação podem ser obtidos da seguinte maneira:

- confecção de painéis de alvenaria revestidos com argamassas de diferentes traços,
- as dimensões desses painéis devem ser maiores do que 10 vezes a espessura da argamassa de revestimento, nas duas direções;
- submeter tais painéis à secagem com ambientes de diferentes umidades relativas;
- caso haja fissuração nos painéis, observar o espaçamento, abertura e idade de surgimento das fissuras.

O mesmo procedimento descrito acima pode ser estendido para outros agentes patológicos como a variação de temperatura; e para outros parâmetros geométricos do sistema, como a sua espessura da argamassa e o tamanho do painel de revestimento.

11 ANEXOS

11.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS

Tabela 51 - Características Físicas do Agregado Miúdo.

MÉTODO	DESCRIÇÃO	RESULTADOS
NBR 7218/87	Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	0%
NBR 7219/87	Determinação do teor de materiais pulverulentos	0,7%
NBR 7251/82	Massa unitária de agregado em estado solto	1,51kg/dm ³
NBR 9776/87	Massa específica (frasco de Chapman)	2,65kg/dm ³
NBR 7217/87	Dimensão máxima característica (mm)	0,6
NBR 7217/87	Módulo de finura	1,52

Tabela 52 - Composição granulométrica das amostras de agregado miúdo.

Amostra	Massa Inicial (g)	Peneiras Aberturas (mm)	Massa Retida (g)	% retida (%)	D _{máx} (mm)
M1	500	1.2	0	0	0.6
		0.6	16.1	3.2	
		0.3	253.2	50.8	
		0.15	212.1	42.6	
		<0.15	17.1	3.4	
		TOTAL	498.4	100	
M2	500	1.2	0	0	0.6
		0.6	17	3.4	
		0.3	242.1	48.4	
		0.15	219.1	43.8	
		<0.15	22.1	4.4	
		TOTAL	500.3	100	

Tabela 53 - Resultado da composição granulométrica e classificação da areia.

Amostras	Peneiras aberturas (mm)	% retida média (%)	% retida acumulada média (%)	Classificação NBR7211	Limites da NBR7211 (%)	Módulo de finura
	1.2	0	0		0 A 10	
	0.6	3	3	AREIA	0 A 20	
M1 + M2	0.3	50	53	MUITO FINA	50 A 85	1.52
	0.15	43	96		85 A 100	
	<0.15	4	100			

Com relação ao cimento CII-E32, foram determinadas suas propriedades de massa específica segundo NBR 6474/84 e massa unitária no estado solto, segundo NBR 7251/82, cujos valores encontrados foram de 3,00kg/dm³ e 1,45kg/dm³, respectivamente.

No caso da cal, CHIII, a tabela seguinte apresenta os ensaios realizados.

Tabela 54 - Ensaio de caracterização da cal hidratada.

METODOLOGIA	ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES DA NBR 7175/92
NBR 6474/84	MASSA ESPECÍFICA	2,62kg/dm ³	
NBR 7251/82	MASSA UNITÁRIA	0,62kg/dm ³	
NBR 9289/85	FINURA (%RETIDA ACUMULADA)	0,2%	≤ 0,5%
	PEN. N.30	14,1%	≤ 15,0%
	PEN. N.200		

Tabela 55 - Caracterização do substrato de bloco de concreto.

MÉTODO DE ENSAIO	N.º DE CPS	DETERMINAÇÃO	RESULTADO
NBR 6461/83	8	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	12MPA
NBR 12118/91	3	UMIDADE (% DA ABSORÇÃO TOTAL)	24%
NBR 12118/91	3	ABSORÇÃO DE ÁGUA	6,8%
NBR 9778/87	3	MASSA ESPECÍFICA SECA	2,15kg/dm ³
ASTM C67/94*	3	TAXA DE ABSORÇÃO INICIAL (IRA)	AINDA NÃO REALIZADO

* ASTM C67/94 - "Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile"

*11.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE
DEFORMAÇÃO ESTÁTICA E RESISTÊNCIA À
COMPRESSÃO UNIAXIAL*

ARGAMASSA ADITIVADA A1 - 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3
Traço em Massa	1:3,12
Relação a/c	0,64
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 56 - Módulos de deformação para o traço A1 com 3 d.

Resistência máxima média	9,52MPa
E _o - Módulo tangente inicial	3,240GPa
E _{sec,0.4}	3,120GPa
E _{sec,0.5}	3,080GPa
E _{sec,0.6}	2,890GPa
E _{sec,0.7}	2,770GPa
E _{sec,0.8}	2,600GPa
E _{sec,0.9}	2,430GPa
E _{sec,1.0}	1,810GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,53%

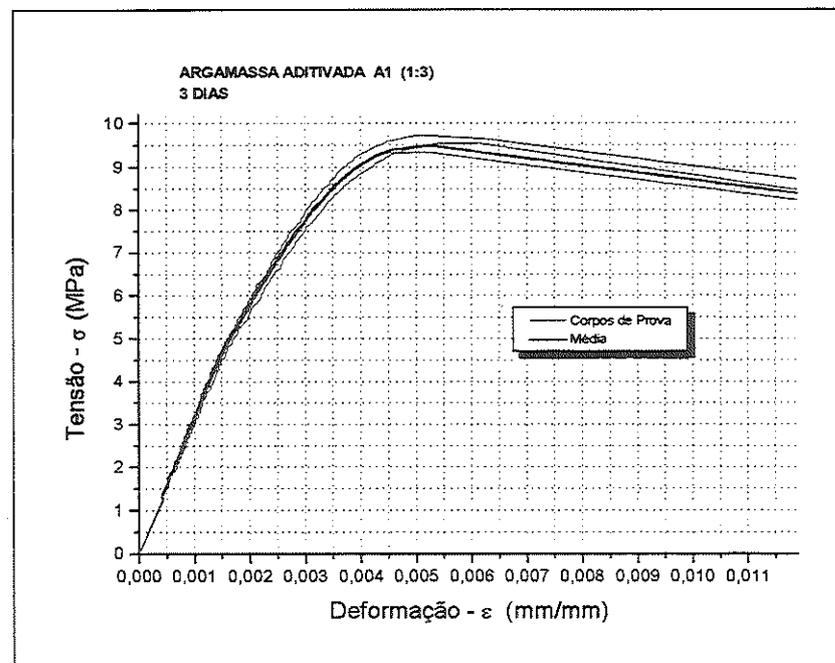


Figura 65 - Diagrama Tensão · Deformação para a argamassa A1 (3 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A1 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3
Traço em Massa	1:3,12
Relação a/c	0,64
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 57 - Módulos de deformação para o traço A1 com 7 d.

Resistência máxima média	10,07MPa
Eo - Módulo tangente inicial	2,640GPa
Esec,0.4	2,610GPa
Esec,0.5	2,480GPa
Esec,0.6	2,370GPa
Esec,0.7	2,300GPa
Esec,0.8	2,210GPa
Esec,0.9	2,080GPa
Esec,1.0	1,550GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,65%

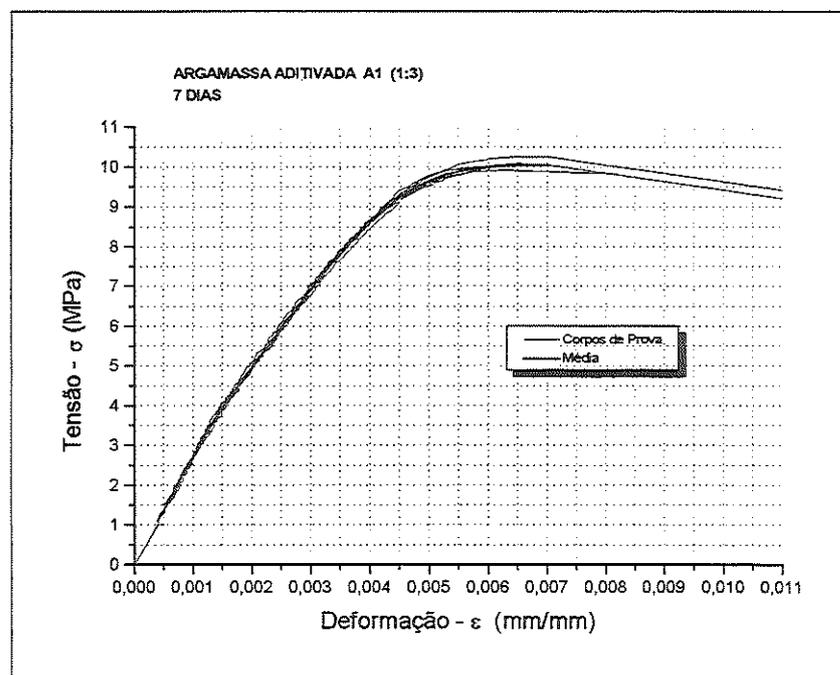


Figura 66 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A1 (7 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A1 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3
Traço em Massa	1:3,12
Relação a/c	0,64
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 58 - Módulos de deformação para o traço A1 com 28 d.

Resistência máxima média	18,55MPa
E _o - Módulo tangente inicial	3,830GPa
E _{sec,0.4}	3,780GPa
E _{sec,0.5}	3,740GPa
E _{sec,0.6}	3,720GPa
E _{sec,0.7}	3,700GPa
E _{sec,0.8}	3,670GPa
E _{sec,0.9}	3,590GPa
E _{sec,1.0}	3,340GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,55%

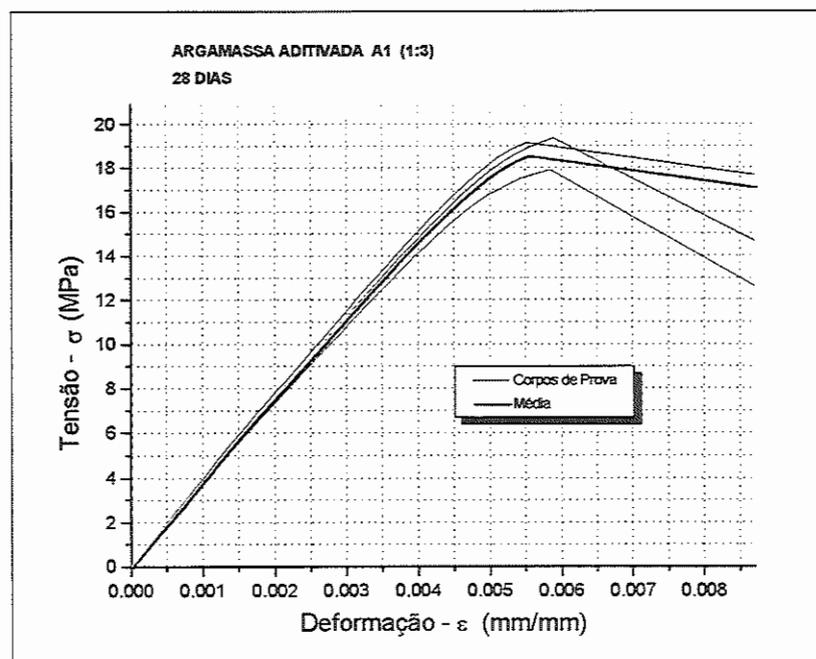


Figura 67 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A1 (28 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A2 - 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:6
Traço em Massa	1:6,25
Relação a/c	1,15
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 59 - Módulos de deformação para o traço A2 com 3 d.

Resistência máxima média	2,22MPa
Eo - Módulo tangente inicial	1,250GPa
Esec,0.4	1,250GPa
Esec,0.5	1,150GPa
Esec,0.6	1,100GPa
Esec,0.7	1,060GPa
Esec,0.8	1,010GPa
Esec,0.9	0,930GPa
Esec,1.0	0,700GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,32%

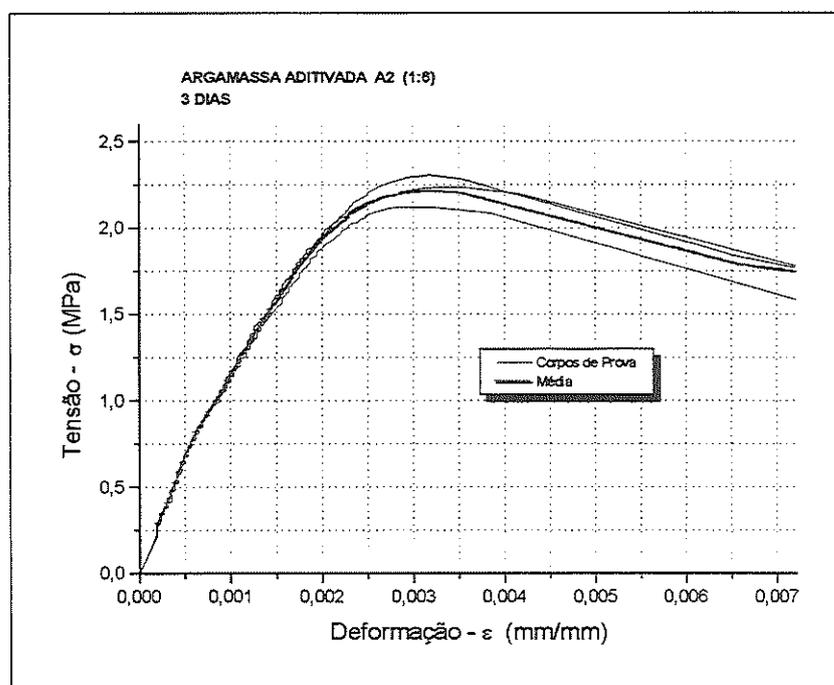


Figura 68 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (3 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A2 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:6
Traço em Massa	1:6,25
Relação a/c	1,15
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 60 - Módulos de deformação para o traço A2 com 7 d.

Resistência máxima média	3,31MPa
E _o - Módulo tangente inicial	1,560GPa
E _{sec,0.4}	1,560GPa
E _{sec,0.5}	1,460GPa
E _{sec,0.6}	1,390GPa
E _{sec,0.7}	1,330GPa
E _{sec,0.8}	1,280GPa
E _{sec,0.9}	1,200GPa
E _{sec,1.0}	1,010GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,33%

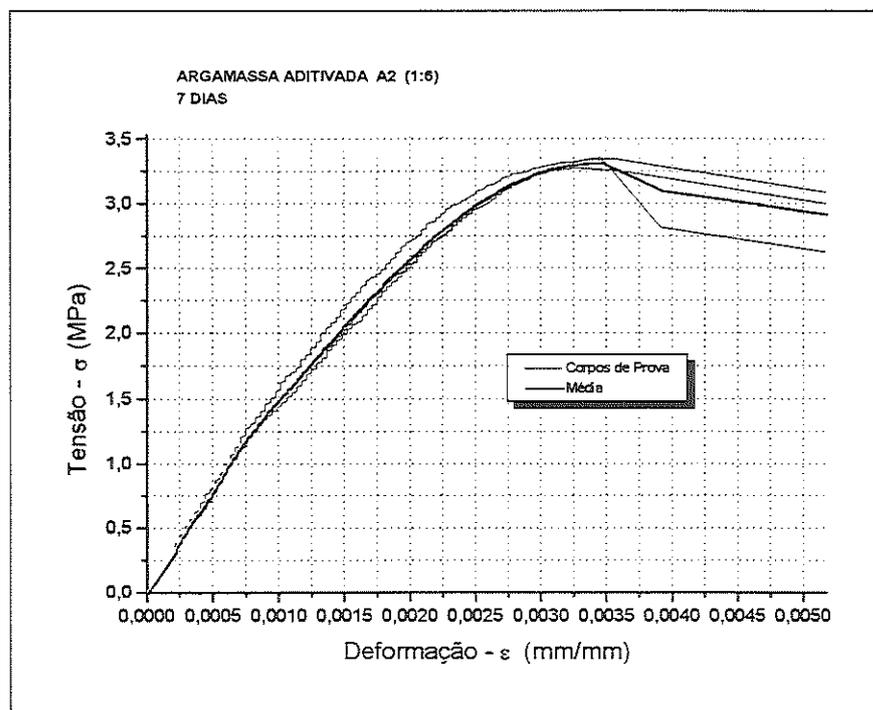


Figura 69 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (7 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A2 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:6
Traço em Massa	1:6,25
Relação a/c	1,15
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 61 - Módulos de deformação para o traço A2 com 28 d.

Resistência máxima média	4,85MPa
E _o - Módulo tangente inicial	1,95GPa
E _{sec,0.4}	1,76GPa
E _{sec,0.5}	1,69GPa
E _{sec,0.6}	1,63GPa
E _{sec,0.7}	1,58GPa
E _{sec,0.8}	1,54GPa
E _{sec,0.9}	1,47GPa
E _{sec,1.0}	1,15GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,42%

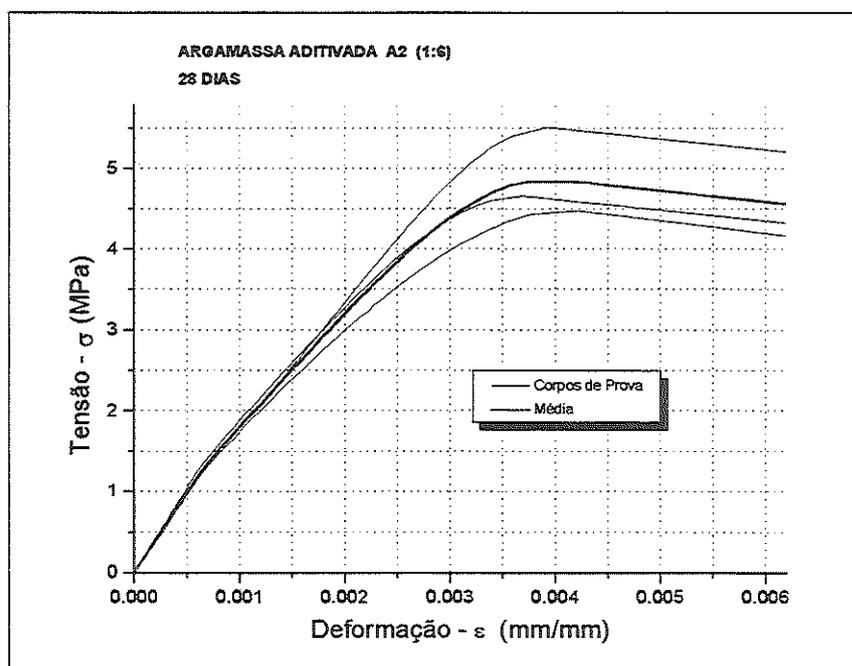


Figura 70 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A2 (28 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A3 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:9
Traço em Massa	1:9,37
Relação a/c	1,80
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 62 - Módulos de deformação para o traço A3 com 3 d.

Resistência máxima média	0,74MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,620GPa
Esec,0.4	0,550GPa
Esec,0.5	0,510GPa
Esec,0.6	0,470GPa
Esec,0.7	0,440GPa
Esec,0.8	0,410GPa
Esec,0.9	0,370GPa
Esec,1.0	0,265GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,28%

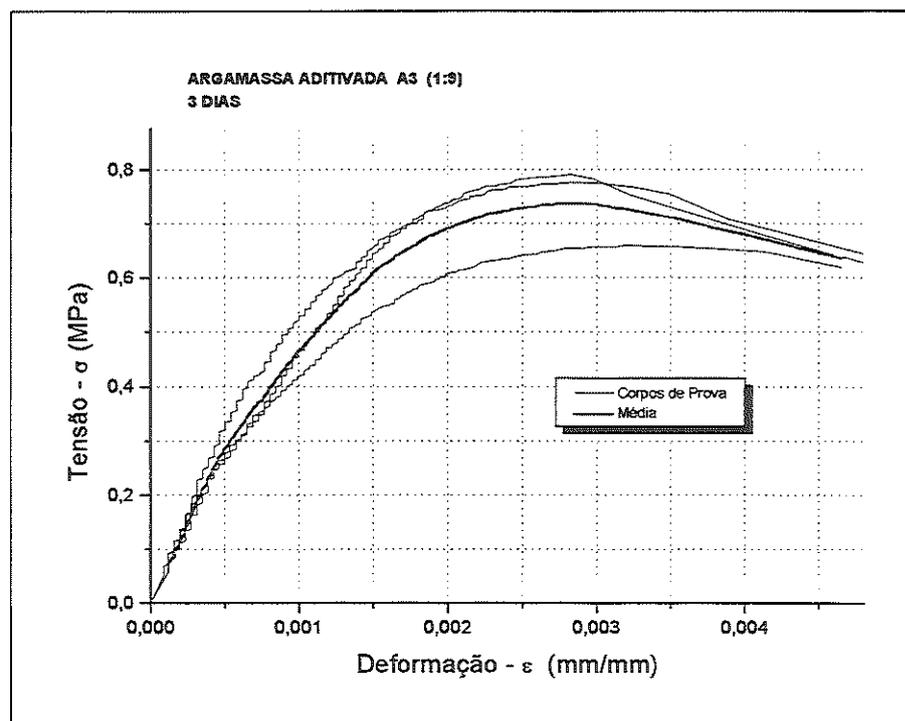


Figura 71 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (3 d)



ARGAMASSA ADITIVADA A3 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:9
Traço em Massa	1:9,37
Relação a/c	1,80
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 63 - Módulos de deformação para o traço A3 com 7 d.

Resistência máxima média	0,88MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,760GPa
Esec,0.4	0,630GPa
Esec,0.5	0,540GPa
Esec,0.6	0,410GPa
Esec,0.7	0,320GPa
Esec,0.8	0,280GPa
Esec,0.9	0,250GPa
Esec,1.0	0,200GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,44%

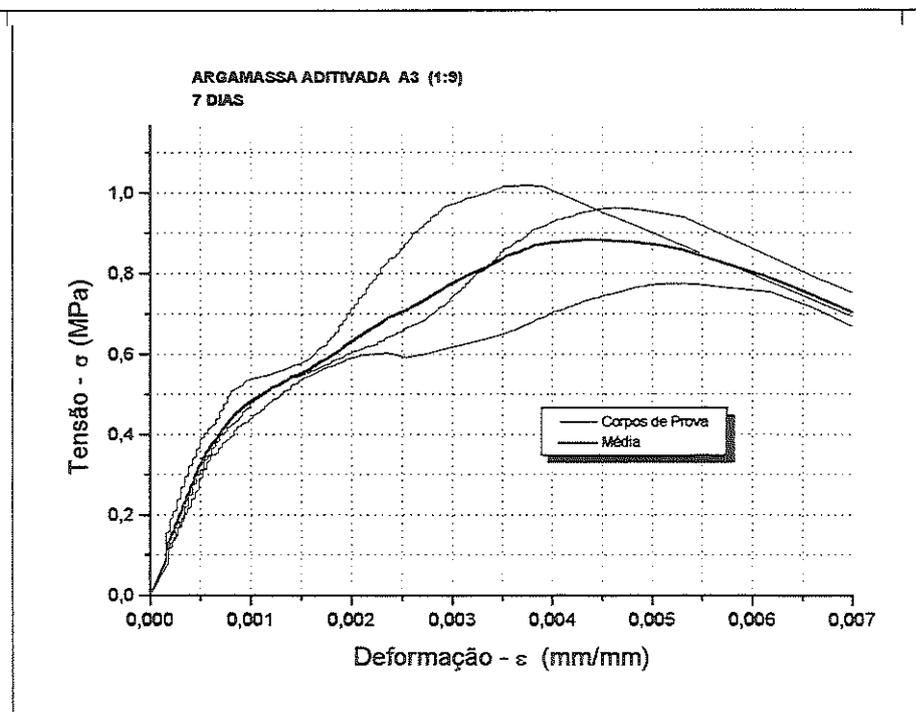


Figura 72 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (7 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A3 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:9
Traço em Massa	1:9,37
Relação a/c	1,80
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 64 - Módulos de deformação para o traço A3 com 28 d.

Resistência máxima média	1,50MPa
E _o - Módulo tangente inicial	1,02GPa
E _{sec,0.4}	0,91GPa
E _{sec,0.5}	0,81GPa
E _{sec,0.6}	0,75GPa
E _{sec,0.7}	0,71GPa
E _{sec,0.8}	0,67GPa
E _{sec,0.9}	0,63GPa
E _{sec,1.0}	0,52GPa
Deformação (ε) máxima média	0,29%

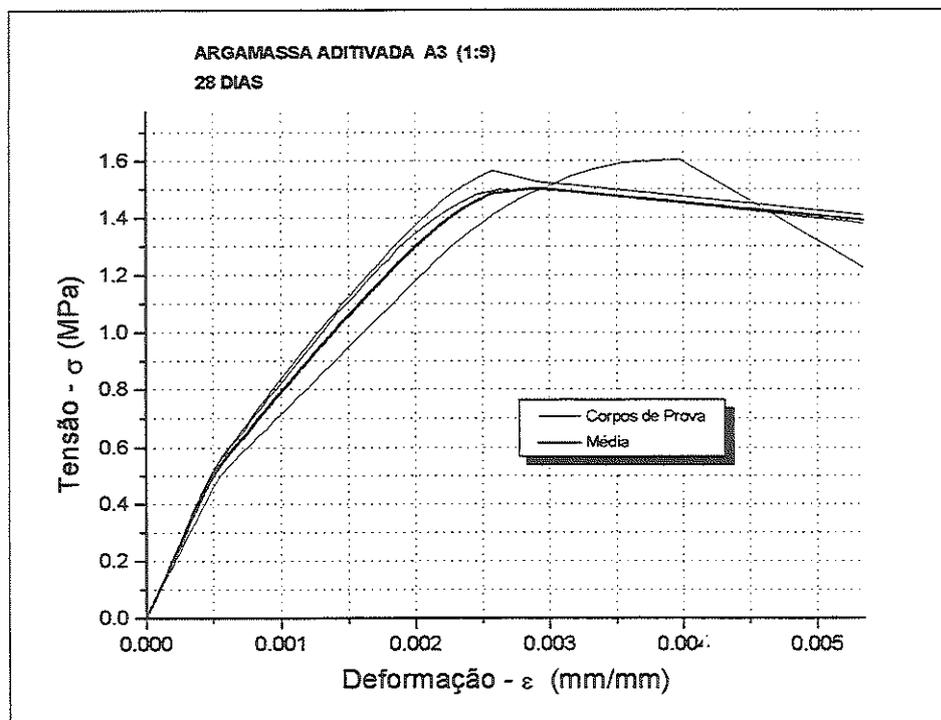


Figura 73 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A3 (28 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A4 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:12
Traço em Massa	1:12,5
Relação a/c	2,37
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 65 - Módulos de deformação para o traço A4 com 3 d.

Resistência máxima média	0,40MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,260GPa
Esec,0.4	0,255GPa
Esec,0.5	0,235GPa
Esec,0.6	0,227GPa
Esec,0.7	0,220GPa
Esec,0.8	0,215GPa
Esec,0.9	0,200GPa
Esec,1.0	0,155GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,26%

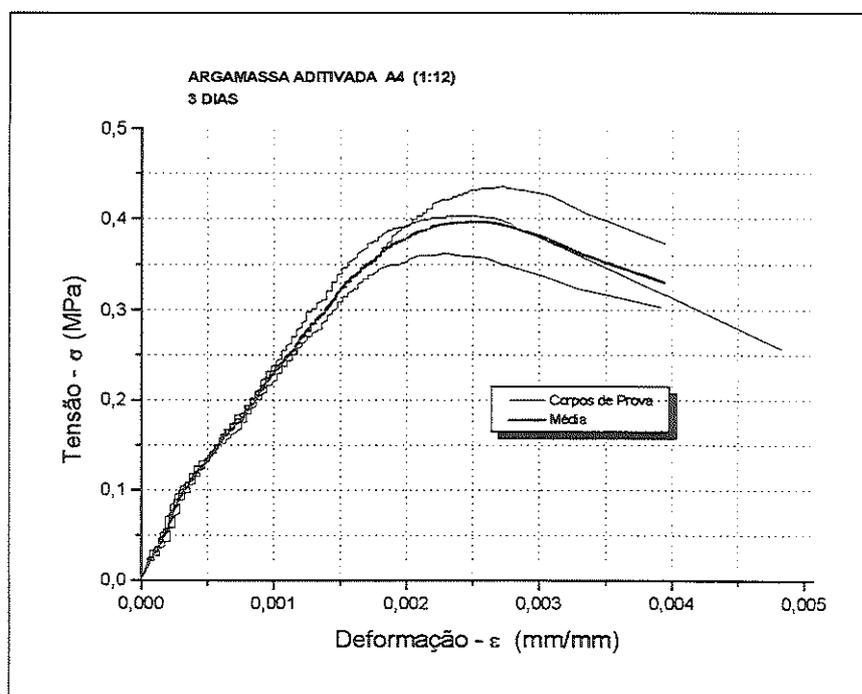


Figura 74 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (3 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A4 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:12
Traço em Massa	1:12,5
Relação a/c	2,37
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 66 - Módulos de deformação para o traço A4 com 7 d.

Resistência máxima média	0,35MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,310GPa
Esec,0.4	0,290GPa
Esec,0.5	0,250GPa
Esec,0.6	0,140GPa
Esec,0.7	0,100GPa
Esec,0.8	0,080GPa
Esec,0.9	0,075GPa
Esec,1.0	0,060GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,58%

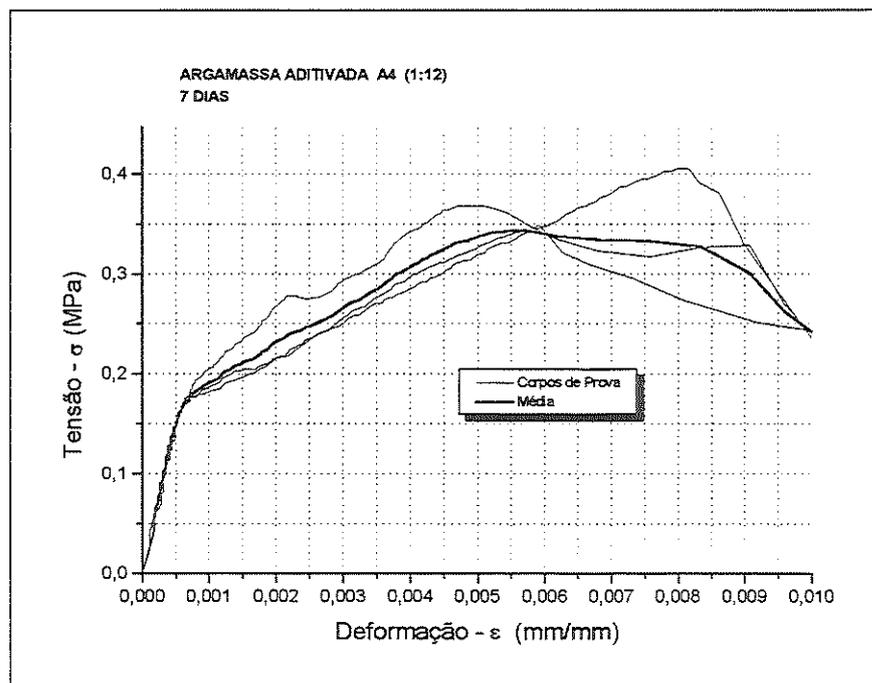


Figura 75 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (7 d)

ARGAMASSA ADITIVADA A4 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:12
Traço em Massa	1:12,5
Relação a/c	2,37
Teor de Aditivo	0,50ml/l areia

Tabela 67 - Módulos de deformação para o traço A4 com 28 d.

Resistência máxima média	0,82MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,65GPa
Esec,0.4	0,54GPa
Esec,0.5	0,47GPa
Esec,0.6	0,44GPa
Esec,0.7	0,42GPa
Esec,0.8	0,39GPa
Esec,0.9	0,37GPa
Esec,1.0	0,27GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,31%

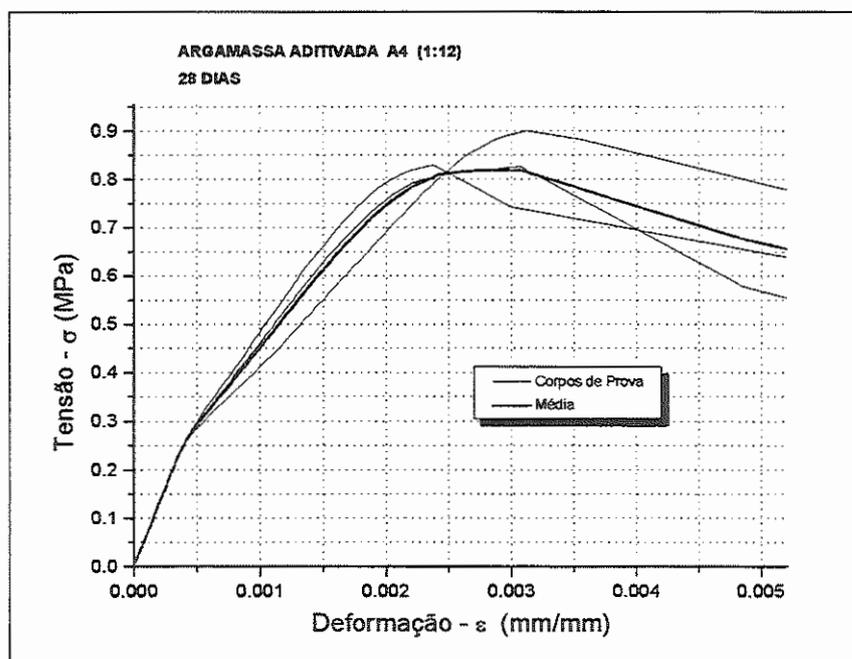


Figura 76 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa A4 (28 d)

ARGAMASSA MISTA M1 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:0,5:4,5
Traço em Massa	1:0,21:4,69
Relação a/c	1,09

Tabela 68 - Módulos de deformação para o traço M1 com 3 d.

Resistência máxima média	4,52MPa
Eo - Módulo tangente inicial	1,840GPa
Esec,0.4	1,800GPa
Esec,0.5	1,610GPa
Esec,0.6	1,500GPa
Esec,0.7	1,400GPa
Esec,0.8	1,320GPa
Esec,0.9	1,190GPa
Esec,1.0	0,890GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,51%

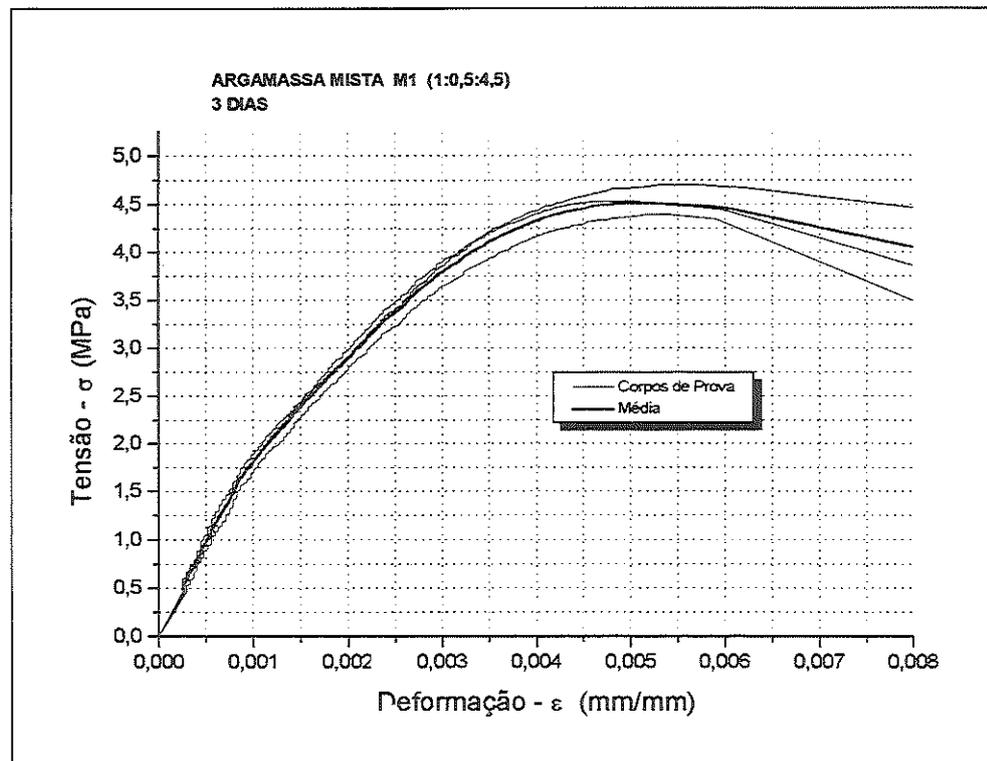


Figura 77 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (3 d)

ARGAMASSA MISTA M1 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:0,5:4,5
Traço em Massa	1:0,21:4,69
Relação a/c	1,09

Tabela 69 - Módulos de deformação para o traço M1 com 7 d.

Resistência máxima média	7,68MPa
E_0 - Módulo tangente inicial	2,660GPa
$E_{sec,0.4}$	2,650GPa
$E_{sec,0.5}$	2,510GPa
$E_{sec,0.6}$	2,400GPa
$E_{sec,0.7}$	2,290GPa
$E_{sec,0.8}$	2,180GPa
$E_{sec,0.9}$	2,020GPa
$E_{sec,1.0}$	1,620GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,47%

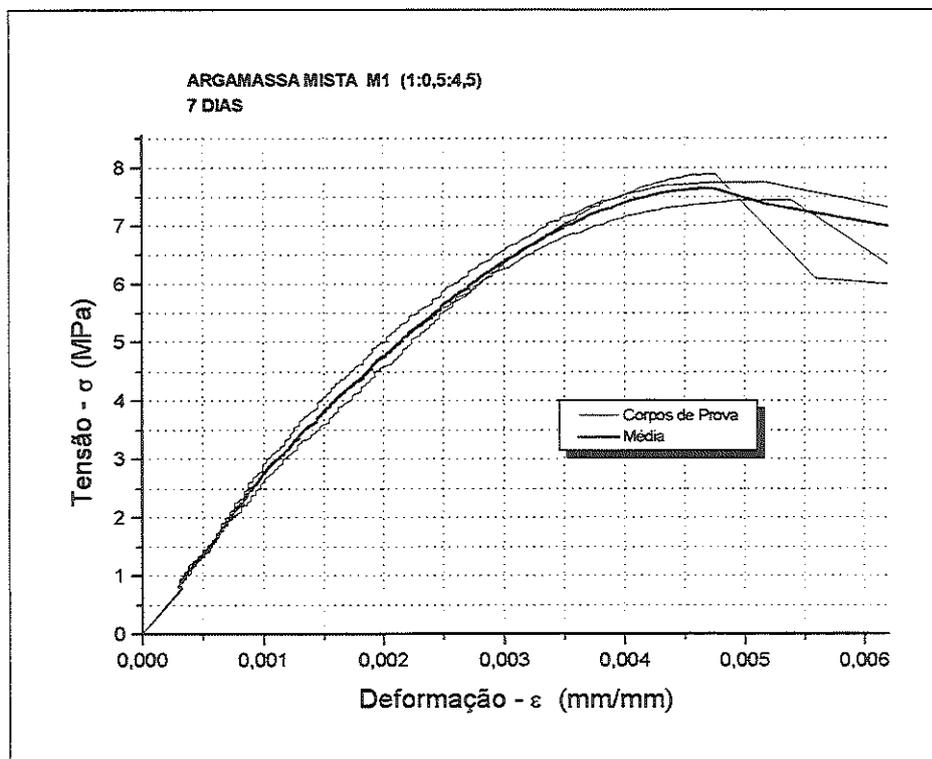


Figura 78 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (7 d)

ARGAMASSA MISTA M1 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:0,5:4,5
Traço em Massa	1:0,21:4,69
Relação a/c	1,09

Tabela 70 - Módulos de deformação para o traço M1 com 28 d.

Resistência máxima média	11,71MPa
E _o - Módulo tangente inicial	3,10GPa
E _{sec,0.4}	2,89GPa
E _{sec,0.5}	2,81GPa
E _{sec,0.6}	2,75GPa
E _{sec,0.7}	2,70GPa
E _{sec,0.8}	2,62GPa
E _{sec,0.9}	2,52GPa
E _{sec,1.0}	2,09GPa
Deformação (ε) máxima média	0,56%

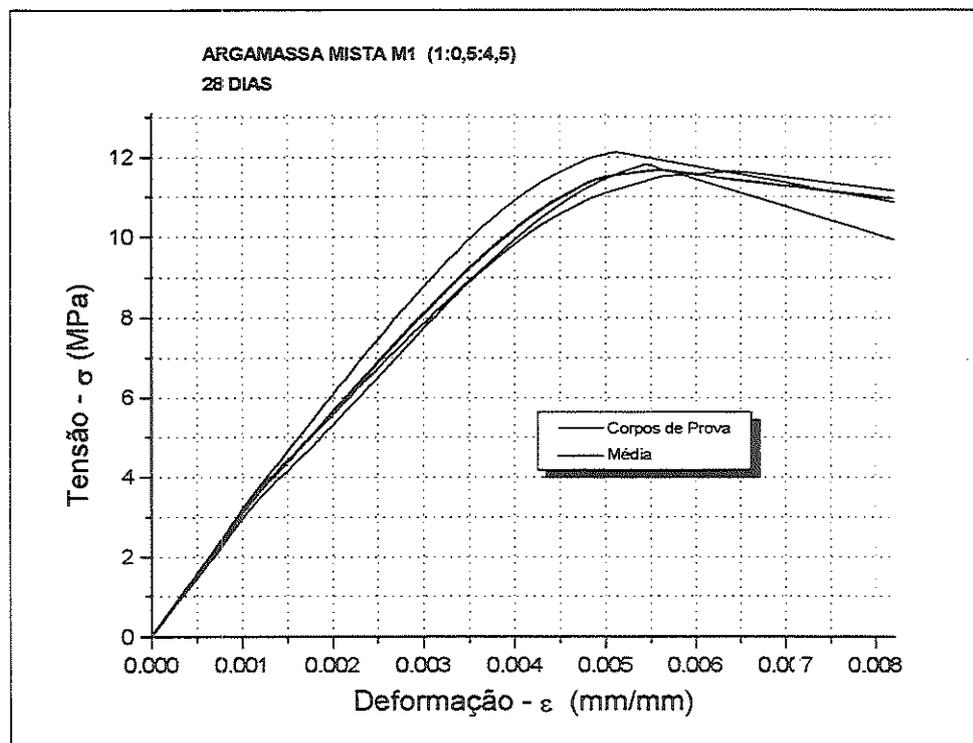


Figura 79 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M1 (28 d)

ARGAMASSA MISTA M2 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:1:6
Traço em Massa	1:0,43:6,25
Relação a/c	1,44

Tabela 71 - Módulos de deformação para o traço M2 com 3 d.

Resistência máxima média	2,38MPa
E _o - Módulo tangente inicial	1,370GPa
E _{sec,0.4}	1,350GPa
E _{sec,0.5}	1,250GPa
E _{sec,0.6}	1,190GPa
E _{sec,0.7}	1,110GPa
E _{sec,0.8}	1,030GPa
E _{sec,0.9}	0,920GPa
E _{sec,1.0}	0,660GPa
Deformação (ε) máxima média	0,36%

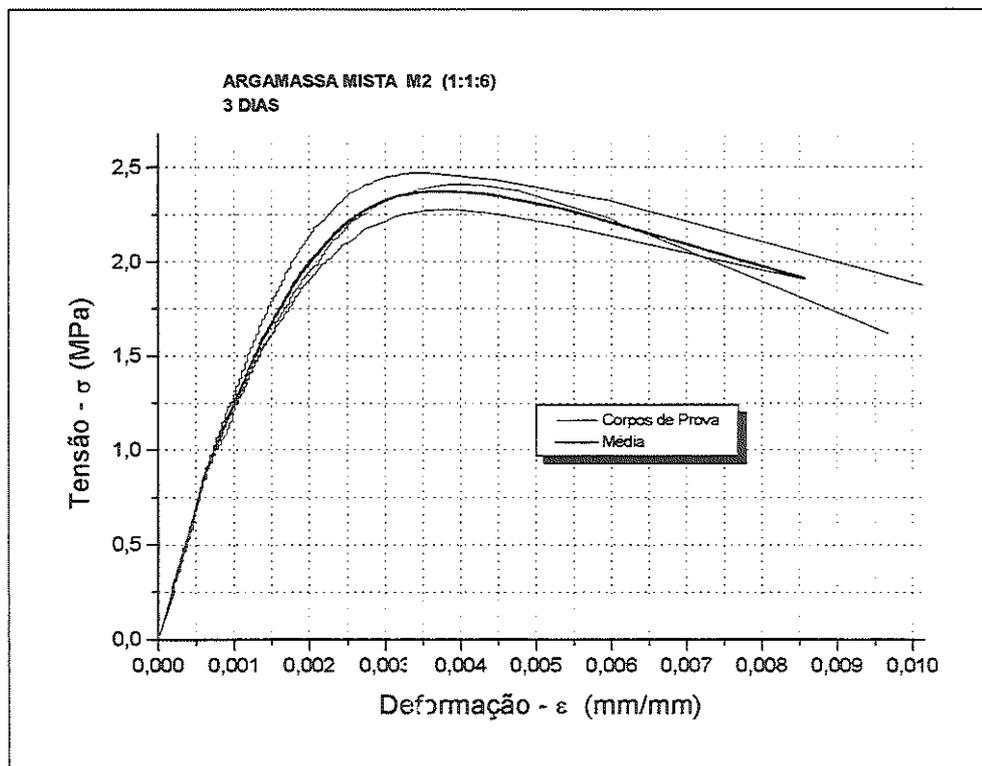


Figura 80 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (3 d)

ARGAMASSA MISTA M2 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:1:6
Traço em Massa	1:0,43:6,25
Relação a/c	1,44

Tabela 72 - Módulos de deformação para o traço M2 com 7 d.

Resistência máxima média	4,29MPa
E _o - Módulo tangente inicial	1,980GPa
E _{sec,0.4}	1,800GPa
E _{sec,0.5}	1,700GPa
E _{sec,0.6}	1,640GPa
E _{sec,0.7}	1,550GPa
E _{sec,0.8}	1,460GPa
E _{sec,0.9}	1,320GPa
E _{sec,1.0}	0,920GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,47%

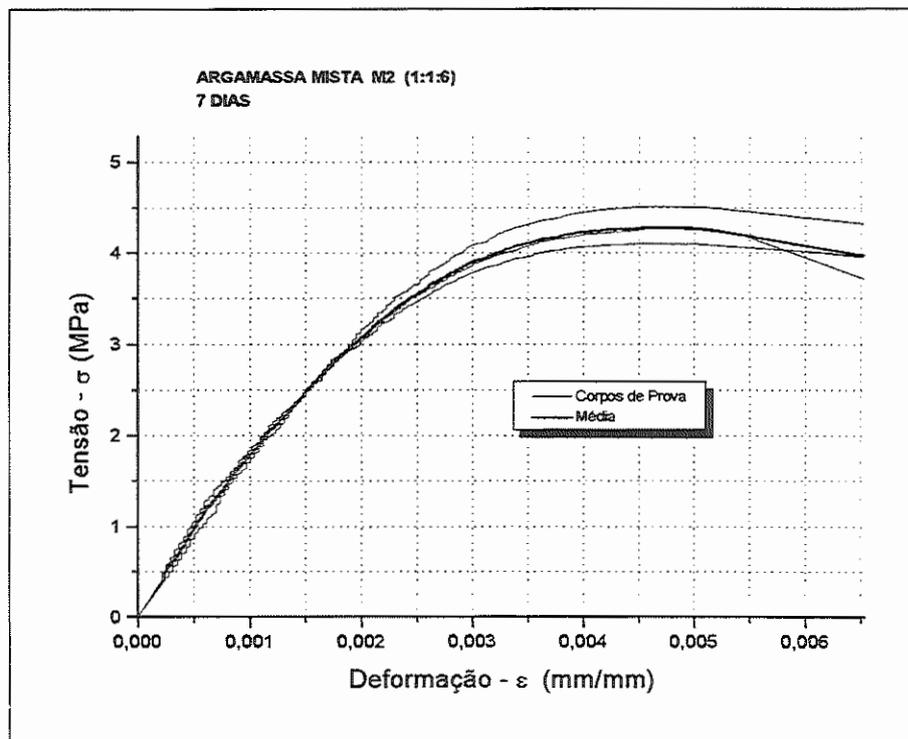


Figura 81 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (7 d)

ARGAMASSA MISTA M2 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:1:6
Traço em Massa	1:0,43:6,25
Relação a/c	1,44

Tabela 73 - Módulos de deformação para o traço M2 com 28 d.

Resistência máxima média	6,77MPa
E _o - Módulo tangente inicial	2,36GPa
E _{sec,0.4}	2,27GPa
E _{sec,0.5}	2,19GPa
E _{sec,0.6}	2,15GPa
E _{sec,0.7}	2,09GPa
E _{sec,0.8}	2,02GPa
E _{sec,0.9}	1,86GPa
E _{sec,1.0}	1,45GPa
Deformação (ε) máxima média	0,45%

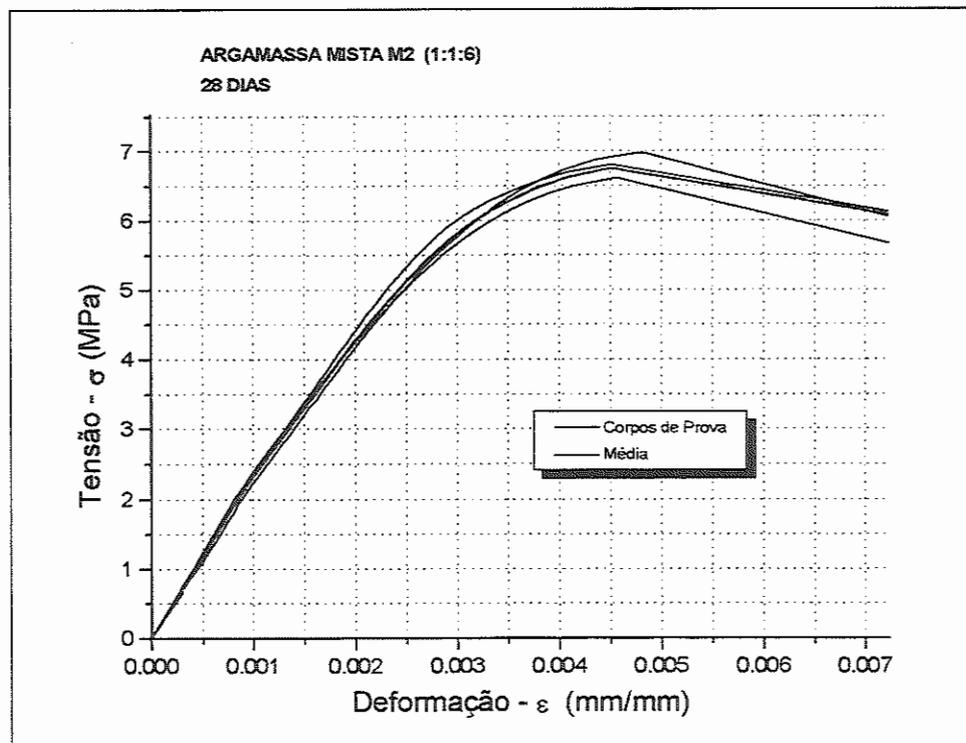


Figura 82 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M2 (28 d)

ARGAMASSA MISTA M3 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:2:9
Traço em Massa	1:0,86:9,37
Relação a/c	2,19

Tabela 74 - Módulos de deformação para o traço M3 com 3 d.

Resistência máxima média	0,97MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,690GPa
Esec,0.4	0,580GPa
Esec,0.5	0,520GPa
Esec,0.6	0,460GPa
Esec,0.7	0,440GPa
Esec,0.8	0,400GPa
Esec,0.9	0,340GPa
Esec,1.0	0,220GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,44%

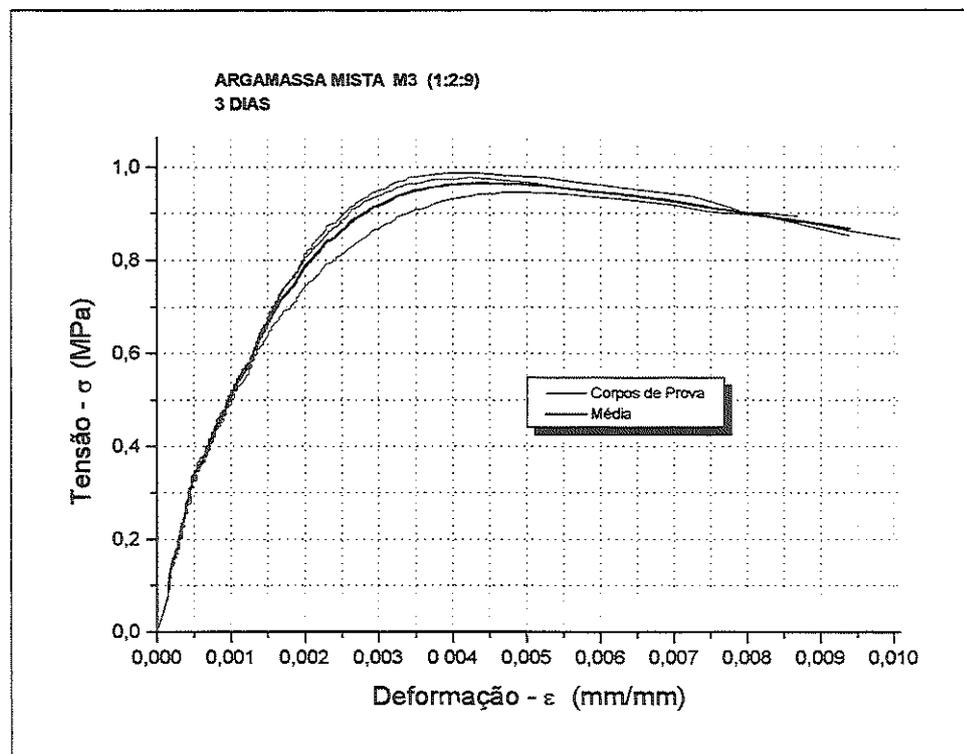


Figura 83 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (3 d)

ARGAMASSA MISTA M3 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:2:9
Traço em Massa	1:0,86:9,37
Relação a/c	2,19

Tabela 75 - Módulos de deformação para o traço M3 com 7 d.

Resistência máxima média	1,98MPa
Eo - Módulo tangente inicial	1,200GPa
Esec,0.4	1,200GPa
Esec,0.5	1,090GPa
Esec,0.6	1,030GPa
Esec,0.7	0,940GPa
Esec,0.8	0,870GPa
Esec,0.9	0,770GPa
Esec,1.0	0,500GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,40%

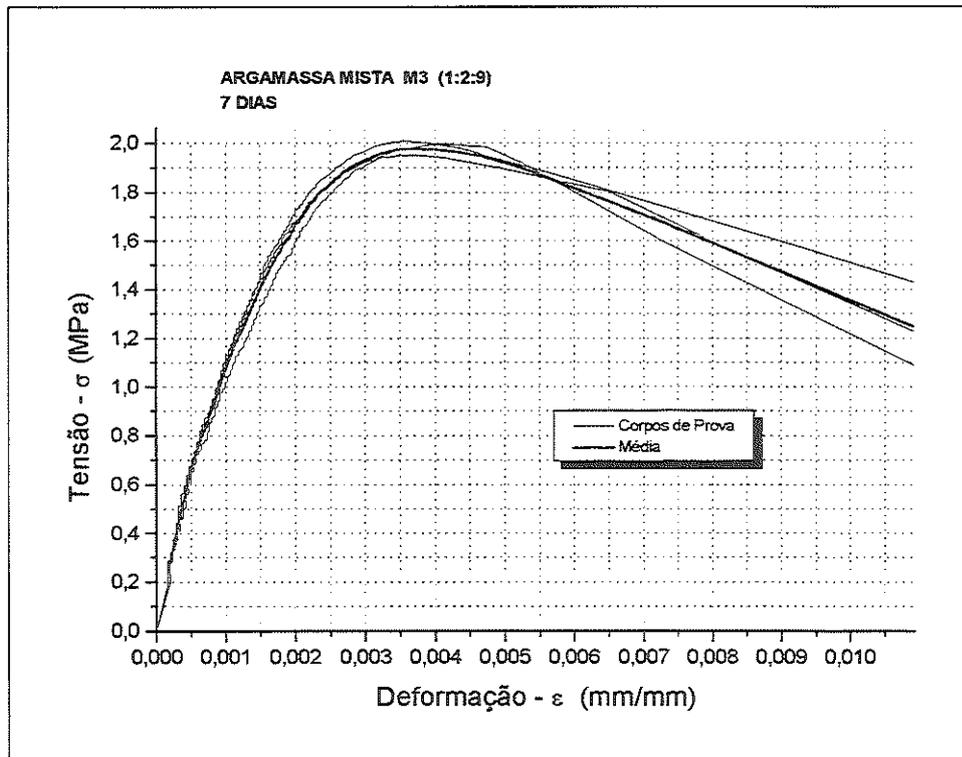


Figura 84 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (7 d)

ARGAMASSA MISTA M3 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:2:9
Traço em Massa	1:0,86:9,37
Relação a/c	2,19

Tabela 76 - Módulos de deformação para o traço M3 com 28 d.

Resistência máxima média	2,84MPa
Eo - Módulo tangente inicial	1,33GPa
Esec,0.4	1,22GPa
Esec,0.5	1,16GPa
Esec,0.6	1,10GPa
Esec,0.7	1,06GPa
Esec,0.8	0,99GPa
Esec,0.9	0,91GPa
Esec,1.0	0,66GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,43%

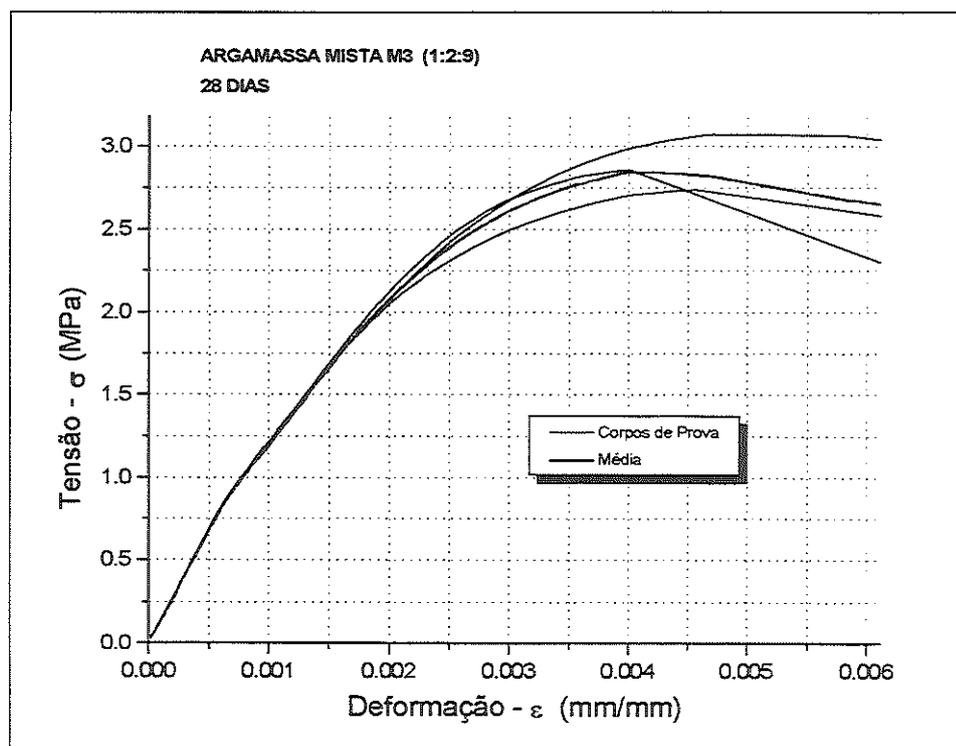


Figura 85 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M3 (28 d)

ARGAMASSA MISTA M4 3D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3:12
Traço em Massa	1:1,28:12,5
Relação a/c	2,99

Tabela 77 - Módulos de deformação para o traço M4 com 3 d.

Resistência máxima média	0,53MPa
E _o - Módulo tangente inicial	0,400GPa
E _{sec,0.4}	0,360GPa
E _{sec,0.5}	0,320GPa
E _{sec,0.6}	0,290GPa
E _{sec,0.7}	0,270GPa
E _{sec,0.8}	0,240GPa
E _{sec,0.9}	0,210GPa
E _{sec,1.0}	0,110GPa
Deformação (ε) máxima média	0,48%

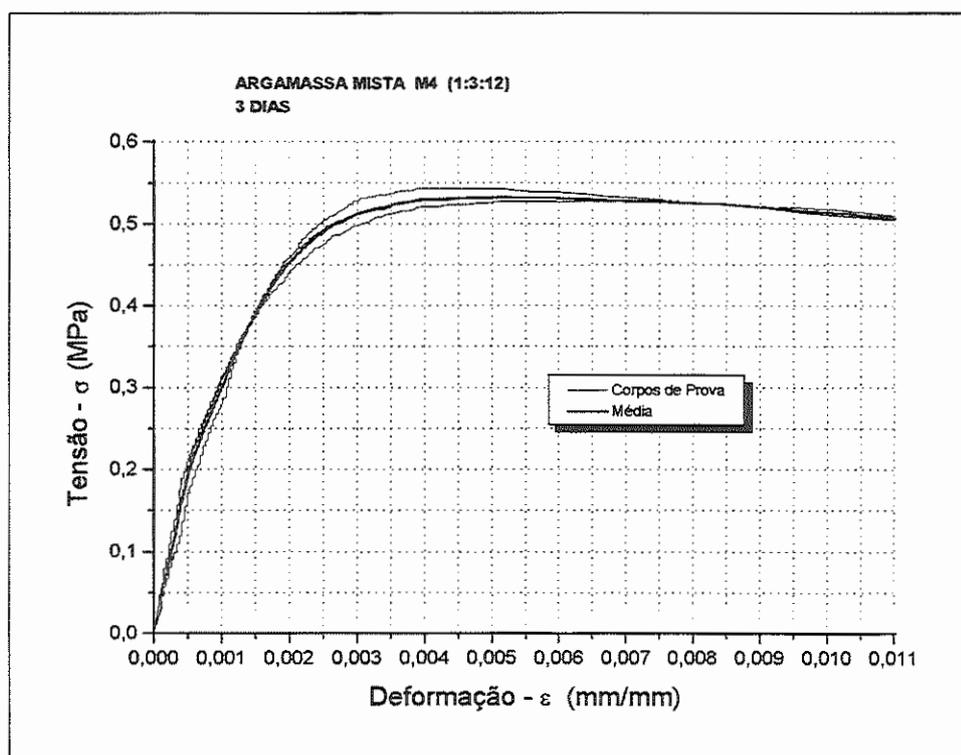


Figura 86 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (3 d)

ARGAMASSA MISTA M4 7D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3:12
Traço em Massa	1:1,28:12,5
Relação a/c	2,99

Tabela 78 - Módulos de deformação para o traço M4 com 7 d.

Resistência máxima média	1,17MPa
Eo - Módulo tangente inicial	0,690GPa
Esec,0.4	0,650GPa
Esec,0.5	0,590GPa
Esec,0.6	0,540GPa
Esec,0.7	0,500GPa
Esec,0.8	0,450GPa
Esec,0.9	0,400GPa
Esec,1.0	0,280GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,42%

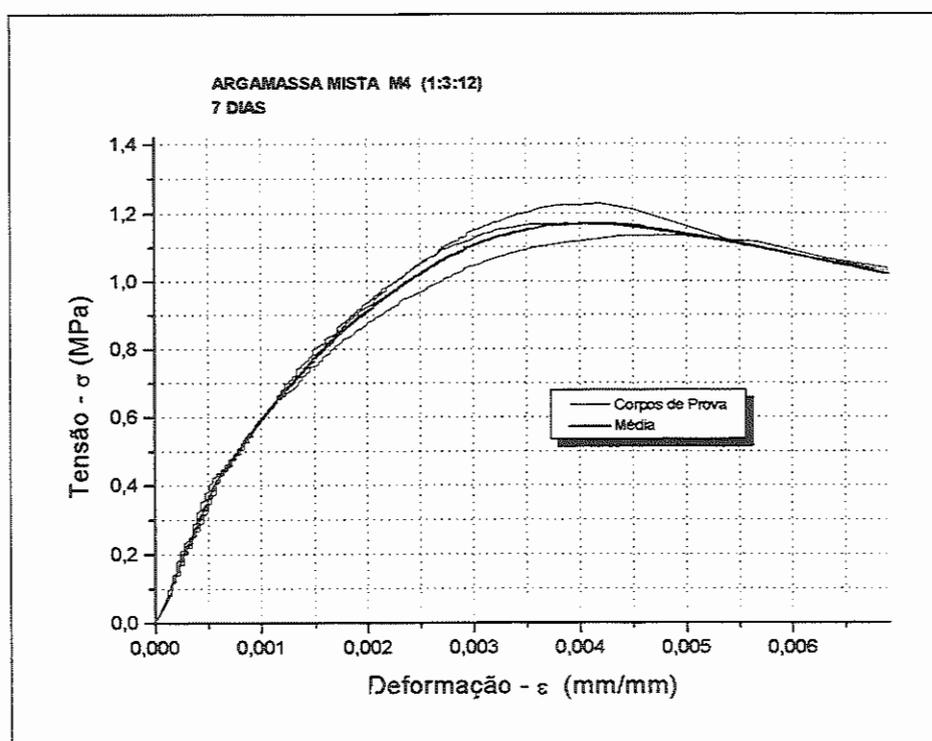


Figura 87 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (7 d)

ARGAMASSA MISTA M4 28D

Características de Dosagem	
Traço em Volume	1:3:12
Traço em Massa	1:1,28:12,5
Relação a/c	2,99

Tabela 79 - Módulos de deformação para o traço M4 com 28 d.

Resistência máxima média	1,51MPa
E _o - Módulo tangente inicial	0,93GPa
E _{sec,0.4}	0,89GPa
E _{sec,0.5}	0,82GPa
E _{sec,0.6}	0,77GPa
E _{sec,0.7}	0,72GPa
E _{sec,0.8}	0,67GPa
E _{sec,0.9}	0,60GPa
E _{sec,1.0}	0,42GPa
Deformação (ϵ) máxima média	0,36%

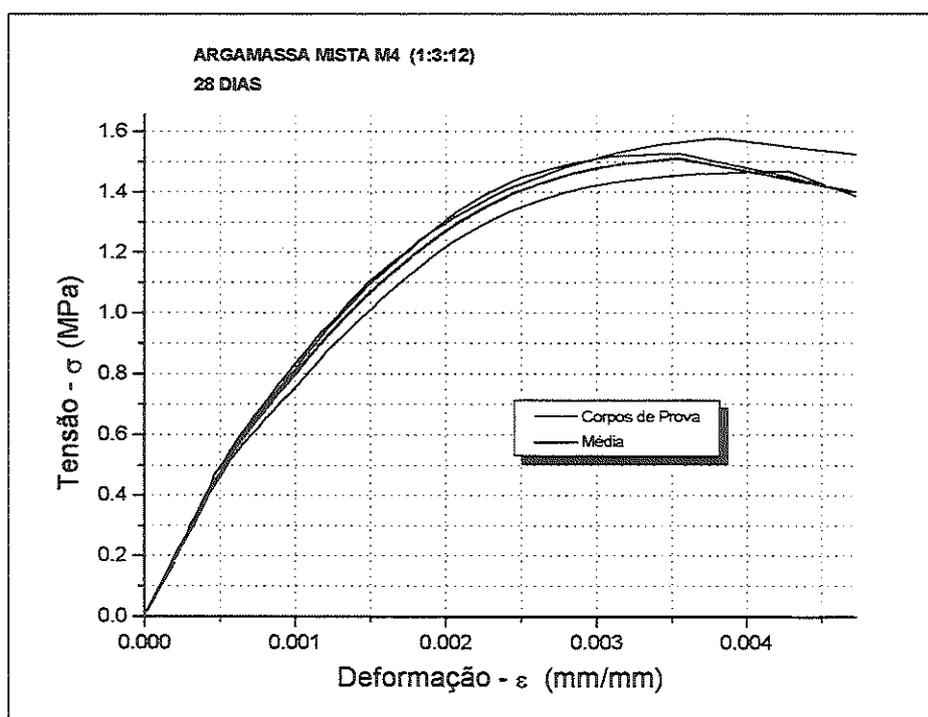


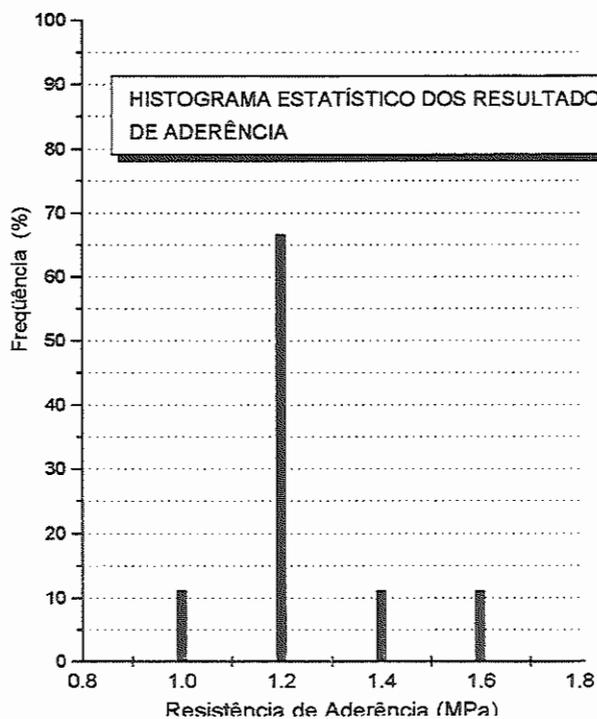
Figura 88 - Diagrama Tensão - Deformação para a argamassa M4 (28 d)

11.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA A1 (1:3) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	2486	4,90	1886	1,32	7			100		
2	2889	4,90	1886	1,53	24	80		20		
3	2270	4,90	1886	1,20	-2			100		
4	2251	4,90	1886	1,19	-3			100		
5	2420	4,90	1886	1,28	4			100		
6	2270	4,90	1886	1,20	-2			100		
7	2186	4,90	1886	1,16	-6			100		
8	2158	4,90	1886	1,14	-7			100		
9	1961	4,90	1886	1,04	-16		100			
10	2354	4,90	1886	1,25	1			100		
MEDIA				1,23	MPa					
Desvio Médio				0,09	MPa					
Desvio Padrão				0,13	MPa					
Coef. Variação				11	%					

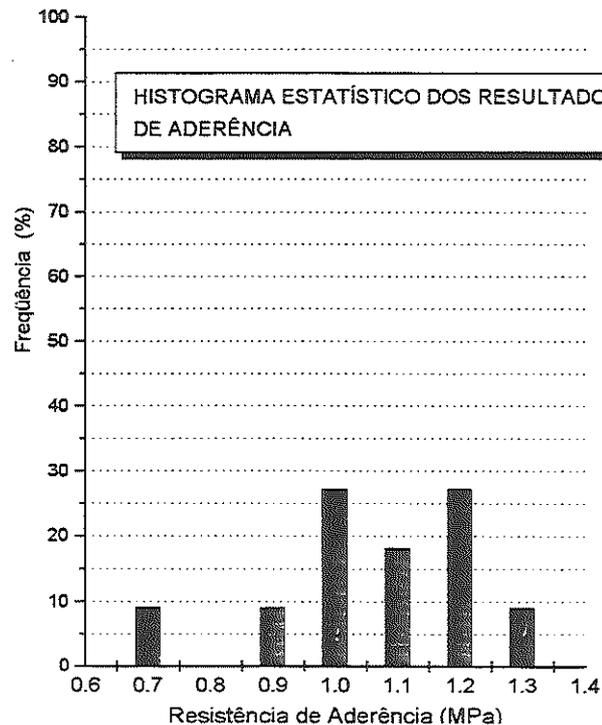
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA A2 (1:6) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	1886	4,90	1886	1,00	-6			100		
2	2233	4,90	1886	1,18	11		100			
3	2036	4,90	1886	1,08	1			100		
4	1380	4,90	1886	0,73	-31			100		
5	2036	4,90	1886	1,08	1			100		
6	1952	4,90	1886	1,03	-3			100		
7	1727	4,90	1886	0,92	-14			100		
8	1914	4,90	1886	1,02	-5	80	20			
9	2345	4,90	1886	1,24	17		100			
10	2223	4,90	1886	1,18	10		100			
11	2411	4,90	1886	1,28	20		100			
MÉDIA				1,07	MPa					
Desvio Médio				0,12	MPa					
Desvio Padrão				0,16	MPa					
Coef. Variação				15	%					

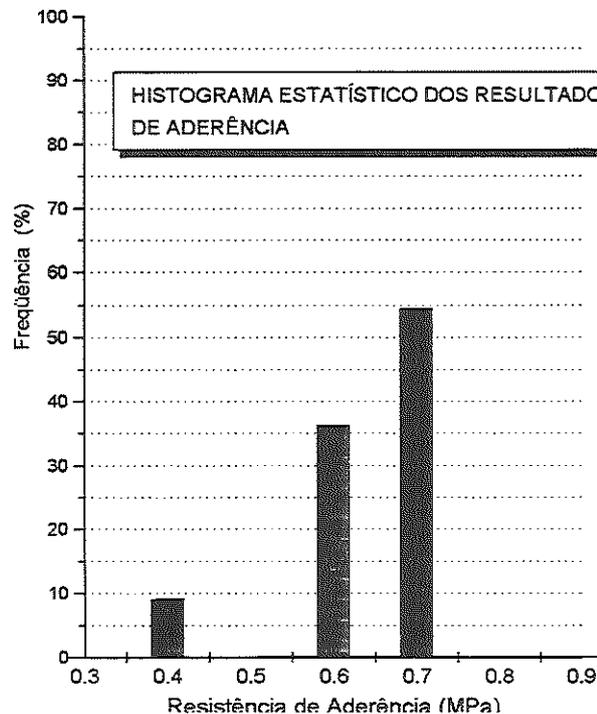
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA A3 (1:9) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	659	4,80	1810	0,36	-42		100			
2	1183	4,80	1810	0,65	4		100			
3	1277	4,80	1810	0,71	12	40	60			
4	1052	4,80	1810	0,58	-7	40	60			
5	1127	4,80	1810	0,62	-1	50	50			
6	1211	4,80	1810	0,67	7		100			
7	1258	4,80	1810	0,70	11	30	70			
8	1024	4,80	1810	0,57	-10	80	20			
9	1202	4,80	1810	0,66	6	80	20			
10	1314	4,80	1810	0,73	16		100			
11	1202	4,80	1810	0,66	6		100			
MÉDIA				0,63	MPa					
Desvio Médio				0,07	MPa					
Desvio Padrão				0,10	MPa					
Coef. Variação				16	%					

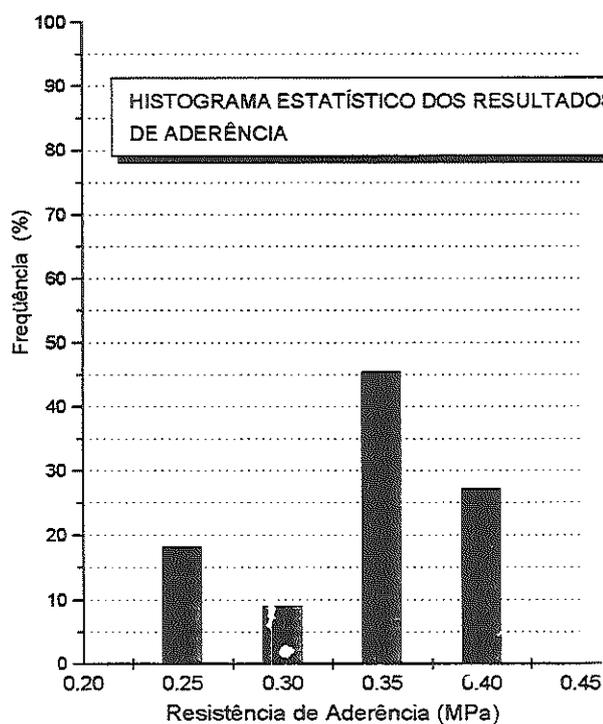
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA A4 (1:12) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	659	4,80	1810	0,36	6		100			
2	640	4,80	1810	0,35	3		100			
3	499	4,80	1810	0,28	-20		100			
4	471	4,80	1810	0,26	-24		100			
5	715	4,80	1810	0,39	15	20	80			
6	471	4,80	1810	0,26	-24		100			
7	630	4,80	1810	0,35	1		100			
8	743	4,80	1810	0,41	19		100			
9	659	4,80	1810	0,36	6	60	40			
10	602	4,80	1810	0,33	-3	30	70			
11	752	4,80	1810	0,42	21	10	90			
MÉDIA				0,34	MPa					
Desvio Médio				0,04	MPa					
Desvio Padrão				0,06	MPa					
Coef. Variação				16	%					

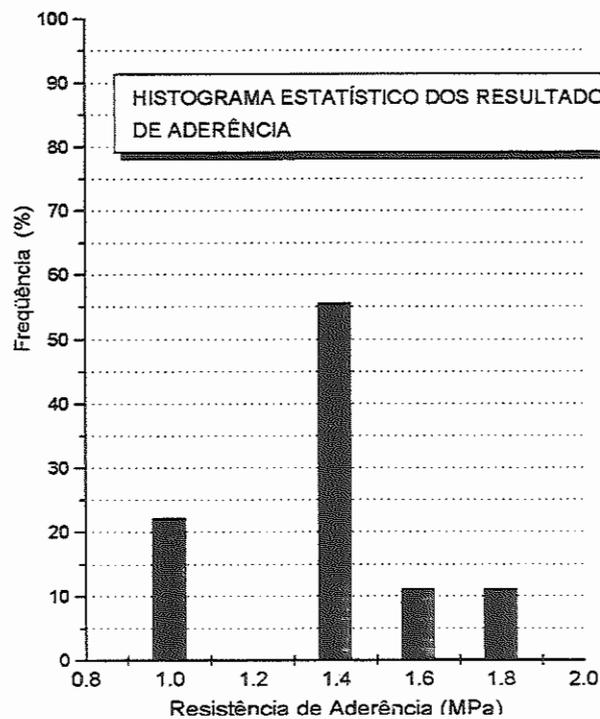
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA M1 (1:0,5:4,5) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	3329	4,90	1886	1,77	28	30	70			
2	2673	4,90	1886	1,42	3			100		
3	1970	4,90	1886	1,04	-24		100			
4	3020	4,90	1886	1,60	16			100		
5	2551	4,90	1886	1,35	-2		100			
6	2626	4,90	1886	1,39	1		100			
7	2748	4,90	1886	1,46	6		100			
8	1877	4,90	1886	1,00	-28		100			
9	2589	4,90	1886	1,37	0		100			
MÉDIA				1,38	MPa					
Desvio Médio				0,17	MPa					
Desvio Padrão				0,24	MPa					
Coef. Variação				18	%					

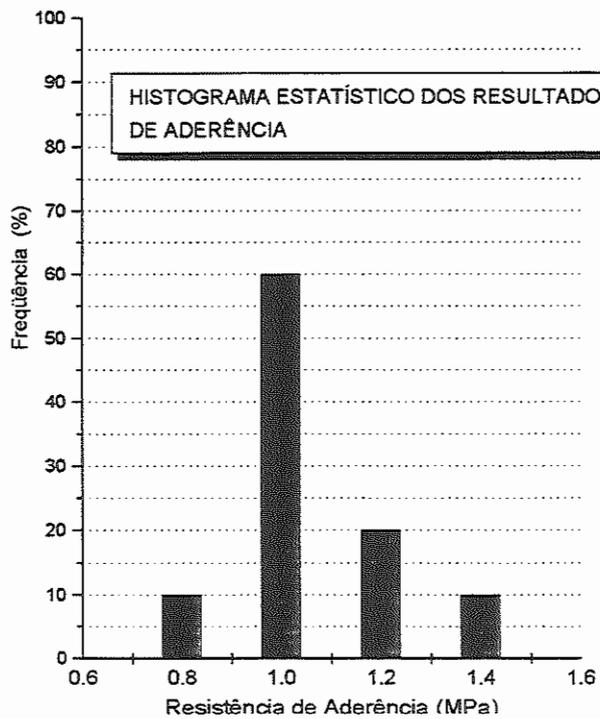
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA M2 (1:1:6) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	2364	4,90	1886	1,25	18	50	50			
2	2584	4,90	1886	1,37	29		100			
3	1858	4,90	1886	0,99	-7	30	70			
4	2345	4,90	1886	1,24	17		100			
5	1586	4,90	1886	0,84	-21		100			
6	1830	4,90	1886	0,97	-9		100			
7	1998	4,90	1886	1,06	0	50	50			
8	1970	4,90	1886	1,04	-2	60	40			
9	1783	4,90	1886	0,95	-11		100			
10	1708	4,90	1886	0,91	-15		100			
MÉDIA				1,06	MPa					
Desvio Médio				0,14	MPa					
Desvio Padrão				0,17	MPa					
Coef. Variação				16	%					

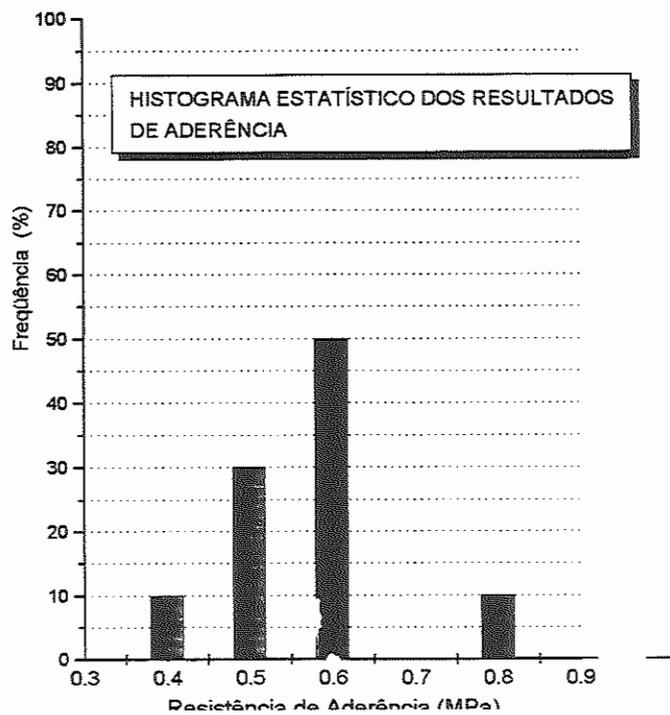
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA M3 (1:2:9) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	1080	4,90	1886	0,57	-1		10			
2	837	4,90	1886	0,44	-23	10	90			
3	1071	4,90	1886	0,57	-2			100		
4	1586	4,90	1886	0,84	46				100	
5	1183	4,90	1886	0,63	9	20	80			
6	958	4,90	1886	0,51	-12	50	50			
7	958	4,90	1886	0,51	-12				100	
8	1090	4,90	1886	0,58	0				100	
9	902	4,90	1886	0,48	-17	15			85	
10	1221	4,90	1886	0,65	12				100	
MÉDIA				0,58	MPa					
Desvio Médio				0,08	MPa					
Desvio Padrão				0,11	MPa					
Coef. Variação				20	%					

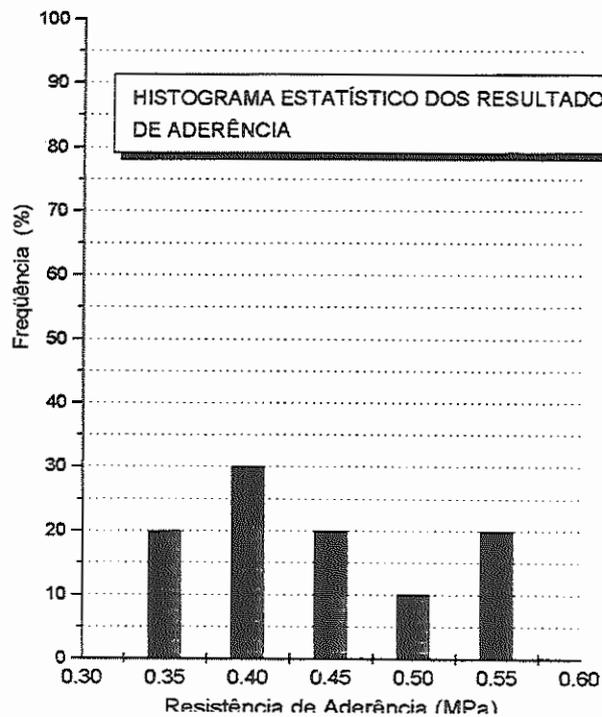
- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO
EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO
ARGAMASSA M4 (1:3:12) - IDADE 28 DIAS**

Corpo de Prova	Carga (N)	Diâmetro (cm)	Secção (mm ²)	Tensão (MPa)	Desvio (%)	Forma de Ruptura (%)				
						(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1	788	4,90	1886	0,42	-6	100				
2	674	4,90	1886	0,36	-20	100				
3	980	4,90	1886	0,52	17	100				
4	1002	4,90	1886	0,53	19	100				
5	831	4,90	1886	0,44	-1	100				
6	852	4,90	1886	0,45	1	100				
7	688	4,90	1886	0,37	-18	100				
8	767	4,90	1886	0,41	-9	100				
9	781	4,90	1886	0,41	-7	100				
10	1044	4,90	1886	0,55	24	100				
MÉDIA				0,45	MPa					
Desvio Médio				0,05	MPa					
Desvio Padrão				0,07	MPa					
Coef. Variação				15	%					

- (a) ruptura na interface argamassa/substrato
 (b) ruptura da argamassa de revestimento
 (c) ruptura do substrato
 (d) ruptura na interface revestimento/cola
 (e) ruptura na cola



11.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

São apresentados dados relativos a todas as argamassas estudadas na presente pesquisa, a 28 d.

Foi determinado para três corpos de prova de cada traço a absorção de água a 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação desses em contato com a água.

Os resultados das medidas dos três corpos de prova de cada traço são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 80– Anotação dos dados relativos ao ensaio de absorção de água por capilaridade nos corpos de prova das argamassas mistas e aditivadas

Identificação	Exemplar	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	M inicial (B) (g)	M 3h (A) (g)	M 6h (A) (g)	M 24h (A) (g)	M 48h (A) (g)	M 72h (A) (g)
A1	1	4,98	10,10	357,50	364,60	368,25	378,68	384,20	386,95
	2			355,90	361,96	364,80	375,32	381,45	384,90
	3			353,54	360,61	364,14	375,74	382,34	385,85
A2	1	5,00	10,00	323,60	348,73	358,03	359,38	359,58	359,75
	2			321,16	342,11	352,93	357,42	357,65	357,86
	3			324,99	349,96	359,88	361,63	361,88	362,04
A3	1	5,00	9,95	306,12	344,67	344,90	345,16	345,33	345,50
	2			303,53	341,58	341,95	342,24	342,43	342,59
	3			310,94	350,28	350,43	350,75	350,97	351,16
A4	1	4,95	10,08	299,13	338,59	338,59	338,92	339,12	339,30
	2			304,60	343,82	343,91	344,20	344,35	344,50
	3			304,92	342,86	342,93	343,23	343,35	343,48
M1	1	5,00	9,95	365,18	378,60	386,83	409,50	410,71	411,35
	2			362,17	382,31	392,99	408,20	409,09	409,70
	3			371,05	386,93	396,48	417,48	418,47	419,17
M2	1	5,00	10,06	366,85	397,70	410,02	416,01	416,78	417,40
	2			362,16	388,17	401,69	411,56	412,38	413,00
	3			363,12	388,84	401,20	412,75	413,65	414,23
M3	1	4,95	9,93	351,02	391,59	398,68	399,84	400,70	401,30
	2			353,26	401,90	404,08	404,93	405,73	406,30
	3			347,95	385,39	397,42	398,86	399,62	400,23
M4	1	4,98	10,00	344,56	395,10	395,78	396,69	397,63	398,25
	2			344,40	396,48	396,67	397,48	398,30	398,87
	3			350,87	403,38	403,87	404,76	405,67	406,30

A média dos três corpos de prova de cada traço são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 81– Absorção de água por capilaridade média dos três cps.

<i>Argamassa</i>	<i>Absorção a 3horas (g/cm2)</i>	<i>Absorção a 6horas (g/cm2)</i>	<i>Absorção a 24horas (g/cm2)</i>	<i>Absorção a 48horas (g/cm2)</i>	<i>Absorção a 72horas (g/cm2)</i>
A1	0.34	0.51	1.07	1.38	1.54
A2	1.21	1.72	1.85	1.86	1.87
A3	1.97	1.98	2.00	2.01	2.01
A4	1.98	1.98	2.00	2.01	2.01
M1	0.84	1.32	2.32	2.37	2.41
M2	1.40	2.05	2.52	2.56	2.59
M3	2.15	2.51	2.57	2.61	2.64
M4	2.63	2.66	2.70	2.75	2.78

11.5 ROTINA COMPUTACIONAL EM FORTRAN

Esta rotina em fortran serve para avaliação da evolução das tensões devido retração impedida de maneira incremental. Aqui não está implementado a análise da relaxação do material.

```

C
C          PROGRAMA PARA CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO
EQUIVALENTE POR RETRAÇÃO CONSIDERANDO
C          A VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA
COM O TEMPO
C
C          PROGRAM RETR_ARG
C
C          DECLARACAO DE VARIAVEIS
C
C          IMPLICIT REAL*8 (A-H,M-Z)
          IMPLICIT INTEGER (I,J,K,L)
C
          REAL*8 MOD_ELAS[ALLOCATABLE](:),EPCS[ALLOCATABLE](:),
+
TEMPO_MOD_ELAS[ALLOCATABLE](:),TEMPO_EPCS[ALLOCATABLE](:)
          INTEGER Q_M_E,Q_EPCS,INCR
          CHARACTER*8 ENTARQ
C
C          LEITURA DE DADOS
C
C          WRITE(*,1)
1  FORMAT(//,' NOME DO ARQUIVO DE DADOS :',\ )
          READ(*,10) ENTARQ
10  FORMAT(A8)
          OPEN (2, FILE = ENTARQ//'.ENT',STATUS='UNKNOWN')
          OPEN (3, FILE = ENTARQ//'.SOL',STATUS='UNKNOWN')
C
C
          READ(2,*)
          READ(2,*) Q_M_E
          ALLOCATE(MOD_ELAS(Q_M_E))
          ALLOCATE(TEMPO_MOD_ELAS(Q_M_E))
          DO i=1,Q_M_E
              READ(2,2)TEMPO_MOD_ELAS(i),MOD_ELAS(i)
          ENDDO
2  FORMAT(2(F20.0))
C
          READ(2,*)
          READ(2,*) Q_EPCS
          ALLOCATE(EPCS(Q_EPCS))
          ALLOCATE(TEMPO_EPCS(Q_EPCS))
          DO i=1,Q_EPCS
              READ(2,3)TEMPO_EPCS(i),EPCS(i)

```

```

        ENDDO
3      FORMAT(2(F20.0))
C
        READ(2,*)
        READ(2,4) DIAINI
4      FORMAT(F20.0)
C
        CLOSE (2)
C
        WRITE(*,5)
5      FORMAT(//,'  NUMERO DE INCREMENTOS DE TENSÃO :',\ )
        READ(*,*) INCR
C
        WRITE(*,6)
6      FORMAT(//,'  IDADE DA ANALISE :',\ )
        READ(*,*) DIAFIM
C
        DELTA_TEMPO=(DIAFIM-DIAINI)/INCR
C
        TEMPO=DIAINI
C
        LME=1
        LEPCS=1
        MODULO=0.0D0
        RETRACAO=0.0D0
        SIGMA=0.0D0

        WRITE(3,60)
60     FORMAT(7X,'IDADE',6X,'RETRACAO',3X,'EQUIVALENTE',3X,'MODULO',6X,
+           'TENSÃO',7X,'PURA',/\ )
C
        DO j=1,INCR
C
            TEMPO=TEMPO+DELTA_TEMPO
C
            PROCURAR O VALOR DO MODULO ELASTICO PARA O DIA=TEMPO
C
7         CONTINUE
            IF(TEMPO_MOD_ELAS(LME).GE.TEMPO) THEN
                AUX5=MODULO
                AUX1=TEMPO_MOD_ELAS(LME)
                AUX2=TEMPO_MOD_ELAS(LME-1)
                AUX3=MOD_ELAS(LME)
                AUX4=MOD_ELAS(LME-1)
                MODULO=AUX4+((AUX3-AUX4)/(AUX1-AUX2))*(TEMPO-
AUX2)
                MODULO_M=(MODULO+AUX5)/2
            ELSE
                LME=LME+1
                GOTO 7
            ENDIF
C
8         CONTINUE
            IF(TEMPO_EPCS(LEPCS).GE.TEMPO) THEN
                AUX5=RETRACAO
                AUX1=TEMPO_EPCS(LEPCS)

```

```

                                AUX2=TEMPO_EPCS(LEPCS-1)
                                AUX3=EPCS(LEPCS)
                                AUX4=EPCS(LEPCS-1)
                                RETRACAO=AUX4+((AUX3-AUX4)/(AUX1-
AUX2))*(TEMPO-AUX2)
                                DELTA_R=(RETRACAO-AUX5)
                                ELSE
                                LEPCS=LEPCS+1
                                GOTO 8
                                ENDIF
C
C   CALCULO DA TENSAO
C
                                SIGMA=SIGMA+MODULO_M*DELTA_R
                                EPCS_EQ=SIGMA/MODULO_M
                                SIGMA_PURO=MODULO_M*RETRACAO

                                WRITE(3,80)
TEMPO,RETRACAO,EPCS_EQ,MODULO_M,SIGMA,SIGMA_PURO
80   FORMAT(5X,E10.5,2X,E10.5,2X,E10.5,2X,E10.5,2X,E10.5,2X,E10.5)
C
C   ENDDO
C
C   CLOSE(3)
C
C   STOP
C   END
```

12 BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT – coleção de normas técnicas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-13276/95 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência-padrão*. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 13277/95 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água*. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 13278/95 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado*. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 13280/95 – *Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido*. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 13528/95 – *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração*. São Paulo, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 13749/96 – *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação*. São Paulo, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 9779/95 – *Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. São Paulo, 1995.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 7200/82 – *Revestimentos de paredes e tetos com argamassas – Materiais, preparo, aplicação e manutenção*. São Paulo, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR- 8522/84 – *Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação*. São Paulo, 1986.
- ABCI - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA CONSTRUÇÃO INDUSTRIALIZADA *Manual técnico de alvenaria*. São Paulo, ABCI/Projeto, 1990.
- AGNESINI, M. V. C. *Concretos com ar incorporado: efeitos produzidos pela incorporação de ar sobre as propriedades dos concretos dosados com os agregados usualmente empregados na região de São Carlos*. São Carlos, publicação USP, 1988.
- ALONSO, U. R. *Previsão e controle das fundações* São Paulo, Edgard Blücher, 1995.
- ALUCCI, M. P. & WANDERLEY, D.F. & MILANO, S. *Bolor em edifícios: causas e recomendações*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia.
- AZEREDO, H. A. *Dosagem das argamassas empregadas na construção de edifícios*. São Paulo,. Dissertação (Mestrado), 1978.
- BASCOUL, A. *Formation des Microfissures*. An. Inst. Tech. Bat. Trav. Publ., n. 398, Out. 1981, Série Béton, n.202, p. 7.
- BAUER, L. A. *Argamassa de revestimento/Determinação da permeabilidade por coluna de água*. Manual de Procedimentos de Garantia da Qualidade. ACT - 003. pp 01/02. Centro Tecnológico de Controle da Qualidade L. A. BAUER. São Paulo, 1993.
- BAUER, Luiz Alfredo Falcão *Materiais de construção*. 5 ed., Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994.
- BORTOLUZZO, C. W. *Qualidade em vedações, argamassas e revestimentos*. São Carlos, EESC, 1999. (Relatórios 1 a 5 de pesquisa FAPESP)

- BOYTON, R. S. & GUTSCHIK, K. A. A *Aderência de argamassas à componentes de alvenaria, fatores que influenciam a resistência, extensão e durabilidade da aderência*. N. L. A. Masonry mortar technical notes 3, 1964. In: A.B.C.P. Boletim 7.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION *External rendered finishes*. B. S. 5262: 1976.
- CALDEIRA, P. C. *O uso do solo laterítico e escória de alto-forno ativada em edificações e obras viárias*. São Paulo, 1994, 217p. Tese de Doutorado, EESC, USP.
- CARASEK, H. *Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – Avaliação dos fatores*. Tese (Doutorado), São Paulo, EDUSP, 1996.
- CATUNDA, R. M., *Características básicas para gestão da qualidade*. In: II qualitech Brasil'90, Trabalhos, São Paulo, 1990.
- CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT. *Modalités d'essais des enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques*. Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, L230, C.1779, 1982. 8p.
- CINCOTTO, M. A., MARQUES, J. C. & HELENE, P. R. L. *Propriedades das argamassas cimento: cal: areia*. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, Seminário sobre argamassas, São Paulo, IBRACON, Jul. 1985.
- CINCOTTO, M. A. *Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio*. São Paulo, IPT, 1995.
- CINCOTTO, M. A. *Patologia das argamassas de revestimento: análise e recomendações*. 2 ed., São Paulo, IPT, 1989 (publicação IPT, n.º.1801).
- CINCOTTO, M. A. *Patologia das argamassas*. São Paulo, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1985.
- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETÓN 1990. CEB-FIP – Model code, 1990.
- COUTINHO, A. S. *A fissurabilidade dos cimentos, argamassas e betões por efeito da sua contração*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1954. Publicação nº57.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 18555: part1- *Testing mortar containing mineral binders: general, sampling, test mortar*. Berlin, 1982. 3p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 52617 – *Bestimmung des wasseraufnahmekoeffizienten von baustoffen*. Berlin, 1987. 4p.

FLAUZINO, W. D., *Durabilidade de materiais e componentes das edificações*, São Paulo, EPUSP, Dissertação (Mestrado), 1983.

FIORITO, A. J. S. I. *Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução*. São Paulo, Pini, 1994.

FIORITO, A. J. S. I. *Limpeza final com ácido*. TCPO8, pg.794, Pini, 1986.

GOMES, A. M. *Novo método para a avaliação da trabalhabilidade e consistência das argamassas*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas: anais, Goiânia: UFG/ANTAC, 1995.

GUEDES, M.F. *Caderno de Encargos*, Ed. Pini, 1982.

GUIMARÃES, J. E. P. *As aplicações da cal nas construções civis*. São Paulo, Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1985.

HANAI, J. B. de. *Construções de argamassa armada: fundamentos tecnológicos para projeto e execução*. São Paulo, Ed. Pini, 1992.

HELENE, P.R.L. *Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*. São Paulo, Ed. Pini, 1992.

HELENE, P.R.L., *Envelhecimento das superfícies de concreto aparente e produtos de proteção*, In.: Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, 9: Reforços, Reparos e Proteção das Estruturas de Concreto, São Paulo, 18-19/5/1989. Anais p. 175-208.

IOSHIMOTO, E. *Incidência de manifestações patológicas em edificações habitacionais*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.

Instituto da Qualidade do Revestimento Cerâmico - Material de divulgação tecnológica do CCB..

- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS *Programa de coleta de informações: patologia na construção.* São Paulo, 1981 (IPT - relatório 14754).
- JOISEL, A. *Les fissures du ciment.* Paris, STAR, s.d.
- KOPSCHITZ, Pedro et al *Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas da argamassas mistas para revestimento.* In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas: anais, Salvador: CETAVANTAC, 1997.
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. *A influência da cal hidratada na resistência das argamassas.* Lisboa, LNEC, novembro, 1984.
- LIBÓRIO, J.B.L., *Estudo patológico de construções de argamassa armada existentes no Brasil.* São Carlos, EESC-USP, 1989, Tese de Doutorado.
- LICHTENSTEIN, N. B. *Patologia das construções.* São Paulo, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1985.
- LIMA, A. S., *Redução de custos na construção civil: uma visão mais ampla.* São Paulo, 1995.
- MARTINELLI, Frederico Augusto *Usos, funções e propriedades das argamassas mistas destinadas ao assentamento de alvenarias.* São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, 1991 (BT/PCC/47).
- MC BURNEY, R. S. *Tension bond between bricks and mortar.* Strutral Clay Products Inst. s.l., s.d.
- MEHTA, P. K. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais.* São Paulo, Pini, 1994.
- MOLINARI, G. *Algumas recomendações para evitar descolamentos da argamassa de cal nas alvenarias de tijolos.* Revista Engenharia, pg. 99 - 102, out. 1953.
- NATIONAL BUILDING RESEARCH INSTITUTE. *Gypsum based plasters: factors influencing crazing and adhesion to Portland- Cement based plasters.* Pretoria, NBRI, 1980 (information sheet - X/BOU - 2 - 43).
- NATIONAL BUILDING STUDIES. *Burean of standards journal of research.* RP. 683, v.12, maio 1934.

- NATIONAL BUILDING STUDIES. *Mortars for brickwork block construction and masonry*. London, B. R. S., Bulletin no. 8, 1950.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. tradução Salvador E. Giammusso, São Paulo, Pini, 1982.
- SIQUEIRA, N. M. *Influência da fração carbonática da cal hidratada no desempenho de revestimentos em argamassas inorgânicas*. São Paulo, 202p. 1995. Dissertação de Mestrado, EPUSP.
- OLIVEIRA, H. P. de *Uma introdução para o emprego racional das argamassas nos edifícios*. Salvador, Escola Politécnica da Universidade da Bahia, 1959.
- PEREZ, A. R. *Umidade nas edificações: recomendações para a prevenção da penetração de água pelas fachadas*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- PEREZ, A. R. *Umidade nas edificações*. São Paulo, 164p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, (1960)
- PICCI, F. A., "Sistemas da qualidade: uso em empresas de construção de edifícios", Tese de Doutorado em engenharia.
- PLUMMER, H.C. *Brick and tile engineering*. Strutral Clay Products Inst. s.l., 1967.
- RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATÉRIAUX. RILEM Recommendations MR1-21: *Testing methods of mortars and renderings*, Paris, RILEM, 1982.
- ROSELLO, M. T. V. *Morteros de cemento para albañilería*. Madrid, Instituto Eduardo Torroja, Monografía N°337, outubro, 1976.
- SABBATINI, F. H. *Argamassa de assentamento para alvenaria estrutural*. (notas de aula), EPUSP, 1981.
- SABBATINI, F. H. *Argamassa de assentamento para paredes de alvenaria resistente*. EPUSP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. Boletim técnico: 02/86, São Paulo, 1986.
- SABBATINI, F. H. *Agregados miúdos para argamassas de revestimento*. IN: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, EPUSP - LCC, 1986.

- SANCHES, F. J. *Cálculo de esforços e deslocamentos em pisos de edifícios de concreto armado, considerando-se modelos próprios para concreto*. São Carlos, 1998. (Dissertação de Mestrado, EESC).
- SELMO, Sílvia Maria de Souza *Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios*. São Paulo: EPUSP, 1991, IOP (BT/PCC/39).
- SELMO, S. M. S. *Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo de fachada dos edifícios*. São Paulo, 1989. (Dissertação de Mestrado EPUSP).
- SELMO, S. M. S. *Agregados miúdos para argamassas de revestimento*. IN: I SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, EPUSP - LCC, 1986.
- SELMO, S. & Lichtentein, N. *Aderência no assentamento de azulejos*. São Paulo, Seminário apresentado na Escola Politécnica da USP, 1986.
- THOMAZ, E. *Trincas em edificações: causas e mecanismos de formação*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- THOMAZ, E. *Trincas em edificações: causas, prevenção e recuperação*. São Paulo, Pini, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.
- TRISTÃO et al *Análise de métodos de ensaio para caracterização das argamassas de revestimento das edificações*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas: anais, Goiânia: UFG/ANTAC, 1995.
- UEMOTO, K. L. *Patologia: danos causados por eflorescência*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- UEMOTO, K. L. *Problemas de pintura na construção civil*. IN: Tecnologia de edificações/ Projeto de divulgação tecnológica Lix da Cunha. São Paulo, Pini, Divisão de Edificações do IPT, 1988.
- VAN VLACK, L. H. *Princípios de ciência dos materiais*. Traduzido pelo Eng. Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo, Edgard Blücher, 1970.