

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PASTAS DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND E SÍLICA ATIVA  
PARA REVESTIMENTO**

José Antonio De Milito

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gladis Camarini

Dissertação de Mestrado apresentado à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

Campinas, SP  
2001

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese. 05/09/2001

Prof. Dr. *Gladis Camarini*  
Matrícula: 06230-8

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE



20124765

UNIDADE 3e  
N.º CHAMADA  
T/UNICAMP  
D395a  
V. Ex  
TOMBO BC/ 46874  
PROC. 76.892/01  
C   X  
PREÇO R\$ 11,00  
DATA 04/11/01  
N.º CPG

CM00161496-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D395a De Milito, José Antonio  
Avaliação do comportamento de pastas de gesso com  
cimento portland e sílica ativa para revestimento / José  
Antonio De Milito. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientadora: Gladis Camarini.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Gipsita. 2. Gesso. 3. Cimento portland. 4.  
Revestimentos. I. Camarini, Gladis. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil.  
III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PASTAS DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND E SÍLICA ATIVA  
PARA REVESTIMENTO**

José Antonio De Mito

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**Campinas**

**2001**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PASTAS DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND E SÍLICA ATIVA  
PARA REVESTIMENTO**

José Antonio De Milito

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Profª. Drª. Gladis Camarini  
Presidente e Orientadora/UNICAMP**

  
**Prof. Dr. Ércio Thomaz**

**IPT**

**Prof. Dr. Vladimir Antonio Paulon  
UNICAMP**

**UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE**

**Campinas, 06 de agosto de 2001**

## Dedicatória

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

À minha família pelo apoio que foi fundamental, em especial à minha esposa Ana Marli e filhos Felipe e Flávia que, mesmo nos momentos mais difíceis mantiveram a serenidade. Não posso deixar de agradecer aos meus pais (*in memoriam*) pelo legado da vida.

## **Agradecimentos**

À Profª. Drª. Gladis Camarini, pela orientação recebida, pelo apoio incansável na realização da pesquisa e pela dedicação na fase de elaboração deste trabalho.

À ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, pela realização dos ensaios de Difração de Raios-X, Análise Termo Diferencial, Análise Termogravimétrica. Devo registrar também o apoio da Biblioteca que disponibilizou o seu acervo para as pesquisas.

Ao IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pelos ensaios físicos e químicos do gesso.

À FATEC-Sorocaba, em especial ao Prof. Samuel Mendes Franco pela realização do ensaio de expansibilidade longitudinal.

À Holdercim do Brasil pelo fornecimento do cimento para a pesquisa.

À COHAB/SP pela autorização da consulta ao relatório 19.110, Análise de edificações construídas em painéis pré-moldados com “Concreto Plástico Químico”.

Aos professores da FEC/UNICAMP e funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção, pelos ensinamentos e apoio técnico.

Ao amigo Eng. Fábio Usuda pela participação em inúmeras discussões e formatação deste trabalho.

Gostaria de registrar a importância da Faculdade de Engenharia de Sorocaba nesse processo, que permitiu e incentivou a realização deste trabalho. Ao LEMAT – Laboratório de Materiais, pelo apoio técnico para realização dos demais ensaios, e também ao seu corpo de funcionários, em especial ao Prof. Dr. Paulo Albuquerque e aos técnicos Alexandre Vaz de Lima e Marcio Luiz Pazini.

Este trabalho é fruto de várias pessoas, e que se não foram citadas, ficam aqui registrados meus sinceros agradecimentos.

## Sumário

	<b>Páginas</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	xv
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xxiii
<b>Lista de Abreviações</b> .....	xxvii
<b>RESUMO</b> .....	xxix
<b>ABSTRACT</b> .....	xxxi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo .....	4
1.2 Experiência nacional .....	4
<b>2 GESSO</b> .....	7
2.1 Gipsita .....	8
2.1.1 Estrutura Cristalina da Gipsita .....	9
2.2 Fornos .....	14
2.2.1. Tipos de Fornos Empregados no Brasil .....	15
2.2.2 Fornos com Aquecimento Direto .....	16
2.2.3 Fornos com Aquecimento Indireto .....	18
2.3 Processo de Fabricação do Gesso .....	19
2.4 Reação de Desidratação e Calcinação da Gipsita .....	20
2.4.1 Classificação do Gesso .....	23
2.5 Estrutura Cristalina do Gesso .....	24
2.6 Hidratação e Tempo de Pega .....	25
<b>3 CIMENTO PORTLAND</b> .....	29
3.1 Produção de Cimento Portland .....	30
3.2 Composição do Cimento Portland .....	33
3.3 Cimento Portland de Alto-Forno .....	38

3.4 Finura .....	40
3.5 Hidratação do Cimento Portland Comum .....	41
3.5.1 Hidratação da Fase Silicato .....	43
3.5.2 Hidratação da Fase Intersticial .....	45
3.6 Hidratação do Cimento Portland de Alto-Forno .....	47
<b>4 ADIÇÕES: SÍLICA ATIVA E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO .....</b>	<b>49</b>
4.1 Sílica Ativa .....	50
4.2 Escória de Alto Forno .....	54
4.2.1 Hidratação da Escória .....	56
4.2.2 Ativação da Escória .....	57
<b>5 MISTURA DE GESSO, CIMENTO PORTLAND E SÍLICA ATIVA .....</b>	<b>63</b>
5.1 Efeito da Quantidade de Adição de Gesso em Pastas de Cimento Portland.	64
5.2 Deterioração dos Produtos de Cimento devido à Etringita .....	68
5.2.1 Mecanismo de Formação dos Cristais de Etringita .....	70
5.3 Deterioração dos Produtos de Cimento devido à Thaumásita .....	74
5.4 Melhoria do Desempenho das Misturas utilizando Gesso, Cimento Portland e Sílica Ativa .....	77
<b>6 APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE GESSO .....</b>	<b>79</b>
6.1 Preparo dos Substratos .....	80
6.1.1 Aderência da Pasta de Gesso em Diversos Substratos .....	81
6.2 Execução Manual .....	84
6.2.1 Preparo da Pasta .....	85
6.2.2 Aplicação da Pasta .....	86
6.2.3 Inspeção Final .....	87
<b>7 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>89</b>
7.1 Materiais Utilizados .....	89
7.1.1 Gesso .....	89
7.1.2 Cimento .....	91
7.1.3 Sílica Ativa .....	93
7.1.4 Superplastificante .....	94
7.2 Misturas Experimentais .....	94

7.2.1 Preparo da Mistura .....	95
7.2.2 Preparo dos Corpos-de-prova .....	98
7.2.3.Preparos das Amostras para os Ensaios de Análise Térmica Diferencial e Difração de Raios-X .....	101
7.3 Ensaios da Pasta no Estado Fresco .....	102
7.3.1 Consistência .....	102
7.3.2 Pega .....	103
7.4 Ensaios da Pasta no Estado Endurecido .....	103
7.4.1 Absorção Capilar e Perda de Massa .....	103
7.4.2 Resistência à Compressão .....	105
7.4.3 Resistência à Tração .....	105
7.4.4 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG) .....	106
7.4.5 Difração de Raios X .....	107
7.4.6 Permeabilidade ao Ar .....	107
7.4.7 Expansibilidade Longitudinal .....	109
7.5 Aplicação das Pastas em Painéis de Alvenaria .....	111
<b>8 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>115</b>
8.1 Consistência .....	115
8.2 Pega .....	117
8.3 Absorção Capilar e Perda de Massa .....	119
8.4 Resistência à Compressão .....	124
8.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	127
8.6 Permeabilidade ao Ar .....	129
8.7 Expansibilidade Longitudinal .....	132
8.8 Difração de Raios-X .....	134
8.9 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG).	142
8.9.1 Análise Térmica Diferencial (ATD) .....	142
8.9.2 Análise Termogravimétrica (ATG) .....	149
8.10 Análise dos Revestimentos em painéis .....	155
<b>9 CONCLUSÕES</b> .....	<b>159</b>

<b>10 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DAS PESQUISAS .....</b>	<b>161</b>
<b>11 ANEXOS .....</b>	<b>163</b>
Anexo A – PREPARO DAS AMOSTRAS E PAINÉIS DE ALVENARIA .....	163
Anexo B – FOTOGRAFIAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	171
Anexo C – RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	179
Anexo D – FOTOGRAFIAS DOS PAINÉIS E CORPOS-DE-PROVA COM CURA EXTERNA.....	215

## Lista de Figuras

	Páginas
2.1 Localização da Principais Jazidas de Gipsita no Brasil (Pereira,1973) .....	9
2.2 Estruturas Cristalinas (Jastrzebski, 1976) .....	11
2.3 Planos Cristalinos da Gipsita (Kazmierczak, 1990) .....	12
2.4 Projeção da Estrutura da Gipsita sobre o Plano (0 0 1) (Kazmierczak, 1990) .	13
2.5.Faces Cristalinas Apresentadas pelas Gipsitas Cristalizadas na Natureza (Lecroix, citado em Kazmierczak, 1990) .....	14
2.6 Fluxograma – Forno Rotativo .....	18
2.7 Fluxograma – Forno Marmita .....	19
2.8 Processo de Fabricação do Gesso (Festa, 995) .....	20
2.9 Estrutura Cristalina da Anidrita (Rejl,1994) .....	25
2.10 Exemplo de Curva de Hidratação de uma pasta de gesso (Clifon, 1973, citado em Antunes et al.) .....	26
3.1 Fluxograma do Processo de Fabricação do Cimento Portland (Kattar et al. 1999) .....	31
3.2 Esquema da Hidratação do Cimento Portland Comum (Jawed et al., citado em Camarini, 1995) .....	42
3.3 Esquema de Hidratação do C <sub>3</sub> S (Jawed et al., citado em Camarini, 1995) .....	44
3.4 Curva da Hidratação do C <sub>3</sub> S (Jawed et al., citado em Taylor, 1992) .....	46
3.5 Curva Calorimétrica da Hidratação do C <sub>4</sub> AF em Água, na Presença de Gipsita, e na Presença de Cal e Gipsita (Jawed et al., citado em Camarini, 1995) .....	47

3.6 Curva de Calorimetria da Hidratação do C <sub>3</sub> S na Presença de Escória (Uchikawa, citado em Camarini, 1995) .....	48
3.7 Taxa de Hidratação do C <sub>3</sub> S no Cimento com Vários Teores de Escória (Totani et al. citado em Camarini, 1995) .....	48
4.1 Fluxograma da Fabricação do Silício e do Fumo Silício (Aïtcin, 2000) .....	51
4.2 Efeito Filler da Sílica Ativa (H. Bache, citado em Aïtcin, 2000) .....	53
4.3 Fluxograma da Produção de Escória de Alto-forno (Aïtcin, 2000) .....	54
4.4 Curva Calorimétrica da Hidratação de Escória na Presença de Sulfato e Vários teores de Hidratação de Cálcio (Daimon, 1980) .....	59
4.5 Modelos de Hidratação do Cimento de Escória com Diferentes Ativadores (Shi, 1995, citado em Silva, 1998) .....	61
5.1 Taxa de Liberação de Calor Clínquer 1 e Clínquer 2 (Whittaker et al., 1945) .	66
5.2 Taxa de Liberação de Calor Clínquer 3 e Clínquer 4 (Whittaker et al., 1945) .	66
5.3 Taxa de Liberação de Calor Clínquer 5 (Whittaker et al., 1945) .....	67
5.4 Micrografia dos Cristais de Etringita (Camarini, 1995) .....	69
5.5 Esquema do Retardamento da Pega Devido a Interação do C <sub>3</sub> A (Skalny, 1992) .....	70
5.6 Influência da Reação Aluminato/Sulfato da Fase Aquosa entre 2 e 3 horas (Adaptação de F.W.Locher et al., citado em Mehta, 1994) .....	71
5.7 Influência da Reação Aluminato/Sulfato da Fase Aquosa entre 10 e 45 minutos (Adaptação de F.W.Locher et al., citado em Mehta, 1994) .....	72
5.8 Influência da Reação Aluminato/Sulfato da Fase Aquosa em menos de 45 minutos (Adaptação de F.W.Locher et al., citado em Mehta, 1994) .....	72
5.9 Influência da Reação Aluminato/Sulfato da Fase Aquosa em menos de 10 minutos (Adaptação de F.W.Locher et al., citado em Mehta, 1994) .....	73
5.10 Influência da Reação Aluminato/Sulfato da Fase Aquosa - falsa pega (Adaptação de F.W.Locher et al., citado em Mehta, 1994) .....	73
5.11 Esquema do Processo Químico para Produzir Thaumasita e Etringita (Colleparidi, 1999) .....	74
5.12 Thaumasita (Rejl et al., 1994) .....	75
5.13 Difratoograma da Thaumasita e Etringita (Colleparidi, 1999) .....	76

6.1 Resistência de Aderência dos Revestimentos de Gesso, sobre Substrato de Alvenaria Cerâmica, em Função da Relação água/gesso da Pasta. Ensaio pela NBR 13528/95 (Hincapie et al., 1997) .....	82
6.2 Variação da Resistência de Revestimento de Gesso Liso, Sobre as Bases Indicadas na Legenda e Respectivas relação água/gesso. Ensaio pela NBR 13528/95 (Hincapie et al., 1997) .....	83
7.1 Influência da Relação h/d na Resistência à Compressão em Corpos-de-prova de Concreto (Tucker, 1993) .....	99
7.2 Detalhe do Suporte e Fixação dos moldes em PVC dos Corpos-de-prova .....	100
7.3 Porta Amostra e Prensa Mecânica .....	102
7.4 Bandeja e Suporte para os Corpos-de-prova .....	104
7.5 Disposição do Corpo-de-prova .....	106
7.6 Aparelho de Permeabilidade ao Ar .....	108
7.7 Metroscópio Horizontal .....	110
7.8 Exemplo de Medição no Metroscópio Horizontal .....	111
7.9 Detalhe do Suporte dos Corpos-de-prova .....	112
7.10 Localização dos Painéis .....	113
8.1 Coeficiente de Absorção Capilar em uma hora aos 28, 90 e 180 dias ( $k_{abs}$ ) ....	120
8.2 Perda de Massa após 24 horas de Imersão em água aos 28, 90 e 180 dias (%).	123
8.3 Resistência à Compressão aos 3, 7, 28, 90 e 180 dias (MPa) das Misturas (M1, M2, M3, M4, M5 externas e M6, M7, M7, M8, M9, M10 interna) .....	125
8.4 Resistência à Tração por Compressão aos 3, 7, 28, 90 e 180 dias (MPa) das Misturas (M1, M2, M3, M4, M5 externas e M6, M7, M7, M8, M9, M10 interna) .....	128
8.5 Resultados da Permeabilidade ao Ar aos 28, 90 e 180 dias e, $m^2$ , Amostra Superior .....	131
8.6 Resultados da Permeabilidade ao Ar aos 28, 90 e 180 dias e, $m^2$ , Amostra Inferior .....	131
8.7 Expansibilidade Longitudinal nas Diferentes Idades (mm) .....	133
8.8 Comparação dos Difractogramas das Misturas de Mesmo Traço aos 28 e 180 dias (M1 = externo e M6 = interno) .....	137

8.9 Comparação dos Difractogramas das Misturas de Mesmo Traço aos 28 e 180 dias (M2 = externo e M7 = interno) .....	138
8.10 Comparação dos Difractogramas das Misturas de Mesmo Traço aos 28 e 180 dias (M3 = externo e M8 = interno) .....	139
8.11 Comparação dos Difractogramas das Misturas de Mesmo Traço aos 28 e 180 dias (M4 = externo e M9 = interno) .....	140
8.12 Comparação dos Difractogramas das Misturas de Mesmo Traço aos 28 e 180 dias (M5 = externo e M10 = interno) .....	141
8.13 Comparação das Curvas de ATD das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M1 = externa e M6 = interna) .....	144
8.14 Comparação das Curvas de ATD das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M2 = externa e M7 = interna) .....	145
8.15 Comparação das Curvas de ATD das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M3 = externa e M8 = interna) .....	146
8.16 Comparação das Curvas de ATD das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M4 = externa e M9 = interna) .....	147
8.17 Comparação das Curvas de ATD das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M5 = externa e M10 = interna) .....	148
8.18 Comparação das Curvas de ATG das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M1 = externa e M6 = interna) .....	150
8.19 Comparação das Curvas de ATG das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M2 = externa e M7 = interna) .....	151
8.20 Comparação das Curvas de ATG das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M3 = externa e M8 = interna) .....	152
8.21 Comparação das Curvas de ATG das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias (M4 = externa e M9 = interna).....	153
8.22 Comparação das Curvas de ATG das Misturas de Mesmo traço com Cura Interna e externa aos 28 e 180 dias M5 = externa e M10 = interna .....	154
8.23 Comparação visual dos corpos-de-prova submetidos à cura externa (M1 a M5) e à cura interna ao ar em laboratório (M6 a M10).....	157

A1 Construção da alvenaria em bloco de concreto, e cobertura com telhas de fibrocimento, para aplicação das diversas misturas.....	164
A2 Aplicação do revestimento, utilizando um quadro de 80 x 80 cm e 4,5 cm de espessura como molde e desempenadeira de PVC. ....	165
A3 Revestimento interno aplicado (M6, M7, M8, M9, M10).....	165
A4 Revestimento externo aplicado (M1, M2, M3, M4, M5).....	166
A5 Detalhe do suporte dos corpos-de-prova submetidos à cura externa.....	166
A6 Moldagem dos corpos-de-prova de 2,75x5,5 cm utilizados para os ensaios de Resistência à compressão, Resistência à tração e Absorção Capilar.....	167
A7 Moldagem dos corpos-de-prova de 5,0x10,0 cm e 4,0x4,0x16,0 cm utilizados para os ensaios de permeabilidade ao ar e expansibilidade longitudinal respectivamente.....	167
A8 Desforma e cura ao ar em laboratório dos corpos-de-prova.....	168
A9 Preparo das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar.....	169
A10 Amostra na célula inferior do permeabilímetro.....	169
A11 Bandeja e suporte de cobre para ensaio de absorção por capilaridade.....	170
A12 Ensaio de absorção capilar sendo realizado.....	170
B1 Ensaio de expansibilidade utilizando o metroscópio horizontal CARL-ZEISS JENA-FATEC/Sorocaba, precisão de décimos de milésimos.....	172
B2 Ensaio de Resistência à Compressão utilizando uma prensa eletro-hidraulica Forney Test Equipment com capacidade máxima de 110 KN e faixa nominal 20 a 950 KN, precisão de 0,05 KN.....	172
B3 Ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral utilizando uma prensa eletro-hidraulica Forney Test Equipment com capacidade máxima de 110 KN e faixa nominal 20 a 950 KN, sensibilidade de 0,05 KN.....	173
B4 Balança Termogravimétrica Rigaku Thermoflex TG 8110-ABCP contendo a amostra padrão para realização dos ensaios de ATD e ATG.....	173
B5 Balança Termogravimétrica Rigaku Thermoflex TG 8110-ABCP pronta para realização dos ensaios de ATD e ATG, e detalhe da prensa manual para o preparo das amostras para o ensaio de difração de raios-X.....	174

B6 Amostra sendo colocada no difratômetro X-RAY da Rigaku-ABCP.....	174
B7 Diffractometer da Rigaku-ABCP pronto para o ensaio de difração de raios-X..	175
B8 Ensaio de Consistência utilizando o equipamento de Vicat modificado.....	176
B9 Equipamento para realizar o ensaio de Permeabilidade ao ar-FEC/Unicamp...	177
C1 Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28, 90 e 180 dias( $K_{abs}$ ) .....	180
C2 Perda de massa após 24horas de imersão em água aos 28, 90 e 180 dias (%)..	181
C3 Resistência à Compressão aos 3 e 7 dias (MPa).....	182
C4 Resistência à Compressão aos 28 e 90 dias (MPa).....	183
C5 Resistência à Compressão aos 180 dias (MPa).....	184
C6 Comparação das resistência à compressão das misturas M1 e M6 (100/0/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	184
C7 Comparação das resistência à compressão das misturas M2 e M7 (85/15/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	185
C8 Comparação das resistência à compressão das misturas M3 e M8 (75/25/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	185
C9 Comparação das resistência à compressão das misturas M4 e M9 (85/10/5) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	186
C10 Comparação das resistência à compressão das misturas M5 e M10 (75/20/5) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	186
C11 Resistência à Tração por Compressão diametral aos 3 e 7 dias (MPa).....	187
C12 Resistência à Tração por Compressão diametral aos 28 e 90 dias (MPa).....	188
C13 Resistência à Tração por Compressão diametral aos 180 dias (MPa).....	189
C14 Comparação das resistência à tração por compressão diametral das misturas M1 e M6 (100/0/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	189
C15 Comparação das resistência à tração por diametral das misturas M2 e M7 (85/15/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	190
C16 Comparação das resistência à tração por compressão diametral das misturas M3 e M8 (75/25/0) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	190
C17 Comparação das resistência à tração por compressão diametral das misturas M4 e M9 (85/10/5) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	191

C18 Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M5 e M10 (75/20/5) aos 28, 90 e 180 dias (MPa).....	191
C19 Permeabilidade ao ar aos 28, 90 e 180 dias em m <sup>2</sup> – amostra superior.....	192
C20 Permeabilidade ao ar aos 28, 90 e 180 dias em m <sup>2</sup> – amostra inferior.....	193
C21 Expansibilidade Longitudinal das amostras externas, nas diferentes idades (mm).....	194
C22 Expansibilidade Longitudinal das amostras internas, nas diferentes idades (mm).....	194
C23 Difratoograma das misturas aplicadas externamente aos 28 dias.....	195
C24 Difratoograma das misturas aplicadas internamente aos 28 dias.....	196
C25 Difratoograma das misturas aplicadas externamente aos 180 dias.....	197
C26 Difratoograma das misturas aplicadas internamente aos 180 dias.....	198
C27 Curvas de análise Térmica Diferencial das misturas aplicadas externamente aos 28 dias.....	199
C28 Curvas de análise Térmica Diferencial das misturas aplicadas internamente aos 28 dias.....	200
C29 Curvas de análise Térmica Diferencial das misturas aplicadas externamente aos 180 dias.....	201
C30 Curvas de análise Térmica Diferencial das misturas aplicadas internamente aos 180 dias.....	202
C31 Curvas de análise Termogravimétrica das misturas aplicadas externamente aos 28 dias.....	203
C32 Curvas de análise Termogravimétrica das misturas aplicadas internamente aos 28 dias.....	204
C33 Curvas de análise Termogravimétrica das misturas aplicadas externamente aos 180 dias.....	205
C34 Curvas de análise Termogravimétrica das misturas aplicadas internamente aos 180 dias.....	206
D1 Paineis externos aos 7 dias.....	216
D2 Paineis externos aos 180 dias.....	217
D3 Paineis M1 (100/0/0) e M2 (85/15/0) aos 240 dias.....	218

D4 Painel M3 (75/25/0) e M4 (85/10/5/) aos 240 dias.....	219
D5 Painel M5 (75/20/5) aos 240 dias .....	220
D6 Comparação visual dos corpos-de-prova submetidos à cura externa (M1 a M6) e cura ao ar no laboratório (M6 a M10).....	220

## Lista de Tabelas

## Páginas

2.1 Geometria dos Sistemas Cristalinos (Jastrzebski, 1976) .....	10
2.2 Reações de Desidratação .....	21
2.3 Compostos Formados na Calcinação da Gipsita.....	22
2.4 Classificação do Gesso quanto aos Teores de Hemi-hidrato .....	23
3.1 Seqüência de reações no Processo até a Clinquerização e Resfriamento (Kattar et al. , 1999) .....	32
3.2 Composição Química do Clínquer (Kattar et al., 1999) .....	33
3.3 Compostos do Cimento Portland, suas Abreviações e Composições (Mehta, 1994) .....	34
3.4 Principais Compostos do Clínquer e suas Propriedades Específicas (Kattar et al., 1999) .....	38
3.5 Teores de Escória no Cimento Portland de acordo com a ABNT .....	40
4.1 Composição Química Típica de algumas Sílicas Ativas (Aïtcin, 2000) .....	51
4.2 Composição Típica das Escórias de Alto-forno Produzidas no Brasil (John, 1995) .....	55
4.3 Compostos Hidratados produzidos pela Ativação da Escória (Glasser et al., 1991 citado em Camarini, 1995) .....	60
5.1 Quantidade de SO <sub>3</sub> em Cimentos Normalizados pela ABNT .....	65
6.1 Desvios Máximos de Prumo, Nível e Planeza para Substratos que Vão Receber Revestimentos de Gesso (ABNT, 1995) .....	80
6.2 Etapas e Tempo Aproximado de execução da Aplicação Manual de Gesso, para Consumo de 45 litros de Pasta = um saco de gesso (Revista Técnica nº22, 1996) .....	87
7.1 Análise Química do Gesso (IPT) .....	90

7.2	Análise Física do Pó, da Pasta e Propriedades Mecânicas do Gesso (IPT) .....	91
7.3	Análise Química do cimento (Holdercim) .....	92
7.4	Análise Física do cimento (Holdercim) .....	93
7.5	Análise Química e Física da Sílica Ativa (pelo fabricante) .....	93
7.6	Misturas ensaiadas.....	96
7.7	Quantidade de Corpos-de-prova 2,75 x 5,50 cm por Mistura – Para os Ensaio de Absorção, Resistência à Compressão e Resistência à Tração .....	97
7.8	Quantidades de Corpos-de-prova 5,0 x 10,0 cm por Mistura para o Ensaio de Permeabilidade ao Ar .....	97
7.9	Quantidade de Corpos-de-prova 4,0 x 4,0 x 16,0 cm por Mistura para Ensaio de expansibilidade .....	98
8.1	Consistência das Misturas (penetração) .....	116
8.2	Tempo de Início e Fim de Pega (min. e seg.) .....	117
8.3	Resultados do Coeficiente de Absorção Capilar em Uma Hora .....	120
8.4	Perda de Massa após 24 horas em água (g) .....	122
8.5	Resistência à Compressão em MPa .....	125
8.6	Resistência à Tração por Compressão Diametral em MPa .....	127
8.7	Resultados Médios obtidos de Permeabilidade ao ar (m <sup>2</sup> ) aos 28, 90 e 180 dias .....	130
8.8	Resultados Obtidos de expansibilidade nas Diferentes Idades (mm) .....	133
8.9	Compostos Prováveis Presentes nas Misturas .....	135
8.10	Compostos Presentes nas Misturas .....	143
8.11	Perda de Massa dos Compostos Presentes nas Misturas .....	149
8.12	Resultados da Aplicação da Pasta, em cada camada, nos painéis .....	155
8.13	Períodos de Duração Climática (180 dias) .....	156
C1	Valores descontados no cálculo da média, no ensaio de Resistência à Compressão das misturas M1 a M5, que diferem de 15% (NBR127215/96) e desvio padrão.....	207
C2	Valores descontados no cálculo da média, no ensaio de Resistência à Compressão das misturas M6 a M10, que diferem de 15% (NBR127215/96) e desvio padrão.....	208

C3 Valores descontados no cálculo da média, no ensaio de Resistência à Tração das misturas M1 a M5, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão.....	209
C4 Valores descontados no cálculo da média, no ensaio de Resistência à Compressão das misturas M1 a M5, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão.....	210
C5 Valores, média e desvio padrão do ensaio de expansibilidade longitudinal aos 7, 28, 60, 120, 150 e 180 dias.....	211
C6 Valores, média e desvio padrão do ensaio de absorção capilar e perda de massa aos 7, 28, 60, 120, 150 e 180 dias.....	212
C7 Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 28 dias.....	213
C8 Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 90 dias.....	213
C9 Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 180 dias.....	213

## Lista de Abreviações

A =  $\text{Al}_2\text{O}_3$

a/g = relação água/gesso

a/agl = relação água/aglomerantes

ABCP = Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

AC = Água Quimicamente Combinada

AFm = Monossulfoaluminato de Cálcio

AFt = Trissulfoaluminato de cálcio

$\text{Al}_2\text{O}_3$  = Alumina

C = CaO

$\bar{C}$  =  $\text{CO}_2$

CaO = Óxido de Cálcio

$\text{CO}_2$  = Anidrido Carbônico

$\text{CaCO}_3$  = Carbonato de Cálcio

$\text{CaSO}_4$  = Sulfato de Cálcio

C-A-H = Aluminato de Cálcio Hidratado

C-S-H = Silicato de Cálcio Hidratado

$\text{C}_2\text{S}$  = Silicato Dicálcico

$\text{C}_3\text{A}$  = Aluminato Tricálcico

$\text{C}_3\text{S}$  = Silicato Tricálcico

$\text{C}_4\text{AF}$  = Ferroaluminato Tetracálcico

CP = Cimento Portland Comum

CPIII = Cimento Portland de Alto-Forno

F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

H = H<sub>2</sub>O

IBRACON = Instituto Brasileiro do Concreto

ICCC = International Congress on the Chemistry of Cement

IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

K = K<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

M = MgO

MgCO<sub>3</sub> = Carbonato de Magnésio

MgO = Óxido de Magnésio

N = Na<sub>2</sub>O

NaOH = Hidróxido de Sódio

S = SiO<sub>2</sub>

SiO<sub>2</sub> = Sílica

$\bar{S}$  = SO<sub>3</sub>

## RESUMO

DE MILITO, José Antonio. **Avaliação do Comportamento de Pastas de Gesso com Cimento Portland e Sílica Ativa para Revestimento**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 228p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Arquitetura e Construção.

O uso crescente de revestimento de gesso nas edificações tem sido uma alternativa prática e econômica. O gesso tem a vantagem de endurecer rapidamente e proporcionar um acabamento fino, mas está limitado ao uso interno devido à sua sensibilidade a água. Por outro lado, o cimento Portland é um aglomerante que resiste bem em contato permanente com a água. Além disso, com a presença da sílica ativa, suas propriedades são ainda mais favorecidas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi o de observar as propriedades de pastas das misturas de gesso-cimento Portland-sílica ativa aplicadas em painéis de alvenaria de bloco de concreto submetidos a duas condições: ambiente interno, protegido das intempéries e em ambiente externo sujeito às variações ambientais. Realizaram-se ensaios físicos, químicos e físico-químicos.

Dos resultados obtidos observou-se que a adição de sílica ativa na mistura reduz a formação de etringita, especialmente nos revestimentos sujeitos à umidade. Da mesma forma, houve melhoria à abrasão e menor perda de massa ao longo do tempo nas misturas com adição de cimento e, após 180 dias de sua aplicação, não houve o aparecimento de fissuras ou gretamento visíveis na superfície dos revestimentos. Assim, os resultados obtidos permitem concluir uma possível coexistência de sucesso entre o gesso e o cimento

**Palavras Chaves:** Gipsita; Gesso; Cimento Portland de Alto-Forno; Cura; Revestimento de painéis.

## **ABSTRACT**

DE MILITO, José Antonio. **Evaluation of the Behavior of Pastes of Plaster with Portland Cement and Silica for Coating**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 228p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Arquitetura e Construção.

The growing use of plaster in the constructions has been a practical and economical alternative. The plaster has the advantage of to harden quickly and to provide a fine finish, but limited to the internal use due to its water sensibility. In other hand, Portland cement is a hydraulic binder and have an excellent behaviour in water. Besides that, silica fume improves its properties. So, the aim of this work was to observe the properties of pastes made from the mixture of plaster-Portland cement-silica fume in concrete block walls. These pastes were submitted to two kinds of expositions: internal and external walls. These pastes were submitted to several tests: physical, chemical and physico-chemical.

From these results it was observed that the addition of silica fume diminished the ettringite formation in the walls subjected to humidity. The plaster-Portland cement had the abrasion resistance improved and the weight loss was also diminished. The panels are until now with the same aspects-from the first day of the paste application and there were not observed cracks on them. In this way, its is possible to conclude that the mixture of plaster and Portland cement can be a reality.

**Key-words:** Gypsum; Plaster; Portland Cement; Cures; Coating in panels.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de revestimento de gesso nas edificações como uma alternativa prática e econômica tem aumentado muito nos últimos anos. O gesso tem a vantagem de endurecer rapidamente e proporcionar um acabamento fino, mas é limitado ao uso interno devido à sua sensibilidade à umidade. O cimento Portland, por sua vez, não é comparável com o gesso quanto ao endurecimento rápido e ao seu acabamento, pois não é empregado na forma de pasta porque apresenta fissuras mapeadas devido à sua retração; mas no estado endurecido é resistente e durável em contato com a água.

Misturas de gesso com cimento Portland não são usualmente utilizadas, porque podem resultar em expansão deteriorando o revestimento.

Como o revestimento de gesso está sendo largamente utilizado, é de grande interesse por parte da construção civil poder aplicá-lo em outros locais que não sejam somente os internos, aumentando com isso a sua utilização visto ser o revestimento de gesso de fácil aplicação, endurecimento rápido, acabamento liso e de baixo custo comparado com os revestimentos tradicionais (chapisco, emboço e reboco)

Embora essa mistura não seja quimicamente estável, com o avanço da tecnologia do cimento, atualmente há diferentes tipos de cimento Portland, com elevado teores de adição, que poderiam permitir essa mistura.

Um estudo recente (Klover, 1998) abordou a adição de cimento Portland e sílica ativa ao gesso, resultando em um sistema com nível de durabilidade maior do que a mistura de gesso puro. O sistema mostrou também uma relação relativamente alta de resistência seca/úmida, e uma redução da expansão, principalmente nas misturas com sílica ativa sujeita à umidade.

Esses resultados permitem vislumbrar uma possível convivência pacífica entre o gesso e o cimento Portland, o que motivou a presente pesquisa experimental. No desenvolvimento deste trabalho, foi possível observar que poucos estudos relacionados às misturas de gesso com cimento e de gesso com cimento e sílica ativa foram realizados no Brasil.

Para desenvolver este trabalho, realizou-se uma pesquisa bibliográfica atualizada sobre a utilização do gesso como revestimento, as misturas de gesso e cimento Portland comum, bem como a sua aplicação. Desta forma, no *capítulo 2*, analisou-se tudo sobre o gesso, desde a sua formação geológica, a calcinação, os tipos de fornos utilizados no Brasil, as reações de desidratação, hidratação e tempo de pega. Em seguida, no *capítulo 3*, fez-se algumas considerações sobre o cimento Portland comum, e o cimento Portland de alto-forno. As adições de sílica ativa e escória de alto-forno foram estudadas no *capítulo 4*, onde se analisou a hidratação da escória de alto-forno, os elementos que ativam as escórias bem como a quantidade de escória permitida em cimentos nacionais.

No *capítulo 5*, tem-se algumas considerações sobre a mistura de gesso com cimento e sílica ativa, e sobre a deterioração dos produtos de cimento devida à etringita e à thaumasita, causados por suas expansões.

Para ter-se uma idéia mais prática da aplicação do gesso em revestimento, no *capítulo 6*, foi descrito passo a passo a maneira que os gesseiros utilizam para a aplicação do gesso em revestimento de tetos e paredes incluindo alguns ensaios para melhorar esta aplicação, desde o preparo do substrato até a verificação final de planicidade dos painéis.

No *capítulo 7* encontra-se a investigação experimental utilizada no desenvolvimento deste trabalho e, no capítulo posterior, vêm os resultado e a análise.

O *capítulo 8* analisa a consistência da pasta, o tempo de início e fim de pega, a absorção capilar e a perda de massa, a resistência à compressão e à tração das diversas misturas submetidas a cura interna e externa. Segue-se a análise da permeabilidade ao ar, a difração de raios-X, em que se faz uma análise qualitativa dos compostos mais prováveis que compõem as pastas. Encontram-se, também, os resultados da análise térmica diferencial e a análise

termogravimétrica, em que se procurou observar a presença de diversos compostos e a quantidade de água não evaporável. Fez-se também uma análise dos revestimentos de gesso aplicados em paredes internas e externas sobre blocos de concreto.

Finalmente, no *capítulo 9*, estão as conclusões relativas às diversas misturas e no *capítulo 10*, encontra-se a descrição de algumas propostas para a continuidade da pesquisa.

Assim foram avaliados os comportamentos de pastas resultantes da substituição de parte do gesso por cimento Portland e de parte do cimento por sílica ativa. Os materiais utilizados foram gesso, cimento Portland de alto-forno, e sílica ativa disponíveis no mercado. No desenvolvimento experimental foram empregadas cinco misturas de gesso-cimento Portland-sílica ativa conforme os traços e denominações a seguir: M1=M6 (100/0/0); M2=M7 (85/15/0); M3=M8 (75/25/0); M4=M9 (85/10/5), M5 = M10 (75/20/5) e relação água/aglomerante de 0,70. Parte das misturas foram aplicadas sobre um painel de alvenaria de blocos de concreto e expostas a duas condições de exposição: cura interna, em local protegido das intempéries (M6; M7; M8; M9; M10); e cura externa, em local submetido às ações das intempéries (M1; M2; M3; M4; M5). Moldaram-se corpos-de-prova para realizar os ensaios de laboratório. Os corpos-de-prova das misturas M1 a M5 foram submetidos à cura externa junto aos painéis externos, e os corpos-de-prova das misturas M6 a M10 foram submetidos à cura interna em laboratório.

O comportamento das misturas foi avaliado durante um período de 180 dias, por meio de ensaios da pasta no seu estado fresco (consistência e pega) e da pasta no seu estado endurecido (absorção capilar, resistência à compressão e tração, permeabilidade ao ar, expansibilidade longitudinal, difração de raios-X, análise térmica diferencial e análise termogravimétrica). Realizou-se também, ao longo do tempo, a observação tátil e visual das misturas aplicadas internamente e externamente sobre os painéis de alvenaria.

Dos resultados obtidos observou-se que a sílica ativa na mistura reduz a formação de etringita, especialmente nos revestimentos sujeitos à umidade. Da mesma forma houve melhoria à abrasão e menor perda de massa ao longo do tempo nas misturas com cimento, e após 180 dias

de sua aplicação não houve o aparecimento de fissuras ou gretamento visíveis na superfície dos revestimentos

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho teve como objetivo observar o comportamento das misturas de gesso, cimento Portland de alto-forno e sílica ativa encontrados no mercado brasileiro, para serem aplicados em revestimento interno e externo sujeitos à umidade. Neste sentido, foi necessário verificar a formação de etringita e de thaumasita, que provocam o aparecimento de fissuras ou empolamento dos revestimentos, principalmente na presença de umidade, bem como a proporção ideal de cimento para melhorar as resistências das pastas de gesso.

## **1.2 Experiência Nacional**

Como já exposto, poucos trabalhos e estudos foram realizados no Brasil sobre a mistura de gesso com cimento. Entretanto, no início dos anos 80 a mídia divulgou e os meios técnicos analisaram o ocorrido nas edificações realizadas pela COHAB-SP, quando a construtora contratada para realização do empreendimento utilizou painéis pré-moldados alveolares para vedação vertical com o então chamado “concreto plástico químico”.

O “concreto plástico químico”, era uma mistura de gesso com cimento Portland comum, agregados leves ou normais, água e aditivos. A quantidade de gesso e cimento, foi da ordem de 60% de gesso e 40% de cimento, em massa seca do total de aglomerante da mistura. O mecanismo esperado e desejado com esta mistura seria de que o gesso entrando em contato com a água de amassamento hidratava-se formando o sulfato de cálcio di-hidratado que confere resistência mecânica suficiente para a desforma rápida e transporte do painel. Com o tempo, o

cimento presente, também iria-se hidratar e, conseqüentemente, o painel iria adquirir resistência maior.

Alguns alvéolos dos painéis eram armados e preenchidos com concreto convencional; sua deterioração culminou com a demolição de todo o conjunto habitacional.

O que se pode concluir neste caso foi que o teor de sulfato de cálcio utilizado era propício à formação de etringita, acarretando expansão e desagregação progressiva dos painéis. Outro problema era a elevada porosidade e higroscopicidade intensificando a interação dos painéis com o meio ambiente, acarretando a alteração das suas características físicas e mecânicas. Um problema de natureza físico-química ocorre pois o sulfato de cálcio di-hidratado é solúvel em água, ou seja é capaz de ser lavado e carregado por água de chuva, de chuveiros, de torneiras, águas de lavagem de piso, etc. Sendo o gesso levemente ácido pode contribuir para o aparecimento de fungos emboloradores, que encontram nos aglomerantes à base de cálcio um meio propício para o seu desenvolvimento. Outro fato que agravou o sistema chegando à demolição, foi o ataque do gesso às armaduras dos pilaretes (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, parecer técnico nº 5.250/89 DCC-AMPC – Estudo de Viabilidade de Recuperação dos Edifícios do “Sistema COAN”).

Outro caso recente foi a deterioração de revestimentos externos em edifícios de quatro pavimentos. O fato ocorreu quanto foi utilizada argamassa mista de cimento, cal e areia, pré-misturados. Ensaio efetuados nos laboratórios da Faculdade de Engenharia de Sorocaba revelaram uma quantidade em torno de 15% de gesso na mistura em relação à massa dos aglomerantes. O gesso era colocado indiscriminadamente na obra pelos pedreiros com o intuito de obter um endurecimento rápido da argamassa.

Como está havendo um uso indiscriminado do gesso para revestimento diretamente sobre os elementos de alvenaria e em outras formas de utilização em contato com cimento Portland e umidade, pretendeu-se, neste trabalho, ampliar o conhecimento técnico neste tema.

## 2 GESSO

O gesso é um aglomerante constituído de sulfatos de cálcio hemi-hidratados e anidros. É obtido pela calcinação da gipsita natural, constituída de sulfato de cálcio bi-hidratado e de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio. As impurezas variam até um limite máximo de 6%. Esse processo é obtido em fornos, com temperaturas e tempos controlados, devido à influência que essas impurezas terão no produto final.

Os hemi-hidratos e os sulfatos anidros solúveis resultantes da calcinação da gipsita, em presença de água, à temperatura ambiente, reconstituem rapidamente o sulfato bi-hidratado original. Essa combinação faz-se com a produção de uma fina malha cristalizada, interpenetrada, responsável pela coesão do conjunto. Tal fenómeno, conhecido pelo nome de *pega do gesso*, é acompanhada de elevação da temperatura, por ser a hidratação uma reação exotérmica.

O gesso é encontrado no mercado a granel ou em sacos de 40 kg, sendo um pó branco de elevada finura, cuja massa unitária varia de  $0,70 \text{ g/cm}^3$  a  $1,00 \text{ g/cm}^3$ , diminuindo com o grau da finura. Sua massa específica aparente é de cerca de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ .

Na construção civil, o gesso é usado especialmente em revestimentos e decorações interiores, na fabricação de ornamentos, painéis para parede, forros entre outros. Para os revestimentos em painéis, a pasta ou a argamassa de gesso, pode ser aplicada de forma manual ou projetada mecanicamente.

## 2.1 Gipsita

A gipsita é uma rocha sedimentar de origem química e salina, formada pela precipitação de sais. Essa precipitação ocorre devido às mudanças nas condições físico-químicas do meio. A gipsita é então formada a partir das reações entre os elementos em suspensão e outros materiais externos, especialmente o hidrogênio e oxigênio da água.

No caso da gipsita, as águas estão saturadas de sais de sulfatos ( $\text{SO}_4^{--}$ ) e elementos como o cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) que, com a evaporação e o conseqüente aumento da salinidade, se precipitam combinando e cristalizando-se em camadas compactas, em geral associadas com a  $\text{CaSO}_4$  e o  $\text{C}_3\text{S}$ . Como a gipsita se forma pela evaporação de lagos ou mares de água salgada ela se classifica como evaporito, uma forma de bacia sedimentar (Carvalho et al., 1994).

As condições necessárias para a formação de evaporitos são variáveis como, por exemplo, a água do mar que deve conter aproximadamente 3,5% de salinidade. A quantidade de água que entra nos lagos de água salgada deve ser menor do que a água que evapora. Quando a quantidade de água que evapora alcança 80%, a precipitação de evaporito começa a ocorrer, seguindo uma ordem, onde componentes mais insolúveis como a gipsita precipitam primeiro. Após o desaparecimento de 90% da água original outros minerais solúveis como a halita começam a se formar (Carvalho et al., 1994).

A gipsita pura possui cor branca podendo ser encontrada algumas variedades transparentes. Devido à impureza da matéria prima, existem também em várias tonalidades de marrom, cinza, vermelho e amarelo. Normalmente a quantidade de impurezas não ultrapassa a 6%, sendo constituídas de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) (Carvalho et al, 1994).

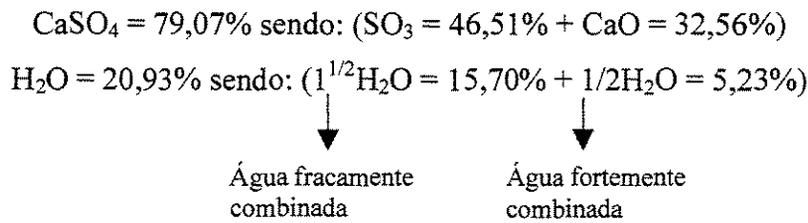
Os principais depósitos nacionais de gipsita estão localizados na Chapada do Araripe, entre Pernambuco, Ceará e Piauí (Figura 2.1), (Pereira, 1973).



*Figura 2.1 – Localização das principais jazidas de gipsita no Brasil (Pereira, 1973).*

### 2.1.1 Estrutura Cristalina da Gipsita

A gipsita é um mineral do grupo dos sulfatos. Cada molécula é composta de um átomo de cálcio, um de enxofre e quatro de oxigênio, e são hidratados por duas moléculas de água cristalizada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), possuindo a seguinte composição, para valores em porcentagem de massa: (Asso, 1973):



Das duas moléculas de água da gipsita, uma e meia está fracamente combinada e a outra meia molécula fortemente combinada. Isto explica o porquê da ocorrência de pelo menos duas fases distintas na fabricação do gesso. Na primeira fase se desprende a água fracamente combinada, é quando se obtém o hemi-hidrato e a segunda fase quando se desprende a água fortemente combinada, obtendo-se o sulfato anidro solúvel, também conhecido como anidrita III. (Van Thoff, citado em Asso,1973)

A estrutura cristalina é um arranjo atômico no qual os átomos se agrupam ordenadamente no espaço.

As estruturas cristalinas podem ser encontradas de sete formas; cúbica, tetragonal, romboédrico, hexagonal, orthorômbico, monoclinico e triclinico conforme ilustrado na Tabela 2.1 e na Figura 2.2.

**Tabela 2.1 – Geometria dos sistemas cristalinos (Jastrzebski, 1976)**

Sistema cristalino	Tipo de unidade celular	Eixos	Ângulos axiais
cubico	Simples, corpo centrado, face centrada	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
tetragonal	Simples, corpo centrado	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
orthorômbico	Simples, base centrada, corpo centrado	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
romboedral	simples	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$
hexagonal	simples	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$
monoclinico	Simples, base centrada	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$
triclinico	simples	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

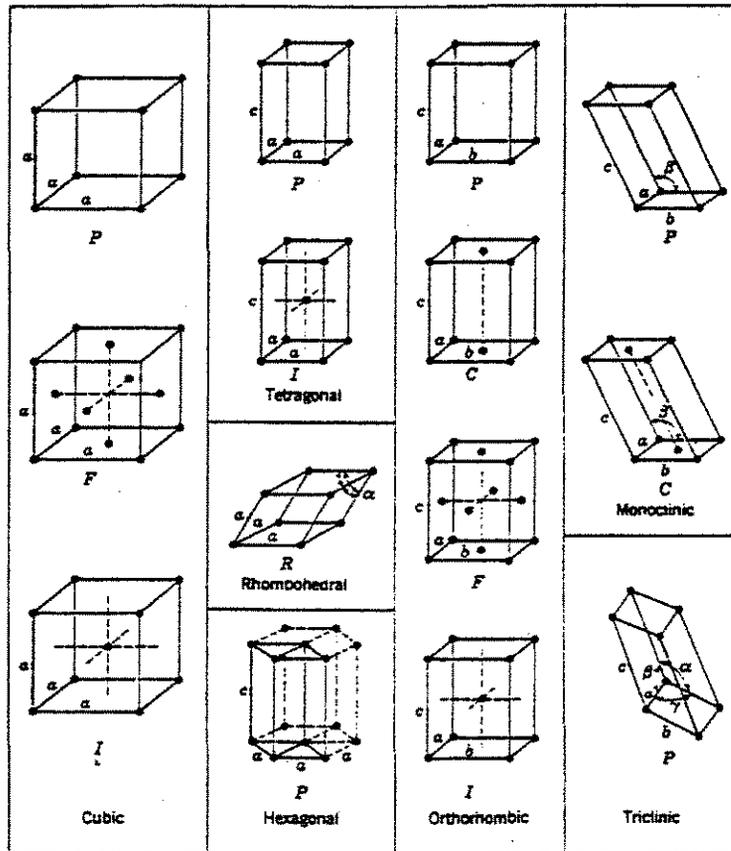


Figura 2.2 – Estruturas cristalinas ( Jastrzebski, 1976).

As formas dos cristais são determinadas pela estrutura básica dos átomos que os compõem. Para se deduzir a exata simetria de um cristal é necessário traçar um retrato da densidade dos elétrons em todos os pontos da unidade celular.

A gipsita tem estrutura cristalina externa composta por cristais que podem ser tubulares com faces curvas, colunares, aciculares ou terminados em seta, e ainda de variedade fibrosa. Seus cristais pertencem ao sistema monoclinico de simetria, no qual não há par de faces com o mesmo comprimento, largura e altura.

As formas cristalinas da gipsita são prismas monoclinicos com quatro a oito moléculas de água e a rede cristalina é formada por capas de cálcio e grupos tetraédricos de sulfatos

separados por lâminas ou capas de moléculas de água, as quais, ao serem eliminadas, não destroem a estrutura cristalina (Riddell, citado em Asso, 1973).

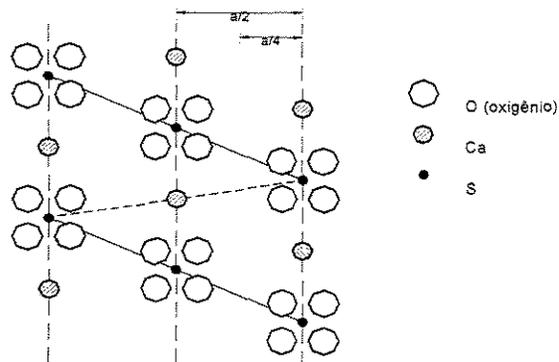
De acordo com Kamierczak, 1990, os elementos constituintes de sua estrutura são os seguintes:

*Íons  $SO_4$* , formando tetraedros, sendo o enxofre o átomo central. A distância entre dois átomos de oxigênio no tetraedro é de 2,44 Å e a distância entre os átomos de oxigênio e o enxofre é de 1,49 Å

*Átomos de cálcio*, próximos a oito átomos de oxigênio, dos quais dois são ligados à molécula de água. A distância das ligações  $Ca - H_2O$  é de 2,44 Å, sendo que o centro das ligações está sobre a bissetriz do ângulo  $H - O - H$ , formado pelas moléculas de água.

*Moléculas de água*, cada qual ligada a dois átomos de oxigênio de dois tetraedros  $SO_4$  e a um átomo de cálcio. A distância  $H_2O - \text{oxigênio do } SO_4$  é de 2,7 Å e o ângulo  $H - O - H$  é de 108°.

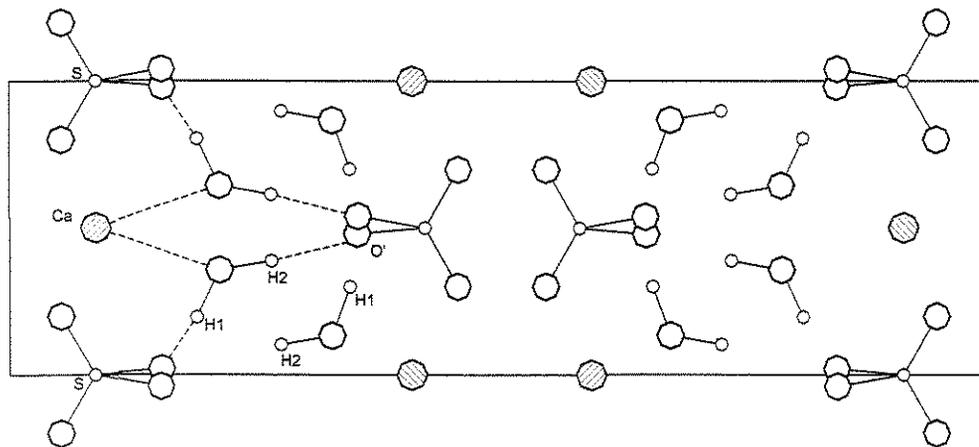
A gipsita apresenta estrutura lamelar em camadas paralelas ao plano (0 1 0), alternando uma camada de água com duas camadas de sulfato ( $CaSO_4$ ). Qualquer camada de sulfato é constituída por planos  $CaSO_4$  paralelos ao eixo c, espaçados de 5,2 Å. A distância de um íon cálcio ao átomo de enxofre situado no centro do tetraedro é de 3,10 Å. Através do plano (0 1 0), qualquer plano  $Ca - SO_4 - Ca - SO_4$  separa-se por  $a/2$  e  $c/2$  do próprio plano. Uma camada idêntica situa-se a  $b/6$ , deslocada a  $a/4$  da anterior, conforme Figura 2.3.



**Figura 2.3 – Planos cristalinos da gipsita (Kamierczak, 1990)**

As moléculas de água apresentam dois tipos de ligação com as camadas de sulfato; uma forte ligação em sua própria lâmina, entre um íon cálcio (  $O - Ca$  ) e um átomo de oxigênio de um grupo sulfato (  $H_1 - O_1$  ) e uma ligação fraca com as lâminas adjacentes, entre o segundo átomo de hidrogênio e um átomo de oxigênio de um grupo sulfato (  $H_2 - O$  ).

Tais ligações são exemplificadas na Figura 2.4, segundo uma projeção da malha de Bragg sobre o plano ( 0 0 1 ).



**Figura 2.4—Projeção da estrutura da gipsita sobre o plano (0 0 1) (Kazmierczak, 1990)**

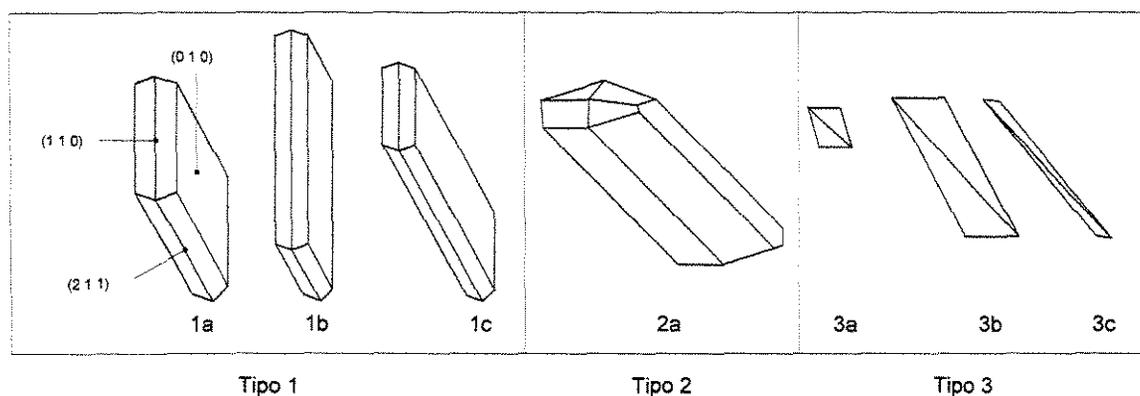
Existem três tipos principais de fases cristalinas das gipsitas cristalizadas pela natureza (Figura 2.5): (Lacroix, citado em Cincotto/Kazmierczak, 1990)

Tipo 1 – Cristais achatados segundo (0 1 0) e apresentando como faces dominantes (1 1 0) e (2 1 1). É denominado gipsita trapezoidal.

Tipo 2 – Diferencia-se do Tipo 1 por apresentar forma de pirâmides arredondadas.

Tipo 3 – Não apresentam zona prismática e são constituídos por pirâmides ou apresentam na forma de lentilhas cônicas ou alongadas.

O tipo de estrutura cristalina da gipsita tem influência na escolha do tipo de forno para a calcinação, no tempo de pega do gesso e na qualidade do produto final. No entanto, este estudo precisa ser melhor desenvolvido e não é objeto de estudo deste trabalho de pesquisa.



**Figura 2.5 – Faces cristalinas apresentadas pelas gipsitas cristalizadas na natureza (Lecroix, citado em Kazmierczak-1990)**

## 2.2 Fornos

O forno tem uma influência no processo da calcinação e no produto final obtido. O forno ideal seria aquele onde as condições de temperatura fossem idênticas em todos os seus pontos, o que levaria a um rendimento de 100%, ou seja, todo o sulfato di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) presente na gipsita, passaria a hemi-hidratado. Entretanto, verifica-se que isso dificilmente acontece, restando sempre uma porcentagem de material não calcinado (di-hidratado) nos pontos onde a temperatura não atingiu o valor necessário para dissociação em hemi-hidratado. Nos pontos onde a temperatura for excessiva, parte do material poderá passar a sulfato de cálcio anidro (anidrita).

Portanto, a calcinação realizada em fornos apropriados é ideal para se obter maior porcentagem de hemi-hidrato, e para que o gesso resultante seja de melhor qualidade, pois quanto maior for a quantidade de hemi-hidrato maior será o seu poder aglomerante.

No Brasil, especificamente na Chapada do Araripe, onde se encontram as maiores jazidas de gipsita, os fornos utilizados pelas indústrias gesseiras são basicamente os de panela, de marmitta, o rotativo tubular e o de marmitta rotativo (Pereira,1973).

### **2.2.1 Tipos de Fornos Empregados no Brasil**

A fabricação do gesso pode ser feita por meio de diferentes fornos. No Brasil encontram-se tanto os modelos rudimentares como os modelos mais modernos. A matéria prima empregada pode estar moída ou em forma de pasta.

Os fornos utilizados classificam-se em:

- a) Fornos de aquecimento direto e aquecimento indireto. São fornos onde a matéria prima pode entrar ou não em contato com o combustível ou gás de combustão.
- b) Fixo ou rotativo.
- c) Com funcionamento contínuo ou descontínuo.

Uma vez escolhido o tipo de forno, define-se a granulometria da matéria prima a ser calcinada e a necessidade ou não da moagem do produto numa etapa posterior ao processo de calcinação.

Para a fabricação do hemi-hidrato  $\beta$  é possível utilizar fornos com dispositivos de calcinação por aquecimento direto:

- Forno rotativo contra corrente;
- Forno rotativo de fluxo contínuo;
- Forno com moagem simultânea;
- “Procédé Flash” (processo rápido), e dispositivo de calcinação por aquecimento indireto
- Forno rotativo de funcionamento contínuo;
- Forno de marmitta de eixo horizontal;
- Forno de Marmitta de eixo vertical com funcionamento contínuo ou descontínuo;
- Forno estático ( parafuso e de leito fluidizado).

Para a fabricação da anidrita, a gipsita deve ser levada a uma temperatura superior a 250 °C. Industrialmente, as temperaturas de fabricação ficam compreendidas entre 450 °C e 700 °C. Nestas condições de temperatura, não é possível utilizar os mesmos equipamentos empregados para a fabricação do hemi-hidrato. Assim, a escolha do tipo de forno para a fabricação da anidrita torna-se mais restrita. Esta escolha limita-se essencialmente a alguns tipos de equipamentos:

- Fornos rotativos de aquecimento direto, contra corrente e de fluxo contínuo;
- Fornos rotativos de aquecimento indireto;
- Fornos de leito fluidizado;
- Fornos de marmitta.

### **2.2.2 Fornos com Aquecimento Direto**

A seguir, serão descritos de maneira sucinta os fornos com aquecimento direto empregados na fabricação do hemi-hidrato.

a) Forno Meda

É um forno rudimentar, onde a gipsita é colocada sobre o carvão vegetal empregado como combustível, em camadas alternadas dispostas horizontalmente. O conjunto é revestido por uma camada de barro ou argila, na qual se fazem furos para a tiragem do ar. Resulta em gesso impuro misturado com carvão e de qualidade desuniforme. Só se aproveita 1/3 de cada fornada (Bauer, 1994).

b) Forno de Campanha

Modelo rudimentar, no qual os fragmentos de gipsita são colocados no interior de um poço cavado no terreno, ou contra barranco e paredes de pedra ou alvenaria cerâmica, formando o volume de uma fornalha na parte inferior onde a lenha é empregada como combustível (Nolhier, 1986).

Nesses fornos a gipsita é misturada com o combustível, geralmente a lenha, resultando um produto de qualidade inferior, escurecido pelas contaminações inevitáveis, contendo elevada proporção de cinzas que não se separam do produto final.

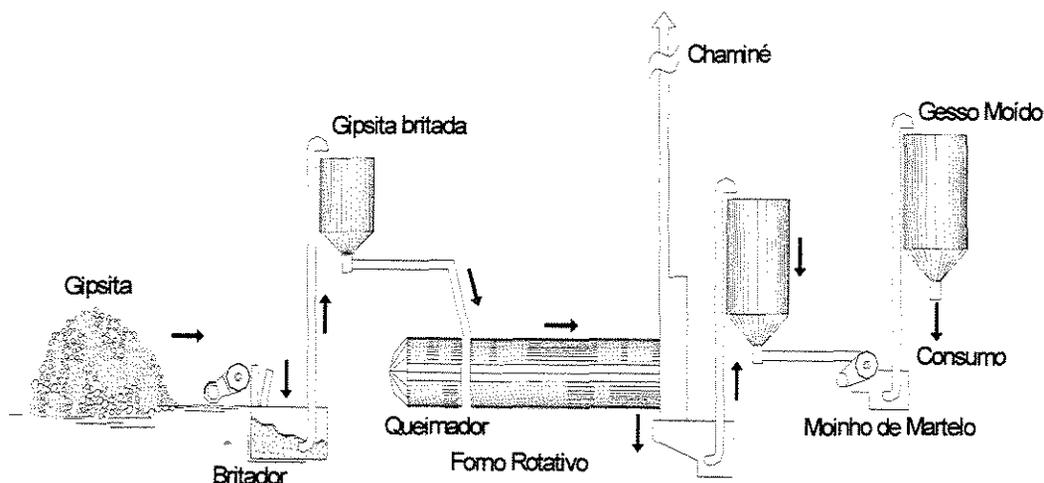
c) Forno de Telheiro:

Também considerado primitivo, porém melhor e mais empregado. O combustível é colocado em linha e coberto com abóbodas de pedra de gipsita maiores seguido de pedras menores. A gipsita leva de 8 a 10 horas para desidratar-se e isso ocorre desuniformemente, resultando gesso impuro com parte supercalcificada e parte mal calcinada (Nolhier, 1986).

d) Forno Rotativo:

É o processo mais moderno de produção do gesso. Em todos os seus aspectos assemelha-se ao processo de produção de cal e cimento em forno rotativo. Esses fornos caracterizam-se pelo tubo de aço giratório, com pequena inclinação e o seu interior revestido com material refratário.

Nestes equipamentos, a gipsita moída entra em contato direto com as chamas, que saem de um maçarico, ao lado da alimentação do forno. A gipsita, à medida que vai sendo calcinada percorre, por gravidade, toda a extensão do forno. O tempo de permanência no forno é controlado pela sua velocidade de rotação (Figura 2.6) (Nolhier, 1986).



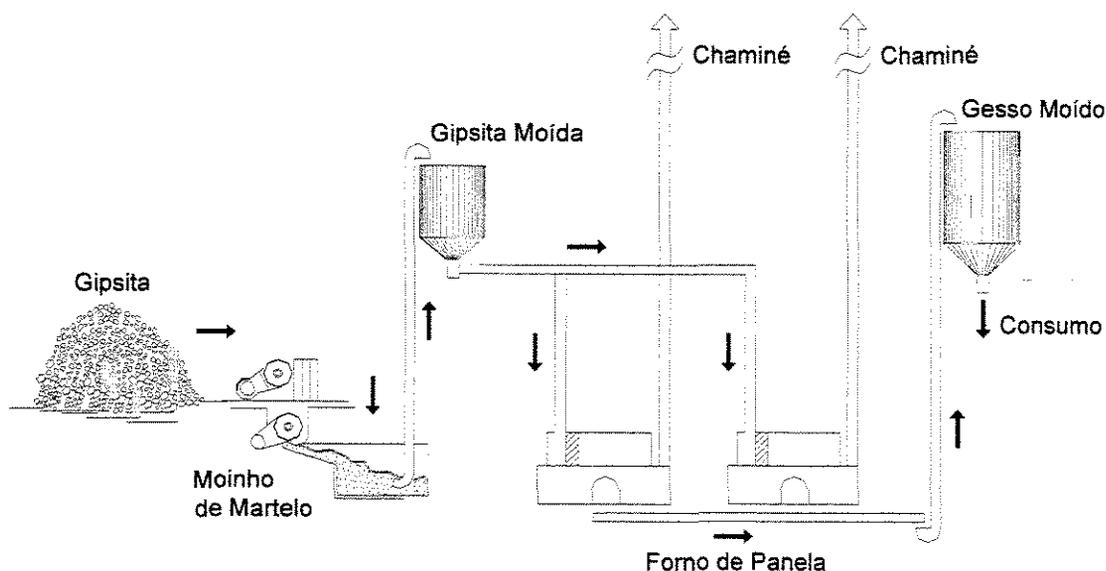
*Figura 2.6 – Fluxograma – Forno rotativo*

### 2.2.3 Fornos com aquecimento indireto

É um processo mais moderno de calcinação da gipsita. Os equipamentos caracterizam-se pela forma de panelões fechados, com capacidade variável entre 10 e 20 toneladas, onde a gipsita pulverizada é aquecida. O material é agitado e aquecido por fogo indireto, gerado na parte inferior por queima de óleo combustível BPF ou lenha. A temperatura é controlada através de pirômetro e um sistema de palhetas internas (Figura 2.7). Entre 100 e 110 °C a umidade superficial é eliminada, ocorrendo a desidratação entre 120 e 150 °C. A água de hidratação é eliminada sob forma de vapor, com agitação violenta, que se assemelha à fervura. Esse processo continua até que a desidratação de 1 ½ molécula de água se complete, ocasião em que o material

entra em repouso. O gesso nesse estágio de produção é denominado de primeira cozedura e se constitui principalmente de hemi-hidratos.

Se o processo for contínuo, mediante a elevação da temperatura até 190 ou 220 °C, elimina-se o restante da água de hidratação, observando-se nova fervura. Obtém-se assim o gesso de segunda cozedura. O material obtido é constituído quase que exclusivamente de anidrita solúvel. Observa-se que o gesso de segunda cozedura pode adquirir qualidades semelhantes ao da primeira cozedura por meio de processo de envelhecimento ao ar atmosférico (Festa, 1995).



*Figura 2.7 – Fluxograma – Forno Marmitta*

### 2.3 Processo de Fabricação do Gesso

Para ilustrar melhor todo o processo de fabricação, a Figura 2.8 apresenta uma fábrica de produção de gesso, desde a entrada da matéria-prima até o ensacamento e distribuição.

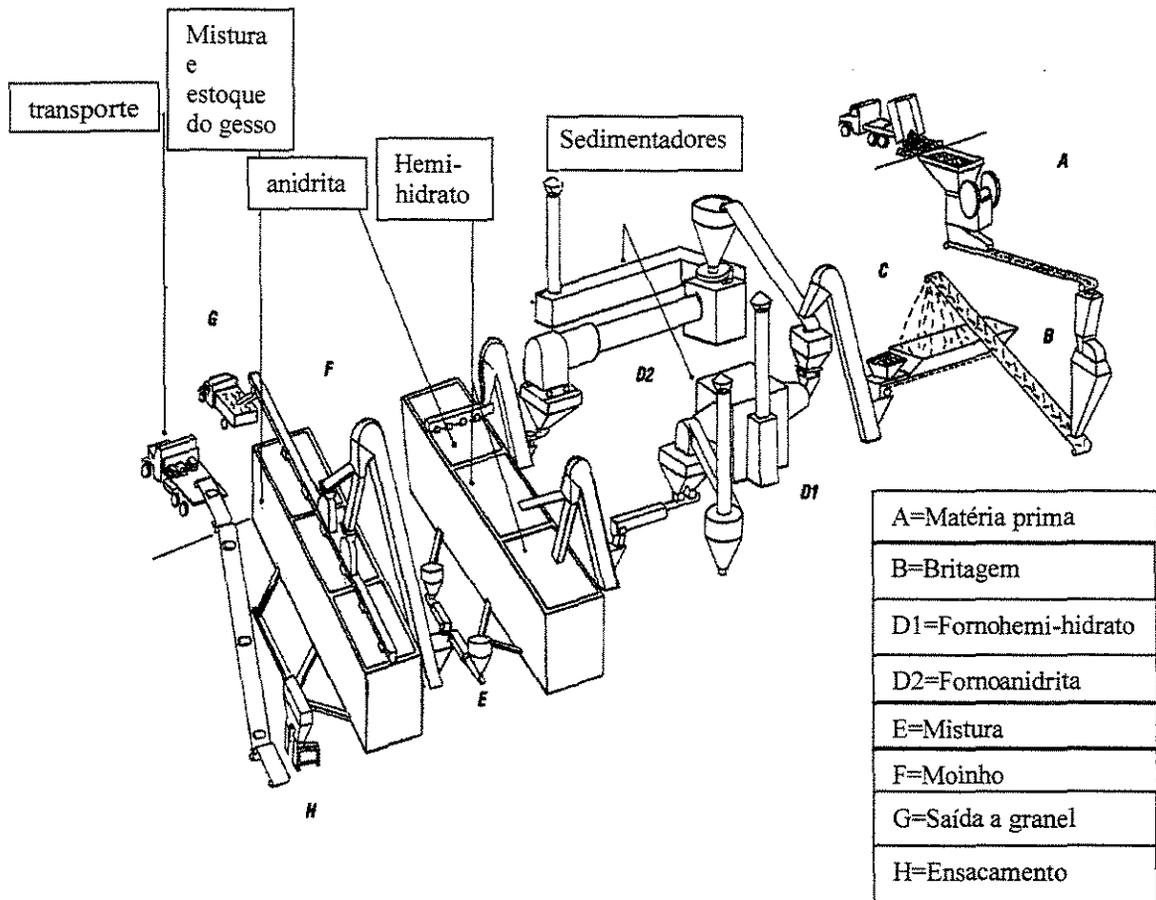


Figura 2.8 – Processo de Fabricação do Gesso (Festa, 1995)

## 2.4 Reações de Desidratação e Calcinação da Gipsita

A partir da desidratação da gipsita, que ocorre na calcinação, é possível obter o hemi-hidrato  $\alpha$  e o hemi-hidrato  $\beta$ , as Anidritas tipo I, II e III (Tabela 2.2 e 2.3).

Na prática, a temperatura na qual se dá a calcinação depende do tipo de forno, da velocidade de aquecimento da matéria prima, da pressão no interior do forno, da granulometria da gipsita e da sua densidade.

**Tabela 2.2 – Reações de desidratação**

<b>Tipo</b>	<b>Reações</b>	<b>Produto da reação</b>
Desidratação da gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} + 1\ 1/2\text{H}_2\text{O}$	<b>Hemi-hidrato</b>
Desidratação do hemi-hidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O} + \delta\text{H}_2\text{O}$	<b>Anidrita III</b>
Desidratação da Anidrita III	$\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 + \Delta\text{H}_2\text{O}$	<b>Anidrita II</b>
Supercalcinação	$\text{CaSO}_4 \Rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_2/\text{SO}_3$	<b>Anidrita II <math>\Rightarrow</math> Anidrita I</b>

A anidrita III ( $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$ ) é intermediária entre os hemi-hidratos e a anidrita II, pois apresenta uma quantidade pequena de água combinada ( $0,06 < \varepsilon < 0,11$ ). É obtida em temperaturas entre 180 a 300 °C. A anidrita III é solúvel e instável, extremamente reativa, re-hidratando-se rapidamente funcionando como catalisador na reação de hidratação. A sua presença pode ser benéfica dependendo do tipo de gesso que se pretende obter.

A anidrita II ( $\text{CaSO}_4$ ) é obtida em temperatura entre 300 a 700 °C, é chamada de supercalcinação e é insolúvel.

A anidrita I ou anidrita de alta temperatura, é obtida com temperaturas muito elevadas, acima de 1200 °C. É formada pela dissociação da anidrita II, sendo facilmente contaminada por óxido de cálcio (CaO). Não é observada em temperaturas abaixo de 1200 °C, pois seu resfriamento faz com que se transforme novamente em anidrita II.

A natureza do produto obtido (hemi-hidrato  $\alpha$  ou  $\beta$ , anidrita I, II, ou III) depende do tipo de forno empregado e da temperatura de calcinação no interior do mesmo. Dois princípios são empregados: por via seca e por via úmida.

Utilizando a calcinação por via seca fabrica-se o *hemi-hidrato  $\beta$*  a uma temperatura entre 100 a 180 °C, e a *anidrita III* a uma temperatura entre 180 a 300 °C. Em ambos os casos, qualquer que seja o equipamento, a calcinação é efetuada sob pressão atmosférica ou sob pressão

parcial do vapor de água. Este método de calcinação abrange a maior parte dos dispositivos de calcinação utilizados para produzir os gessos de construção, de moldagem ou pré-fabricação.

A calcinação por via úmida se dá sob pressão de água saturante, dentro de autoclaves de pressão ou à pressão atmosférica, mas dentro de soluções salinas em ponto de ebulição (superior a 100 °C). Deste sistema de calcinação obtém-se o *hemi-hidrato α* que é a base dos gessos especiais para moldagem (próteses dentárias, moldagem de precisão). Este sistema pode igualmente ser utilizado no tratamento da gipsita resultante da fabricação do ácido fosfórico.

**Tabela 2.3 – Compostos formados na calcinação da gipsita**

Compostos	Composição Química	Temperatura de obtenção	OBS
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O		Matéria prima
Hemi-hidrato α ou β	CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O	100 a 180 °C	gesso
Anidrita III	CaSO <sub>4</sub> .εH <sub>2</sub> O	180 a 300 °C	Solúvel e instável, reativa, re-hidratando-se
Anidrita II	CaSO <sub>4</sub>	300 a 700 °C	Supercalcinada e insolúvel
Anidrita I	CaO + SO <sub>2</sub> /SO <sub>3</sub>	Acima de 1200 °C	Gesso morto, cal virgem
Carbonato de cálcio	CaCO <sub>3</sub>	-	impureza
Carbonato de magnésio	MgCO <sub>3</sub>	-	impureza
Sílica	SiO <sub>2</sub>	-	impureza
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	impureza
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	impureza
Óxido de cálcio	CaO	-	impureza
Anidro sulfúrico	SO <sub>3</sub>	-	impureza
Anidro carbônico	CO <sub>2</sub>	-	impureza

ε= pequena quantidade de água combinada ( 0,06 < ε < 0,11 )

Na composição do gesso encontra-se tanto o hemi-hidrato quanto a anidrita, em qualquer uma das suas formas, visto que a temperatura no forno não é idêntica em todos os pontos. Desta

forma, o rendimento da operação não é de 100%. Em algum ponto do forno a temperatura não atinge o valor necessário para dissociação em hemi-hidrato, restará uma proporção de di-hidrato; da mesma forma, parte do material pode passar a anidrita se em algum ponto do forno a temperatura for excessiva.

Na construção civil utiliza-se o hemi-hidrato  $\beta$ , mesmo apresentando uma cristalização menos homogênea e menos solúvel que o hemi-hidrato  $\alpha$ , devido ao seu baixo custo e facilidade de obtenção.

#### 2.4.1 Classificação do Gesso

O tempo de desidratação pode definir o gesso como sendo de fundição ou revestimento.

O gesso é classificado de acordo com o percentual de hemi-hidrato presente. Quanto mais rico em hemi-hidrato maior seu poder aglomerante, já que o di-hidrato e a anidrita II e I são inertes. Sendo assim, eles se classificam de acordo com os teores especificados na Tabela 2.4.

*Tabela 2.4 – Classificação do gesso quanto aos teores de hemi-hidrato*

<b>Tipo</b>	<b>% de Hemi-hidrato</b>
Escaiola	80
Branco	66
Negro	50

A composição química do gesso é determinada por análises laboratoriais e tem grande importância para uma análise de suas propriedades. Os resultados vêm expressos como:

- água combinada = h (%)
- sílica e resíduos insolúveis = p (%)
- óxidos de cálcio (CaO) = c (%)
- óxidos de magnésio (MgO) = m (%)
- anidrido sulfúrico (SO<sub>3</sub>) = s (%)
- anidrido carbônico (CO<sub>2</sub>) = r (%)

## 2.5 Estrutura Cristalina do Gesso

Não há consenso a respeito da classificação da estrutura cristalina dos hemi-hidratos. Os hemi-hidratos  $\alpha$  e os hemi-hidratos  $\beta$ , apresentam estados de cristalização diferentes. A variedade  $\beta$  apresenta dimensões variando entre 500 Å e 1000 Å, massa unitária maior que 700,00 kg/m<sup>3</sup> e dureza maior que 30,0 N/mm<sup>2</sup>. Os hemi-hidratos  $\alpha$ , apresentam-se na forma de cristais hexagonais, são mais estáveis e dificilmente hidratam-se sendo mais lentos (na hidratação) do que a variedade  $\beta$  (Cincotto/Kazmierczak, 1990).

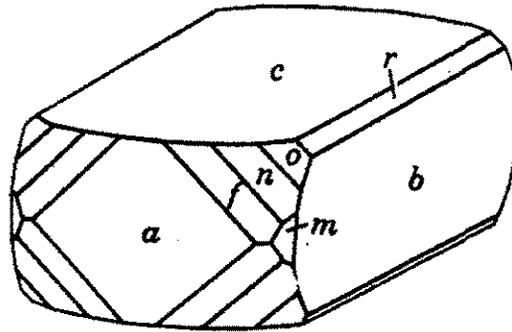
O sulfato de cálcio anidro solúvel (anidrita III) apresenta-se na forma cristalina orthorômbica, tem massa específica variando entre 2,899 e 2,985 g/cm<sup>3</sup>, dureza MOHS entre 3,0 e 3,5 e hidrata-se rapidamente, sofrendo aumento volumétrico. Segundo Flörke (citado em Cincotto/Kamzmierczak, 1990), a estrutura do CaSO<sub>4</sub> consiste em um plano Ca – SO<sub>4</sub> onde o íon Ca está ao longo do eixo c, e nos tetraedros o íon SO<sub>4</sub>.

O sulfato de cálcio insolúvel (anidrita II) possui as mesmas características da anidrita III diferenciando somente na velocidade de hidratação que é bastante lenta.

O sistema cristalino apresentado à RILEM (citado em Cincotto/Kamzmierczak, 1990) é definido por  $a=6,21\text{Å}$ ,  $b=6,95\text{Å}$  e  $c=6,96\text{Å}$ . Sendo 1 Å = angstrom = 10<sup>-10</sup>m = 10<sup>-8</sup> = 0,1nm.

(Figura 2.9). Sua estrutura é constituída por planos Ca – SO<sub>4</sub> – Ca paralelos ao eixo a, sendo o cálcio e os grupos de sulfato distanciados 3,1Å.

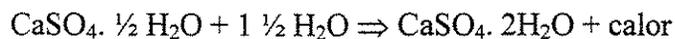
As fases cristalinas da anidrita dependem de suas condições de hidratação, (Cincotto/Kazmierczak, 1990).



*Figura 2.9 – Estrutura cristalina da anidrita. (Rejl, 1994)*

## 2.6 Hidratação e Tempo de Pega

A pega e o endurecimento dos hemi-hidratos misturados com a água é a consequência prática e útil de sua hidratação. O mecanismo de hidratação do gesso é a dissolução-precipitação, ou seja, ao entrar em contato com a água o gesso dissolve-se dando origem a uma solução de íons Ca<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, os quais ao atingirem a saturação, precipitam cristais de di-hidrato (Antunes et al., 1999).



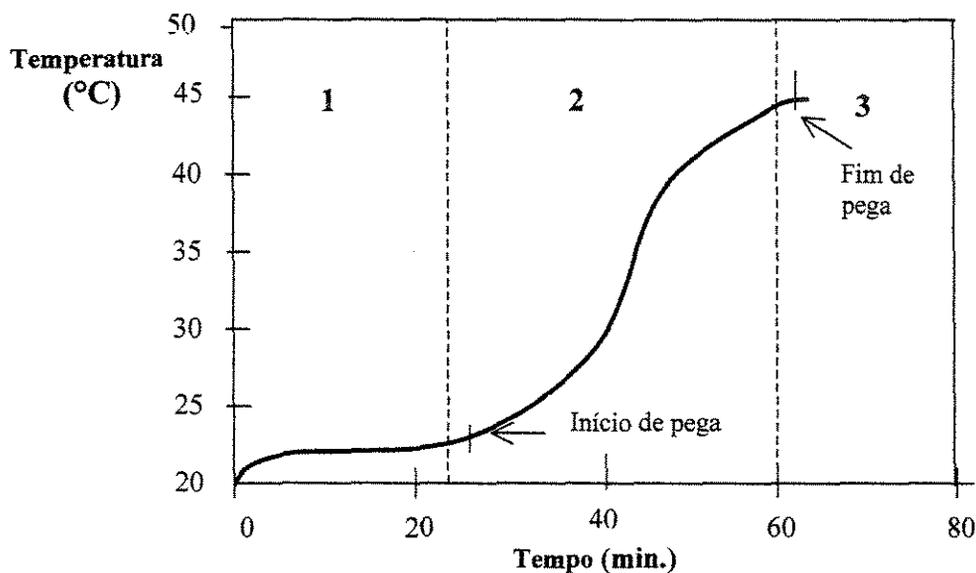
A hidratação do gesso pode ser decomposta em três fases (Figura 2.10):

*1ª fase:* Ocorre uma pequena hidratação seguida do período de indução e início de pega. A duração é de alguns minutos e começa no momento da introdução do pó de gesso na água. O hemi-hidrato é primeiro umedecido pela água e absorve uma parte dela. Em seguida, se dissolve

até a saturação da água. Uma pequena quantidade de água fica aderida à superfície dos grãos sólidos e rapidamente formam-se falsos hidratos instáveis em torno dos grãos de gesso (Cincotto et al., 1990).

*2ª fase:* Há um arranjo cristalino dos falsos hidratos que se tornam verdadeiros hidratos. Esses últimos constituem, então, os núcleos de hidratação da reação futura que é possível de se acelerar multiplicando-se o número de núcleos de hidratação ou diluindo-os na solução. A multiplicação dos núcleos de hidratação é realizada unidirecionalmente nas instalações de fabricação pelo acréscimo de gesso fino. Os grãos finamente moídos de gesso constituem então os núcleos de hidratação. A dispersão e a ativação dos falsos hidratos é realizada por uma malaxação (agitação violenta). Os choques mecânicos separam então os falsos hidratos dos hemi-hidratos, o que multiplica as superfícies livres e acelera a reação (Cincotto et al., 1990).

*3ª fase:* A reação atinge o ponto máximo de incremento de temperatura, que corresponde à conclusão da hidratação, isto é, o final da pega. A solução supersaturada em hemi-hidratos precipita. Há cristalização em gipsita. Essa reação é autocatálica e exotérmica (Cincotto et al., 1990).



*Figura 2.10 – Exemplo de curva de hidratação de uma pasta de gesso (Clifton, 1973, citado em Antunes et al., 1999)*

A partir da terceira fase a cristalização torna-se mais lenta em razão do desaparecimento do hemi-hidrato. Essa etapa tem uma influência essencial sobre as características finais do produto, retração e características mecânicas. É a fase mais difícil de ser controlada devido ao revestimento e crescimento dos cristais (Cincotto et al. 1990)

Em outras palavras, quando o gesso entra em contato com a água de amassamento, uma parte do hemi-hidrato se dissolve rapidamente; sua combinação com 1 1/2 molécula de água resulta em di-hidratos que são cinco vezes menos solúveis que o hemi-hidrato, tornando assim a solução supersaturada. A mistura adquire uma consistência pastosa permitindo manter a trabalhabilidade durante alguns minutos. No processo de cristalização, uma parte dos hemi-hidratos dissolvidos libera uma certa quantidade de água que agirá sobre outros hemidratos e assim sucessivamente. A consistência da pasta aumenta pouco a pouco. Quando a cristalização termina o gesso está solidificado (Cincotto et al., 1990).

Vários fatores modificam a velocidade de hidratação do gesso ou a pega do gesso. A relação água/gesso, cujo aumento provoca um aumento do tempo de pega, e a ação da temperatura, tem dois efeitos contraditórios. Por um lado, a elevação da temperatura acelera as reações, mas por outro lado diminui a solubilidade do hemi-hidrato, o que retarda a velocidade de supersaturação e, portanto, da reação global. Os dois efeitos, devido à variação da temperatura da mistura, se conjugam de maneira que a velocidade de hidratação diminui (Cincotto et al., 1990).

O início da pega, observada por calorimetria (Figura 2.10), é o instante em que a taxa de crescimento da temperatura ultrapassa  $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (Clifton, 1973, citado em Antunes et al., 1999).

Com o aumento da temperatura, observa-se uma dilatação linear de, aproximadamente, 0,3%. Após o endurecimento o gesso retrai em de uma proporção inferior à dilatação na hidratação.

A quantidade de água necessária para o amassamento varia de 50 a 80% da massa de gesso seca, conforme o tipo de aplicação a que se destina. Para gesso grosso, próprio para camadas espessas de revestimento, a água varia entre 60 a 70% da massa de gesso seco. Para gesso fino, a quantidade de água varia entre 70 a 80%; a pasta é mais fluída e é própria para

acabamento do revestimento. A quantidade de água utilizada no amassamento é muito maior do que o gesso precisa para a sua hidratação (teoricamente são necessários 21%). A água excedente evapora e confere porosidade ao revestimento, o que aumenta a sua capacidade de deformação.

A quantidade de água exerce uma influência grande na velocidade de reação, no endurecimento e na resistência mecânica. Quanto menor a quantidade de água, mais rápida é a pega. Por outro lado, o excesso de água na pasta pode produzir retardamento na pega e diminuição da resistência mecânica superficial do revestimento.

No caso do gesso constituído de hemi-hidrato e de anidrita solúvel, o mecanismo da pega consiste na combinação do hemi-hidrato com a água para recompor-se em di-hidrato cristalizado. A hidratação rápida da anidrita solúvel e sua cristalização diferenciam-se daquelas obtidas para o hemi-hidrato. Tal cristalização complementar advinda da anidrita solúvel aumenta a coesão da rede de agulhas da gipsita, que por sua vez é o resultado da hidratação dos hemi-hidratos que está presente em maior quantidade. Ao mesmo tempo, o fenômeno se opõe à retração de secagem e garante assim o revestimento sem fissuração (Cincotto et al., 1990).

A velocidade do endurecimento das pastas de gesso depende da temperatura, do tempo de calcinação, da finura, da quantidade de água de amassamento e da presença de aditivos e impurezas.

Gessos de elevada finura dão pega mais rápido e atingem maiores resistências, em razão do aumento da superfície específica disponível para a hidratação. A presença de impurezas, que naturalmente ocorrem na gipsita original, diminui a velocidade de endurecimento. Pode-se também retardar o tempo de pega mediante o emprego de aditivos apropriados. Tais produtos retardam a hidratação por interferência mecânica, formando membranas protetoras intergranulares (Cincotto et al., 1990).

### 3 CIMENTO PORTLAND

Cimento é um termo proveniente do latim “caecmentum” que significa pedaços de pedras ásperas e não talhadas, e pode ser considerado como material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos minerais entre si de modo a formar um todo compacto (Kattar et al.,1999). A ASTM C 150 (1991) define o cimento Portland como sendo um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer, que consiste essencialmente em silicatos de cálcio, usualmente misturados com uma ou mais formas de sulfatos de cálcio e com um produto de adição (escória granulada de alto forno, pozolanas e materiais carbonáticos) (Mehta, 1994).

A utilização de cimento é bem antiga. Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado. Os gregos e romanos usavam calcário calcinado, e aprenderam, posteriormente, a misturar cal, água, areia e pedra britada, tijolos ou telhas realizando o primeiro concreto. Somente no século XVIII registrou-se um avanço da tecnologia dos cimentos, quando John Smeaton em 1756 descobriu que se obtinha uma argamassa melhor quando a pozolana era misturada ao calcário calcinado contendo elevado teor de argila. Desenvolveram-se outros cimentos hidráulicos como o “cimento romano”, obtido por James Parker ao calcinar nódulos de calcário argiloso, culminando com a patente do cimento Portland por Joseph Aspdin em 1824. Este cimento era fabricado aquecendo num forno uma mistura de argila finamente moída e calcário, até eliminar o  $\text{CO}_2$ . Nesta época, a temperatura do forno era bem inferior à necessária para formação do “clínquer”. O cimento moderno foi criado em 1845 por Issac Johnson, que calcinou uma mistura de argila e greda (giz) até a formação do clínquer propiciando as reações necessárias à formação de compostos de alta resistência no cimento (Kattar et al., 1999)

O nome cimento Portland, decorre da semelhança de cor e de qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland (um calcário extraído em Dorset), e é usado até hoje para designar um cimento obtido pela mistura apropriada de materiais calcários e argilosos, ou outros materiais contendo sílica, alumina ou óxido de ferro, aquecidos a uma temperatura necessária para a formação do clínquer, e moagem conjunta com a gipsita. (Kattar et al., 1999)

A qualidade do cimento vai depender da qualidade e proporção dos materiais com que são compostos. Por isso, é necessário conhecer bem suas características e propriedades.

### 3.1 Produção do Cimento Portland

O Cimento Portland é usualmente conhecido na construção civil como cimento, sendo um material em pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação da água.

As matérias primas utilizadas para a obtenção do cimento são:

*Calcário:* O calcário é a principal matéria prima da fabricação do cimento. Quando exposto à temperatura acima de 800 °C, o  $\text{CaCO}_3$  que o constitui, passa para a forma de  $\text{CaO} + \text{CO}_2$  que vai reagir com o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , provenientes da argila e outras matérias primas.

*Argila:* É utilizada para fornecer os silicatos de alumínio e ferro que irão reagir com a cal no interior do forno, formando o clínquer.

*Areia:* Quando ocorre deficiência de  $\text{SiO}_2$  na argila é necessário a utilização da areia como corretivo da farinha crua.

*Minério de ferro:* É utilizado para corrigir a deficiência de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  da argila, e é proveniente do minério de ferro (hematita). Estes compostos interagem entre si no forno formando uma série de produtos mais complexos e, com exceção de um pequeno resíduo de

óxido de cálcio que não teve tempo suficiente para reagir, é atingido um estado de equilíbrio químico. Entretanto, esse equilíbrio não é mantido durante o resfriamento. A velocidade de resfriamento influencia o grau de cristalização e a quantidade de material amorfo presente no clínquer (Neville, 1997).

É possível resumir o processo de fabricação e controle conforme fluxograma (Figura 3.1).

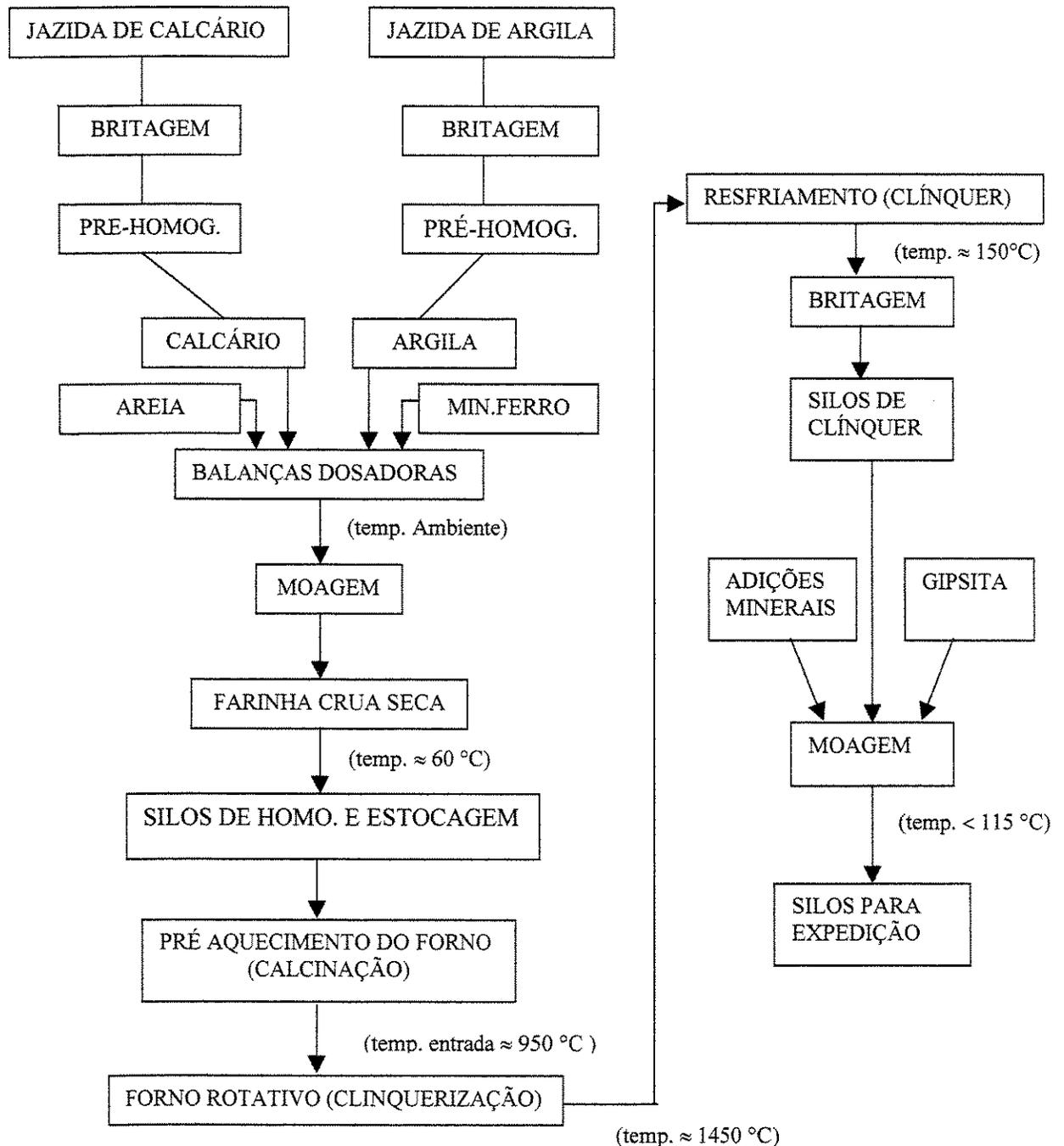


Figura 3.1 – Fluxograma do Processo de Fabricação do cimento Portland (Kattar et al., 1999)

A farinha obtida da moagem das matérias primas é homogeneizada e lançada continuamente na alimentação do pré-aquecedor do forno rotativo. É nesta parte do processo que inicia-se a transformação mineral da matéria prima, com a evaporação da água livre, água combinada, desprendimento do CO<sub>2</sub> do calcário, liberando o CaO para reagir com os silicatos de ferro e alumínio, provenientes principalmente da argila.

As reações complementares para obtenção dos silicatos C<sub>3</sub>S, e C<sub>2</sub>S, e dos aluminatos C<sub>3</sub>A, e C<sub>4</sub>AF, ocorrem no interior do forno rotativo.

A seqüência de reações no processo até a clinquerização e resfriamento pode ser vista na Tabela 3.1.

***Tabela 3.1 – Seqüência de reações no processo até a clinquerização e resfriamento (Kattar et al., 1999).***

<b>Faixa de Temperatura (°C)</b>	<b>Tipo de reação (local)</b>
<u>Aquecimento</u>	
20 - 100	Evaporação da água livre (moagem da farinha)
100 - 300	Perda da água combinada ( pré-aquecedor)
400 - 900	Calcinação das argilas minerais (H <sub>2</sub> O e grupos de OH) (pré-aquecimento.)
> 500	Modificações estruturais nos silicatos (pré-aquecedor)
600 - 900	Dissociação dos carbonatos (pré-aquecedor)
> 800	Formação do C <sub>2</sub> S, prod. Interm., aluminatos e ferrita (forno)
> 1250	Formação da fase líquida (forno)
Aprox. 1450	Formação do C <sub>3</sub> S e C <sub>2</sub> S (forno-zona de queima)
<u>Resfriamento</u>	
1300 - 1240	Cristalização da fase líquida, especialmente os aluminatos e ferrita (após zona de queima, antes do resfriador)
1240 - 150	Consolidação das características dos minerais obtidos no forno.

Na produção do cimento Portland, ocorre a moagem do clínquer junto com sulfatos de cálcio, filler calcário, escórias de alto-forno e pozolanas. Após a moagem obtém-se o cimento propriamente dito que é armazenados em silos para expedição. Os cimentos produzidos podem ser distribuídos em sacos, transportados a granel ou em big-bag (Kattar et al., 1999).

Dependendo da composição da matéria-prima o clínquer de cimento Portland pode conter, aproximadamente, os elementos expressos em óxidos da Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 Composição Química do Clínquer (Kattar et al., 1999)**

	<b>Fórmula</b>	<b>Abreviação</b>	<b>Composição (%)</b>
Óxido de cálcio	CaO	C	59 – 67
Sílica	SiO <sub>2</sub>	S	16 - 26
Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	4 - 8
Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	2 - 5
Magnésio	MgO	M	0,8 – 6,5
Sódio	Na <sub>2</sub> O	-	0 – 1,5
Potássio	K <sub>2</sub> O	-	0 – 1,5
SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$	0,5 - 1,2

### 3.2 Composição do Cimento Portland

A composição potencial do cimento Portland é calculada a partir das quantidades de óxidos presentes no clínquer, como se ocorresse a cristalização completa destes compostos.

Consideram-se quatro compostos principais, denominados compostos potenciais que estão relacionados na Tabela 3.3, com seus símbolos abreviados. A anotação abreviada, usada

pelos químicos do cimento, representa cada óxido por uma letra, facilitando o estudo da química do cimento Portland.

**Tabela 3.3 – Compostos do cimento Portland, suas abreviações e composições (Mehta, 1994 e publicação Holdercim)**

Óxido	Fórmula	Abreviação	Compostos Potenciais	Abreviação	Composição (%)
Óxido de cálcio	CaO	C	3CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	59 – 67
Sílica	SiO <sub>2</sub>	S	2CaO . SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	16 – 26
Alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A	4 – 8
Ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	4CaO . Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF	2 – 5
Magnésio	MgO	M			
SO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	$\bar{S}$			
H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	H			

Considerando-se que as propriedades do clínquer Portland estão relacionadas com o teor dos compostos presentes, é difícil extrair quaisquer conclusões a partir da análise do clínquer expressa em óxidos. Usando uma série de equações, originalmente desenvolvidas por R.H.Bogue, é possível encontrar os valores em percentuais dos compostos potenciais do clínquer. Para isso, assume-se que os quatro componentes principais são o C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A e o C<sub>4</sub>AF, e que todo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente ocorre no C<sub>4</sub>AF, e que o restante do Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ocorre no C<sub>3</sub>A (Taylor,1992). Desta maneira as equações de R. H. Bogue, para estimar a composição potencial ou teórica dos compostos minerais do clínquer Portland, são as seguintes:

$$C_3S = 4,071.CaO - 7,602.SiO_2 - 6,718 Al_2O_3 - 1,430 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2,867.SiO_2 - 0,754.C_3S$$

$$C_3A = 2,650.Al_2O_3 - 1,692.Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3,043.Fe_2O_3$$

A seguir serão apresentadas as características de cada composto principal.

a) *Silicato Tricálcico – C<sub>3</sub>S*

O C<sub>3</sub>S, abreviação de Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, é um mineral do clínquer de cimento Portland que apresenta polimorfismo. Mas pode se apresentar com três tipos de estruturas, a monoclinica, triclinica e romboédrica. É o principal constituinte do clínquer que compõe o cimento Portland, constituindo cerca de 50 a 70% da sua massa.

De todos os componentes do clínquer, o C<sub>3</sub>S é o que apresenta maior influência no desenvolvimento das resistências mecânicas em todas as idades do cimento. Libera grande quantidade de hidróxido cálcio e apresenta calor de hidratação (120 cal/g) durante as reações de hidratação (Taylor, 1992).

b) *Silicato Dicálcico – C<sub>2</sub>S*

O C<sub>2</sub>S, abreviação de Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, apresenta cinco formas polimórficas bem definidas, desde a temperatura ambiente até 1550-1500 °C denominadas  $\alpha$ ,  $\alpha'_H$ ,  $\alpha'_L$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Ao contrário do C<sub>3</sub>S apresenta estruturas mais regulares reagindo lentamente com a água. Pode se apresentar na forma monoclinica e romboédrica.

As formas  $\alpha$  e  $\alpha'$  são pouco conhecidas, mas é certo que apresentam hidraulicidade maior que as outras formas de C<sub>2</sub>S. As diferentes formas de C<sub>2</sub>S não são identificáveis ao microscópio.

O C<sub>2</sub>S tem, também, contribuição importante na resistência aos esforços mecânicos do cimento, agindo em idades mais longas. Em comparação ao C<sub>3</sub>S, desprende menor calor de hidratação e libera menor quantidade de hidróxido de cálcio durante a hidratação.

A fase intersticial do clínquer é originada da cristalização, da fase líquida, durante o resfriamento. Esta fase tem um papel importante no processo de clínquerização; quer seja físico-químico, favorecendo e acelerando as reações de formação dos silicatos, quer seja físico-mecânico, atuando no mecanismo de granulação do clínquer. A fase intersticial é formada

essencialmente por  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Microscopicamente, pode-se apresentar homogênea e sem distinção entre o  $C_3A$  e o  $C_4AF$ , caso em que é considerada vítrea, decorrente das condições favoráveis de resfriamento rápido. Por outro lado, pode apresentar-se diferenciada em  $C_3A$  e  $C_4AF$ . Nesse caso, a fase é considerada cristalinizada, fato originado das condições lentas de 2º resfriamento. O  $C_3A$  apresenta os contornos retilíneos e bem diferenciados dos cristais de  $C_4AF$  (Taylor, 1992).

c) *Aluminato tricálcico –  $C_3A$*

O  $C_3A$ , abreviação de  $Ca_2 Al_2O_6$ , constitui a fase intersticial entre os cristais de  $C_3S$  e  $C_2S$ . Cristaliza-se no sistema cúbico, mas a sua estrutura ainda não foi bem definida. Desempenha um importante papel na formação e desenvolvimento da fase líquida quando da clinquerização.

O  $C_3A$  tem um papel importante na resistência dos cimentos às águas agressivas, sendo o tipo de cristalização fator preponderante quanto ao seu comportamento frente às águas agressivas. Um cimento com 16% de  $C_3A$  tetragonal apresenta expansão comparável a um cimento com 7% de  $C_3A$  cúbico. Quanto da hidratação, reage rapidamente com a água, conferindo ao cimento, juntamente com o  $C_3S$ , a resistência inicial às solicitações mecânicas.

O  $C_3A$  tem um efeito interativo (catalisador) no comportamento do  $C_3S$  e o desenvolvimento das resistências do  $C_3S$  nas primeiras idades depende do conteúdo de  $C_3A$  no cimento. É o componente do cimento que apresenta o maior calor de hidratação (207 cal/g), sendo o principal responsável pela pega do cimento (Taylor, 1992).

d) *Ferro-aluminato Tetracálcico –  $C_4AF$*

O  $C_4AF$ , abreviação de  $Ca_2 Al_2 FeO_5$ , constitui, juntamente com o  $C_3A$ , a fase intersticial do clínquer. Cristaliza-se no sistema ortorrômbico.

O  $C_4AF$  apresenta valor hidráulico baixo e tem pequena participação na resistência aos esforços mecânicos do cimento. Sua propriedade principal é a resistência à corrosão química. O  $C_4AF$  é responsável, também, pela coloração cinzenta do clínquer, dada à presença de ferro, por isso não deve estar presente nos clínqueres brancos (Taylor, 1992).

e) *Compostos Alcalinos e Sulfatados*

Os compostos alcalinos no clínquer do cimento Portland, o sódio e o potássio, são provenientes dos compostos da argila ou no carvão, sua quantidade total expressa em  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente a  $\text{Na}_2\text{O eq.} = (\text{Na}_2\text{O} + 0,64\text{K}_2\text{O})$  podendo variar de 0,3 a 1,5%. Já os sulfatos geralmente são originados do combustível e sua presença tem uma influência significativa nas reações iniciais de hidratação do cimento. No cimento Portland comum, os sulfatos são provenientes da gipsita, ou outra fonte de sulfato de cálcio adicionadas ao clínquer, sendo a sua principal função retardar a pega instantânea do cimento Portland, devido à alta reatividade do  $\text{C}_3\text{A}$  presente. O sulfato de cálcio pode ser encontrado como gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hemi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), e anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ). A gipsita se dissolve rapidamente em água, mas o hemi-hidrato é muito mais solúvel e às vezes pode estar presente nos cimentos devido à decomposição da gipsita durante a operação final de moagem (Mehta, 1994).

A composição mineralógica do clínquer varia de acordo com as matérias-primas disponíveis e o processo de calcinação aplicado. Para cada tipo de clínquer (minerais) formado, a composição apresenta diferentes comportamentos de endurecimento que proporcionalmente influenciam as propriedades do cimento nas suas diferentes aplicações.

A Tabela 3.4 mostra, os principais compostos do cimento Portland comum, o  $\text{C}_3\text{S}$ , o  $\text{C}_2\text{S}$ , o  $\text{C}_3\text{A}$  e o  $\text{C}_4\text{AF}$ , e suas propriedades específicas.

Os elementos secundários tais como sódio, potássio, fósforo entre outros, também podem exercer influências significativas sobre as propriedades do clínquer. Por exemplo, magnésio ( $\text{MgO}$ ) e a cal livre ( $\text{CaO}$ ) podem causar um aumento de volume e favorecer a ocorrência de fissuras.

**Tabela 3.4 – Principais compostos do clínquer e suas propriedades específicas. (Kattar et al., 1999)**

Compostos	Fórmula Química Clássica	Abrev.	% no Clínquer	Propriedades Tecnológicas
Silicato Tricálcico (fase silicato)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50 - 65	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato Dicálcico (fase silicato)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15 - 25	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato Tricálcico (fase aluminato)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	6 - 10	Pega muito rápida e deve ser controlada com adição de gipsita; suscetível ao ataque de meios sulfatados, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final
Ferro Aluminato Tetracálcico (fase ferrita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	3 - 8	Endurecimento lento, resistente a meios sulfatados, não tem contribuição para a resistência, cor escura

### 3.3 Cimento Portland de Alto-Forno

O Cimento Portland de Alto-Forno é um produto resultante da mistura do clínquer com escória granulada de alto-forno. A escória é um resíduo da produção de ferro gusa. Quimicamente, a escória é uma mistura de cal, sílica e alumina, os mesmos óxidos que constituem o cimento Portland, mas em proporções diferentes. A composição e estrutura física da escória de alto forno são muito variáveis e dependem do processo usado e do método de

resfriamento. Na utilização em cimento de alto-forno, a escória deve ser resfriada bruscamente, para que se solidifique como material vítreo, com estrutura desordenada, e tenha grande reatividade (propriedades hidráulicas latentes). Esse resfriamento rápido pela água resulta na fragmentação do material na forma granulada ou pelotizada que, quando finamente moída, desenvolverá propriedades cimentantes.

O uso da escória é vantajosa porque a cal está presente como CaO, de modo que não é necessária a energia para a descarbonatação. A escória de alto-forno pode ela mesma ser usada como material cimentício, mas na presença de um álcali ativador ou iniciador. O clínquer é um ativador da escória, pois apresenta em sua composição compostos ativadores. A presença de CaO, álcalis, sulfato de cálcio, a produção de  $\text{Ca(OH)}_2$  quando em contato com a água, e a liberação de calor devido à reação de hidratação são os principais ativadores.

No Brasil, é comum o uso da escória adicionada em diversos teores. No cimento Portland de alto-forno, CPIII, normalizado pela NBR 5735, o teor de escória, em relação à massa total de cimento pode ser de 35% a 70%, admitindo-se também até 5% de filler calcário.

Na Tabela 3.5, pode-se observar os diversos teores de escória em cimentos nacionais.

Este tipo de cimento pode ser produzido com moagem conjunta de clínquer, escória granulada de alto-forno seca, e gipsita, ou misturando cimento Portland em pó com a escória previamente moída. A escória é mais dura que o clínquer, o que deve ser levado em conta no processo de moagem. A moagem em separado da escória granulada resulta uma superfície mais lisa, o que é benéfico para a trabalhabilidade (Neville, 1997).

A massa específica da escória moída de alto forno é de cerca de  $2,9 \text{ g/cm}^3$ , um pouco menor do que a do cimento Portland ( $3,15 \text{ g/cm}^3$ ). Quando o cimento Portland de alto-forno é misturado com a água, os componentes do cimento começam a se hidratar antes, embora haja também uma reação imediata de uma pequena quantidade de escória que libera íons cálcio e alumínio na solução. A escória então reage com os hidróxidos alcalinos; segue-se uma reação com o hidróxido de cálcio liberado pelo cimento Portland formando-se C-S-H, (ACI 3 R-87, citado em Neville, 1997).

**Tabela 3.5 – Teores de escória no cimento Portland de acordo com a ABNT.**

	<b>Cimento Portland Comum</b>	<b>Cimento Portland de alta resistência inicial</b>	<b>Cimento Portland De alto-forno</b>
<b>Sigla</b>	CP I-S	CP V-ARI	CP III
<b>Classes de resistência</b>	25, 32 e 40	-	25, 32 e 40
<b>Clínquer + CaSO<sub>4</sub> (%)</b>	99 - 95	100 - 95	65 – 25
<b>Escória granulada (%)</b>	1 – 5*	-	35 – 70
<b>Material pozolânico (%)</b>	1 – 5*	-	-
<b>Material carbonático (%)</b>	1 – 5*	0 - 5	0 – 5
<b>Norma regulamentadora</b>	NBR 5732	NBR 5733	NBR 5735

\* Apenas um tipo de adição no mesmo cimento

Os cimentos com alto teor de escória podem ser usados como cimentos de baixo calor de hidratação e muitas vezes vantajosos do ponto de vista da resistência ao ataque químico. A atividade hidráulica da escória é condicionada à finura. Na prática, a finura da escória moída tende a ser maior do que a do cimento Portland.

### **3.4 Finura**

Sabe-se que a hidratação se inicia na superfície das partículas, portanto a área total da superfície do cimento representa o material disponível para hidratação. Assim, a velocidade da hidratação depende da finura das partículas de cimento e, para uma evolução rápida da resistência, é necessário uma grande finura. Uma maior velocidade inicial de hidratação depende também, de um maior desprendimento de calor de hidratação.

Por outro lado, quanto mais fino for o cimento, mais rapidamente ele se deteriora quando exposto ao ar. Cimentos mais finos resultam uma reação mais enérgica com os agregados álcali-reativos, e fazem com que a pasta de cimento apresente maior retração e maior tendência à fissuração. Um aumento da finura aumenta a quantidade de gipsita necessária para o retardamento adequado, porque em um cimento mais fino há mais  $C_3A$  disponível para a hidratação inicial. O teor de água de uma pasta com consistência normal é tanto maior quanto mais fino for o cimento (Neville, 1997).

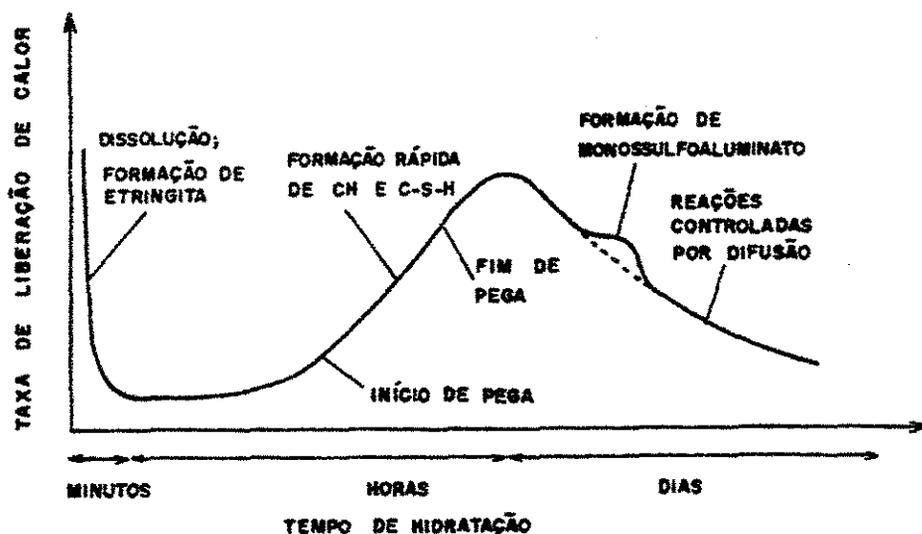
A finura é uma propriedade fundamental do cimento e deve ser cuidadosamente controlada. A fração de cimento retida na peneira 45  $\mu\text{m}$  pode ser determinada pelo método ASTM C 430-92 (Neville, 1977). Deste modo se pode assegurar que o cimento não contém excesso de partículas grandes, as quais, devido à pequena área superficial por unidade de massa, desempenhariam um papel de pouca importância no processo de hidratação e evolução da resistência. No entanto, a peneira de ensaio não proporciona informações sobre o tamanho das partículas menores que 45  $\mu\text{m}$ , e são essas partículas mais finas que desempenham a parte mais importante na hidratação inicial. Por esse motivo, as normas modernas prescrevem um ensaio de finura por determinação da superfície específica do cimento que expressa a área total da superfície por unidade de massa (metros quadrados por kg). A distribuição dos tamanhos das partículas depende do método de moagem, portanto, varia de uma fábrica para a outra. As especificações da ABNT estabelecem limites mínimos para a superfície específica do cimento Portland, e o seu valor depende do tipo de cimento.

### **3.5 Hidratação do Cimento Portland Comum**

Tem-se inicialmente dois mecanismos de hidratação do cimento Portland. A hidratação por dissolução-precipitação, onde envolve a dissolução de compostos anidros em seus constituintes iônicos, formação de hidratos na solução e, devido à sua baixa solubilidade, uma

possível precipitação de hidratos provenientes da solução supersaturada. Outro mecanismo é denominado topoquímico ou hidratação no estado sólido do cimento, onde as reações ocorrem nas superfícies dos componentes do cimento anidro sem entrarem em solução. Pode-se então concluir que a dissolução-precipitação é dominante nos estágios iniciais de hidratação do cimento e, em estágios posteriores, a hidratação das partículas residuais de cimento pode ocorrer por reações no estado sólido.

Os processos das reações de hidratação do cimento pode ser observado através das curvas calorimétricas que apresentam a taxa de desenvolvimento de calor em função do tempo (Figura 3.2).



*Figura 3.2 – Esquema da hidratação do cimento Portland comum (Jawed 1983 et al, citados em Camarini, 1995)*

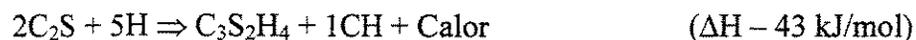
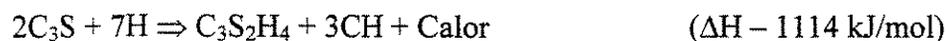
Uma grande quantidade de calor desenvolve-se, à medida que os primeiros produtos hidratados são formados. A taxa de desenvolvimento de calor diminui rapidamente; entretanto, durante o período de indução, a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  na fase líquida alcança a supersaturação com relação ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e, conseqüentemente, inicia-se a nucleação e o crescimento de ambos, CH e C-S-H. Neste estágio de desenvolvimento da estrutura, desenvolvem-se ao redor dos grãos do clínquer camadas finas de C-S-H e agulhas da fase Aft.

Com o aumento na concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  da fase líquida induz a nova aceleração da dissolução do  $\text{C}_3\text{S}$ , grandes quantidades de calor são desenvolvidas e a porosidade global da pasta diminui por conta da precipitação contínua de C-S-H e outros produtos hidratados. Neste momento, uma grande quantidade de  $\text{C}_3\text{A}$  já reagiu com os sulfatos, produzindo a etringita. No caso de existirem quantidades menores de sulfatos disponíveis, a etringita se dissolve com o  $\text{Al}(\text{OH})_4$ , produzindo o monossulfoaluminato de cálcio (Afm). O estágio seguinte é caracterizado pelo baixo desenvolvimento de calor e uma diminuição da velocidade global da reação. Os produtos adicionais hidratados são depositados nos espaços dos poros e os cristais hexagonais de CH envolvem parte do C-S-H formado anteriormente (Camarini, 1995).

Para entender melhor as mudanças físicas e químicas durante a hidratação do cimento Portland, é necessário isolar cada composto potencial e observar o seu comportamento quando em contato com a água.

### 3.5.1 Hidratação da Fase Silicato

Cerca de 70 a 90% do cimento Portland é constituído por silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) e o silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), os quais, quando são hidratados produzem o mesmo composto hidratado, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), diferindo apenas na quantidade de hidróxido de cálcio (CH) liberado pela reação de hidratação (Jawed et al., 1983).



A seqüência dessas reações de hidratação pode ser descrita tomando-se como referência as curvas caloriméricas, que indicam a taxa de desenvolvimento de calor ao longo do tempo,

sendo que o fluxo de calor é proporcional à velocidade de reação. A Figura 3.3 apresenta a curva calorimétrica da hidratação do  $C_3S$  (Jawed et al., 1983).

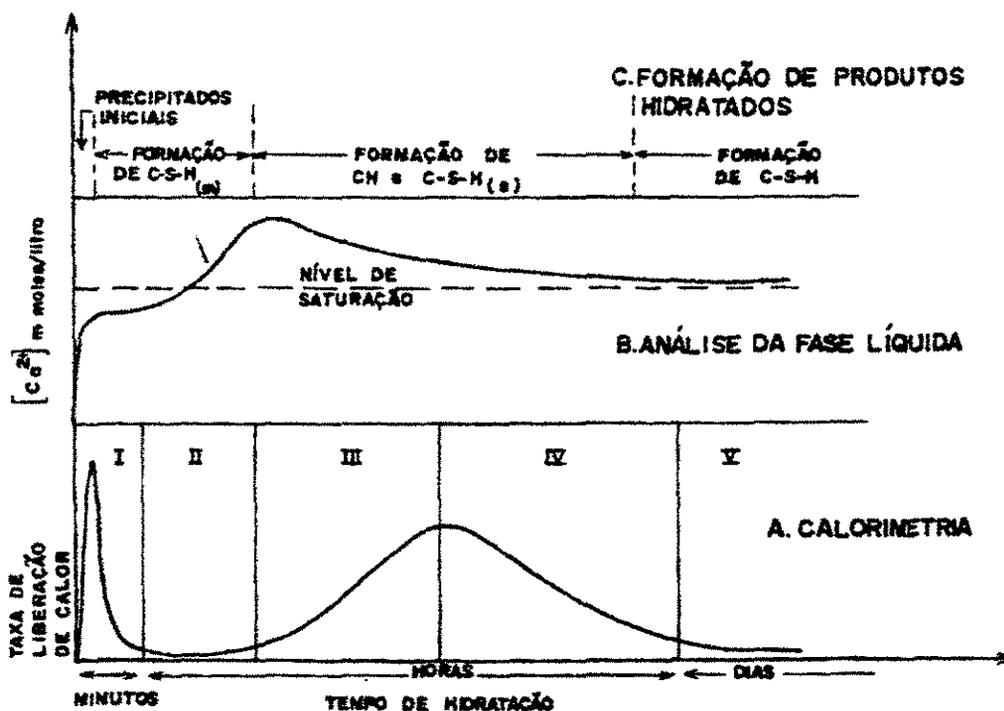


Figura 3.3 – Esquema de hidratação do  $C_3S$  (Jawed et al. 1983, citados em Camarini, 1995).

O estudo das reações de hidratações do  $C_3S$  por calorimetria divide-se em 5 estágios. O primeiro estágio refere-se à reação inicial do  $C_3S$  reagindo imediatamente após o contato com a água. Esta reação é rápida liberando uma grande quantidade de calor que vai diminuindo, à medida que o C-S-H (metaestável) precipita, e ao redor do grão de  $C_3S$ , forma-se uma camada de produto hidratado impermeável diminuindo a velocidade de reação. No segundo estágio, chamado período de indução, a velocidade da reação diminui e a liberação de calor também é baixa. O C-H-S precipitado inicialmente atua na cinética da reação da hidratação, limitando mas não impedindo totalmente a sua continuidade (Scrivener et al. 1992, citados em Camarini, 1995). No final do período de indução, inicia-se a cristalização do CH formando um novo produto hidratado, o C-S-H (estável). O final deste estágio é caracterizado por um rápido aumento da

velocidade de hidratação e tem-se o *início da pega*. O terceiro estágio é denominado período de aceleração e é caracterizado pela rápida formação de hidróxido de cálcio e de C-S-H, diminuindo a concentração dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  na mistura, e aumentando a temperatura devido ao crescimento dos cristais de CH e à dissolução do  $\text{C}_3\text{S}$ . No final deste estágio ocorre o *fim da pega*, iniciando a fase de endurecimento. No quarto estágio, a velocidade de reação diminui sensivelmente, caracterizada pela queda na taxa de desenvolvimento de calor, pois a camada de C-S-H (estável) impede a hidratação pelo mecanismo de dissolução e precipitação ou da difusão iônica. Este estágio é denominado período de desaceleração. E finalmente o quinto estágio, chamado de período de reação lenta e contínua, onde a reação prossegue lentamente e em velocidade cada vez menor, com pouco desenvolvimento de calor (Camarini, 1995).

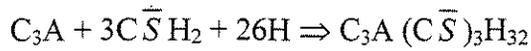
Apesar da formação dos mesmos produtos, a hidratação do  $\text{C}_2\text{S}$  é muito mais lenta do que a do  $\text{C}_3\text{S}$ , e muito mais difícil de ser estudada por calorimetria. Entretanto, o primeiro pico de calor tem magnitude semelhantes ao do  $\text{C}_3\text{S}$ , e imediatamente após o contato com a água, observa-se a formação de uma camada rica em sílica e a precipitação muito lenta do C-S-H (metaestável) (Camarini, 1995).

### 3.5.2 Hidratação da Fase Intersticial

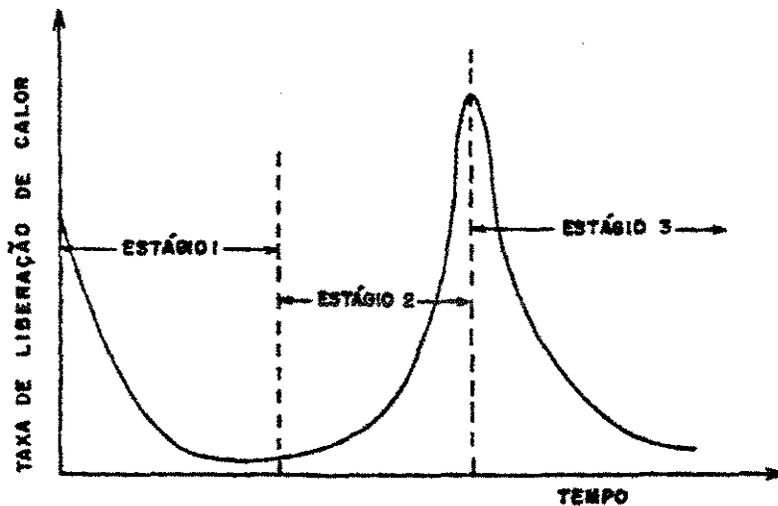
Esta fase é constituída pelos aluminatos ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e ferroaluminatos de cálcio ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), sendo o  $\text{C}_3\text{A}$  o mais reativo com a água, exercendo uma influência nas reações de hidratação.

É importante a hidratação do  $\text{C}_3\text{A}$  para o cimento Portland, pois na presença de sulfato de cálcio (Figura 3.4), adicionado para controlar a pega, forma-se uma camada de etringita ( $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ) (1º estágio), durante a sua formação, a velocidade de reação diminui, gradualmente, indicando que os produtos formados na sua hidratação são mais permeáveis que os  $\text{C}_3\text{S}$  (Pommersheim et al. 1988, citados em Camarini, 1995).

De acordo com Jawet et al.,1983, citados em Taylor 1992, a reação de formação da etringita é:



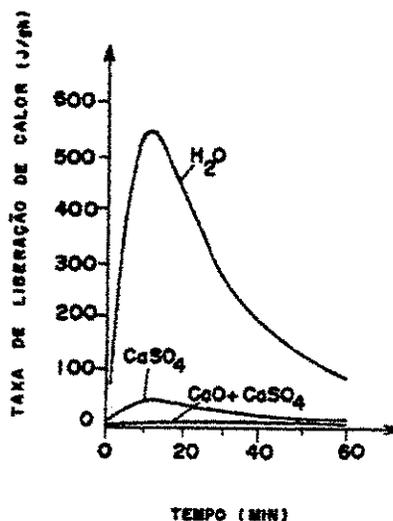
Como a etringita é normalmente encontrada na superfície do  $C_3A$ , supõe-se que, inicialmente, forma-se uma camada semipermeável de etringita na superfície dos grãos de  $C_3A$ , o que impede a difusão dos íons  $SiO_4^{2-}$ ,  $OH^-$  e  $Ca^{2+}$ , diminuindo a reação (2º estágio). Quando a fase líquida do sistema hidratado torna-se deficiente de íons  $Ca^{2+}$  e  $SiO_4^{2-}$ , consumindo toda a gipsita, a camada de etringita se rompe e o  $C_3A$  disponível reage com a etringita transformando-se em monossulfoaluminato hidratado (3º estágio), conforme a reação seguinte (Jawet et al.,1983, citados em Taylor 1992):



*Figura 3.4 Curva da hidratação do  $C_3A$  na presença de gipsita (Jawet et al.,1983, citados em Taylor 1992):*

A hidratação do ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) ocorre juntamente à do  $C_3A$ , com formação de produto semelhante à etringita. As reações são mais lentas do que as do  $C_3A$

desenvolvendo menos calor. O  $C_4AF$  não reage rapidamente e a gipsita retarda ainda mais sua hidratação (Figura 3.5).

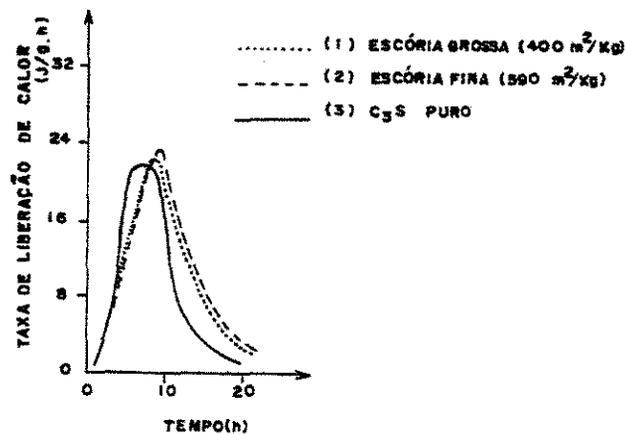


*Figura 3.5 Curva calorimétrica da hidratação do  $C_4AF$  em água, na presença de gipsita, e na presença de cal e gipsita (Jawet et al.,1983, citados em Camarini 1995):*

### 3.6 Hidratação do Cimento Portland de Alto-Forno

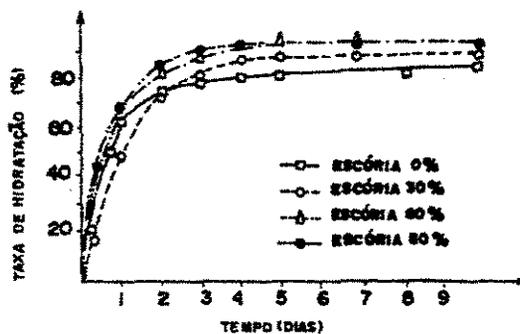
As propriedades do cimento Portland de alto-forno são semelhantes às do cimento Portland comum. A velocidade de endurecimento é mais lenta, nas primeiras idades, porém, nas idades avançadas, há contribuição dos compostos formados pela hidratação da escória, que será discutida no próximo capítulo.

A Figura 3.6 apresenta a influência da escória na hidratação do  $C_3S$ , observa-se que o pico da curva de liberação de calor se desloca, indicando que a escória retarda a hidratação do  $C_3S$  puro nos estágios iniciais, porém acelera no final, pois as partículas de escória atuam como pontos de nucleação de C-S-H produzido pela hidratação do  $C_3S$  (Uchikawa, 1986, citado em Camarini, 1995).



**Figura 3.6 – Curva de calorimetria da hidratação do  $C_3S$  na presença de escória (Uchikawa, 1986, citado em Camarini, 1995).**

Na Figura 3.7, observa-se que a escória acelera a hidratação do  $C_3S$  do cimento e essa aceleração é mais acentuada, quanto maior for o teor de escória no cimento. A aceleração do  $C_3S$  seria causada pela diminuição da concentração de hidróxido de cálcio na fase líquida, liberado pelo clínquer. Isso se atribui ao consumo de hidróxido de cálcio pela escória. A escória tem grande influência na fase intersticial ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ) retardando a hidratação dos compostos. Medindo o calor de hidratação de cimentos Portland de alto-forno, por longos períodos de tempo, observou-se que a quantidade total de calor liberado é maior do que a do cimento Portland comum. Isto significa que os cimentos que possuem escória apresentam maior atividade hidráulica (Totani, et al., 1980).



**Figura 3.7 – Taxa de hidratação do  $C_3S$  no cimento com vários teores de escória . (Totani, 1980 et al., citados em Camarini, 1995)**

## **4 ADIÇÕES AO CIMENTO PORTLAND DE SÍLICA ATIVA E ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

A sílica ativa é um material cimentício, inicialmente usado como pozolana. No entanto, a sua utilização no concreto não é apenas como uma pozolana, mas também proporciona outros benefícios. A primeira utilização prática da sílica ativa foi relatada em 1952 por um pesquisador norueguês (Berhardt, citado em Aïtcin, 2000), mas somente ao final dos anos 70 na Escandinávia, e no início dos anos 80, na América do Norte, é que a sílica ativa começou a ser utilizada como material cimentício suplementar no concreto.

Por vários anos os produtores de silício e de ferro-silício eliminavam o subproduto sílica ativa na atmosfera, começando a coletá-la quando foram submetidos às regulamentações ambientais. O manuseio de um pó tão fino era difícil e problemático. Os produtores de silício não sabiam como poderiam utilizá-lo. As pesquisas no início dos anos 80, em diversos países, levaram a uma rápida aceitação em quase toda a parte do mundo em menos de 5 anos (Aïtcin, 2000).

Já a escória de alto-forno foi conhecida antes que Aspdin registrasse sua patente do cimento Portland em 1824. Mather (citado em John, 1995), afirma que em 1774 Lorient observava o poder aglomerante de escórias misturadas com cal hidratada. A verificação do poder aglomerante das escórias provavelmente esteve ligada à disponibilidade de escória vítrea, uma vez que, as escórias cristalinas não possuem poder aglomerante.

O primeiro registro do uso comercial da escória é de 1865 na Alemanha em fábrica de blocos de alvenaria e, em 1901, a norma suíça incluiu os cimentos de escória obtidos da mistura deste com a cal hidratada ou hidráulica. O cimento de escória começou a ter um desinteresse pela sua

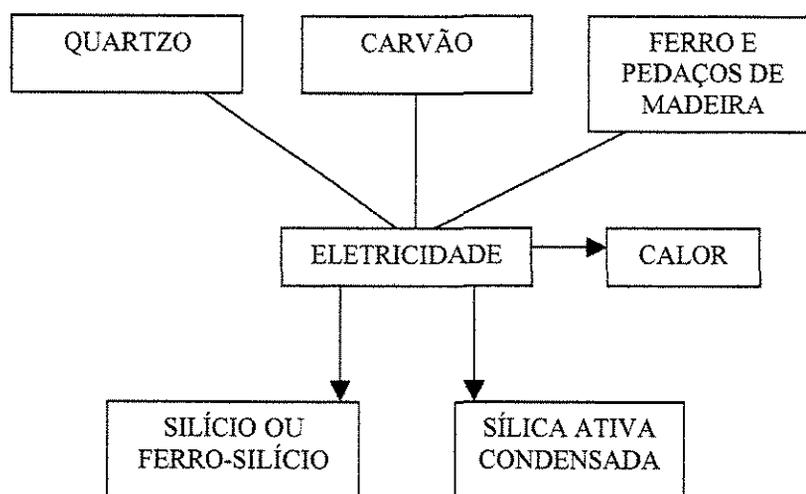
produção quando observaram-se algumas desvantagens, dentre as quais a resistência mecânica relativamente baixa, especialmente nas primeiras idades, como também a deteriorização pela carbonatação da cal durante longos períodos de armazenagem. A única vantagem do cimento de escória é a resistência ao ataque pela água do mar (John, 1995).

O uso da escória como adição ao cimento Portland se deu por volta de 1901, quando foi reconhecido que somente a escória vítrea granulada poderia ser utilizada. Em 1909 foi editada a norma alemã de cimento Portland com adição de até 30% de escória de alto-forno e, em 1917, foi editada a norma de cimento de alto-forno, que permitia a adição de até 85% de escória. O cimento de escória sem clínquer desapareceu rapidamente; entretanto a adição de escória ao clínquer Portland cresceu continuamente (John, 1995).

#### **4.1 Sílica Ativa**

Também denominada fumo de sílica, a sílica ativa é um subproduto, como já visto, da fabricação do silício metálico, das ligas de ferro-silício e de outras ligas de silício. O silício e as suas ligas são produzidos em fornos de arco elétrico imerso onde o quartzo é reduzido na presença de carvão e ferro durante a produção das ligas de ferro-silício (Figura 4.1). Durante a redução da sílica, dentro do arco elétrico, um subóxido de silício,  $\text{SiO}$  é produzido. Este gás escapa para a parte superior da carga, ele se resfria, condensa e oxida na forma de partículas finíssimas de sílica, que são coletadas por um sistema de eliminação de pó.

Outras partículas da carga são também incorporadas nas partículas de sílica ativa como: partículas muito finas de quartzo, partículas de carvão e partículas de grafite dos eletrodos. Os pedaços de madeira que não são coletados pelos retentores de fagulhas podem ser encontrados na sílica ativa; entretanto, essas impurezas representam uma porcentagem muito pequena dos sólidos coletados no sistema de eliminação de poeira ( câmara de filtros) de acordo com Aïtcin (2000).



**Figura 4.1 – Fluxograma da fabricação do silício e do ferro-silício (Aïtcin, 2000)**

A tabela abaixo (Tabela 4.1), mostra a composição química da sílica ativa.

**Tabela 4.1 – Composição Química típica de algumas sílicas ativas (Aïtcin, 2000)**

Componentes	Silício cinza	Ferro-silício	Ferro-silício
		cinza	branco
SiO <sub>2</sub>	93,7	87,3	90,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	1,0	1,0
CaO	0,2	0,4	0,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	4,4	2,9
MgO	0,2	0,3	0,2
Na <sub>2</sub> O	0,2	0,2	0,9
K <sub>2</sub> O	0,5	0,6	1,3
Perda na calcinação	2,9	0,6	1,2

Como se observa na Tabela 4.1, a sílica ativa é composta principalmente de sílica, e o teor de SiO<sub>2</sub> da sílica ativa varia, dependendo do tipo de liga produzida. Os ferro-silícios usuais

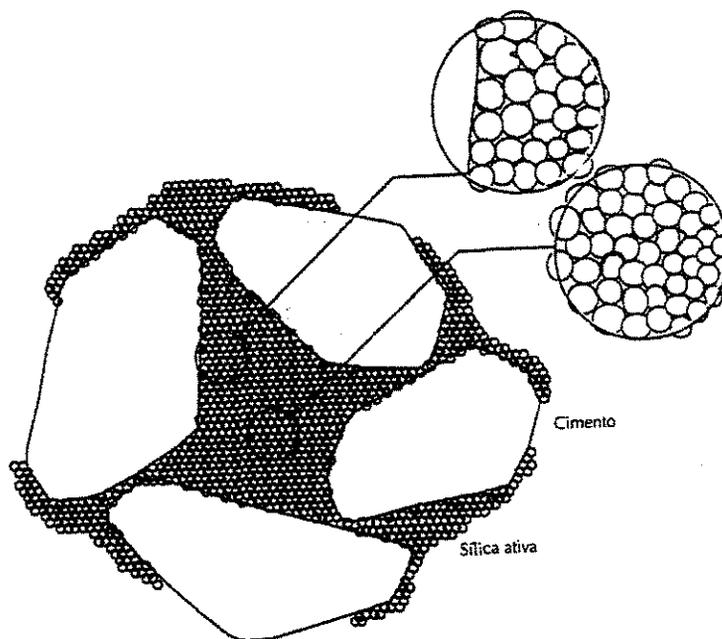
tem um teor nominal de sílica de 50%, 75% e 90%; com 48% o produto é denominado material silício. Quanto mais alto for o teor de sílica na liga, maior o teor de sílica ativa resultante. Como, com um mesmo forno, pode-se produzir diferentes ligas, é importante saber a proveniência de cada sílica ativa a ser usada (Neville, 1997).

Estruturalmente, a sílica ativa é composta de sílica vítrea. O resfriamento do vapor de SiO e a sua oxidação para SiO<sub>2</sub> acontece rapidamente e o tetraedro do SiO<sub>2</sub> não tem tempo de se organizar para constituir a forma da sílica cristalina. Fisicamente, as partículas de sílica ativa parecem perfeitamente esféricas, com diâmetros variando de menos de 0,1 µm até 2 µm; desta forma, a esfera média de sílica ativa é 100 vezes menor do que a média das partículas de cimento Portland. A massa específica da sílica ativa é de cerca de 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Devido à sua extrema finura, a área específica da sílica ativa não pode ser medida como no cimento Portland, sendo determinada por adsorção de nitrogênio, ficando na ordem de 15.000cm<sup>2</sup>/g a 25.cm<sup>2</sup>/g, a área específica de um cimento Portland comum é de aproximadamente 3.500 cm<sup>2</sup>/g (Aïtcin, 2000)

Sendo a sílica ativa um material tão fino e de massa unitária tão baixa, da ordem de 200 kg/m<sup>3</sup> a 300 kg/m<sup>3</sup>, o manuseio deste material é difícil. Por este motivo, a sílica ativa é comercializada nas formas: em bruto, como é produzida, em micropelotas, isto é, aglomerados de partículas, com uma massa unitária de 500 kg/m<sup>3</sup> a 700 kg/m<sup>3</sup> e na forma de calda, com partes iguais de sílica ativa e água, com uma massa específica de cerca de 1300 kg/m<sup>3</sup> a 1400 kg/m<sup>3</sup>. Cada forma apresenta sua vantagem do ponto de vista operacional, mas todas elas podem ser usadas com bom resultado, Não se confirma que uma ou outra forma tenham produzido melhorias mais significativas no concreto (Neville, 1997).

A reação pozolânica rápida da sílica ativa tem proporcionado benefícios na microestrutura e nas propriedades do concreto, mas também ao efeito físico das partículas da sílica ativa, o qual é conhecido como “efeito filler”, além do efeito químico relacionado com a germinação de cristais de portlandita (CaOH<sub>2</sub>) (Aïtcin, 2000).

Os vazios entre as partículas de cimento Portland podem ser preenchidos pela sílica ativa, quando elas estão bem defloculadas na presença de uma dosagem adequada de superplastificante (Figura 4.2).

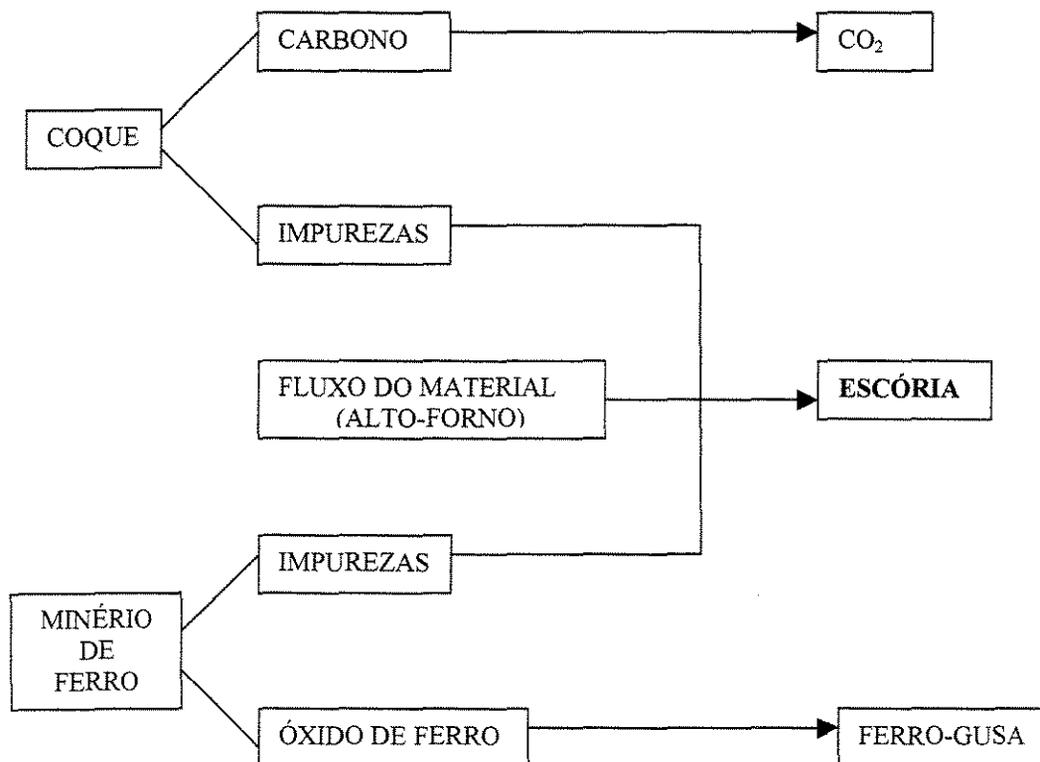


**Figura 4.2 – Efeito filler da sílica ativa (H.Bache, citado em Aïtcin, 2000)**

Um aumento na fluidez do concreto com uma relação água/aglomerante muito baixa, pode ser atribuída ao efeito filler; por conseguinte, devido às suas características físicas únicas, a matriz sólida resultante que inclui sílica ativa é densa mesmo antes que quaisquer ligações químicas entre as partículas do cimento tenham se desenvolvido. A adição de sílica ativa reduz bastante a exsudação interna e superficial da mistura o que é importante do ponto de vista microestrutural, porque transforma as características microestruturais da zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados, e entre a pasta de cimento e o aço da armadura. Além disso, as partículas de sílica ativa têm um efeito fluidificante sobre os traços de concreto com relação água/aglomerante muito baixa e também deslocam uma parte de água presente entre os grãos floculados do cimento, aumentando assim a quantidade de água disponível no concreto (Aïtcin, 2000).

## 4.2 Escória de alto-forno

O subproduto da fabricação do ferro-gusa em alto-forno é denominado escória de alto-forno ou escória granulada de alto-forno. É o produto resultante da combinação das impurezas contidas no ferro, da cinza do coque, do calcário e dolomito, empregados como fundentes, que alimentam o alto-forno. Aproximadamente a 1550°C ocorre a separação entre o ferro e os óxidos fundidos, os quais não se misturam ao metal. Os dois líquidos imiscíveis acumulam-se no fundo do alto-forno, sendo que a escória fica na camada superior por ser menos densa que o ferro e posteriormente separados (Figura 4.3): o ferro para posterior refino e a escória líquida para ser granulada, através de esfriamento.



*Figura 4.3 – Fluxograma da produção de escória de alto-forno (Aïtcin, 2000)*

O resfriamento da escória pode ser efetuado de duas maneiras. Pode ser deixada resfriar lentamente onde ela se cristaliza, e nestes casos ela pode ser utilizada como agregado no concreto, no asfalto e como lastro de cobertura, mas ela tem pouco valor hidráulico, não sendo usada como material cimentício. Outra maneira, é o resfriamento rápido, onde ela solidifica numa forma vítrea e pode então desenvolver propriedades cimentícias, se adequadamente moída e ativada. O teor da fase vítrea é tão importante para o poder hidráulico da escória que, mesmo escórias que não apresentem índice de hidraulicidade adequado, mas elevados teores de fase vítrea, pode proporcionar bons resultados (Books, 1980, citado em Camarini, 1995). Como um material cimentício suplementar, a escória possui algumas características: tem uma composição química que não varia muito porque deve estar dentro de uma área bem definida de composição no diagrama  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , podendo variar nos teores químicos do  $\text{MgO}$  e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mas isso não muda drasticamente as propriedades hidráulicas da escória (Aïtcin, 2000).

A Tabela 4.2 apresenta a composição química média das escórias de alto forno básica (aquelas que apresentam relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , maior do que 1), e ácidas (aquelas que apresentam relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , inferior a 1) produzidas no Brasil.

***Tabela 4.2 – Composição típica das escórias de alto-forno produzidas no Brasil (John, 1995).***

	<b>Escória básica</b>	<b>Escória ácida</b>
CaO	40 - 50	24 – 39
SiO <sub>2</sub>	30 - 35	38 – 55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11 - 18	8 – 19
MgO	2,5 - 9	1,5 – 9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 2	0,4 – 2,5
FeO	0 - 2	0,2 – 1,5
S	0,5 – 1,5	0,03 – 0,2
C/S (média)	1,31	0,68

Deve-se avaliar a escória cuidadosamente quanto à sua vitrificação, pois, como já exposto, suas propriedades hidráulicas estão fortemente ligadas à essa característica. Por outro

lado, a composição química das escórias também é determinada pela composição dos minérios, dos fundentes e das impurezas presentes na carga do alto-forno, a qual deverá ser adequada para que tenha atividade compatível e seja utilizada como adição ao cimento Portland.

#### **4.2.1 Hidratação da Escória**

A escória pode ser hidratada seguindo dois mecanismos: a dissolução da fase vítrea até um nível de saturação da água de amassamento, e em seguida a precipitação dos compostos hidratados. Mesmo considerando que o mecanismo de hidratação da escória seja o mesmo do cimento, a atividade hidráulica é bem diferente. A escória se hidrata muito lentamente em presença de água, devido à sua baixa solubilidade em água, e o seu grau de hidratação é muito baixo.

Para melhorar a atividade hidráulica da escória, pode-se utilizar alguns meios tais como: mantendo-se o meio com pH elevado, ou aumentando sua finura, ou ainda, elevando a temperatura de cura (Regourd, 1986, citado em Camarini, 1995).

Entrando em contato com a água, o grão de escória começa a se dissolver, liberando  $\text{Ca}^{2+}$  e formando ao seu redor uma membrana de hidróxido de alumínio que é impermeável, e o pH da solução permanece baixo. Quando ocorre o aumento do pH, isso acontece quando a concentração do íons  $\text{Ca}^{2+}$  atingir um valor elevado, a membrana se dissolve, permitindo a continuidade da reação. Os compostos formados por precipitação ao redor do grão da escória são chamados de produtos hidratados externos; enquanto houver solução intersticial, a hidratação prossegue por dissolução-precipitação, passando posteriormente, para reação topoquímica de formação de produtos hidratados internos, por difusão iônica através da camada que reveste os grãos anidros (Silva, 1998).

É importante a ação dos ativadores no processo de hidratação da escória, pois permite que o pH da solução mantenha-se elevado, como já exposto. Estudos apontam que o melhor ativador da escória depende fundamentalmente da composição da escória de alto-forno utilizada, sendo o cimento Portland, os sulfatos de cálcio (gipsita, hemi-hidrato, e anidrita),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , silicato de sódio, hidróxido de sódio, ativadores tradicionais e os primeiros a serem utilizados.

#### 4.2.2 Ativação da Escória

A ativação da escória pode ocorrer por processos químicos, mecânicos ou térmicos descritos a seguir.

A *ativação química* pode interferir na hidratação da escória pela combinação de dois fatores: pela elevação da velocidade de dissolução devido ao aumento do pH do meio aquoso, ou pela antecipação do início de precipitação dos compostos hidratados, pelo aumento da concentração de íons na solução no início da dissolução ou pela alteração da solubilidade da escória de alto-forno (Silva, 1998).

A *ativação mecânica* é quando a escória é moída finamente, conseqüentemente, se obtém um material com elevada superfície específica, aumentando a área de contato da partícula de escória com a água, área esta onde se desenvolvem as reações de dissolução.

A *ativação térmica*, quando se aumenta a temperatura a cinética da reação química sofre grande influência, isso pode ser levado em conta também nas reações de hidratação do cimento Portland. A solubilidade dos vidros de sílica, entre eles a escória, cresce com o aumento da temperatura (Silva, 1998).

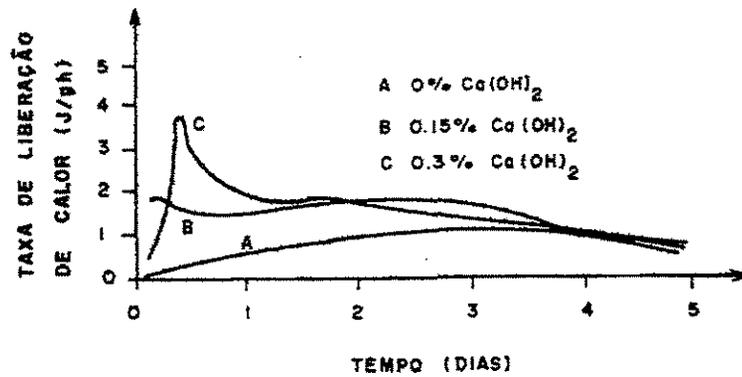
a) Ativação pelo cimento Portland:

Na ativação pelo cimento Portland, observa-se a formação de C-S-H, Aft, Afm, hidrogranadas e hidrocalcita. O cimento Portland é considerado como o ativador mais utilizado, pois nele estão presentes vários ativadores da escória tais como: sulfato de cálcio, hidróxidos de cálcio, hidróxidos de sódio; e, como se empregam várias proporções de cimento com escória, os estudos químicos se tornam muito complexos (Camarini, 1995).

b) Ativação pelos sulfatos de cálcio:

O pH da solução não é alterado com a introdução do sulfato de cálcio. Sem a elevação do pH proporcionada pelo componente alcalino, a escória não é ativada. A grande influência do sulfato de cálcio na hidratação da escória está relacionada com o aumento da permeabilidade da camada de gel que reveste a superfície dos grãos. Com a saturação da solução por íon cálcio, o alumínio dissolvido da escória é retirado da solução por combinação com o íon  $\text{SO}_4^{2-}$  formando a etringita (Willians et al., 1962, citados em Silva, 1998). Com isso, ocorre um aumento da permeabilidade da camada de gel que reveste os grãos, permitindo a continuidade das reações de hidratação. O alumínio restante se encontra combinado na forma de hidróxido de alumínio; conseqüentemente, 90% da escória deve reagir de outra maneira (Schröder, 1968, citado em Camarini, 1995). Ocorre também a formação do C-S-H (Voinovitch et al. 1976, citados em Camarini, 1995).

Na Figura 4.4, as curvas calorimétricas indicam esse fenômeno. Neste caso junto com a escória hidratada pelo sulfato de cálcio, tem-se a adição de uma pequena quantidade de hidróxido de cálcio (Daimon, 1980, citado em Camarini, 1985). Observa-se que a hidratação da escória em presença de sulfatos é lenta, pois o calor desenvolvido é baixo. Quando se adiciona hidróxido de cálcio, nota-se um aumento de calor, indicando um aumento na velocidade das reações de hidratação.



**Figura 4.4 – Curva calorimétrica da hidratação de escória na presença de sulfato e vários teores de hidróxido de cálcio (Daimon, 1980, citado em Camarini, 1985).**

c) Ativação pelo hidróxido de cálcio  $[Ca(OH)_2]$ :

O hidróxido de cálcio age de duas formas na hidratação da escória: inicialmente eleva o pH da solução até no máximo 12,5, o que possibilita a ruptura das ligações Ca-O, Mg-O, Si-O e Al-O, evitando a formação de gel, e também antecipa o início da precipitação dos produtos hidratados através da saturação da solução em decorrência do aumento de íons cálcio (Silva, 1998).

d) Ativação pelo silicato de sódio:

Soluções de silicato de sódio também aumentam o pH, apesar de ser inferior ao do hidróxido de sódio. As ligações iônicas Ca-O e Mg-O e as ligações covalentes Si-O e Al-O podem, então, ser rompidas. Essas soluções apresentam uma elevada concentração de  $SiO_4^{4-}$ , observa-se rapidamente a formação de C-S-H e  $C_4AH_{13}$  (Shi, 1995, citado em Silva 1998).

e) Ativação pelo hidróxido de sódio (NaOH).

O hidróxido de sódio atua como um catalisador da reação de hidratação. As soluções

apresentam uma elevada concentração de íons  $\text{OH}^-$ , que pode promover a ruptura de ligações iônicas (Ca-O, Mg-O) bem como das ligações covalentes (Si-O e Al-O) existentes na estrutura vítrea da escória. O C-S-H, C-A-H, e o C-A-S-H apresentam uma solubilidade menor do que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formado, com isso, uma fina camada de baixa relação C/S constituída por C-S-H,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  e  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  precipita rapidamente na solução (Shi et al., 1997, citados em Silva, 1998)

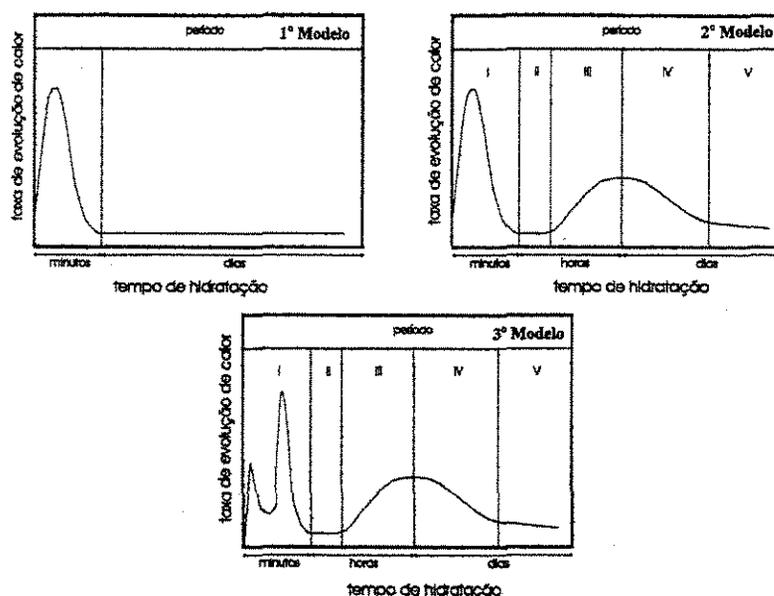
A Tabela 4.3, mostra os compostos hidratados produzidos pelos vários tipos de ativadores da escória.

**Tabela 4.3 – Compostos hidratados produzidos pela ativação da escória (Glasser et al., 1991, citados em Camarini, 1995)**

Tipo de ativador	Fases cristalinas	Comentários
NaOH, $\text{Na}_2\text{CO}_3$	C-S-H, $\text{C}_4\text{AH}_{13}$	- presença se silício no $\text{C}_4\text{AH}_{13}$
Silicatos de sódio	$\text{C}_2\text{ASH}_8$ , $\text{Mg}(\text{OH})_2$	- relação C/S do C-S-H menor do que no cimento Portland
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	C-S-H, $\text{C}_4\text{AH}_{13}$	não ocorre $\text{C}_4\text{ASH}_8$
sulfatos	C-S-H, Aft, $\text{Al}(\text{OH})_3$	Sulfeto da escória atua como autoativador
cimento	C-S-H, Aft, Afm, hidrogranada, hidrotalcita	A hidrotalcita nem sempre é identificável

Observa-se na Tabela 4.3 que, para qualquer tipo de ativador, ocorre a formação de um composto comum: o C-S-H. Esse composto é muito importante pois preenche os espaços, aglutina outras fases cristalinas hidratadas e adere bem à escória anidra e ao agregado (Glasser et al., 1991, citados em Camarini, 1995).

Conhecendo as curvas de evolução de calor de hidratação de cimento de escória ativada com diferentes tipos de ativadores e adotando a mesma classificação dos vários estágios observados para o cimento Portland (Figura 4.5) foram propostos três modelos genéricos para a influência dos ativadores e da temperatura na hidratação do cimento de escória.



**Figura 4.5 – Modelos de hidratação do cimento de escória com diferentes ativadores (Shi, 1995, citado em Silva, 1998).**

No primeiro modelo, observa-se um único pico pouco expressivo e muito difuso nos primeiros minutos de hidratação, o que representa a umidificação dos grãos de escória e adsorção de alguns íons em sua superfície. No segundo modelo, a forma é similar à hidratação do cimento Portland, observa-se um único pico antes e um pico depois do período de indução. No segundo modelo acontece a hidratação da escória ativada com solução de NaOH. No cimento Portland a curva de calor de hidratação da escória ativada com solução de NaOH apresenta um pequeno pico inicial e um período de indução pouco significativo. No terceiro modelo, observa-se a formação de dois picos, um inicial e outro adicional, antes do período de indução. A umidificação/dissolução da escória e adsorção de íons em sua superfície é responsável pelo pico inicial, e a formação do C-S-H pelo pico adicional. (Shi, 1995, citado em Silva, 1998)

Esses modelos têm contribuído para o entendimento da ação diferenciada dos vários ativadores empregados na ativação da escória e também ajudam a esclarecer o efeito benéfico da temperatura no aumento da velocidade de reação da hidratação da escória.

## 5 MISTURA DE GESSO, CIMENTO PORTLAND E SÍLICA ATIVA

O gesso e o cimento Portland são materiais cimentícios de grande utilização em revestimentos e na produção de peças tais como sancas, molduras, florões entre outras. O gesso tem a vantagem de ter a pega rápida e acabamento liso, mas é limitado ao uso interno porque é sensível em contato com a água. Por outro lado, o cimento Portland no seu estado endurecido é resistente e durável em contato com a água, mas não tem endurecimento rápido como o gesso e nem um acabamento liso a não ser quando usado em fôrmas com desmoldantes.

No entanto, as misturas de gesso e cimento Portland não são usualmente utilizadas, porque resulta na formação da etringita na mistura quando o gesso é em proporção pequena, ou a thaumasita quando o teor de gesso é maior. Tanto a etringita como a thaumasita causam expansão resultando numa posterior deterioração dos revestimentos ou em peças executadas com essa mistura.

Klover (1998), estudando uma mistura de gesso, cimento Portland e sílica ativa, observou uma melhora na resistência da mistura, e uma resistência a locais úmidos. A justificativa para esta melhora foi devido à redução da formação da etringita e no desenvolvimento de uma microestrutura em que os cristais de sulfatos foram envolvidos pelo C-S-H e pela adição de sílica ativa impedindo a formação dos compostos expansivos tradicionais (etringita e thaumasita).

É possível que existam outros fatores importantes da mistura do gesso com o cimento, capazes de explicar uma possível coexistência de sucesso na mistura de gesso com o cimento Portland e a sílica ativa.

## 5.1 Efeito da Quantidade de Adição de Gesso em pastas de Cimento Portland

A gipsita adicionada ao cimento para agir como retardador, geralmente é determinada por meio de ensaios normatizados que levam em consideração a resistência do cimento e a retração para determinadas idades de hidratação. Portanto, o teor de gipsita para um bom desempenho do cimento depende da composição do mesmo, principalmente do teor de  $C_3A$ , e também do teor de álcalis e do grau de moagem. Deve-se observar cuidadosamente a quantidade de gipsita a ser adicionada, haja visto que um excesso provoca efeitos expansivos com a conseqüente degradação da pasta de cimento (Neville, 1997).

O teor ótimo pode ser determinado pela observação do desprendimento de calor de hidratação, sendo que, na utilização de uma quantidade correta deve haver pouco  $C_3A$  disponível para a reação após a gipsita ter se combinado, não devendo ocorrer nenhum outro pico na velocidade de desprendimento de calor, o que implica numa velocidade desejável da reação nos primeiros estágios. Isto evita uma concentração local de produtos de hidratação e traz como conseqüência a diminuição no tamanho dos poros da pasta de cimento com reflexo no ganho de resistência. Um aumento no teor de  $C_3A$  e álcalis provoca um aumento na quantidade de gipsita necessária, ocorrendo o mesmo quando do aumento da finura do cimento devido ao aumento da quantidade de  $C_3A$  disponível nas primeiras idades (Neville, 1997).

A quantidade de gipsita adicionada ao clínquer é expressa pela massa de  $SO_3$  presente, chamado de sulfato solúvel (Tabela 5.1), e é feita em função da quantidade de  $C_3A$  presente. Os íons sulfato que entram em solução pela dissolução da gipsita tem um efeito retardador sobre os aluminatos, mas um efeito acelerador na hidratação dos silicatos que são os principais compostos do cimento Portland (Neville, 1997).

Whittaker e Wessels (1945) foram os primeiros a estudarem o efeito da quantidade de adições de gesso em pastas de cimento Portland, as temperaturas de moagem e a hidratação, com o objetivo de obter o conteúdo de gesso mais favorável.

**Tabela 5.1 – Quantidades de SO<sub>3</sub> em cimentos normalizados pela ABNT**

Cimento	CPI - CPI-S	CPII-E – CPII-Z CPII-F	CPIII	CPIV	CPV-ARI	CP - RS
SO <sub>3</sub> %	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 4,0	≤ 3,5 (C <sub>3</sub> A ≤ 8%) ≤ 4,5 (C <sub>3</sub> A ≥ 8%)	Conforme tipo básico
Norma	EB-1	EB-2138	EB208	EB758	EB-2	EB-903
Especificação	NBR5732	NBR11578	NBR5735	NBR5736	NBR5733	NBR5737

O cimento Portland é uma mistura heterogênea com um determinado número de fases, incluindo vários componentes, soluções sólidas, e vidro. Quando essas fases entram em contato com água elas se hidratam para formar os produtos hidratados. A taxa de hidratação depende de vários fatores, que incluem a combinação química natural das fases, a temperatura da reação e a pureza do cimento. A taxa de hidratação pode também variar pela presença de determinados sais – retardadores ou aceleradores, que podem afetar a taxa de hidratação de uma ou mais das fases individuais presentes (Whittaker et al. 1945).

Quando o clínquer do cimento Portland normal é moído sem a adição de um retardador, a hidratação é normalmente tão rápida que ocorre endurecimento rápido. As fases contendo alumina são aquelas que aumentam esta característica indesejável. A gipsita vem sendo empregada como retardador e geralmente sabe-se que ela reage com as fases aluminato para formar sulfoaluminato de cálcio, impedindo a formação de aluminatos de cálcio hidratado, que causam endurecimento rápido. Mas, se houver sulfato mais do que o necessário para reagir com os aluminatos antes da pasta estar completamente rígida, em torno de 24 h, pode ocorrer uma excessiva expansão da pasta. Isto se deve à formação contínua de sulfoaluminato de cálcio depois do enrijecimento da pasta. É por esta razão que a quantidade de gipsita adicionada deve ser limitada. Para observar esse efeito da adição excessiva de gipsita, na taxa de hidratação e algumas das propriedades das pastas de cimento, Whittaker e colaboradores (1945) divulgaram suas primeiras experiências no assunto, ainda que com baixos teores de sulfatos.

Os autores utilizaram para este estudo cimentos provavelmente de clínqueres comerciais, moídos em temperatura ambiente e o conteúdo de SO<sub>3</sub> variou de 0,19% (de clínquer) a 3,76%.

No geral, as reações de hidratação dos cimentos sofreram dois ciclos de acréscimo e decréscimo no desenvolvimento de calor. A taxa de liberação máxima de calor para cada ciclo e o tempo em que ocorreu dependeu do conteúdo de gipsita do cimento. O primeiro ciclo começa logo após o cimento entrar em contato com água e alcança seu valor máximo nos primeiros cinco minutos. O segundo ciclo de liberação de calor começa em mais ou menos duas horas e no geral alcança seu máximo entre a quinta e a décima hora. As propriedades físicas da pasta parecem estar associadas com as características das taxas de liberação de calor destes vários estágios (Figuras, 5.1, 5.2, 5.3) (Whittaker et al., 1945).

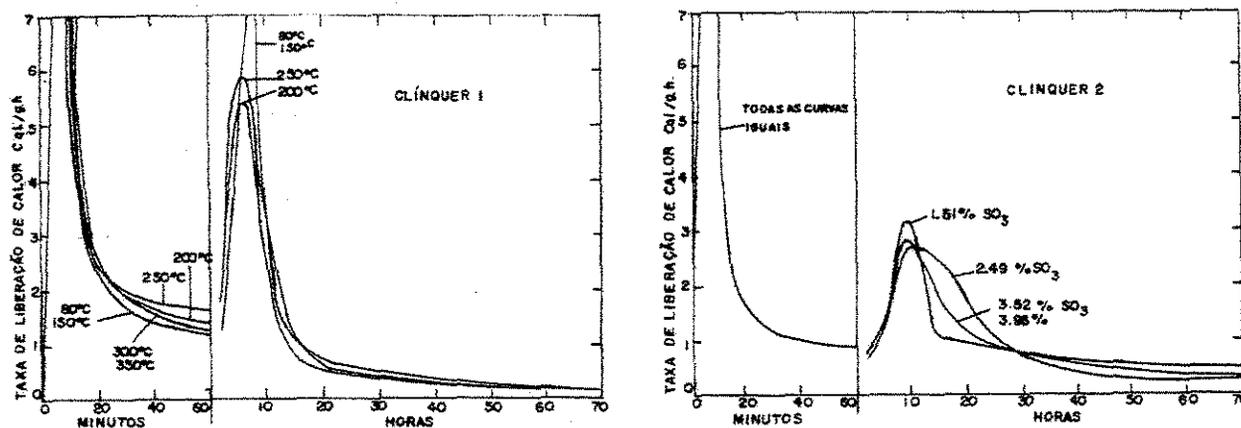


Figura 5.1 – Taxa de liberação de calor clíntquer 1 e clíntquer 2 (Whittaker et al., 1945)

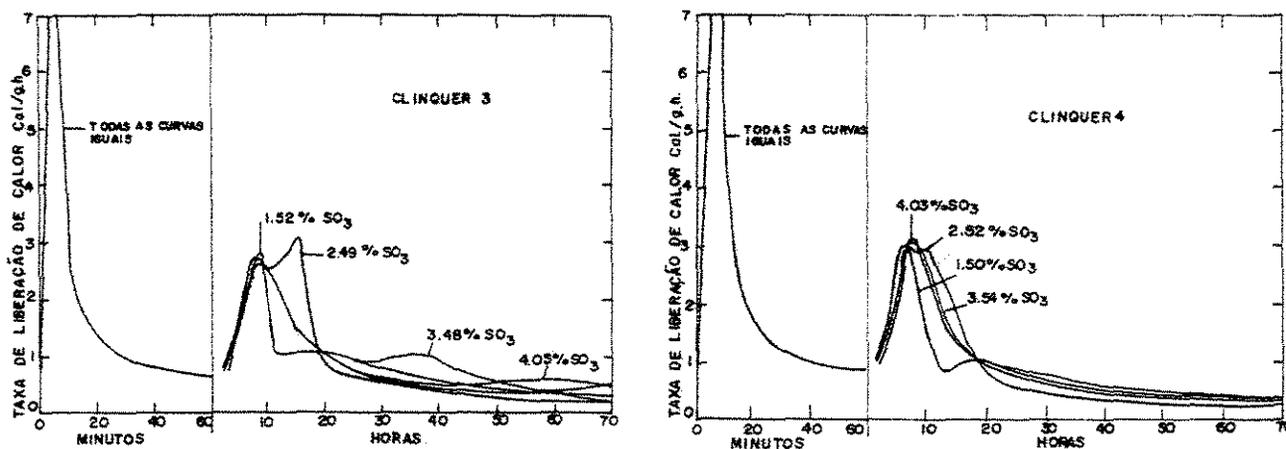


Figura 5.2 – Taxa de liberação de calor clíntquer 3 e clíntquer 4 (Whittaker et al., 1945)

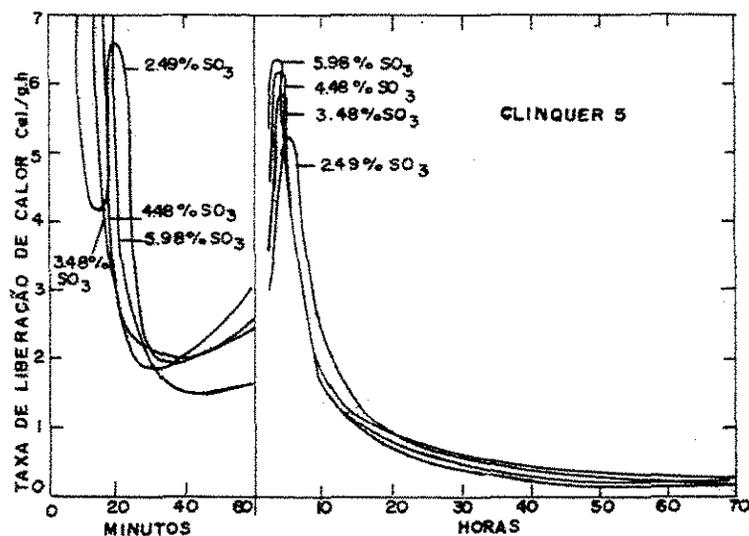


Figura 5.3 – Taxa de liberação de calor clínquer 5 (Whittaker et al., 1945)

A pesquisa foi realizada em três fases: a fase gipsita, para determinar o efeito da quantidade de gipsita sobre a taxa de hidratação do cimento; a fase temperatura, onde se variou a temperatura de moagem do cimento; e a fase de adição de gipsita nos cimentos, com o objetivo de obter o conteúdo mais favorável.

Os seguintes comentários gerais podem ser feitos a respeito destes resultados.

Aumentando-se o conteúdo de gipsita até a quantidade mais favorável resultou nos seguintes efeitos gerais:

1. Os tempos de endurecimento foram apenas levemente afetados, exceto quando foi encontrado a desidratação da gipsita por falsa pega.
2. A expansão em autoclave foi reduzida.
3. Ambas as resistências à tensão e à compressão aumentaram; isto ocorreu particularmente para as resistências nas primeiras idades; mas em muitos casos, até mesmo nas resistências aos 28 dias foram aumentadas.

Das curvas da taxa de liberação de calor (Figuras 5.1, 5.2 e 5.3), observou-se que aumentando a quantidade de gipsita, acima do permitido pelas especificações, a taxa de liberação

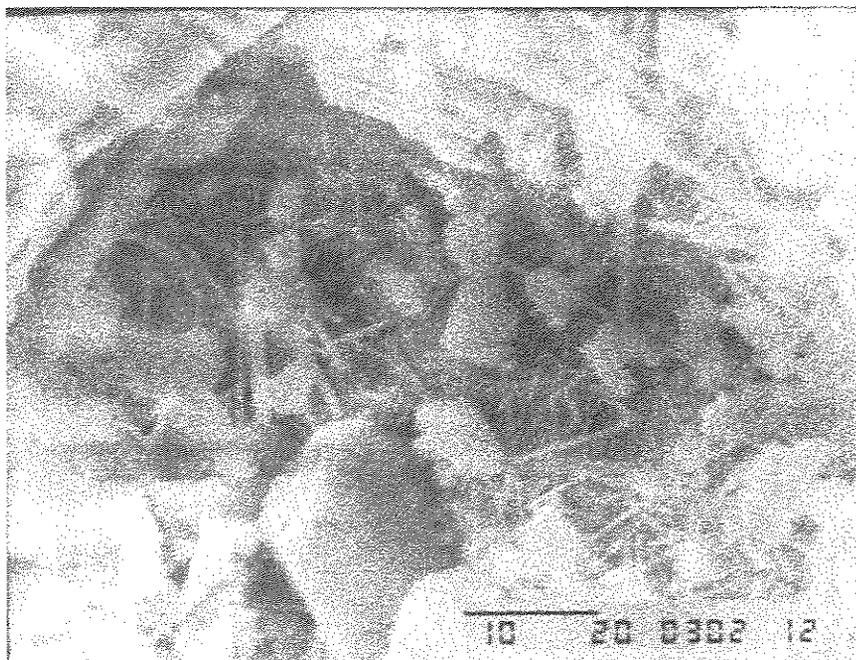
do calor foi normalmente atenuada e a uma certa porcentagem uma curva com apenas dois máximos foi obtida. Esta porcentagem de gipsita foi chamada de conteúdo de gipsita mais favorável e foi considerada como a quantidade necessária para retardar adequadamente a hidratação do cimento. Portanto, um cimento devidamente retardado foi definido como aquele que contém uma quantidade mínima de gesso que proporcionou ao cimento ter dois ciclos de taxa de hidratação crescentes.

Estudou-se também o efeito da temperatura de moagem e observou-se alguma influência sobre o taxa de hidratação.

A pesquisa foi então expandida para determinar o conteúdo de gipsita mais favorável pelos vários clínqueres produzidos nos moedores e para determinar o efeito de temperatura de moagem sobre a quantidade de gipsita necessária. Concluiu-se que todos os cimentos exigiam mais gipsita do que o permitido pelas presentes especificações para retardar apropriadamente a taxa de hidratação. Conforme o conteúdo de gipsita aumentou-se a tendência para a falsa pega ou o enrijecimento prematuro, particularmente quando a temperatura de moagem estava alta. Portanto, se o conteúdo de gipsita for aumentado seria aconselhável manter a temperatura de moagem a mais baixa possível, preferencialmente abaixo de 80 °C.

## **5.2 Deterioração dos Produtos de Cimento devido à Etringita**

Sabe-se que a expansão dos cimentos está associado à formação da etringita. Muitas pesquisas (Nakamura, 1960 e Abo-El-Enein, 1988, citados em Deng et al., 1993) mostraram que os cristais de etringita formados na solução saturada com íons cálcio e hidroxila, são finos, prismáticos ou granulares e ocorrem em torno das partículas contendo íons alumínio (Figura 5.4).



*Figura 5.4 – Micrografia dos cristais de etringita (Camarini, 1995).*

Batic, e colaboradores (1999), observando pastas de cimento e concreto em microscópio óptico e eletrônico verificaram a formação de dois tipos de etringita. A etringita primária, de uma natureza cristalina, formada em períodos precoces resultante de um processo de hidratação de cimentos, e a etringita secundária, com morfologia tanto maciça como cristalina, formada mais tarde (seis meses ou mais) pela recristalização dos componentes primários ( $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Al}^{+++}$ , e  $\text{Ca}^{++}$ ), que estiveram presentes nos poros do concreto, sem a contribuição externa dos íons sulfato.

A quantidade de etringita secundária cristalizada em concretos e pastas de cimento, depende do meio ambiente, pois sabe-se que a migração de íons reativos requer um mecanismo de transporte. Além disso, a etringita secundária depende da composição mineralógica do cimento Portland. Quando os espaços disponíveis dentro do concreto forem pequenos, a etringita desenvolve cristais finos e pequenos. Dentro de poros maiores, tem maior desenvolvimento, e em alguns casos densos agrupamentos são formados o que indica que a etringita se encaixa no espaço disponível sem exercer ação expansiva (Batic et al., 1999).

## 5.2.1 Mecanismo de Formação dos Cristais de Etringita

Pelo fato da etringita ser, experimentalmente, detectada na superfície do aluminato tricálcico, ao invés das partículas da gipsita, admite-se que ela produza uma camada mais ou menos impermeável, que impede a difusão dos íons necessários à formação dos hidratos que causam a pega. Por outro lado, quando os íons presentes no líquido dos poros conduzem à formação da etringita em agulhas longas, ocorre a perda de trabalhabilidade e de pega. Quando a quantidade de íons sulfato é suficiente para produzir etringita, os hidratos de aluminato de cálcio formados causam a pega instantânea (Figura, 5.5). (Skalny, 1992, citado em Djanikian, 1987)

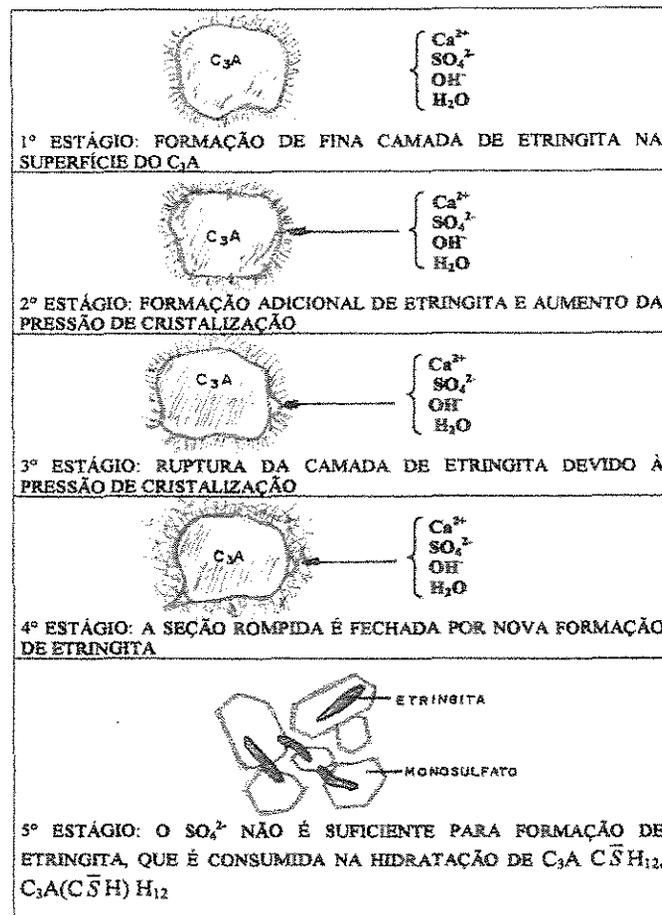
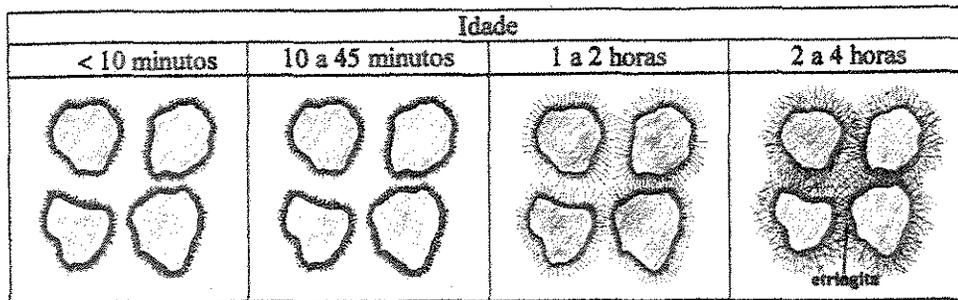


Figura 5.5 – Esquema do retardamento da pega devido à interação do C<sub>3</sub>A (Skalny, 1992).

Os resultados dos estudos de dissolução e comportamento eletrocinético do  $C_3A$  sugerem um novo mecanismo de retardamento da hidratação de  $C_3A$  por íons sulfato. Tais estudos mostraram que o  $C_3A$  dissolve de forma heterogênea em meios neutros ou ácidos e que a gipsita não muda a reação, mas apenas reduz o número de pontos ativos de dissolução do  $C_3A$  (Mehta, 1994).

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10, reproduzem vários casos de influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa nas características de pega de pastas de cimento Portland (Adaptado de F. W. Locher, et al., citados em Mehta, 1994).

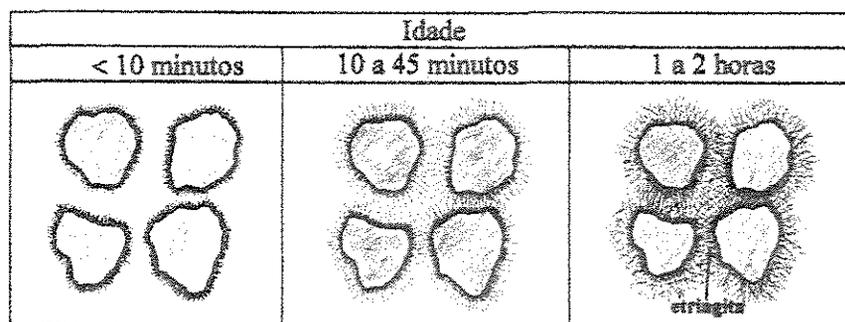
Caso 1 – Neste caso as pastas de cimentos vão permanecer trabalháveis por cerca de 45 minutos, tempo em que começará a se enrijecer à medida em que os espaços vazios ocupados com a água começam a ser preenchidos com cristais de etringita. A pasta torna-se menos trabalhável no intervalo entre 1 e 2 horas e pode iniciar o seu endurecimento no intervalo entre 2 e 3 horas, após a adição de água. A maioria dos cimentos considerados de pega normal pertencem a esta categoria (Figura 5.6).



*Figura 5.6 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 2 e 3 horas (Adaptado de F. W. Locher et al, citados em Mehta, 1994).*

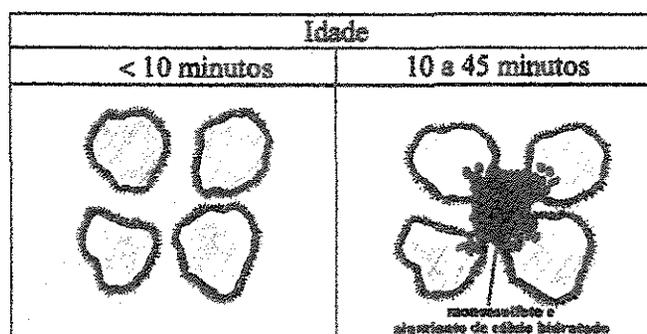
Caso 2 – Neste caso, são formados rapidamente grandes quantidades de etringita, causando uma perda considerável de plasticidade da pasta que torna-se menos trabalhável no intervalo compreendido entre 10 e 45 minutos, acontecendo o endurecimento com pega normal

no intervalo entre 1 e 2 horas, após a adição de água. Cimentos com alto teor de  $C_3A$ , recém produzidos, contendo mais do que a quantidade normal de sulfatos alcalinos ou sulfatos de cálcio hemi-hidratado, geralmente apresentam este tipo de comportamento (Figura 5.7).



*Figura 5.7 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 10 e 45 minutos (Adaptado de F. W. Locher et al, citados em Mehta, 1994).*

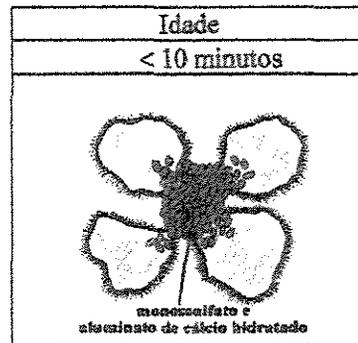
Caso 3 – Neste caso formam-se rapidamente grandes quantidades de cristais em forma de placas hexagonais de monossulfato e de aluminato de cálcio hidratados, provocando a pega da pasta de cimento num intervalo de tempo inferior a 45 minutos após a adição de água, fenômeno que é conhecido como pega rápida (Figura 5.8).



*Figura 5.8 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 45 minutos (Adaptado de F. W. Locher et al, citados em Mehta, 1994).*

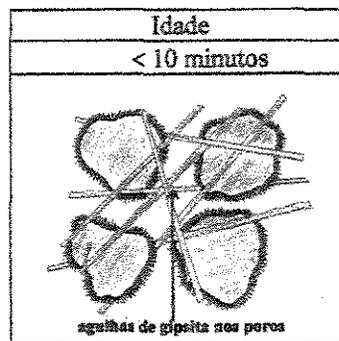
Caso 4 – Neste caso a hidratação do  $C_3A$  é rápida e começam a se formar, logo após a adição de água, grandes quantidades de placas hexagonais de aluminato de cálcio hidratado,

fenômeno que é conhecido como pega instantânea e está associado a uma grande evolução de calor inicial e resistências baixas a longo prazo (Figura 5.9).



*Figura 5.9 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 10 minutos (Adaptado de F. W. Locher et al, citados em Mehta, 1994).*

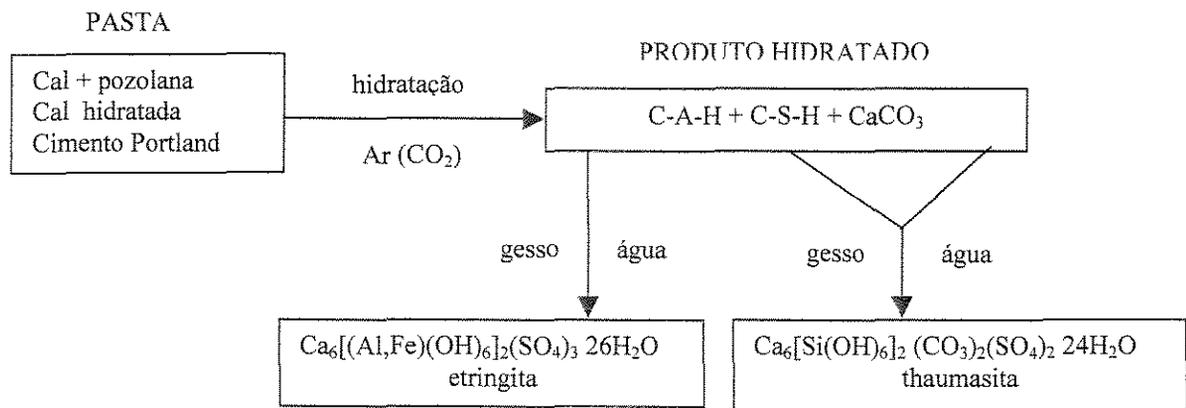
Caso 5 - Quando o  $C_3A$  é de baixa reatividade, como nos casos em que os cimentos se apresentam parcialmente hidratados ou carbonatados, devido a um armazenamento inadequado, ao mesmo tempo em que uma grande quantidade de hemi-hidrato está presente no cimento. Neste caso, a fase aquosa conterà uma baixa concentração de íons aluminato e ficará supersaturada com íons de cálcio e sulfato, levando a uma rápida perda de consistência devido à formação de grandes cristais de gipsita. O fenômeno é conhecido como falsa pega, não estando associado a grande evolução de calor, podendo ser controlado pela mistura energética da pasta, com ou sem adição de mais água (Figura 5.10).



*Figura 5.10 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa -falsa pega (Adaptado de F. W. Locher et al, citados em Mehta, 1994).*

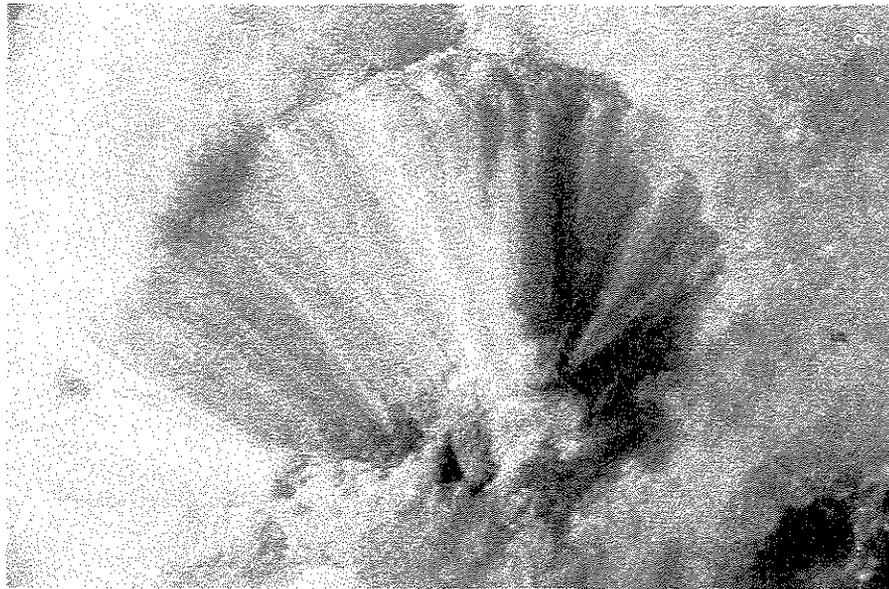
### 5.3 Deteriorização dos Produtos de Cimento Devido à Thaumasita

A thaumasita tem a formação estrutural  $\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2 (\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , no estado puro (Ludwig et al., 1986, citados em Bensted, 1997). A sua estrutura é em forma de prisma hexagonal semelhante ao da etringita  $\text{Ca}_6[(\text{Al},\text{Fe})(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , com a qual pode estar em solução sólida entre um certo limite (Figura 5.11). Quando encontrada como produto de deteriorização, ela é um produto impuro bem menos cristalino. A thaumasita é conhecida normalmente como um pó branco que não tem nenhum poder ligante (Figura 5.12). A sua formação é comum em condições frias quando se tem um ataque sulfático e também uma forte carbonatação. Tais condições, além da temperatura, acontecem na presença de umidade suficiente para permitir o transporte do  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  na superfície do cimento hidratado. Em tais condições o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que se forma da fase  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$ , ou a etringita que se forma do aluminato  $\text{C}_3\text{A}$  e do ferroaluminato  $\text{C}_4\text{AF}$  podem decompor-se para formar a thaumasita. Um fator importante na formação da thaumasita parece ser a formação de grupos estáveis de  $[\text{Si}(\text{OH})_6]^{2-}$ .



*Figura 5.11 – Esquema do processo químico para produzir thaumasita e etringita (Collepari, 1999).*

A presença de thaumasita como pó não ligante é uma indicação qualitativa do ataque sulfúrico e carbonático sobre a pasta de cimento endurecido, em presença de umidade. A thaumasita se apresenta em forma de prisma hexagonal. No passado era confundida com a etringita carbonatada, sobretudo por causa semelhança dos resultados obtidos na análise térmica diferencial, na espectroscopia de infravermelho e na microscopia óptica (Bensted, 1977). A difração de raios-X demonstrou ser a melhor técnica para identificar seguramente a thaumasita. Esta técnica pode também ser usada quantitativamente para avaliar a etringita, a thaumasita e o gesso em pastas.

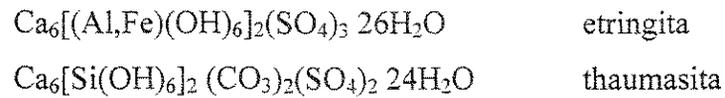


*Figura 5.12 – Thaumasita (Rejl et al. 1994)*

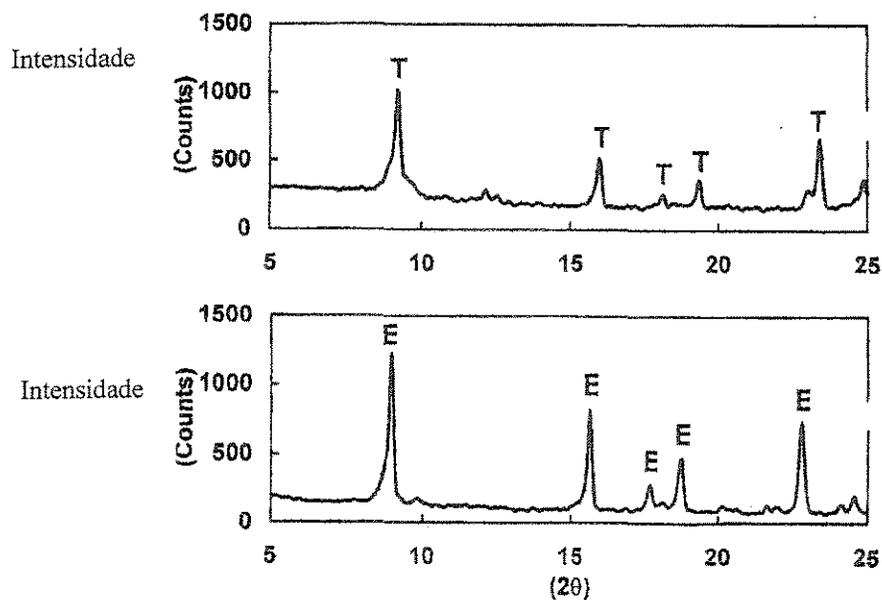
Bensted et al., 1997, observaram que o processo de destruição que acontecem nas pastas de cimento em meios sulfáticos a uma temperatura acima de 20 °C, ocorre a tendência à formação de etringita; em contrapartida, em temperaturas abaixo de 10 °C o problema ocorre pela formação da thaumasita. Observaram também que não somente o controle da transformação na fase aluminato é uma condição necessária para evitar o ataque sulfático destrutivo, mas também é necessário o controle da temperatura na fase silicato. Também em temperaturas ambientes

descobriu-se que cimentos com elevado níveis de  $C_3S$  (acima de 60%) são mais sujeitos ao ataque sulfático do que aqueles com teor elevado de  $C_3A$ .

A composição química e cristalográfica entre a etringita e thaumasita são muito semelhantes. As fórmulas simplificadas dos dois compostos encontram-se a seguir:



O  $\text{Al}^{+3}$  cátion na etringita é trocado por  $\text{Si}^{+4}$  cátion na thaumasita e esta mudança de números e o tipo de grupo aniônicos para compensar a mudança eletrostática do grupo catiônico. Desde que as estruturas cristalográficas da thaumasita e da etringita sejam próximas, os padrões de difração de raios-X correspondentes são muito similares (Figura 5.13) (Collepari, 1999).



Thaumasita		Etringita	
$2\theta$ $\text{CuK}\alpha$	Intensidade	$2\theta$ $\text{CuK}\alpha$	Intensidade
9,15	100	9,08	100
16,00	45	15,75	80
32,98	35	32,25	40

Figura 5.13 – Difratoograma da thaumasita e etringita( Collepari, 1999).

Quando a thaumasita está presente em baixa quantidade e alto ângulo, baixa intensidade de linhas são sobrepostas pelas linhas de outros produtos do cimento. Quando a thaumasita está presente em baixo ângulo, alta intensidade de linhas podem ser usadas (Collepari, 1999).

#### **5.4 Melhoria do Desempenho das Misturas Utilizando Gesso, Cimento Portland e Sílica Ativa**

Sabe-se que o gesso com adição de cimento e pozolanas tem uma tendência em desenvolver uma melhora na durabilidade em água, apesar do fato de que a mistura de gesso e cimento resultar na formação de etringita e de thaumasita, o que já foi comentado nos itens anteriores, causando expansão e resultando em deterioração. Klover (1998) estudou uma mistura com 75% de gesso, 20% de cimento Portland comum e 5% de sílica ativa obtendo uma melhora no seu comportamento em locais úmidos. Klover (1998) observou que, enquanto a temperatura máxima dependeu regularmente do teor de gesso, as propriedades mecânicas das pastas frescas (máxima expansão na pega, trabalhabilidade e características reológicas) foram influenciadas pelo teor de cimento. Já uma pequena porcentagem de adição de cimento em relação ao gesso, resultou em um decréscimo da expansão na pega e fez a trabalhabilidade piorar. Para melhorar a trabalhabilidade das misturas de gesso com cimento Portland é possível utilizar um superplastificante, pois ele atua na parte do cimento da mistura, e indiretamente reflete na cristalização do sulfato de cálcio di-hidratado, diminuindo as tensões internas na microestrutura formada e promovendo condições melhores para o desenvolvimento da estrutura de cristais de sulfato de cálcio. Klover (1998) concluiu que a resistência desenvolvida na mistura gesso/cimento/sílica ativa nas idades iniciais é semelhante à mistura de gesso puro. As propriedades mecânicas e as características da microestrutura das pastas gesso/cimento e gesso/cimento/sílica em idades iniciais, são muito semelhantes. As microestruturas de ambos materiais, às primeiras idades, são muito porosas e não há sinal de gel C-S-H observado entre os cristais de gesso nas misturas. A adição de sílica ativa proporcionou um nível de resistência

maior do que na mistura de gesso puro, e uma relação relativamente alta de resistência seca/úmida. Esta melhora foi explicada pela redução da formação da etringita e no desenvolvimento de uma microestrutura em que os cristais de gesso hidratado foram envolvidos pelo C-S-H, não encontrando sinais de formação de etringita na pasta de gesso/cimento/sílica ativa nas primeiras idades. No entanto, a questão que fica é quando a etringita aparecerá, e quais os efeitos dessa formação em idades avançadas. Portanto, esse assunto merece ser melhor estudado já que os resultados obtidos por Klover (1998) promovem conclusões sobre uma possível coexistência de sucesso entre o gesso e o cimento.

## 6 APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO DE GESSO

Diversas patologias podem surgir nos revestimentos de gesso provenientes do tipo e qualidade do gesso utilizado, da má mistura das pastas, da má aplicação e de fatores externos ao revestimento. Para se conseguir um revestimento de boa qualidade é preciso se preocupar com a planeza, prumo e nível do substrato, bem como com as características da pasta fresca e da habilidade do gesseiro.

O revestimento de gesso pode ser aplicado em diversos substratos, mas deve-se garantir a aderência e uma espessura ideal tanto por fatores técnicos como econômicos. A espessura do revestimento de gesso em geral depende do substrato, mas tecnicamente se recomenda a espessura de  $5 \pm 2$  mm (Hincapie et al., citados em Revista Técnica nº21, 1996).

Para a aplicação do revestimento de gesso deve-se observar o prazo de no mínimo 30 dias para os substratos revestidos com argamassa, e de concreto estrutural; e de no mínimo 14 dias para as alvenarias. Após a aplicação do gesso, o acabamento final poderá ser aplicado em no mínimo 14 dias para as pinturas permeáveis e de 30 dias para as pinturas menos permeáveis e papel de parede (Hincapie et al., citados em Técnica nº22, 1996).

Os revestimentos com pastas de gesso são normalmente executados de forma manual. A produção desse material ainda é realizada, em grande parte, nos canteiros de obra, e alguns fabricantes já começaram a colocar no mercado também produtos aplicáveis por projeção mecânica.

## 6.1 Preparo dos Substratos

A superfície a ser revestida deve estar sempre isenta de poeira, umidade, substâncias gordurosas, eflorescências ou outros materiais soltos, todos os dutos e redes de água, esgoto e gás deverão ser ensaiados sob pressão recomendada para cada caso antes do início dos serviços de revestimento. A superfície precisa apresentar-se suficientemente áspera a fim de que se consiga a adequada aderência do revestimento de gesso.

Inicialmente deve ser verificada a falta de prumo, nível e planeza dos substratos conforme limites constantes no projeto de Norma 02.102.17-006/95 (Tabela 6.1).

**Tabela 6.1 – Desvios máximos de prumo, nível e planeza para os substratos que vão receber revestimento de gesso (ABNT, 1995)**

Desvio do prumo	Desvio de nível	Planeza
$\leq H/900$	$\leq L/900$	<ul style="list-style-type: none"><li>• Irregularidades graduais: <math>\leq 3\text{mm}</math>, em régua de 2,0m</li><li>• Irregularidades abruptas: <math>\leq 1\text{mm}</math>, em régua de 20cm</li></ul>

H= altura da parede em metros

L= maior vão do teto

Caso o substrato não atenda esses limites deve-se retificar o plano da base com a execução de um emboço de argamassa mista de cimento, cal e areia no traço 1:2:9. Pontas de ferro, pregos, resíduos de fôrma, rebarbas de concreto ou argamassa, devem ser removidos antes da aplicação do revestimento de gesso. A remoção de resíduos minerais, poeira ou eflorescências deve ser feita por escovação com escova de aço. Resíduos orgânicos devem ser removidos com água quente e detergente. Bolor ou mofo podem ser removidos utilizando solução de fosfato

trissódico (30g  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  em um litro de água) ou uma solução de hipoclorito de sódio (4% a 6% de cloro ativo). Antes do tratamento com detergentes ou outros materiais de limpeza, o substrato deve ser saturado com água para evitar a penetração desses produtos na base. Após o tratamento o substrato deve ser enxaguado com água em abundância, e espera-se a secagem antes da aplicação do revestimento.

O revestimento de gesso propicia a corrosão de peças metálicas comuns, pois não é alcalino e pode apassar o aço, portanto deve-se tratar os componentes metálicos ou protegê-los conforme instrução de projeto. No caso de pintura de peças de aço, esta deve estar seca antes da aplicação do revestimento.

As alvenarias que deverão receber o revestimento de gesso não deverão ser umedecidas, pois podem movimentar-se causando fissuras no revestimento. Se necessário somente os revestimentos de argamassa devem ser umedecidos pelas suas características de absorção ou de secagem da pasta.

### **6.1.1 Aderência da Pasta de Gesso em Diversos Substratos**

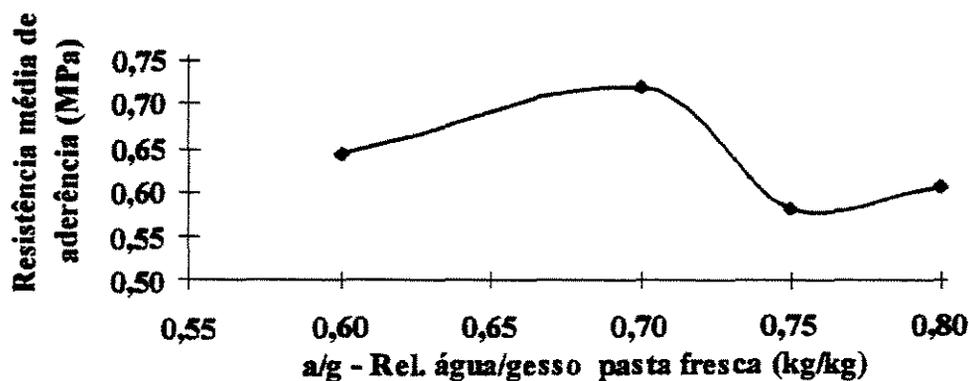
As propriedades da pasta no estado endurecido têm papel significativo no desempenho do revestimento, e depende das condições do substrato, como porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução do assentamento de componentes do substrato. A superfície de contato entre a pasta e o substrato exige assentamento homogêneo sem descontinuidade excessiva entre as juntas dos componentes da alvenaria. A natureza do aglomerante tem também influência sobre a aderência. A capacidade de aderência da interface substrato-pasta depende, ainda, da capacidade de retenção de água, da consistência e do conteúdo de ar da pasta (Cincotto, 1995).

Os substratos de concreto estrutural que geralmente contém resíduos de desmoldantes orgânicos provenientes da aplicação dos mesmos às fôrmas, os blocos cerâmicos estruturais onde as superfícies não possuem ranhuras, as lajes pré fabricadas que utilizam EPS (Poliestireno expandido) como elemento intermediário, ou casos em que no ensaio de aderência a média for inferior a 0,2 MPa, necessitam da aplicação de um tratamento específico nas superfícies para garantir a aderência.

Geralmente a aderência no substrato horizontal é conseguida com a aplicação de um chapisco rolado de cimento Portland e areia, misturada com uma solução aquosa à base de acetato de polivinila (PVA) ou de estireno-butadieno (SBR). No substrato vertical emprega-se somente uma mistura de cimento Portland com solução aquosa à base de polivinila ou estireno-butadieno. Ambos são fornecidos no varejo como adesivos para argamassas e chapiscos.

A aplicação é feita com rolo de espuma ou de lã-de-carneiro em dois sentidos (aplicação cruzada) e após algumas horas da aplicação pode-se iniciar a execução do revestimento.

Ensaio de aderência de pastas de gesso foram realizados em diferentes substratos (Hincapie et al., 1977). Os resultados mostraram que a aderência dos revestimentos de gesso é afetada pela quantidade de água usada no preparo da pasta, até valores de água/gesso igual a 0,80 (Figura 6.1).



*Figura 6.1 – Resistência de aderência dos revestimentos de gesso, sobre substrato de alvenaria cerâmica, em função da relação água/gesso da pasta. Ensaio pela NBR 13528/95. (Hincapie et al., 1997).*

Assim com pastas com relação a/g 0,60 ou 0,70 a ruptura foi preferencialmente no substrato; quando foi aumentado para 0,75 a ruptura foi na interface pasta/bloco; com 0,80 entre a interface pasta/bloco e na própria pasta. Independente da relação água/gesso, os níveis de aderência foram satisfatórios (Figura 6.2), podendo ser aplicado em bases com absorção peculiares, tanto em alvenarias como nas lajes; desde que se tenha garantia da porosidade ou do uso de aditivos que promovam porosidade adequada no substrato.

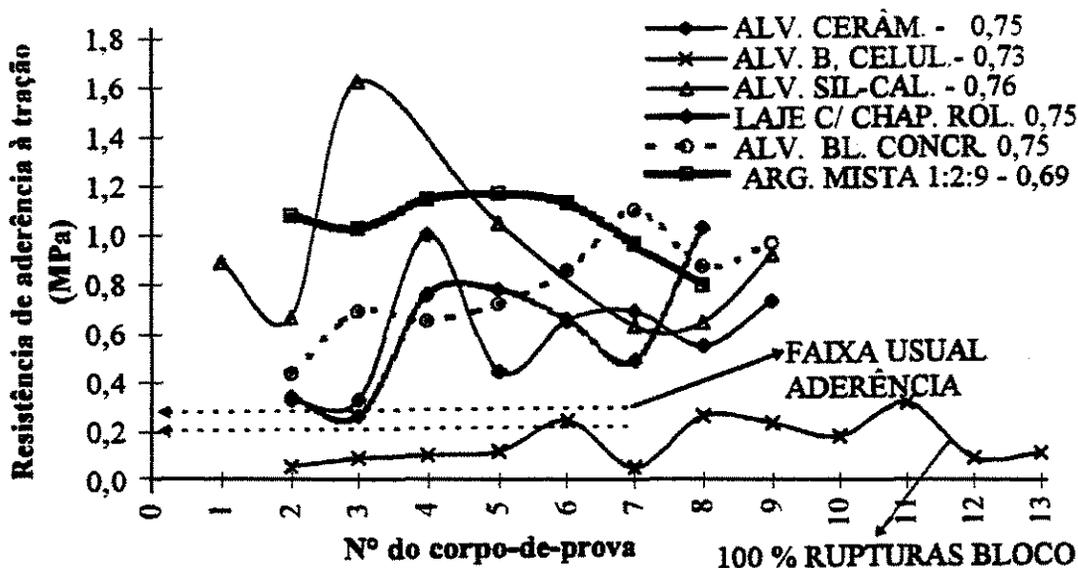


Figura 6.2 – Variação da resistência de revestimentos de gesso liso, sobre as bases indicadas na legenda e respectivas relação água/gesso. Ensaio conforme a NBR 13528/95. (Hincapie et al., 1997).

Ensaio de aderência utilizando uma mistura em pasta de gesso, cimento Portland e sílica ativa realizado por Carvalho (2000), em substrato de EPS, bloco cerâmico e bloco de concreto sem tratamento. Apresentaram os seguintes resultados nos blocos de EPS: a ruptura típica foi na interface substrato/pasta e as substituições de parte do gesso por cimento e sílica ativa não melhoraram o desempenho quanto à aderência; nos substratos cerâmicos e de concreto a ruptura também se deu na interface substrato/pasta, mas nas misturas em pasta onde parte do

gesso foi substituído por cimento Portland e cimento Portland mais sílica ativa apresentaram uma melhora sensível na aderência da mistura ao substrato.

Portanto, mesmo sendo as pastas de gesso adequadas para a execução de revestimento de tetos e paredes, o desempenho e a qualidade final estarão sempre condicionados a um bom preparo dos substratos.

## **6.2 Execução Manual**

Na execução do revestimento de gesso deve-se observar a temperatura ambiente e a temperatura do substrato que não deverão ultrapassar a 35 °C, pois o gesso endurecido desidrata lentamente com o calor (Hincapie et al.,1996, citados em Revista Técnica nº22, 1996)

As ferramentas e acessórios utilizados na execução de revestimento de gesso são:

1. Caixotes para o preparo da pasta com volume interno superior a 100 litros (denominados masseiras);
2. Desempenadeira em chapa de PVC com dimensões aproximadas de 0,25 x 0,60 m e espessura de 4,0 mm;
3. Desempenadeira de aço;
4. Colher de pedreiro;
5. Régua de alumínio com 2,0 m;
6. Cantoneiras de alumínio;
7. Espátula.

### 6.2.1 Preparo da Pasta

Geralmente um gesseiro experiente prepara um saco comercial de 40 kg de gesso por mistura, o que equivale a 45 litros, e que deve ser consumido num tempo máximo de 40 minutos. A pasta de gesso para revestimento deve ser preparada com uma quantidade de água entre 60% a 80% da massa de gesso seca. A quantidade de água depende da finura do gesso. Para gesso grosso a quantidade de água varia entre 60% a 70% da massa de gesso, própria para o enchimento da *camada de espalhamento*. Para gesso fino, a quantidade de água varia entre 70% a 80% da massa de gesso e é próprio para a *camada de acabamento*.

A água é colocada dentro da masseira e o pó é polvilhado progressivamente na água de forma a preencher uniformemente toda a masseira, evitando a formação de grumos. A quantidade de pó utilizada é a necessária para que toda, ou quase toda a água, seja absorvida pelo pó. Segue-se um período de repouso que corresponde ao período de dissolução do hemi-hidrato. Em seguida, parte da pasta é misturada ficando o restante em repouso na masseira.

Mais uma vez, um intervalo de tempo é observado até que a pasta possa ser utilizada. Este intervalo equivale ao período de indução (Figura 2.10). A pasta passa a ser utilizada quando a fração de pasta misturada pelo gesseiro, adquire a consistência adequada para a aplicação. Essa consistência é determinada empiricamente. O início de *tempo útil* corresponde ao final do período de indução e termina antes de ocorrer o início da pega (Figura 2.10), (Antunes,1999).

Ao terminar com a pasta misturada, o gesseiro segue usando o restante da pasta que permaneceu em repouso. Esta pasta que ficou em repouso teve a cinética da reação de hidratação alterada. Neste caso, não é necessário fazer a mistura, pois o tempo necessário para a utilização da primeira fração de pasta é suficiente para que a segunda fração de pasta adquira a consistência adequada para a aplicação.

Quando a pasta ultrapassa a faixa de consistência adequada para revestir o substrato ela ainda pode ser utilizada para dar o acabamento final no revestimento. A adição de água à pasta altera sua consistência, possibilitando seu retorno à consistência de utilização. Neste momento, a pasta se encontra na terceira etapa, ou seja, final da reação de hidratação onde quase todo dihidrato já está formado (Figura 2.10).

Após esta fase, o gesso se hidrata completamente não sendo mais utilizado para revestimento, mesmo que se coloque mais água à pasta para prolongar sua utilização, não existe mais aderência entre essa pasta e o revestimento já aplicado.

O tempo para a utilização da pasta de gesso corresponde à cinética da reação de hidratação. A cinética da reação corresponde ao tempo necessário para que a pasta adquira a consistência mínima e máxima de utilização, influenciando portanto no início e fim do tempo de utilização. Assim, fatores que influenciam a cinética da reação de hidratação tais como: relação água/gesso, umidade relativa do ar, temperatura da água de amassamento, energia de amassamento, impurezas e aditivos modificadores de pega influenciam o tempo de utilização da pasta de gesso.

### **6.2.2 Aplicação da pasta**

Dependendo do substrato a pasta de gesso pode ser aplicada com desempenadeira de PVC em uma ou várias camadas. A espessura da pasta é de 1 mm a 3 mm. Para a execução de uma *camada de espalhamento* divide-se o substrato em faixas de espalhamento com aproximadamente a mesma largura da desempenadeira de PVC. Cada faixa é iniciada com uma pequena sobreposição à precedente. Concluída a execução de uma *camada de espalhamento*, e tendo revestido todas as faixas em uma direção, o gesseiro inicia à camada seguinte, aplicando a pasta de gesso em faixas perpendiculares às primeiras (*camadas cruzadas*).

Terminada a camada de revestimento, e antes que a pega esteja muito avançada, o gesseiro verifica a sua planeza e, com a régua de alumínio, promove o seu sarrafeamento com o intuito de cortar os excessos grosseiros e dar ao revestimento uma superfície mais regular, que irá receber os retoques, raspagens e a camada final de acabamento. Os retoques finais e a *camada de*

*acabamento* são executados utilizando a colher de pedreiro e a desempenadeira de aço, ficando o acabamento final liso e brilhante.

### 6.2.3 Inspeção Final

Após a conclusão dos serviços para verificar a planeza do revestimento como um todo, executa-se uma inspeção visual utilizando uma régua de alumínio de 2,0 m de comprimento, aplicada sobre o revestimento em qualquer direção. Neste caso, o revestimento não poderá apresentar desvio superior a 3 mm. Para pontos localizados, uma régua de alumínio de 20 cm não deve apresentar desvio superior a 1 mm.

Caso necessário pode-se executar ensaios especiais como: medição da espessura, avaliação da dureza, avaliação da aderência do revestimento, avaliação da aderência da pintura.

Para aplicar a pintura, o revestimento de gesso não deve apresentar pulverulência, falhas ou estrias com profundidade superior a 1 mm

A Tabela 6.2 resume as diversas etapas e o tempo aproximado de execução da aplicação manual da pasta.

***Tabela 6.2 – Etapas e tempo aproximado de execução da aplicação manual de gesso, para consumo de 45 litros de pasta = 1 saco de gesso (Hincapie et al., 1996 citados em Revista Técnica nº22, 1996).***

<b>Serviços</b>	<b>Preparo da pasta</b>	<b>Espera</b>	<b>Espalhamento</b>	<b>Sarrafeamento, retoques e raspagens</b>	<b>Acabamento</b>	<b>Total</b>
<b>Tempo (min)</b>	2 a 5	10 a 15	20 a 30	30 a 35	35 a 45	97 a 130

## **7 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

Este capítulo tem como objetivo detalhar todas as etapas que envolveram as determinações experimentais das misturas de gesso, cimento Portland de alto forno, e sílica ativa, submetidas à cura ao ar internamente e externamente ao tempo.

### **7.1 Materiais Utilizados**

Os materiais utilizados no desenvolvimento da etapa experimental, foram obtidos dos fabricantes em sacos comerciais de 40 kg para o gesso, 50 kg para o cimento e 10 kg para a sílica ativa, cujas características estão apresentadas a seguir:

#### **7.1.1 – Gesso**

O gesso utilizado neste estudo foi o gesso lento para revestimento e sua composição química, descrita na embalagem, contém: Sulfato de cálcio hemidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ),

impurezas em teor menor de 2%: (carbonato de cálcio e de magnésio, argilo minerais e sais solúveis), de acordo com ABNT 13207(1994).

Foram efetuados ensaios químicos e físicos do gesso utilizado neste trabalho experimental sendo os seus resultados descritos na Tabela 7.1 e Tabela 7.2, respectivamente.

**Tabela 7.1 - Análise Química do gesso (IPT)**

Determinações	Resultados (%)
Água Livre	1,38
Água combinada*	5,07
Insolúveis em ácido clorídrico (RI+SiO <sub>2</sub> )*	0,64
Sesquióxidos (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )* #	0,19
Óxido de cálcio (CaO)*	38,2
Óxido de magnésio (MgO)*	0,48
Anidro Sulfúrico (SO <sub>3</sub> )*	54,5
Anidro carbônico (CO <sub>2</sub> )*	1,28
Hemidrato (CaSO <sub>4</sub> . ½ H <sub>2</sub> O )	81,8
Anidrita (CaSO <sub>4</sub> )	13,8
Carbonato de cálcio ( CaCO <sub>3</sub> )	1,72
Carbonato de Magnésio ( MgCO <sub>3</sub> )	1,00
Impurezas (RI+SiO <sub>2</sub> +R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,83
Anidrito sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) em excesso	1,25

Nota\* : Ensaio realizado em amostra isenta de água livre;

Nota# : O R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é constituído preponderantemente por Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

OBS: Ensaio realizado no Laboratório de Química de Materiais do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, em 07 de dezembro de 2000.

**Tabela.7.2 - Análise Física do pó da pasta e propriedades mecânicas do gesso (IPT)**

Propriedades físicas do pó – MB 3468/91		
Peneiras		Média de Material retido
Nº	Abertura (mm)	Individual (%)
20	0,840	0,0
40	0,420	0,0
70	0,210	1,15
140	0,105	11,50
Módulo de finura		12,65
Massa unitária		645,6
Determinação das propriedades físicas da pasta – MB3469/91		
Água para pasta de consistência normal (água/gesso)		0,517g/g
Início de pega		08 min.
Fim de pega		18 min.
Determinação das propriedades mecânicas - MB3470/91		
Resist. à Compressão		17,5 MPa
Dureza		22,8 N/mm <sup>2</sup>

OBS: Ensaios realizados no Laboratório de Física dos Materiais do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas em 07 de dezembro de 2000.

### 7.1.2 Cimento

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

O cimento Portland utilizado foi o CPIII-32 RS, Cimento Portland de alto-forno resistente a sulfatos.

A composição deste cimento em valores médios ( % ) é:

- Clínquer = 38%
- Escória = 53,4%
- Calcário = 4,3%
- Gipsita = 4,3%

Foram realizados ensaios químicos e físicos do cimento sendo os seus dados descritos na Tabela 7.3 e Tabela 7.4, respectivamente.

***Tabela.7.3 - Análise Química do Cimento (Holdercim)***

	CP-III-32 RS(%)
% adições	62
P. Fogo	3,01
RI	0,75
SiO <sub>2</sub>	25,93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,38
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,09
CaO	51,53
MgO	3,78
SO <sub>3</sub>	3,68
Na <sub>2</sub> O	0,14
K <sub>2</sub> O	0,55
MS	2,48
MA	4,01
FSC	34,5
C <sub>3</sub> S	21,0
C <sub>2</sub> S	5,0
C <sub>3</sub> A	3,2
C <sub>4</sub> AF	3,5

MS = módulo sílica, MA = módulo de alumínio, FSC = fator de saturação do calcário.

OBS.: A composição potencial foi calculada em função do teor de clínquer

**Tabela.7.4 - Análise Física do Cimento (Holdercim)**

Ensaio	Resultados	Ensaio	Resultados
Peneira nº 200	0,0	Expansão a Quente	0,0
Peneira nº 325	9,7	Resist. Compr. 2 dias (MPa)	0,0
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3.879	Resist. Compr. 3 dias (MPa)	20,5
a/c %	27,2	Resist. Compr. 7 dias (MPa)	30,1
Início de pega (min.)	250	Resist. Compr. 28 dias (MPa)	42,9
Fim de pega (min.)	330	Massa específica g/cm <sup>3</sup>	3,032

OBS: Data do ensaio: 14/09/00.

### 7.1.3 Sílica Ativa

A sílica ativa utilizada tem como composição química descrita na embalagem: Sílica amorfa, óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio.

Na tabela 7.5 estão relacionados os ensaios químicos e físicos da sílica ativa.

**Tabela.7.5 - Análise química e física da sílica ativa (SIBRA).**

Elementos Químicos	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	PF
Média Ponderada	0,09	0,26	0,04	0,54	1,14	0,18	94,0	3,22
Umidade	= 0,79							
Densidade Aparente	=0,41 g/cm <sup>3</sup>							
pH	=8,5							
% resíduo na peneira 45 µm	=3,20							

Data do ensaio: 03/10/00

#### 7.1.4 – Superplastificante

O superplastificante empregado tem as seguintes características:

Massa específica = 1,16 g/cm<sup>3</sup>

Teor de sólidos = 27 %

Para manter uma boa trabalhabilidade, sem alterar a relação água/aglomerante, fez-se necessário o seu emprego, onde adicionou-se 2% de superplastificante, em relação à quantidade de cimento em massa, nas misturas M3, M4, M5, M8, M9, M10,

#### 7.2 Misturas Experimentais

Para atingir os objetivos deste trabalho, foi realizado o seguinte plano de investigação experimental:

a) *Ensaio da pasta no estado fresco*, para determinação da consistência e o tempo de início e fim de pega (NBR12128), pois para a aplicação da pasta em revestimento esses dados são importantes.

b) *Ensaio da pasta no estado endurecido*, logo após o ciclo de cura, aos 3, 28, 90 e 180 dias, para análise:

- da resistência mecânica das pastas submetidas à cura ao ar internamente e externamente. Para a *resistência à compressão* adaptou-se a NBR7215/96, e para *resistência à tração por compressão diametral* adaptou-se a NBR7222/94.

- *absorção*, para observar a penetração de água nas diversas misturas verificando a sua porosidade capilar.
- *permeabilidade ao ar*, para verificar a porosidade interna da mistura e poder comparar com os dados obtidos na absorção.
- *Expansibilidade longitudinal*, para observar a variação dimensional, quando da produção de compostos expansivos nas misturas estudadas.
- *difração de raios-X*, para observação dos compostos formados durante a hidratação dos aglomerantes em diferentes idades.
- *Análise Termica Diferencial - ATD*, para observar, nas mudanças de temperaturas, as variações de entalpia das misturas ou as reações endotérmicas ou exotérmicas, tais como, as mudanças de fase, variações de formas alotrópicas, reações de oxidação e de redução, a desidratação e algumas decomposições e cristalizações.
- *Aplicação em painéis*, para avaliar o comportamento das misturas em revestimentos internos e externos.

### 7.2.1 Preparo das Misturas

Em função de pesquisas já realizadas (Klover,1998); (Bastos 1999), observou-se a necessidade de estudar as misturas apresentadas na Tabela 7.6.

As pastas foram confeccionadas com relação água/aglomerante igual a 0,70, entendendo-se como aglomerante a mistura de gesso + cimento + sílica ativa. Esse valor foi adotado em função do que se utiliza em obra, pois os gesseiros trabalham com uma relação água/gesso da ordem de 0,60 a 0,80. Como a mistura também foi aplicada em painéis, e para reproduzir as condições de obra, adotou-se uma relação água/aglomerante dentro dessa faixa.

**Tabela 7.6 – Misturas ensaiadas**

<b>Locais</b>	<b>Misturas</b>	<b>%gesso</b>	<b>% cim.</b>	<b>% sílica</b>	<b>%superplastificante</b>
<b>E</b>	<b>M1</b>	100	0	0	0
<b>X</b>	<b>M2</b>	85	15	0	0
<b>T</b>	<b>M3</b>	75	25	0	2
<b>E</b>	<b>M4</b>	85	10	5	2
<b>R</b>	<b>M5</b>	75	20	5	2
<b>N</b>					
<b>O</b>					
<b>I</b>	<b>M6</b>	100	0	0	0
<b>N</b>	<b>M7</b>	85	15	0	0
<b>T</b>	<b>M8</b>	75	25	0	2
<b>E</b>	<b>M9</b>	85	10	5	2
<b>R</b>	<b>M10</b>	75	20	5	2
<b>N</b>					
<b>O</b>					

Relação água/aglomerante = 0,70

Inicialmente, foi calculado o volume necessário para o preenchimento dos corpos-de-prova e aplicação nos painéis. O volume calculado foi na ordem de 14.400 cm<sup>3</sup>. Para esse volume foram preparados 18 kg de mistura sendo 10 kg para os corpos-de-prova e 8 kg para os painéis.

Nessa quantidade, foram calculadas as perdas nos recipientes de mistura e colocação, bem como na aplicação dos painéis. A perda nos recipientes de mistura e nos recipientes para colocação das mesmas nos corpos-de-prova são pequenas, mas na aplicação dos painéis a perda fica em torno de 20% (dados retirados da prática).

Os materiais foram pesados em balança digital, com sensibilidade de 0,1 g, em recipientes plásticos para cada material e misturados em bandejas de alumínio com o auxílio de espátulas, por mais de 10 minutos até obter uma mistura homogênea. A homogeneização foi sempre executada pelo mesmo operador.

A mistura homogeneizada foi polvilhada sobre a água lentamente evitando assim a formação de grumos e, em seguida, foi misturada manualmente.

Após a mistura, a pasta foi colocada em moldes cilíndricos de 2,75 x 5,50 cm para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e absorção (Tabela 7.7). Para o ensaio de permeabilidade ao ar, a mistura foi colocada em moldes de 5,0 x 10 cm, também cilíndricos (Tabela 7.8), e, para o ensaio de expansibilidade, em moldes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm (Tabela 7.9).

Após o preenchimento dos corpos-de-prova no laboratório, parte da mistura foi preparada no local da aplicação dos painéis conforme descrito no item 7.5.

**Tabela 7.7 - Quantidades de corpos-de-prova 2,75 x 5,50 cm por mistura – Para os ensaios de Absorção, Resistência à Compressão e Resistência à Tração**

Idades (dias)	Absorção		Resist. Compr.		Resist. Tração		TOTAL
	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	12
3	---	---	3	3	3	3	12
7	---	---	3	3	3	3	12
28	3	3	3	3	3	3	18
90	3	3	3	3	3	3	18
180	3	3	3	3	3	3	18
360	3	3	3	3	3	3	18
<b>TOTAL</b>	12	12	18	18	18	18	<b>96</b>

**Tabela 7.8 – Quantidades de corpos-de-prova 5 x 10 cm por mistura – Para o ensaio de Permeabilidade ao Ar**

Idades (dias)	28	90	180	360	TOTAL
<b>Locais</b>					
Int.	2	2	2	2	8
Ext.	2	2	2	2	8
<b>TOTAL</b>	4	4	4	4	<b>16</b>

**Tabela 7.9 – Quantidade de corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm por mistura – Para o ensaio de Expansibilidade**

		<b>TOTAL</b>
Int.	3	3
Ext.	3	3
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>	<b>6</b>

Os corpos-de-prova foram desenformados após 24 horas da moldagem. Metade dos corpos-de-prova foram submetidos à cura ao ar em laboratório, e a outra parte à cura externa, junto aos painéis de revestimento, durante períodos de 3, 7, 28, 90 e 180 dias.

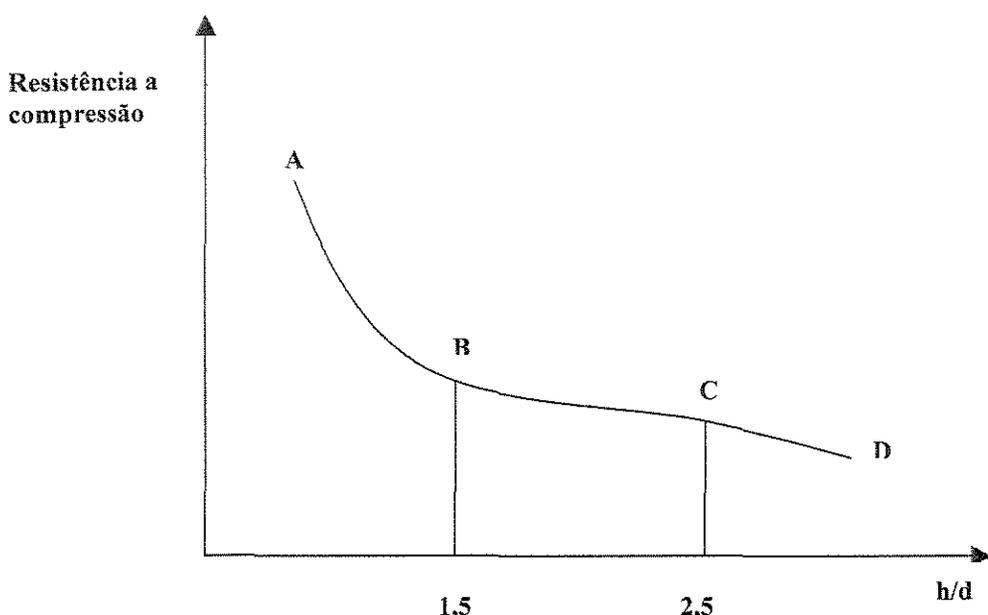
Os corpos-de-prova submetidos à cura externa foram acondicionados em suportes constituídos por uma estrutura de madeira e tela de PVC, para evitar o acúmulo de água, e fixados por parafuso e bucha à alvenaria, conforme descrito no item 7.5 (Figuras 7.9 e 7.10).

### **7.2.2 Preparo dos corpos-de-prova**

Para os ensaios de absorção, resistência à compressão e resistência à tração, foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 2,75 cm de diâmetro x 5,50 cm de altura mantendo-se a relação altura/diâmetro igual a 2. Segundo Tucker (citado em Rodrigues, 1993), a resistência à compressão varia com relação h/d do corpo-de-prova, conforme Figura 7.1, concluindo que no intervalo compreendido entre 1,5 e 2,5 os resultados obtidos permanecem praticamente constantes. Para relações menores que 1,5 ocorre um acréscimo significativo de resistência, e para valores maiores que 2,5, ocorre decréscimo, pela ruptura ser influenciada por fenômenos de flambagem.

A moldagem foi efetuada em duas camadas, utilizando um bastão de vidro para compactação da mistura, de forma a evitar o aprisionamento de bolhas de ar. Após alguns

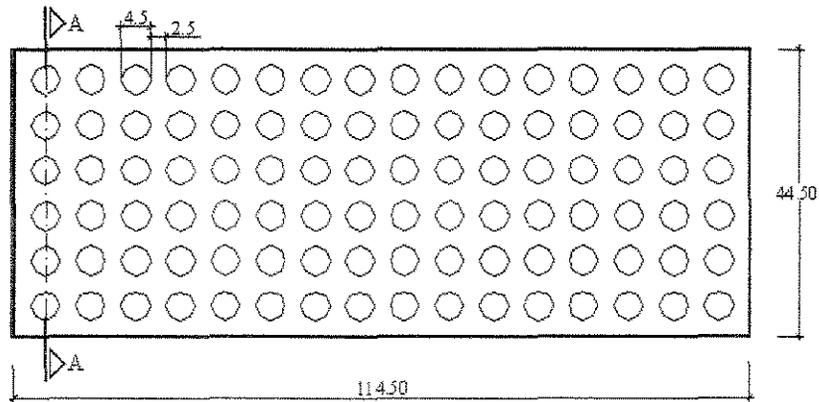
minutos, as superfícies dos corpos-de-prova foram niveladas com uma espátula e colocada uma chapa de vidro sobre os mesmos, permanecendo assim até a sua desforma que se deu 24 horas após a moldagem. Este procedimento se fez necessário para que as superfícies dos corpos-de-prova ficassem planas evitando o capeamento.



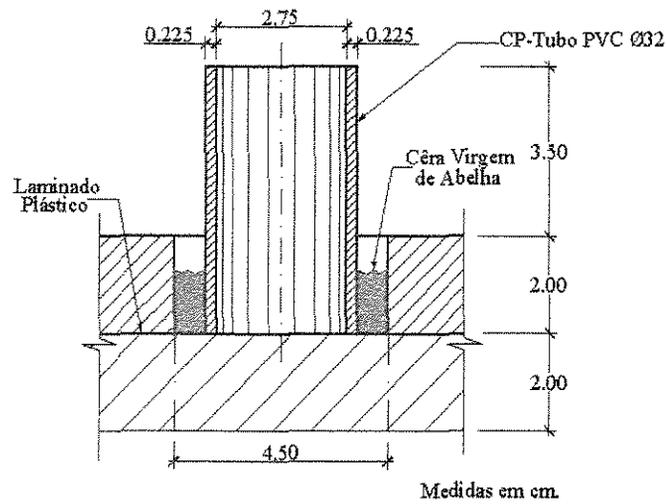
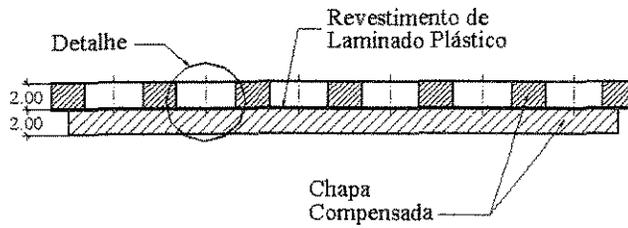
*Figura 7.1 - Influência da relação h/d na resistência à compressão em corpos-de-prova de concreto (Tucker, in Rodrigues, 1993).*

Os corpos-de-prova foram moldados, utilizando tubos de PVC como fôrma, sobre um suporte constituído por uma chapa compensada revestida com laminado plástico e sobre a mesma uma outra chapa perfurada fixada por parafuso e cola. O suporte foi previamente nivelado com nível de bolha manual e as fôrmas de PVC foram fixadas por pasta de cera virgem de abelha (Figura.7.2).

Os tubos de PVC utilizados foram cortados com esquadrejadeira para garantir o paralelismo das peças, e abertos na sua geratriz por lâmina quente. A abertura foi lacrada por fita adesiva da mesma dimensão dos corpos-de-prova para evitar o vazamento da pasta e somente retirada quando da desforma dos mesmos.



SUPORTE PARA 96 CPs 2,75 x 5,50 cm



DETALHE DE FIXAÇÃO DOS CPs 2,75 x 5,50 cm

Figura 7.2 - Detalhe do suporte e fixação dos moldes em PVC dos corpos-de-provas

Para o ensaio de permeabilidade ao ar foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 5,0 cm de diâmetro e 10 cm de altura, e para o ensaio de expansibilidade longitudinal corpos-de-prova prismáticos de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm. Os corpos-de-prova foram moldados utilizando formas metálicas padronizadas.

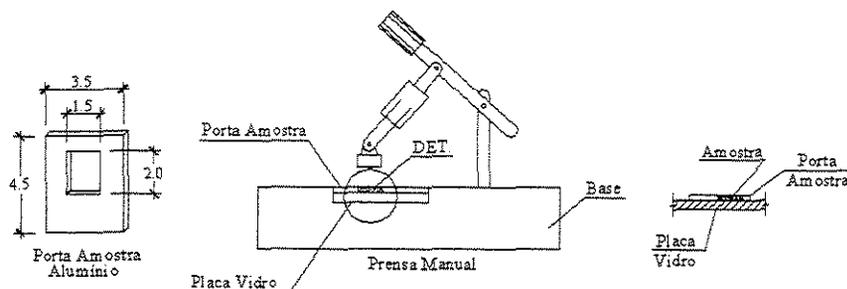
A moldagem foi efetuada em camadas, utilizando um bastão de vidro para compactação da mistura, de forma a evitar o aprisionamento de bolhas de ar. Após alguns minutos, a superfície dos corpos de prova era nivelada com uma espátula. A desforma dos corpos-de-prova se deu 24 horas após a moldagem (Figuras A6 e A7 do Anexo A).

### **7.2.3 Preparo das Amostras para os Ensaios da Análise Térmica Diferencial, Análise Termogravimétrica e Difração de Raios-X**

Após a ruptura dos corpos-de-prova no ensaio de à compressão, os corpos-de-prova foram fragmentados e, nas idades de 28 e 180 dias, foi efetuada a interrupção da hidratação da pasta imergindo-a em acetona em recipiente de vidro, e levado aos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP para a realização dos ensaios.

Vinte e quatro horas antes do ensaio, a amostra foi colocada em estufa a 50°C, para a remoção por evaporação da acetona e, em seguida, moída em almofariz de porcelana por cerca de 15 minutos. Foi feita uma segunda moagem da mistura em almofariz de Agta até obter material passante na peneira nº 200 suficiente para a realização dos ensaios.

Parte desta amostra, 30 mg  $\pm$ 1, foi utilizada para o ensaio de Análise Térmica Diferencial-ATD e de Análise Termogravimétrica-ATG. O restante da amostra foi colocado no porta-amostra de alumínio, com medida externa de 3,5 x 4,5 cm, interna de 2,0 x 1,5 cm e espessura de 2,0 mm e compactado em prensa manual sobre placa de vidro para o ensaio de Difração de raios-X (Figura 7.3 e Figuras B4, B5, B6 e B7 do Anexo B).



**Figura 7.3 – Porta-amostra e prensa mecânica**

## **7.3 Ensaio da Pasta no Estado Fresco.**

### **7.3.1 Consistência**

Através da NBR 12128/91 (ABNT 1991) foram determinados a consistência das pastas e os tempos de início e fim de pega.

Para a determinação da consistência das pastas empregou-se o aparelho de Vicat modificado (Figura B8 do Anexo B), molde tronco cônico de 70 x 60 x 40 mm para colocação da pasta e massa para calafetar para fixar o molde na placa de vidro.

O ensaio foi realizado inicialmente pesando uma massa da mistura. A amostra foi polvilhada, sobre a água, no período de 1 min e permaneceu em repouso por um período de 2min.; em seguida, misturou-se por 1 min., em movimentos circulares, a fim de obter uma pasta uniforme. Para o molde previamente untado transferiu-se a pasta, com ligeira agitação para evitar

a formação de bolhas de ar. O excesso de pasta foi retirado com espátula. Abaixou-se a sonda, previamente umedecida, até o centro do molde sobre a superfície da pasta, deixando-a descer lentamente. Cessando a penetração fez-se a leitura da escala. Todas as leituras foram efetuadas 4,0 min após o início do polvilhamento da mistura do aglomerante com a água. Determinaram-se dois valores de consistência da pasta e tomou-se como valor final a média dessas duas determinações.

### **7.3.2 Pega**

Para a determinação do início e fim de pega foi empregado o aparelho de Vicat, conforme NBR12128/91 (ABNT, 1991)

O ensaio foi realizado com a preparação das pastas conforme descrito no ensaio de consistência. Foi registrado o tempo a partir do instante em que a amostra entrou em contato com a água.

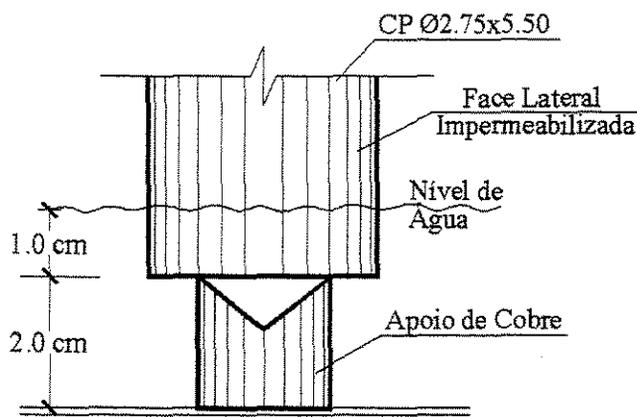
## **7.4 Ensaio da Pasta no Estado Endurecido**

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

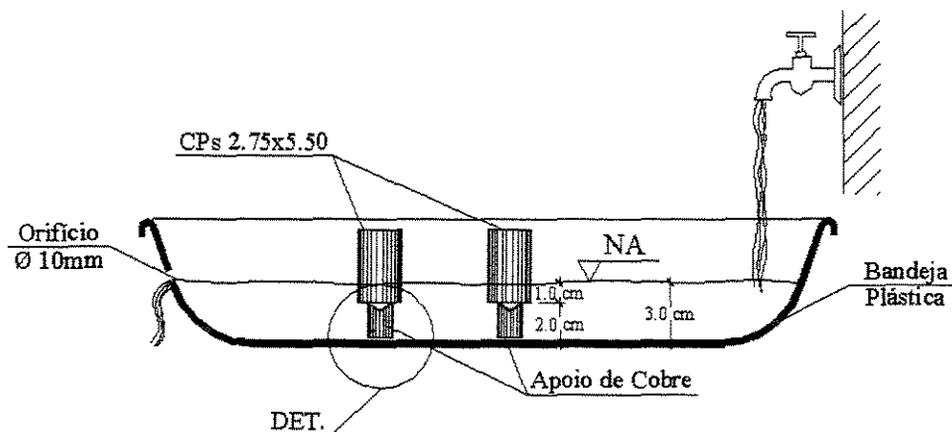
### **7.4.1 Absorção Capilar e Perda de Massa**

O ensaio de absorção foi realizado utilizando-se os seguintes materiais e equipamentos (Figura 7.4 e Figuras A11 e A12 do Anexo A):

- bandeja plástica, perfurada para controle de vazão;
- apoios em chapa de cobre, a fim de manter a altura de imersão em 1,0 cm;
- impermeabilizante constituído de: resina acrílica, monômero de estireno, acrilato de butila, AB-9 veículo qsp.



**DETALHE DO APOIO DOS CORPOS-DE-PROVA**



**Figura 7.4 – Bandeja e suporte para os corpos-de-prova**

Para cada mistura, foram ensaiados três corpos-de-prova cilíndricos de 2,75 cm de diâmetro x 5,50 cm de altura, nas idades de 28, 90 e 180 dias. Os corpos-de-prova foram impermeabilizados nas laterais para evitar a absorção de água por estas faces e assim garantir a área de absorção. Em seguida, foram colocados sobre os apoios em chapa de cobre com 2,0 cm de altura em relação ao fundo da bandeja (Figura.7.4), possibilitando a circulação de água. A

distância entre o fundo do corpo de prova e a lâmina de água é de 1,0 cm com o objetivo de manter uma pressão constante de 0,01mca. O fluxo de água na bandeja foi constante para garantir que os corpos-de-prova permanecessem com 1,0 cm de imersão.

Parte dos corpos-de-prova foi curada em laboratório e parte externamente durante 27, 89, 179 dias e mais 24 horas em estufa à 50 °C completando, assim, os 28, 90, 180 dias. O ensaio foi efetuado inicialmente medindo-se a massa do corpo-de-prova seco, e após 1 min., 5 min., 10 min., 15 min., 30 min., 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 8 h e 24 h de imersão. Após esse período, os corpos-de-prova foram rompidos diametralmente para verificação da altura de penetração da água.

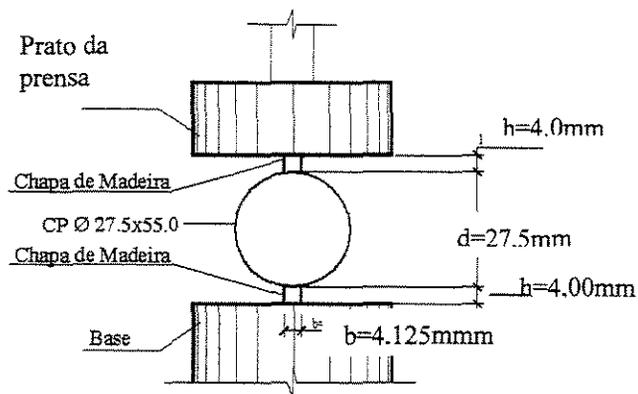
#### **7.4.2 Resistência à Compressão**

Adaptou-se a NBR 7215/96 (ABNT 1996) e realizaram-se ensaios à compressão utilizando três corpos-de-prova cilíndricos de 2,75 cm de diâmetro por 5,50 cm de altura, para cada mistura, nas idades de 3, 7, 28, 90, 180 dias. Após a desforma, que se deu após 24h da moldagem, parte dos corpos-de-prova permaneceu ao ar em laboratório e parte em ambiente externo junto aos painéis de revestimento (Figura B2 do Anexo B).

#### **7.4.3 Resistência à tração**

Adaptou-se a NBR 7222/94 (ABNT 1994) e determinou-se a resistência à tração por compressão diametral, utilizando três corpos-de-prova cilíndricos de 2,75 de diâmetro por 5,50 cm de altura, para cada mistura, nas idades de 3, 7, 28, 90, 180 dias (Figura B3 do Anexo B).

Os corpos-de-prova foram colocados em suportes metálicos, de modo que ficassem em repouso sobre o prato da máquina de compressão, entre os suportes e o corpo-de-prova, foram colocadas duas tiras de madeira de 4,125 x 4,0 x 55 mm, sendo o comprimento igual ao da geratriz do corpo-de-prova e seção transversal conforme estabelece a norma (Figura 7.5). A carga foi aplicada continuamente até a ruptura.



$$b = (0,15 \pm 0,01)d$$

$$h = (3,5 \pm 0,5)mm$$

**Figura 7.5 – Disposição do corpo-de-prova**

#### 7.4.4 Análise Térmica Diferencial – ATD e Análise Termogravimétrica - ATG

Utilizou-se uma amostra de cada mistura do material reservado e acondicionado conforme procedimento do item 7.2.3, o ensaio foi realizado nas idades de 28 e 180 dias conforme descrição a seguir.

Empregou-se um cadinho de platina e ouro, lavado com HCl +H<sub>2</sub>O na proporção de 1:1 a cada ensaio. A mistura moída foi colocada no cadinho com o auxílio de uma pequena espátula e compactada com um compactador manual de metal. A amostra foi pesada em balança digital até

atingir  $30 \text{ mg} \pm 1$ . O cadinho foi colocado na balança termogravimétrica (Figuras B4 e B5 do Anexo B) no porta-amostra onde está colocado uma amostra padrão de óxido de alumínio para referência de temperatura. O gradiente de temperatura empregado foi de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  por minuto. Após 60 minutos procedeu-se ao desaquecimento por um período de 30 minutos.

O resultado obtido é fornecido em um gráfico termogravimétrico contendo a variação da temperatura do padrão e um gráfico de termogravimetria e análise térmica diferencial da amostra.

#### **7.4.5 Difração de Raios - X**

Utilizou-se uma amostra de cada mistura do material reservado e acondicionado conforme procedimento do item 7.2.3. Nas idades de 28 e 180 dias, a amostra foi colocada dentro do equipamento de raios-X por um período de 30 minutos (Figuras B6 e B7 do Anexo B).

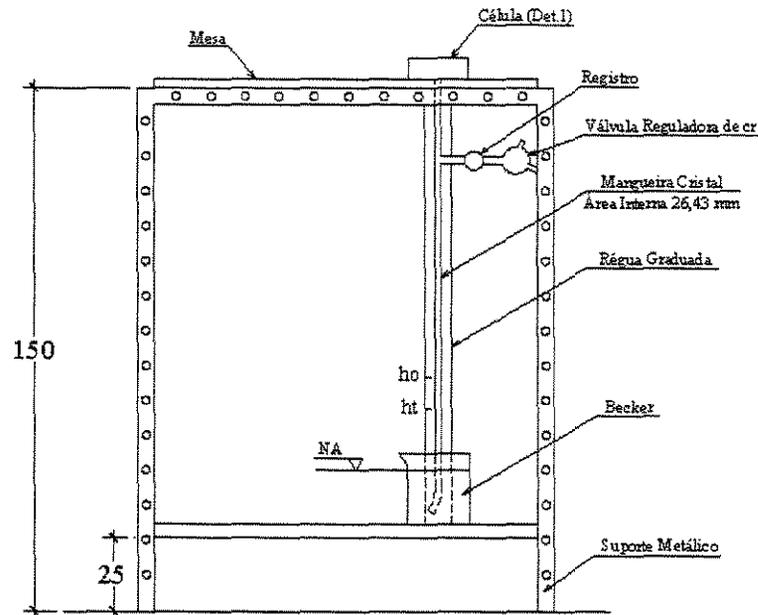
O ensaio foi efetuado em ângulos de  $2^\circ$  a  $60^\circ$ , e os resultados apresentados em gráficos de variação de intensidade em função do ângulo de difração  $2\theta$ .

#### **7.4.6 Permeabilidade ao Ar**

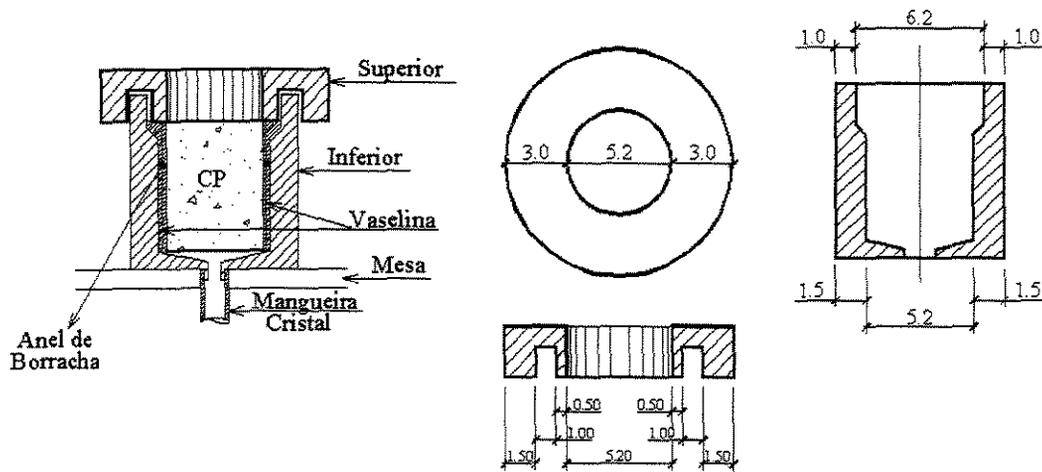
Para medir a permeabilidade ao ar foi desenvolvido um equipamento (Figura 7.6 e B9 do Anexo B), composto por: (Massat, 1995).

- Suporte metálico;
- Mesa de madeira para fixação das células de permeabilidade;

- Válvula reguladora de pressão;
- Mangueira de área interna 26,43mm<sup>2</sup>;
- Régua graduada;
- Becker.



**PERMEABILÍMETRO ( medidas em cm)**



**DETALHE 1 – CÉLULA DE PERMEABILIDADE AO AR**

**Figura 7.6 – Aparelho de Permeabilidade ao ar**

Para cada mistura, foram ensaiados dois corpos-de-prova cilíndricos de 5,0 x 10,0 cm nas idades de 28, 90, 180 dias, serrados ao meio (5,0 x 5,0 cm), efetuando-se duas medidas para a metade superior e duas medidas para a inferior.

A preparação dos corpos-de-prova para esse ensaio ocorreu da seguinte maneira: Vinte quatro horas antes do ensaio os corpos-de-prova foram colocados em estufa com temperatura de 50 °C. Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram serrados ao meio (5,0cm de diâmetro por 5,0 cm de altura) e suas extremidades lixadas para deixar as superfícies mais porosas e sua laterais foram impermeabilizados com impermeabilizante constituído por resina acrílica, monômero de estireno, acrilato de butila, AB-9 veículo qsp. No centro da amostra foi colocada fita teflon e um anel de borracha. Para melhorar a vedação entre o corpo-de-prova e o aparelho utilizou-se graxa incolor. A amostra foi colocada no aparelho de permeabilidade (Figura 7.6).

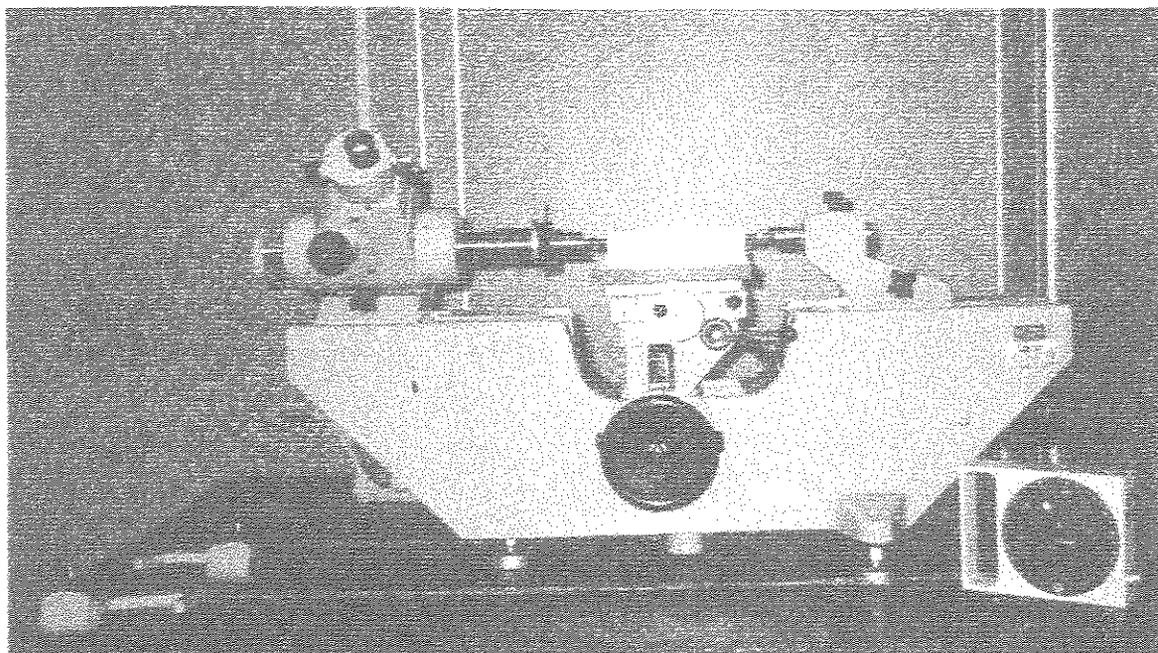
Com o corpo-de-prova devidamente instalado, a água do becker foi sugada até a altura  $h_0$ , a válvula reguladora foi fechada e o tempo que a água levou para descer do nível  $h_0$  até o nível  $h_t$  foi medido.

Optou-se por dividir os corpos-de-prova ao meio para verificar se haveria diferenças de medidas de tempo devido à precipitação de finos na base dos corpos-de-prova durante a cura, e também devido ao fenômeno de exudação deixando o parte, superior da amostra mais porosa.

#### **7.4.7 Expansibilidade Longitudinal**

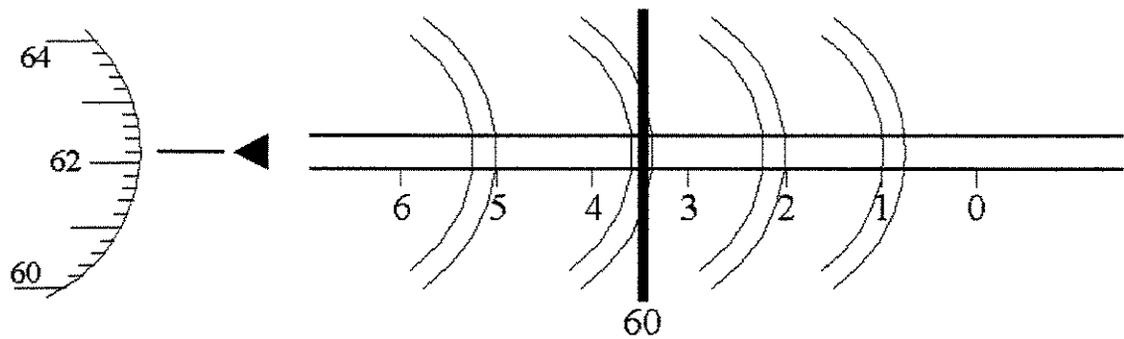
O ensaio de expansibilidade longitudinal foi efetuado adaptando-se a NBR 8490/84 (ABNT 1984) e NBR 11.582/91 (ABNT 1991), com a finalidade de observar-se a variação dimensional quando da possível produção de compostos expansivos nas misturas estudadas.

Para cada mistura foram moldados seis corpos-de-prova prismáticos de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm em fôrmas metálicas, sendo três para as misturas internas e três para as misturas externas. Os corpos-de-prova foram desformados 24 h após a moldagem tendo o cuidado de não danificar as suas extremidades. Foi determinado geometricamente o centro da amostra e a mesma levada ao aparelho medidor de deformação que efetua as medidas com a sensibilidade de décimos de milésimos de milímetros (Figura 7.7)



*Figura 7.7– Metroscópio Horizontal (Fatec – Sorocaba)*

O metroscópio foi calibrado através de um padrão de 160 mm, a mesa de medição nivelada e os corpos-de-prova colocados centrados nas ponteiras de medição. As leituras foram efetuadas através da ocular, onde se vê as escalas do microscópio espiral, podendo ajustar o foco para melhor visualização, girando a ocular no sentido horário ou anti-horário. Partindo sempre da medida de 100 mm (Figura 7.8).



mm =	160,000
Décimos =	0,3
Centésimos e milésimos =	0,062
Décimos de milésimos =	<u>0,0002</u>
	160,3622

*Figura 7.8 – Exemplo de medição no Metroscópio Horizontal*

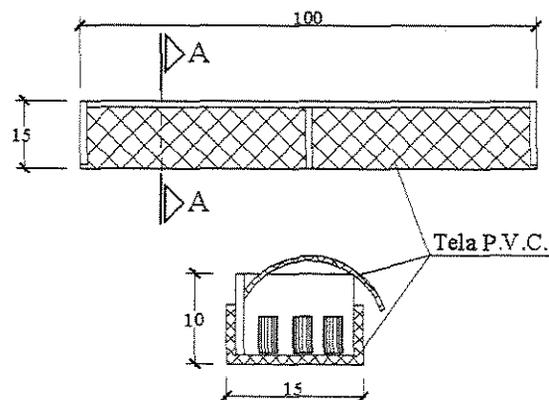
### **7.5 Aplicação das pastas em painéis de alvenaria**

Os revestimentos em gesso geralmente são aplicados diretamente sobre as alvenarias de bloco de concreto, blocos cerâmicos, blocos silico calcário etc., justificando, portanto, a economia, visto não necessitar do chapisco e do emboço, (revestimento tradicional), uniformizando, desta maneira, os painéis de paredes e tetos.

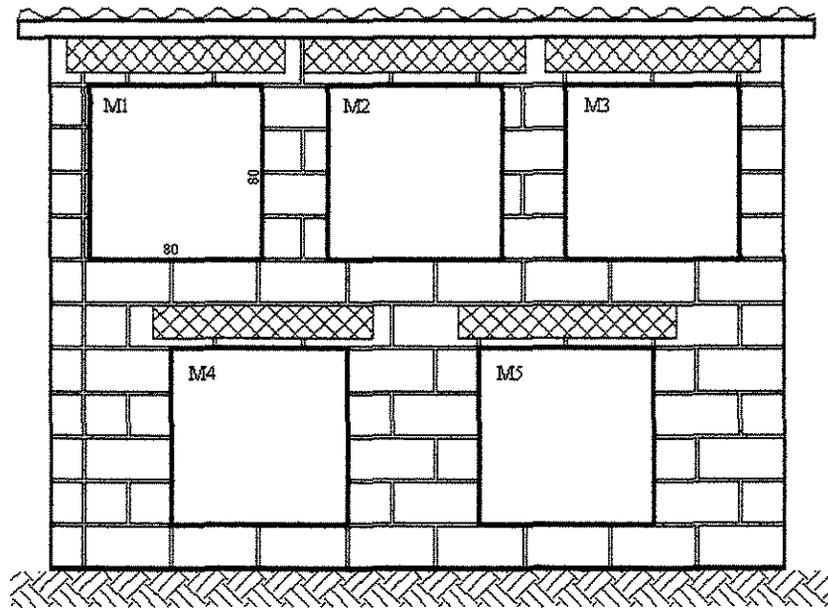
O painel de alvenaria foi executado, no Campus da Faculdade de Engenharia de Sorocaba, com blocos de concreto 14 x 19 x 39 cm, assentados com argamassa mista no traço 1:0,5:6. Uma das faces ficou exposta ao tempo e a outra protegida sob cobertura de telhas de fibro-cimento ondulada de 6,0 mm (Figura 10 e Figuras A1 a A5 do Anexo A).

Os revestimentos dos painéis com as misturas foram realizados conforme descrito a seguir.

As misturas preparadas conforme descrito no item 7.2.1, e aplicadas sobre a alvenaria de bloco de concreto em painéis de 0,80 x 0,80 m em três camadas, duas de espalhamento e uma de regularização e acabamento, de acordo como a execução efetuada pelos gesseiros (item 6.2.2). As misturas M1, M2, M3, M4 e M5 foram aplicadas na face externa, e as misturas M6, M7, M8, M9, M10 nas internas, sendo que as misturas de mesmo traço na mesma posição. As aplicações foram feitas utilizando a desempenadeira de PVC nas primeiras demãos e de aço na última até que a superfície do revestimento ficasse lisa e uniforme. Para garantir uma espessura constante para todos os painéis, foi utilizado um molde feito de chapa de *Eucatex* de 4,3 mm de espessura. Parte dos corpos-de-prova moldados no item 7.2.2. foram colocados ao lado de cada painel externo para serem ensaiados nas idades propostas em suportes construídos de madeira e tela de PVC, para evitar o acúmulo de água de chuva (Figura 7.9 e Figuras A4 e A5 do Anexo A).



**Figura 7.9 – Detalhe do suporte dos corpos-de-prova**



VISTA EXTERNA (S/E)

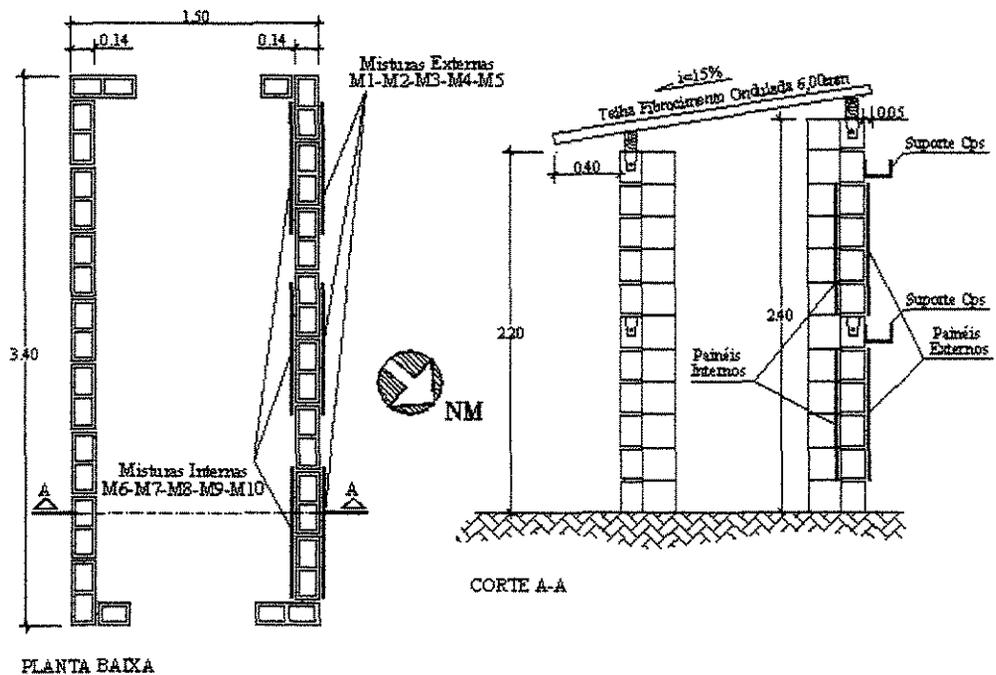


Figura 7.10 – Localização dos painéis

## 8 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo encontram-se os resultados obtidos na investigação experimental das misturas de gesso, cimento Portland de alto-forno e sílica ativa, submetidas a cura ao ar, internamente e externamente ao tempo.

### 8.1 Consistência

Apresentam-se na Tabela 8.1 os valores de consistência obtidos nas misturas ensaiadas. Os resultados são as médias de duas determinações de penetração, em milímetros. Cumpre ressaltar que nas misturas M3 = M8, M4 = M9, e M5 = M10 foram acrescentados 2% de superplastificante. A relação água/aglomerante de todas as misturas foi mantida constante e igual a 0,70.

A NBR 12128/91 determina que, quando for obtida uma penetração de  $30 \pm 2$  mm, a consistência é considerada normal, e os resultados devem ser expressos pela razão massa de água por massa de gesso. Como nos ensaios as misturas continham cimento e sílica ativa, optou-se por avaliar a consistência verificando somente a penetração da sonda.

**Tabela 8.1 – Consistência das misturas (penetração)**

Misturas g/c/s	Penetração (mm)
M1 = M6	29,0
M2 = M7	28,5
M3 = M8	27,5
M4 = M9	16,5
M5 = M10	18,5

a/agl=0,70

M1 = M6 (100/0/0); M2 = M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5)

Nas misturas M1=M6 com 100% de gesso, verificou-se que a pasta de gesso com relação a/agl. 0,70 obteve consistência normal obtendo um índice de penetração de 29,0 mm estando portanto dentro da variação dada por norma que é de 28 a 31 mm.

As misturas contendo gesso e cimento M2 = M7 (85/15/0) obtiveram uma penetração um pouco inferior (28,5 mm) em relação às pastas de gesso (29,0 mm). Isto se deve a uma aceleração no tempo de pega quando o gesso foi misturado com o cimento. Observou-se a dificuldade no preparo da mistura. Assim para manter a manuseabilidade da pasta na mistura M3 = M8 (75/25/0), com mais cimento, foi acrescentado 2% de superplastificante, mantendo-se a mesma relação a/agl. de 0,70. Com isso obteve-se um índice de penetração de 27,5 mm, o que possibilitou um manuseio melhor da pasta.

As misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5), obtiveram um índice de penetração de 16,5 mm e 18,5 mm, respectivamente. Estes valores foram menores do que as demais misturas devido a substituição de parte do cimento por sílica ativa. Mesmo acrescentando 2% de superplastificante a pega foi mais acelerada resultando em um índice de penetração menor.

A diferença do índice de penetração de 2,0 mm das misturas M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) pode ter ocorrido devido ao tempo entre a mistura e o seu lançamento no molde.

Para as misturas M2 = M7 (85/15/0) e M3 = M8 (75/25/0) a diferença de 1,0 mm no índice de penetração ocorrida foi devido à adição de 2% de superplastificante nas misturas M3 = M8 (75/25/0) e na variação do teor de cimento.

## 8.2 Pega

Avaliou-se o tempo decorrido a partir do momento em que a mistura entrou em contato com a água, até o instante em que a agulha do aparelho de Vicat ao penetrar na pasta, ficou distante 1,0 mm do fundo do molde caracterizando o *tempo de início de pega*, e o instante em que a agulha não mais deixou impressão na superfície da mistura, caracterizando o *tempo de fim de pega*.

Os resultados de início e fim de pega (Tabela 8.2) foram expressos em minutos e segundos. Esses valores constituem a média de duas determinações que não diferiram em mais de 10%.

**Tabela 8.2 - Tempo de início e fim de pega ( minutos. e segundos.)**

Misturas g/c/s	Início de Pega	Fim de pega	Diferença
M1 = M6	30 min. e 33 s.	45 min. e 49 s.	15 min. e 16 s
M2 = M7	7 min. e 48 s.	15 min. e 14 s	7 min. e 66s
M3 = M8	10 min. e 05 s.	16 min. e 12s	6 min. e 07 s
M4 = M9	11 min. e 43 s.	18 min. e 58 s	7 min. e 15 s
M5 = M10	9 min. e 34 s.	16 min. e 48 s	7 min. e 14 s

a/agl=0,70

M1 = M6 (100/0/0); M2 =M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5)

Nas pastas de gesso M1 = M6 com 100% de gesso e relação a/agl de 0,70 obteve-se um tempo de início de pega em 30 min. e 33 s e fim de pega em 45 min e 49 s. Pela NBR 13207/94, o tempo de início de pega deve ser maior do que 10 min., e o tempo de fim de pega maior do que 45 min. Devido à relação a/agl. ser alta, por motivos de aplicação em revestimento, o tempo de início de pega foi elevado mas satisfaz a norma brasileira. A diferença entre os tempos de início e fim de pega foi de 15 min. e 16 s.

Nas misturas contendo gesso e cimento e relação a/agl. 0,70 houve uma diminuição considerável no tempo de início de pega das misturas M2 = M7 (85/15/0) passando o início de pega a 7 min. e 48 s e o fim de pega para 15 min. e 14 s. A diferença entre os tempos de início e fim de pega, com a substituição de parte do gesso pelo cimento, passou a ser de 7 min. e 26 s; sendo, aproximadamente, 50% da pasta de gesso puro. Em função dos resultados obtidos para as misturas M2 = M7 (85/15/0), em que houve acentuada redução dos tempos de pega, optou-se pela utilização de um superplastificante (2% em relação à massa de cimento) para as misturas com mais quantidades de cimento M3 = M8 (75/25/0) e também as com sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5).

Nas misturas M3 = M8 (75/25/0) observou-se um tempo de início de pega de 10 min. e 05 s e um tempo de fim de pega de 16 min. e 12 s., tempos maiores do que as misturas M2 = M7 (85/15/0). Assim, observa-se o efeito retardador do tempo de pega do aditivo superplastificante.

Com relação às misturas contendo gesso, cimento, e sílica ativa, e relação a/agl. de 0,70, M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) e adição de 2% de superplastificante, observou-se que nas misturas com mais cimento M5 = M10 (75/20/5), o tempo de início de pega foi de 9 min. e 34 s. e o tempo de fim de pega de 16 min. e 48 s., menores em relação às misturas M4 = M9 (85/10/5) que obtiveram tempos de início e fim de pega de 11min. e 43s. e 18 min. e 58 s. respectivamente. Observou-se que, à medida que o teor de cimento aumenta, a pega é mais acelerada, sendo sempre inferior às pastas de gesso puro.

### 8.3 Absorção Capilar e Perda de Massa

Neste item serão apresentados os resultados obtidos da absorção em uma hora e a perda de massa ocorrida durante o período de 24 horas em que os corpos-de-prova estiveram submersos em água.

Medidas efetuadas durante o ensaio de absorção mostrou que até uma hora não havia perda significativa de massa. Portanto o coeficiente de absorção capilar foi calculado em uma hora pois a partir deste período verificou-se uma perda de massa crescente durante o ensaio impossibilitando o cálculo do coeficiente de absorção capilar pois o mesmo depende da massa. Os resultados de cada série, são as médias de três determinações.

Não foi possível neste ensaio determinar a profundidade de penetração da água devido ser o corpo-de-prova de pequena dimensão ficando saturado.

O cálculo do coeficiente de absorção capilar foi efetuado segundo a equação de Ballayssac (1992).

$$K_{abs} = \frac{(W_t - W_o) / A}{\sqrt{t}}$$

sendo:  $K_{abs}$  = coeficiente de absorção capilar ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$ );

$t$  = tempo de ensaio (s);

$W_o$  = massa inicial do corpo-de-prova (kg);

$W_t$  = massa do corpo-de-prova (kg);

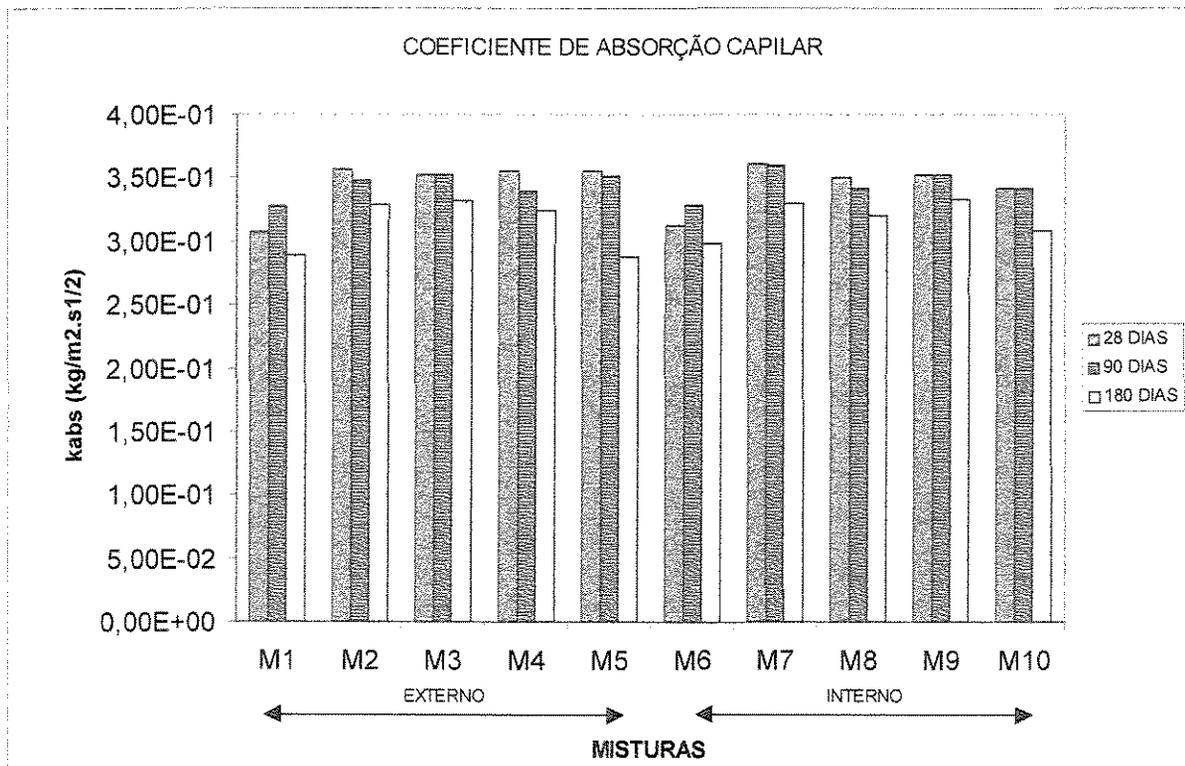
$A$  = área transversal do corpo-de-prova ( $\text{m}^2$ ).

Na Tabela 8.3 estão os resultados dos coeficientes de absorção capilar em uma hora, e nas Figuras 8.1 e C1 do Anexo C, estão os gráficos referentes ao coeficiente de absorção capilar em uma hora, aos 28, 90 e 180 dias.

**Tabela 8.3 - Resultados do coeficiente de absorção capilar em uma hora**

Misturas	g/c/s (%)	$K_{abs}$ (kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )	$K_{abs}$ (kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )	$K_{abs}$ (kg/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )
		(28 dias)	(90 dias)	(180 dias)
M1	100/0/0	3,07.10 <sup>-01</sup>	3,28.10 <sup>-01</sup>	2,88.10 <sup>-01</sup>
M2	85/15/0	3,57.10 <sup>-01</sup>	3,49.10 <sup>-01</sup>	3,29.10 <sup>-01</sup>
M3	75/25/0	3,53.10 <sup>-01</sup>	3,52.10 <sup>-01</sup>	3,32.10 <sup>-01</sup>
M4	85/10/5	3,56.10 <sup>-01</sup>	3,39.10 <sup>-01</sup>	3,24.10 <sup>-01</sup>
M5	75/20/5	3,56.10 <sup>-01</sup>	3,51.10 <sup>-01</sup>	2,88.10 <sup>-01</sup>
M6	100/0/0	3,13.10 <sup>-01</sup>	3,29.10 <sup>-01</sup>	2,99.10 <sup>-01</sup>
M7	85/15/0	3,61.10 <sup>-01</sup>	3,60.10 <sup>-01</sup>	3,30.10 <sup>-01</sup>
M8	75/25/0	3,51.10 <sup>-01</sup>	3,41.10 <sup>-01</sup>	3,21.10 <sup>-01</sup>
M9	85/10/5	3,53.10 <sup>-01</sup>	3,53.10 <sup>-01</sup>	3,34.10 <sup>-01</sup>
M10	75/20/5	3,42.10 <sup>-01</sup>	3,42.10 <sup>-01</sup>	3,08.10 <sup>-01</sup>

M1 a M5 (externo); M6 a M10 (interno)



**Figura 8.1 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28, 90 e 180 dias ( $k_{abs}$ )**

Nas pastas de gesso submetidas à cura interna (M6) e naquelas submetidas à cura externa (M1), observa-se que houve pouca variação na absorção de água apresentando um comportamento semelhante. Notou-se também que houve um acréscimo na absorção de água para as pastas aos 90 dias comparativamente às de 28 dias e uma diminuição considerável na absorção aos 180 dias, devido ao aumento da cristalização do gesso. Este fato ocorreu tanto para as pastas submetidas à cura interna como externa e não se repetiram para as demais misturas. Não se obteve diferenças significativas nas quantidades de água absorvidas na pasta interna (M6) e na externa (M1).

Nas misturas de gesso e cimento M2 = M7 (85/15) e M3 = M8 (75/25) tanto na cura interna como na externa, observou-se uma absorção maior em relação às pastas com 100% de gesso, devido ao acréscimo de finos e uma diminuição do diâmetro dos capilares, fazendo com que a água fosse absorvida com mais intensidade. No entanto, nas misturas de mesmo traço, houve um decréscimo na absorção aos 180 dias em relação aos 90 e 28 dias. Devido à ação do cimento em idades mais avançadas. Observou-se que as diferenças das quantidades de água absorvida ao longo do tempo, foram inferiores a 10%. A mesma diferença foi observada para as diferentes condições de exposição.

Tendo em vista as condições de ensaio e de exposição dos corpos-de-prova considerou-se que essa diferença não era significativa.

Nas misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) tanto na cura interna como na externa, observou-se uma absorção maior em relação às pastas com 100% de gesso, devido ao acréscimo de finos e uma diminuição do diâmetro dos capilares, fazendo com que a água fosse absorvida com mais intensidade. No entanto, nas misturas de mesmo traço, houve um decréscimo na absorção aos 180 dias em relação aos 90 e 28 dias, devido à ação do cimento em datas maiores.

A substituição do cimento por sílica ativa não apresentou acréscimo significativos na taxa de absorção de água (inferior a 10%).

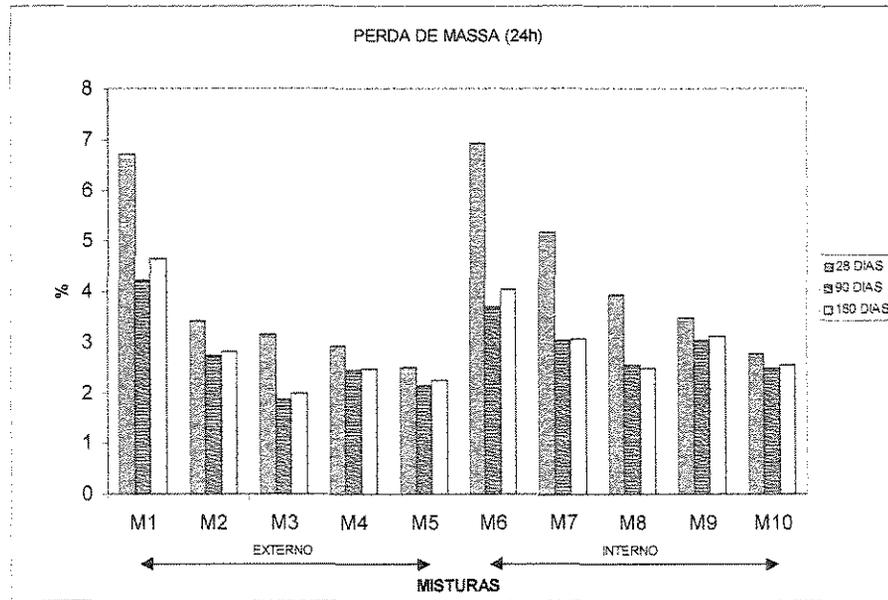
A seguir, estão apresentados os resultados obtidos da perda de massa após 24 horas de imersão em água (Tabela 8.4), e nas Figuras 8.2 e C2 do Anexo C, estão os gráficos referentes à perda de massa após 24 horas de imersão em água aos 28, 90 e 180 dias.

Como o trabalho se refere ao estudo do comportamento das diversas misturas aplicadas como revestimento, a perda de massa é um item importante pois o revestimento dificilmente ficará imerso em água e sim sujeitos a chuvas, respingos, locais de lavagem (box de banheiros, tanques, pias etc.) e em curta duração. Portanto, em continuidade ao ensaio de absorção os corpos-de-prova ficaram imersos em água durante 24 horas obtendo-se os seguintes resultados:

**Tabela 8.4 - Perda de massa após 24 horas em água (g)**

Idade		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
<b>28</b> (dias)	<b>Massa</b>	38,39	37,09	37,65	36,06	36,33	38,25	36,75	37,52	36,14	36,64
	<b>inicial</b>										
	<b>Massa</b>	35,81	35,82	36,46	35,00	35,42	35,60	34,85	36,04	34,88	35,62
	<b>Após 24h</b>										
	<b>%</b>	6,72	3,42	3,16	2,93	2,51	6,93	5,17	3,94	3,48	2,78
<b>90</b> (dias)	<b>Massa</b>	37,12	36,53	36,85	37,38	35,85	36,96	37,76	38,07	36,63	36,85
	<b>inicial</b>										
	<b>Massa</b>	35,55	35,56	36,16	36,46	35,07	35,60	36,62	37,09	35,52	35,93
	<b>Após 24h</b>										
	<b>%</b>	4,23	2,74	1,87	2,46	2,15	3,69	3,06	2,56	3,04	2,49
<b>180</b> (dias)	<b>Massa</b>	36,60	36,70	36,70	35,10	35,50	37,50	37,00	38,20	36,90	37,60
	<b>inicial</b>										
	<b>Massa</b>	34,90	35,67	35,97	34,23	34,70	35,98	35,86	37,25	35,75	36,64
	<b>Após 24h</b>										
	<b>%</b>	4,64	2,81	1,98	2,48	2,25	4,05	3,08	2,49	3,11	2,55

M1 = M6 (100/0/0); M2 = M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5) – (g/c/s)



**Figura 8.2 – Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água aos 28, 90 e 180 dias**

Para as pastas com 100% de gesso obteve-se uma perda de massa significativa, principalmente aos 28 dias, tanto para as misturas submetidas à cura interna (M6) como na externa (M1). Observou-se também que a mistura submetida à cura externa (M1) apresentou uma perda de massa maior, do que a mistura submetida à cura interna (M6).

Nas misturas de gesso e cimento M2 e M7 (85/15/0) e M3 e M8 (75/25/0), a perda de massa foi maior aos 28 dias. No entanto, observou-se uma perda de massa menor em relação à mistura com 100% de gesso, devido à ação do cimento nas misturas. Neste caso, observou-se que as misturas submetidas à cura externa (M2 e M3) obtiveram uma menor perda de massa do que as misturas submetidas à cura interna (M7 e M8) devido à presença de umidade na cura externa propiciando uma melhor hidratação do cimento.

Nas misturas de gesso, cimento e sílica ativa M4 e M9 (85/10/5) e M5 e M10 (75/20/5) a perda de massa também foi maior aos 28 dias, observando-se uma perda de massa menor em relação às pastas com 100% de gesso. As misturas submetidas à cura externa (M4 e M5) obtiveram uma perda de massa menor do que as misturas submetidas à cura interna (M9 e M10), devido à presença de umidade na cura externa propiciando uma melhor hidratação do cimento.

Para as misturas de gesso e cimento (M2 = M7 e M3 = M8) e as misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa (M4 = M9 e M5 = M10), observou-se que, em quase todos os casos, as misturas de gesso com cimento apresentaram um desempenho melhor, perdendo menos massa em relação às misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa. Portanto, o acréscimo de sílica ativa para os casos de perda de massa não mostrou grandes vantagens. Em contrapartida, o cimento, com hidratação maior em idades avançadas colaborou para que ocorresse uma perda de massa menor.

#### **8.4 Resistência à Compressão**

Apresentam-se os resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova das misturas estudadas, submetidos à cura ao ar internamente e externamente ao tempo. Com esses resultados, fez-se a análise de cada mistura nas diversas idades, comparando-se com a pasta de gesso sem adições

Para cada mistura, foram ensaiados três corpos-de-prova e os resultados apresentados na Tabela 8.5 e nas Figuras 8.3 e C3 a C10 do Anexo C. Esses valores representam a média das três determinações, sendo que o resultado individual não diferiu 15% da média calculada. O resultado que diferiu não foi considerado (Tabela C1 e C2, do anexo C) (NBR 7215/96).

Observou-se, neste ensaio, um decréscimo da resistência para as pastas curadas externamente e um aumento acanhado nas pastas internas nas primeiras idades, devido ao pouco tempo para se efetuarem as reações. O mesmo ocorreu para os ensaios em 180 dias nas misturas curadas externamente, devido à perda de massa verificada ao longo do tempo.

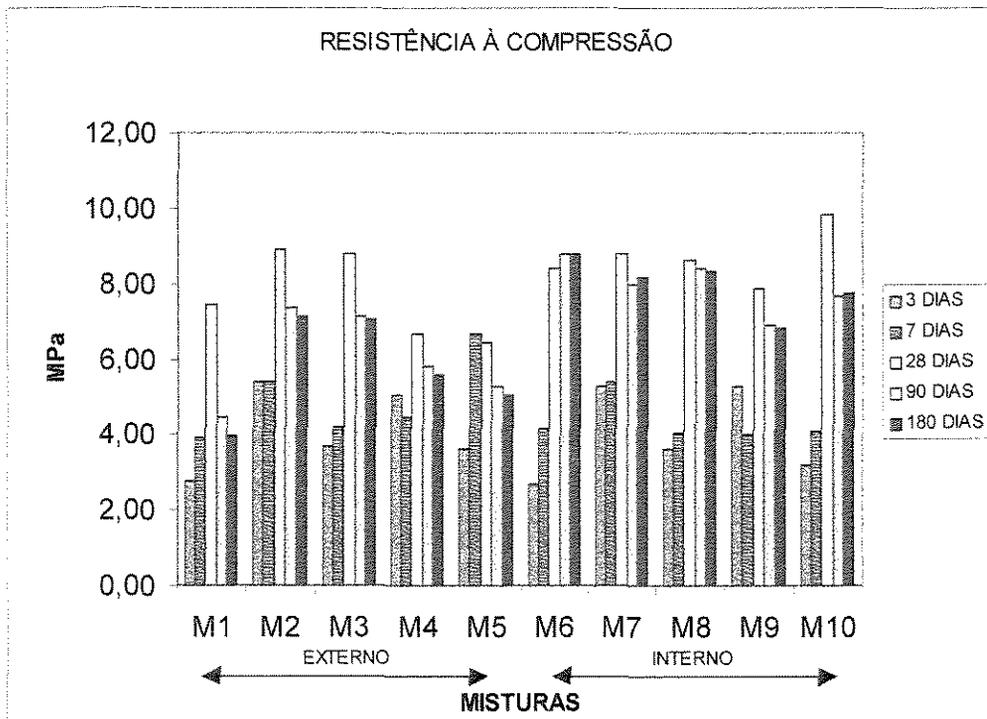
**Tabela 8.5 - Resistência à Compressão em MPa**

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – externa (dias)				
		3	7	28	90	180
M1	100/0/0	2,78	3,93	7,45	4,46	3,90
M2	85/15/0	5,39	5,39	8,92	7,35	7,13
M3	75/25/0	3,70	4,21	8,78	7,16	7,04
M4	85/10/5	5,05	4,49	6,68	5,84	5,58
M5	75/20/5	3,62	6,68	6,45	5,28	5,05

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – interna (dias)				
		3	7	28	90	180
M6	100/0/0	2,69	4,18	8,42	8,78	8,81
M7	85/15/0	5,28	5,39	8,81	7,97	8,19
M8	75/25/0	3,62	4,07	8,64	8,42	8,33
M9	85/10/5	5,28	4,01	7,88	6,90	6,85
M10	75/20/5	3,20	4,10	9,85	7,69	7,74

a/agl. = 0,70



**Figura 8.3 – Resistências a compressão (Mpa) aos 3, 7, 28, 90, e 180 dias das misturas (M1, M2, M3, M4, M5 externa e M6, M7, M8, M9, M10 interna)**

Nas pastas com 100% de gesso submetidas à cura externa (M1) obteve-se um acréscimo da resistência até 28 dias. No entanto, observou-se que em idades de 90 e 180 dias houve um decréscimo considerável de resistência, obtendo-se valores aos 180 dias semelhantes aquelas obtidas aos 7 dias. Este fato não ocorreu para as misturas submetidas à cura interna (M6) onde a resistência à compressão aumentou gradativamente até a idade de 180 dias. O fato pode ser atribuído à perda de massa observada nas misturas submetidas à cura externa.

Nas misturas de gesso e cimento, M2 = M7 (85/15/0) e M3 = M8 (75/25/0), observou-se uma melhora gradativa em todas as idades, especialmente nas misturas submetidas à cura externa M2 e M3 comparativamente às misturas com 100% de gesso. O aumento gradativo da resistência se deveu ao fato do aumento da resistência do cimento ao longo do tempo devido à hidratação da parcela do clínquer no cimento e da ativação da escória pelo sulfato presente no gesso.

Nas misturas submetidas à cura interna não ocorreu aumento da resistência em relação às pastas com 100% de gesso. Porém, em relação às misturas contendo cimento M7 e M8, observou-se que a mistura M8 (75/25/0) obteve resistência maior do que a M7 (85/15/0), devido ao teor de cimento ser maior.

Nas misturas de gesso mais cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5), observou-se uma melhora da resistência à compressão em todas as idades comparativamente às pastas com 100% de gesso, especialmente para as misturas submetidas a cura externa (M4 e M5). Quanto à cura interna (M9 e M10) houve um decréscimo de resistência em relação as pastas com 100% de gesso.

Assim, as misturas de gesso e cimento obtiveram um comportamento melhor de resistência à compressão em relação às misturas de gesso, cimento e sílica ativa, tanto para as misturas submetidas à cura interna como nas externas. Portanto, a substituição de parte do cimento por sílica ativa não contribuiu para melhorar a resistência. Pequenas variações podem ter ocorrido no momento da ruptura dos corpos-de-prova, principalmente devido a falhas na moldagem, a falta de capeamento e a perda de massa que tornou a superfície dos corpos-de-prova mais porosas e irregulares podendo, com isso, ter havido interferência nos resultados.

## 8.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Neste item, serão apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova das misturas estudadas, submetidas à cura ao ar em ambiente interno e em ambiente externo. Com esses resultados, fez-se a análise de cada mistura nas diversas idades, comparando-as com a pasta de gesso sem adições.

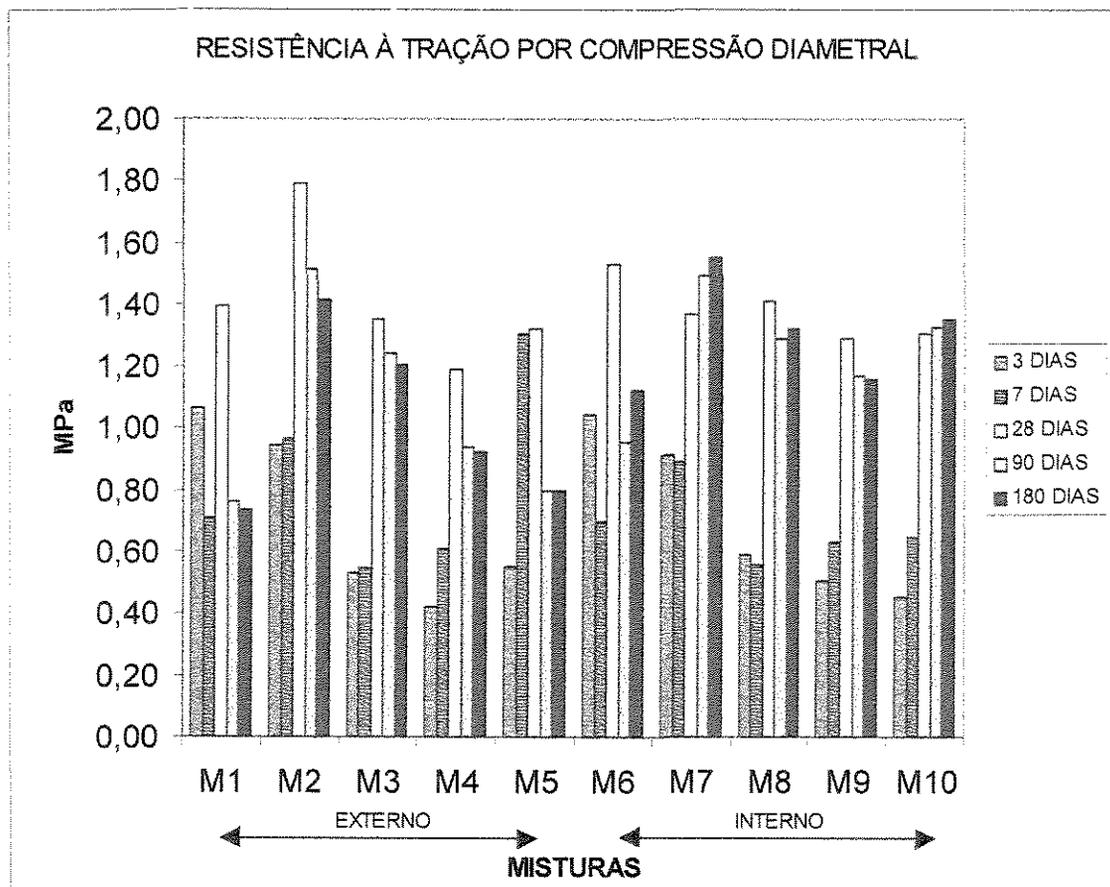
Para cada mistura, foram ensaiados três corpos-de-prova. Os resultados apresentados na Tabela 8.6 e nas Figuras 8.4 e C11 a C18 do Anexo C, são as médias das três determinações, sendo que o resultado individual não diferiu 15% da média calculada. O resultado que diferiu não foi considerado (Tabela C3 e C4 do anexo C) (NBR7222/94).

**Tabela 8.6 - Resistência à Tração por compressão diametral em MPa**

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – externa (dias)				
		3	7	28	90	180
M1	100/0/0	1,07	0,71	1,40	0,76	0,74
M2	85/15/0	0,95	0,97	1,79	1,51	1,42
M3	75/25/0	0,53	0,55	1,35	1,24	1,21
M4	85/10/5	0,42	0,61	1,19	0,94	0,93
M5	75/20/5	0,55	1,30	1,32	0,80	0,80

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – interna (dias)				
		3	7	28	90	180
M6	100/0/0	1,05	0,70	1,53	0,95	1,12
M7	85/15/0	0,91	0,89	1,37	1,49	1,55
M8	75/25/0	0,59	0,56	1,41	1,29	1,32
M9	85/10/5	0,51	0,63	1,29	1,17	1,16
M10	75/20/5	0,45	0,65	1,30	1,33	1,35

a/agl. = 0,70



**Figura 8.4 – Resistência à tração por compressão diametral (Mpa) aos 3, 7, 28, 90, e 180 dias das misturas (M1, M2, M3, M4, M5 externa e M6, M7, M8, M9, M10 interna)**

Nas pastas com 100% de gesso e submetidas à cura externa (M1) houve um decréscimo da resistência ao longo do tempo, atingindo a sua maior marca aos 28 dias; nas pasta submetidas à cura interna o mesmo fato ocorreu, porém a diminuição de resistência foi menor.

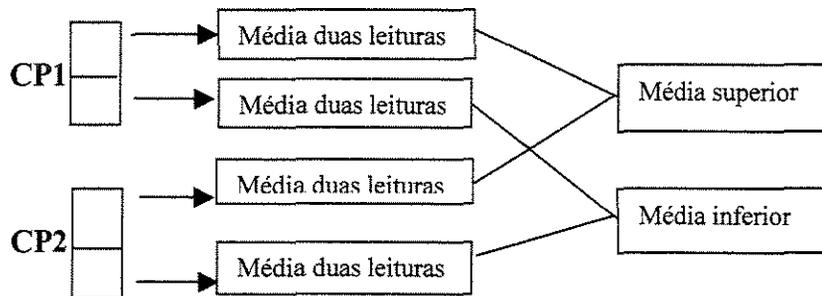
Nas misturas gesso – cimento submetidas à cura externa M2 (85/15/0) e M3 (75/25/0), observou-se uma melhora significativa nas idades mais avançadas da resistência à tração comparativamente à mistura de gesso puro. O mesmo comportamento foi obtido para as misturas com gesso, cimento e sílica ativa M4 (85/10/5) e M5 (75/20/5).

Nas misturas gesso, cimento e sílica ativa à cura interna, observou-se, principalmente nas idades avançadas um aumento de resistência à tração comparativamente à mistura de gesso puro.

## 8.6 Permeabilidade ao Ar

Este ensaio teve por objetivo avaliar a porosidade interna das misturas por meio da permeabilidade ao ar nos corpos-de-prova de pasta conforme descrito no item 7.4.6 do capítulo 7.

Para cada mistura ensaiaram-se dois corpos-de-prova de 5,0 x 10,0 cm, serrados ao meio, sendo que para a parte superior e inferior foram efetuadas duas leituras para confirmação dos dados. Os resultados obtidos (Tabela 8.7 e nas Figuras 8.5, 8.6 e C19, C20 do Anexo C), foi da média de duas leituras para ambas as partes, inferiores e superiores; exemplificando:



O cálculo da permeabilidade ao ar foi feito pela Equação 4 (Balayssac, 1992)

$$K_{\text{per.}} = \frac{(\mu.s.l)}{(A.\tau.g.t).\ln(ho / ht)}$$

Sendo:

$K$  = permeabilidade ao ar ( $m^2$ );

$h_0$  = altura inicial do nível da água (m);

$h_t$  = altura final do nível da água, no tempo  $t$  (m);

$\mu$  = viscosidade ao ar a 20°C;

$s$  = seção do tubo capilar ( $mm^2$ );

$A$  = seção do corpo-de-prova ( $mm^2$ );

$\tau$  = massa específica da água ( $kg/m^3$ );

$g$  = gravidade ( $m/s^2$ );

$t$  = tempo de medida (s);

$l$  = altura do corpo-de-prova (m).

**Tabela 8.7 - Resultados médios obtidos de permeabilidade ao ar ( $m^2$ ), aos 28, 90 e 180 dias**

	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
	28(dias)		90(dias)		180(dias)	
<b>M1</b>	$8,59 \cdot 10^{-14}$	$6,99 \cdot 10^{-14}$	$7,08 \cdot 10^{-14}$	$6,63 \cdot 10^{-14}$	$7,49 \cdot 10^{-14}$	$6,90 \cdot 10^{-14}$
<b>M2</b>	$4,16 \cdot 10^{-14}$	$3,38 \cdot 10^{-14}$	$3,85 \cdot 10^{-14}$	$3,72 \cdot 10^{-14}$	$3,88 \cdot 10^{-14}$	$3,74 \cdot 10^{-14}$
<b>M3</b>	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$4,52 \cdot 10^{-14}$	$4,81 \cdot 10^{-14}$	$4,56 \cdot 10^{-14}$	$4,90 \cdot 10^{-14}$	$4,60 \cdot 10^{-14}$
<b>M4</b>	$7,08 \cdot 10^{-14}$	$6,63 \cdot 10^{-14}$	$5,96 \cdot 10^{-14}$	$5,35 \cdot 10^{-14}$	$6,02 \cdot 10^{-14}$	$5,35 \cdot 10^{-14}$
<b>M5</b>	$4,56 \cdot 10^{-14}$	$4,52 \cdot 10^{-14}$	$4,52 \cdot 10^{-14}$	$3,83 \cdot 10^{-14}$	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$3,91 \cdot 10^{-14}$
<b>M6</b>	$8,74 \cdot 10^{-14}$	$8,32 \cdot 10^{-14}$	$7,38 \cdot 10^{-14}$	$6,99 \cdot 10^{-14}$	$7,28 \cdot 10^{-14}$	$6,81 \cdot 10^{-14}$
<b>M7</b>	$3,34 \cdot 10^{-14}$	$2,76 \cdot 10^{-14}$	$3,94 \cdot 10^{-14}$	$3,59 \cdot 10^{-14}$	$3,97 \cdot 10^{-14}$	$3,61 \cdot 10^{-14}$
<b>M8</b>	$4,85 \cdot 10^{-14}$	$3,80 \cdot 10^{-14}$	$5,19 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$	$5,14 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$
<b>M9</b>	$4,26 \cdot 10^{-14}$	$3,88 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$	$4,13 \cdot 10^{-14}$	$4,44 \cdot 10^{-14}$	$4,09 \cdot 10^{-14}$
<b>M10</b>	$4,06 \cdot 10^{-14}$	$3,77 \cdot 10^{-14}$	$4,44 \cdot 10^{-14}$	$3,80 \cdot 10^{-14}$	$4,44 \cdot 10^{-14}$	$3,77 \cdot 10^{-14}$

M1 a M5 (externo); M6 a M10 (interno) – (g/c/s)

M1 = M6 (100/0/0); M2 = M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5)

A altura inicial da água no ensaio foi de 40 cm e altura final de 14,6 cm. A seção do tubo capilar empregado de  $26,43 \text{ mm}^2$  e tomou-se a viscosidade do ar a 20 °C como sendo de  $1,91 \cdot 10^{-5}$  (Pa/s). O procedimento do ensaio estabelece que:  $\ln(h_0/h_t) = 1$ .

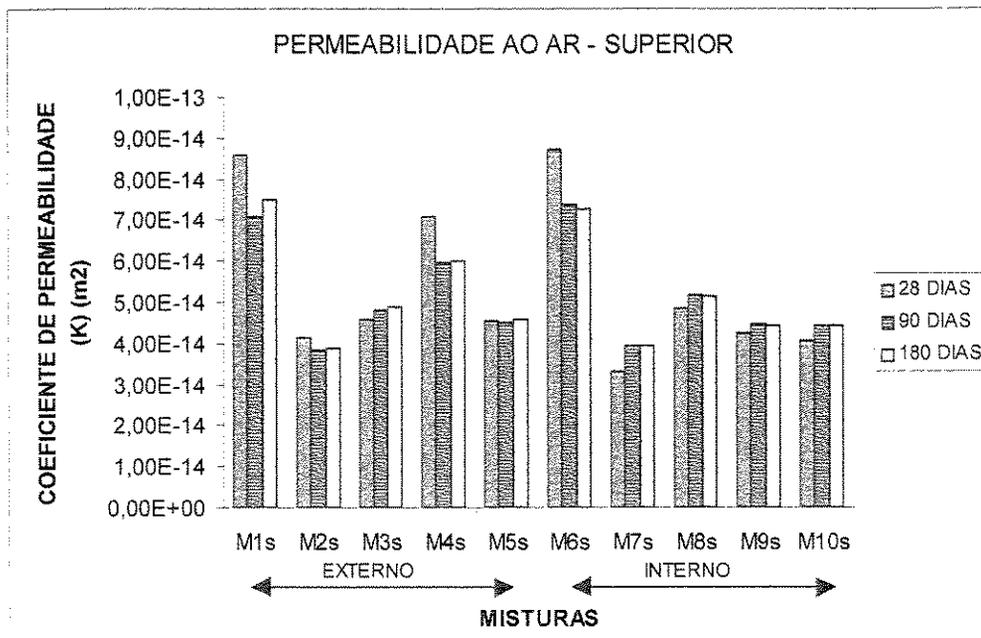


Figura 8.5 – Resultados da Permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28, 90 e 180 dias, amostra superior

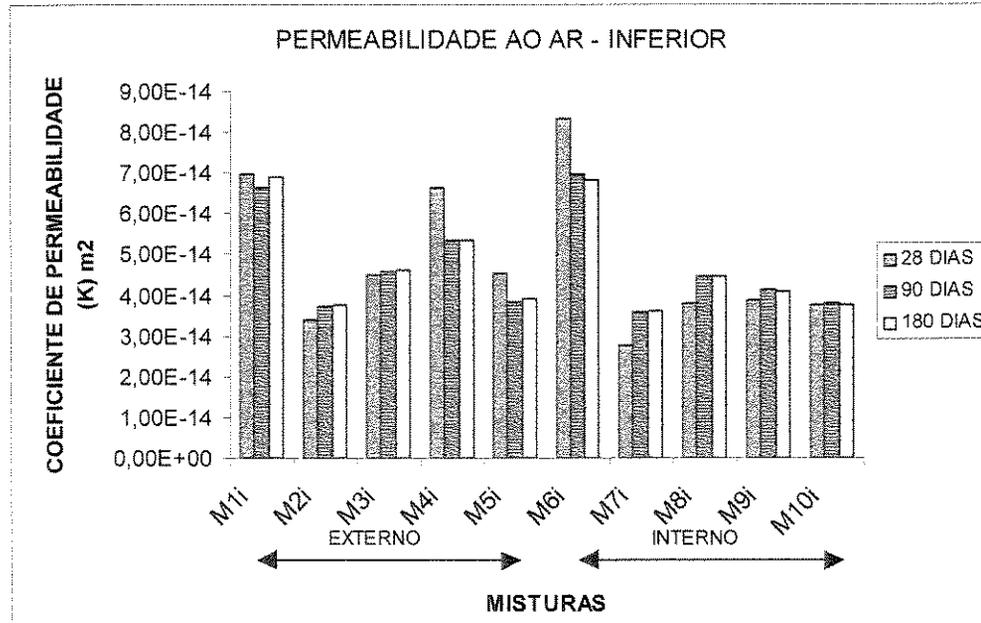


Figura 8.6 – Resultados da Permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28, 90 e 180 dias, amostra inferior

As misturas com 100% de gesso (M1 e M6) apresentaram uma permeabilidade ao ar maior do que as misturas contendo gesso e cimento M2 e M7 (85/15/0), M3 e M8 (75/25/0); e maior também para as misturas com gesso, cimento e sílica ativa M4 e M9 (85/10/5), M5 e M10 (75/20/5) para ambas exposições interna e externa. Observou-se também que a pasta M1 (cura externa) foi menos permeável do que a pasta M6 (cura interna) tanto na seção superior como na inferior do corpo-de-prova.

Nas misturas contendo gesso e cimento M2 = M7 (85/15/0) e M3 = M8 (75/25/0), tanto na seção superior como na inferior, as misturas com maior teor de cimento M3 e M8 apresentaram um índice de permeabilidade maior do que aquelas com menor teor de cimento M2 e M7, respectivamente.

Nas misturas com gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) observou-se um comportamento melhor para as misturas submetidas à cura interna do que para as submetidas à cura externa, sendo as misturas M5 e M10 menos permeáveis do que as M4 e M9.

Comparando-se as misturas de gesso e cimento e as de gesso, cimento e sílica ativa, observou-se que as misturas contendo menor teor de cimento e sem a sílica ativa M2 e M7 (85/15/0) apresentaram melhores resultados em todos os casos.

## **8.7 Expansibilidade Longitudinal**

Analisou-se a variação dimensional dos corpos-de-prova prismáticos para observar reações expansivas entre o cimento Portland e o gesso, que possibilita a formação de etringita e thaumasita, elementos estes expansivos e prejudiciais às misturas.

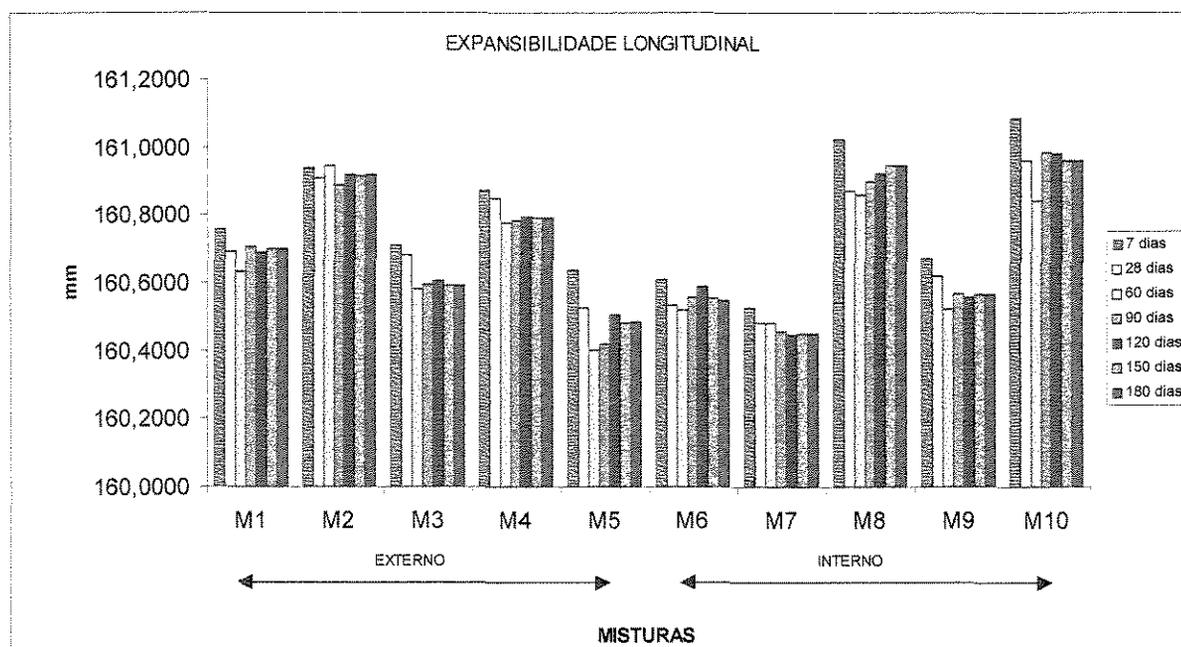
Para cada mistura ensaiaram-se três corpos-de-prova de 4,0 x 4,0x 16,0 cm. Os resultados obtidos (Tabela 8.8 e Figuras 8.7, C21 e C22 do Anexo C), foram as médias de três leituras. Como os corpos-de-prova foram moldados em moldes diferentes, deve-se analisar cada mistura individualmente tomando-se como referência a leitura efetuada aos 7 dias.

**Tabela 8.8 - Resultados obtidos de expansibilidade (mm) nas diferentes idades .**

	07 dias	28 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
M1	160,7546	160,6896	160,6344	160,7062	160,6887	160,7017	160,7014
M2	160,9411	160,9087	160,9479	160,8883	160,9189	160,9163	160,9193
M3	160,7122	160,6818	160,5811	160,5969	160,6062	160,5924	160,5924
M4	160,8752	160,8510	160,7781	160,7840	160,7958	160,7891	160,7891
M5	160,6379	160,5261	160,4010	160,4188	160,5075	160,4822	160,4854
M6	160,6091	160,5352	160,5201	160,5582	160,5895	160,5547	160,5484
M7	160,5287	160,4828	160,4817	160,4585	160,4469	160,4505	160,4505
M8	161,0217	160,8712	160,8588	160,8969	160,9208	160,9474	160,9474
M9	161,6720	160,6225	160,5244	160,5695	160,5583	160,5644	160,5645
M10	161,0863	160,9595	160,8423	160,9835	160,9817	160,9614	160,9616

M1 a M5 (externo); M6 a M10 (interno) – (g/c/s)

M1 = M6 (100/0/0); M2 = M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5)



**Figura 8.7 - Expansibilidade longitudinal (mm) nas diferentes idades.**

Em relação às medidas efetuadas aos 7 dias as pastas com 100% de gesso, tanto submetidas à cura interna M6 como as submetidas à cura externa M1, apresentaram uma retração até os 60 dias. Após esta data, observou-se uma expansão até a idade de 90 dias, e a partir desta data observou-se pequenas variações que podem ter ocorrido no momento da leitura devido à sensibilidade do equipamento empregado para a leitura.

Em relação à medida inicial aos 180 dias houve um decréscimo de 0,0331 % para M1 (cura externa) e de 0,0378 % para M6 (cura interna).

Nas misturas com cimento e gesso observou-se uma variação dimensional até a idade de 90 dias. A partir desta data não houve variação dimensional, pois os resultados das leituras foram praticamente constantes. Mesmo assim todas as misturas apresentaram uma retração em relação às medidas efetuadas aos 7 dias de: M2 (85/15/0) cura externa = 0,0135%; M3 (75/25/0) cura externa = 0,0745 %; M7 (85/15/0) cura interna = 0,0487; e M8 (75/25/0) cura interna = 0,0461%.

Nas misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) o processo se repetiu tanto para as misturas submetidas à cura interna (M9 e M10) como para as submetidas à cura externa (M4 e M5). Mesmo assim, todas as misturas apresentaram uma retração em relação às medidas efetuadas aos 7 dias de: M4 (cura externa) = 0,0535%; M5 (cura externa) = 0,0949%; M9 = (mistura interna) = 0,0685% e M10 (cura interna) = 0,0774%.

## **8.8 Difração de Raios-X**

As substâncias cristalinas difratam os raios-X em uma intensidade dependendo do ângulo de incidência dos raios. Utilizando um contador Geiser os raios-X são classificados, transferindo o resultado para um registrador em forma de um difratograma com picos intensos e outros menos intensos, dependendo do ângulo de incidência dos raios-X, característicos para cada

substância pura cristalina. São utilizadas fichas da ASTM para catalogar os dados de substâncias puras, que são tomadas como referência, para analisar as substâncias puras ou misturas.

Neste trabalho foram efetuados algumas análises por difração de raios-X nas misturas contendo gesso, gesso/cimento/sílica com relação água/aglomerante constante de 0,70 nas idades de 28 e 180 dias (Figuras 8.8 a 8.12 e C23 a C26 do Anexo C).

Os difratogramas das misturas mostram, no eixo das abscissas, o ângulo de difração,  $2\theta$ , em graus (radiação  $\text{CuK}\alpha$ ), e, no eixo das ordenadas, as intensidades relativas. O ensaio foi realizado na faixa de  $0^\circ$  a  $60^\circ 2\theta$ .

Cumpra salientar que a análise dos difratogramas será qualitativa, com a indicação dos compostos mais prováveis presentes nas misturas (Tabela 8.9). Como as amostras são compostas predominantemente de gesso, os picos referentes ao cimento são de difícil identificação, e muitos dos picos que aparecem no difratograma não são identificáveis devido à sobreposição dos picos mais intensos sobre os menos intensos.

***Tabela 8.9 – Compostos prováveis presentes na mistura***

A - Anidrita	G – Gipsita
B – $\text{C}_2\text{S}$	H - hemi-hidrato
C - Calcita	M - monosulfoaluminato
E - Etringita	T - Thaumasita

Para as amostras com 100% de gesso M1 e M6, aos 28 dias, observaram-se os mesmos compostos formados ressaltando o pico maior de hemi-hidrato ocorrido em  $14,50^\circ 2\theta$  para M6 (cura interna), Figura 8.8. Aos 180 dias, Figura 8.8, observaram-se nos difratogramas os mesmos compostos que estão presentes tanto em M1 como em M6, observa-se novamente um pico maior de hemi-hidrato ocorrido em  $14,50^\circ 2\theta$  para a mistura M6 (cura interna).

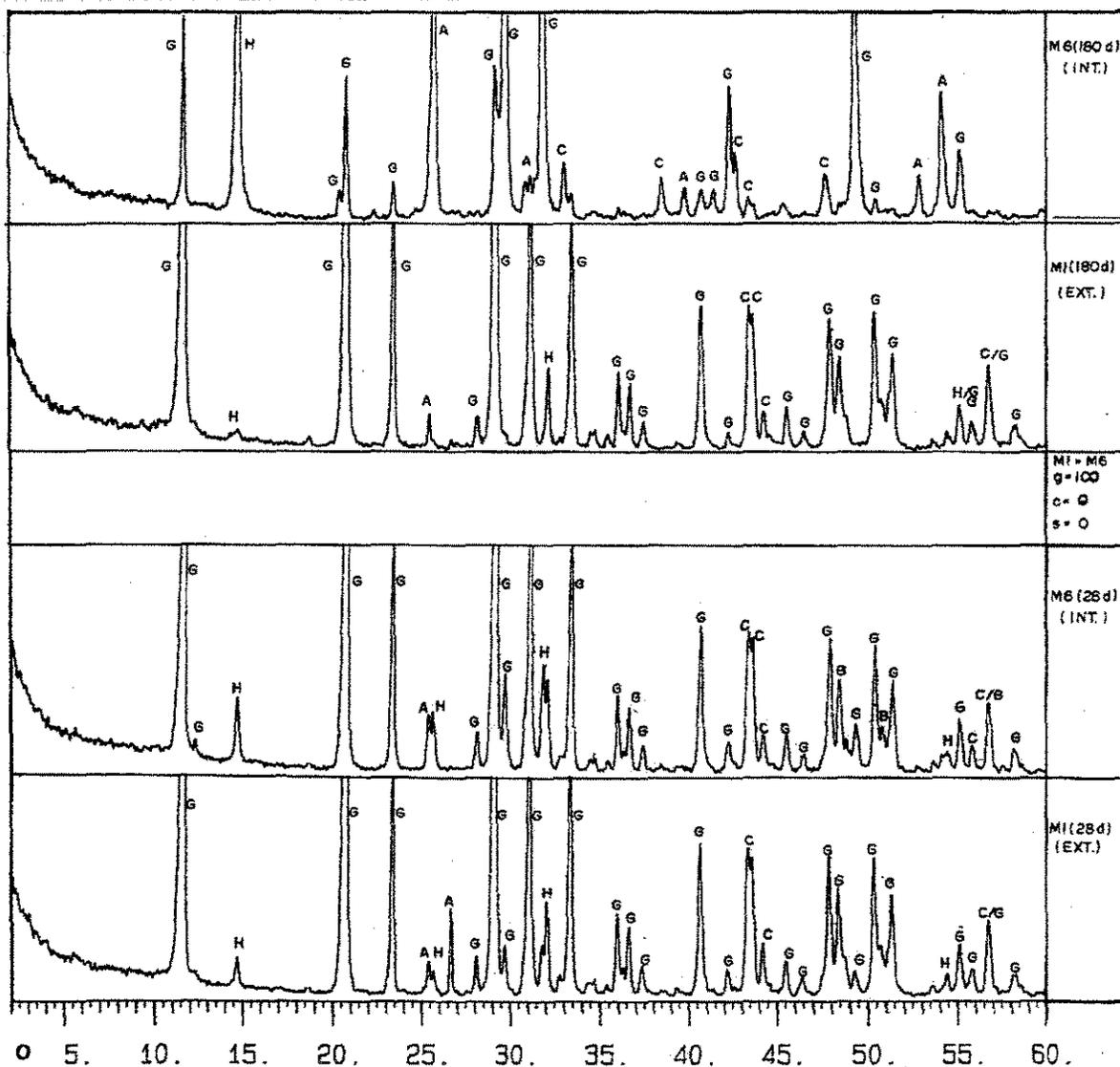
As figuras 8.9 e 8.10 apresentam os difratogramas nas idades de 28 e 180 dias das misturas contendo gesso e cimento M2 = M7 (85/15) e M3 = M8 (75/25), respectivamente. Nos difratogramas das pastas M2 e M7 (Figura 8.9), aos 28 e 180 dias, observaram-se as raias dos compostos hidratados e são praticamente os mesmos para ambas as idades. No entanto, a mistura M7 (cura interna), aos 28 dias, apresentou a etringita no ângulo de  $18,23^\circ 2\theta$ .

Nos difratogramas das pastas M3 e M8 Figura 8.10, aos 28 dias, ocorreu a presença de etringita na mistura M3 (cura externa) e na mistura M8 (cura interna) no ângulo de  $9,02^\circ 2\theta$  e no ângulo  $16^\circ 2\theta$ . Os picos de etringita apareceram também em M3 no ângulo  $22,90^\circ 2\theta$ . Na mistura M8 o pico de etringita também apareceu no ângulo  $17,80^\circ 2\theta$ .

Aos 180 dias o pico de etringita esteve presente somente na mistura M8 no ângulo  $25,47^\circ 2\theta$  e  $31,86^\circ 2\theta$ .

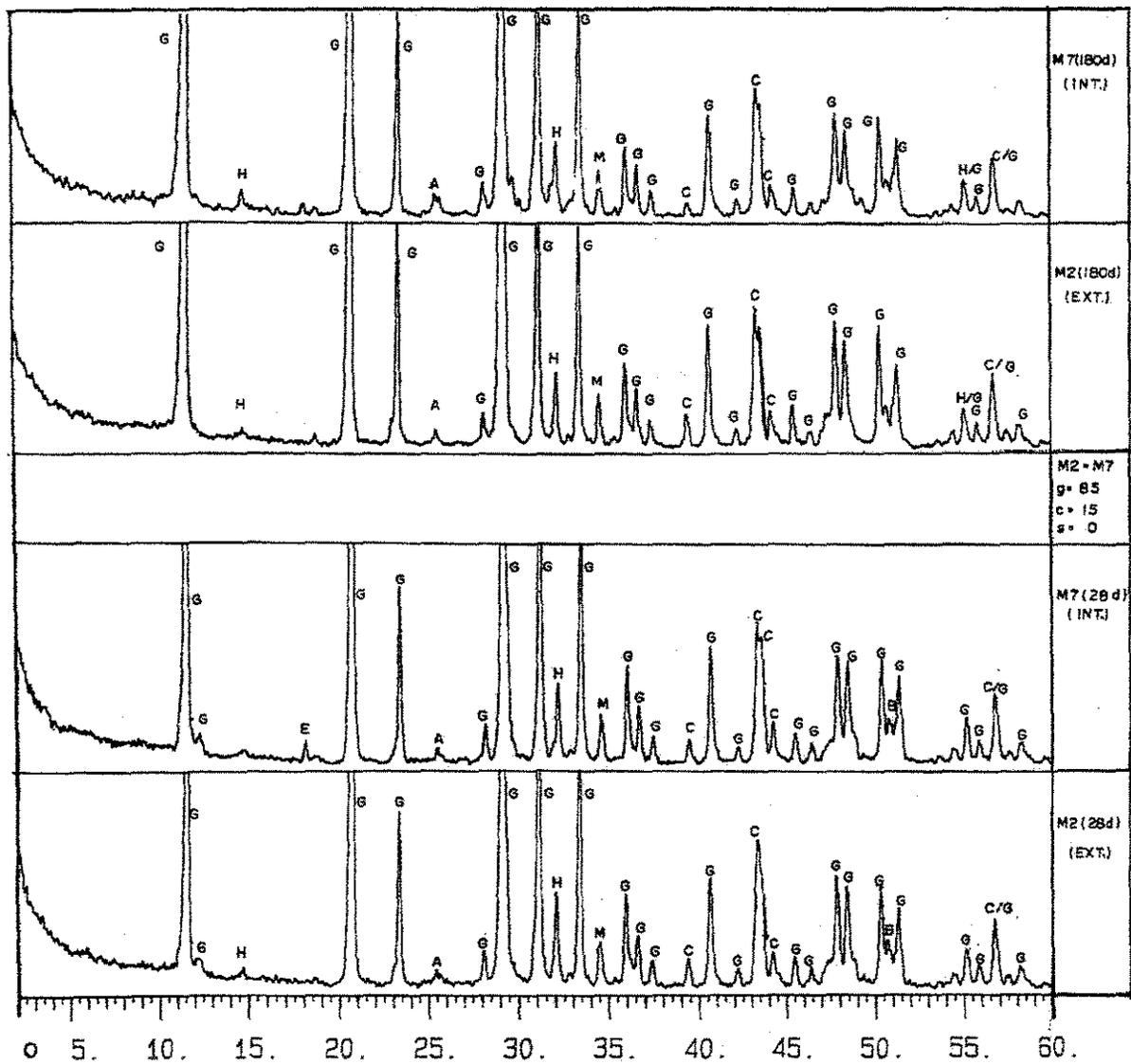
As Figuras 8.11 e 8.12 apresentam os difratogramas de 28 e 180 dias das misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5), respectivamente. Nos difratogramas das pastas M4 e M9, aos 28 dias, (Figura 8.11) observaram-se as raias dos compostos hidratados. O pico de etringita foi observado somente na pasta M9 (cura interna) no ângulo  $9,02^\circ 2\theta$ . Foram observados picos de monossulfoaluminato nas misturas aos 28 e 180 dias. Na pasta M9 (cura interna) observou-se um pico referente ao hemi-hidrato aos 180 dias. Nos difratogramas das pastas M5 e M10 Figura 8.12, aos 28 dias, a mistura M10 (cura interna) apresentou o pico de etringita nos ângulo  $9,02^\circ 2\theta$  e  $15,79^\circ 2\theta$ , Aos 180 dias, a única diferença entre as misturas M5 e M10 é a presença, na M10 (cura interna), do pico de hemi-hidrato no ângulo de  $14,5^\circ 2\theta$ .

Nas misturas internas (M9 e M10) aos 28 dias, mesmo com adição de sílica ativa apareceu a etringita, o mesmo não ocorrendo com as misturas de mesmo traço (M4 e M5) curados externamente e na presença de umidade, o que comprova a teoria de Klover (1998) onde a redução da etringita se deve ao desenvolvimento de uma micro estrutura em que os cristais de gesso foram envolvidos pelo C-S-H e pela sílica ativa.



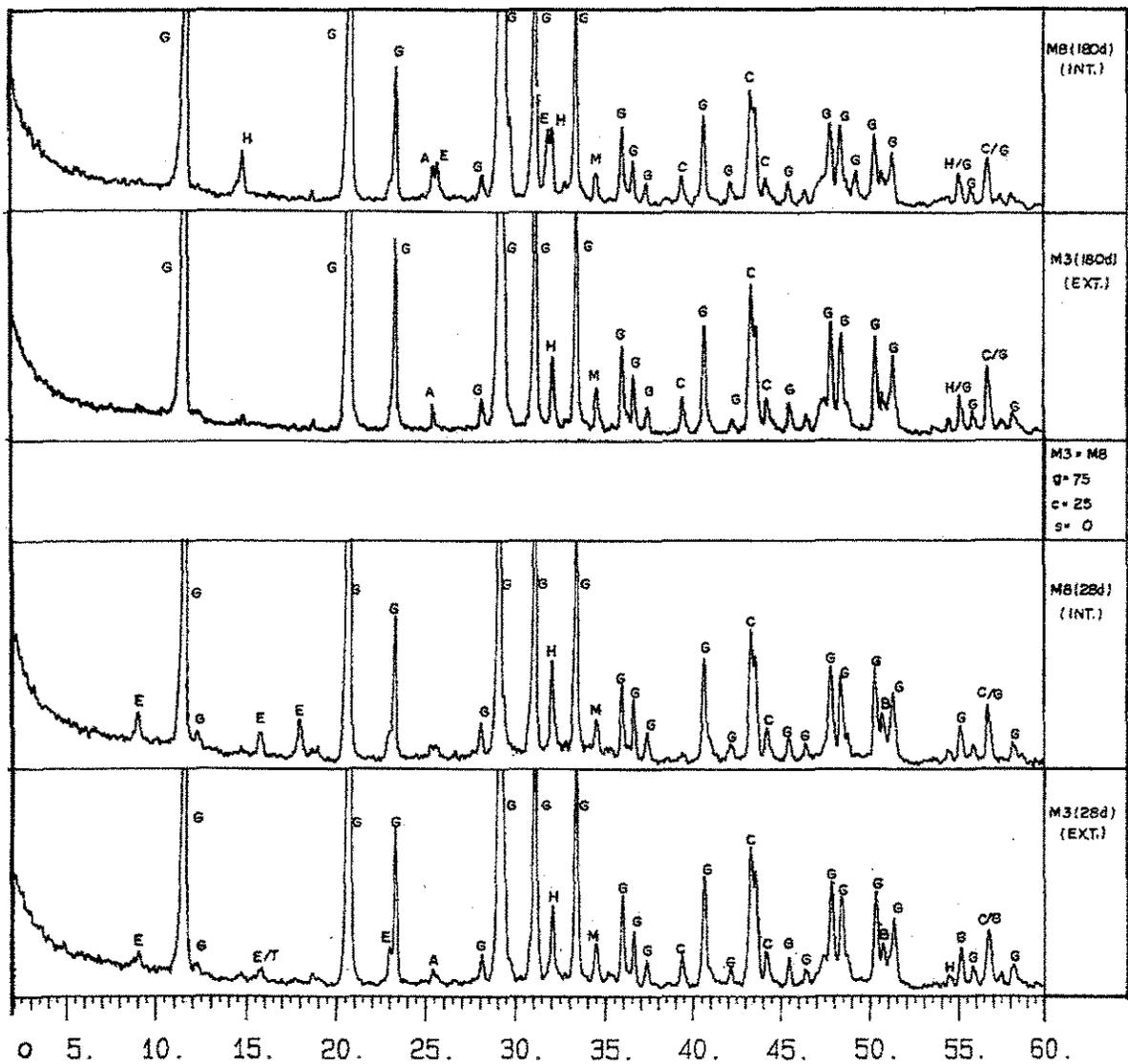
g = gesso            c = cimento            s = silica ativa  
 A = anidrita        B = C<sub>2</sub>S    C = calcita            E = etringita        G = gipsita        H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato    T = thaumasita

*Figura 8.8 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28 e 180 dias (M1=externo e M6=interno)*



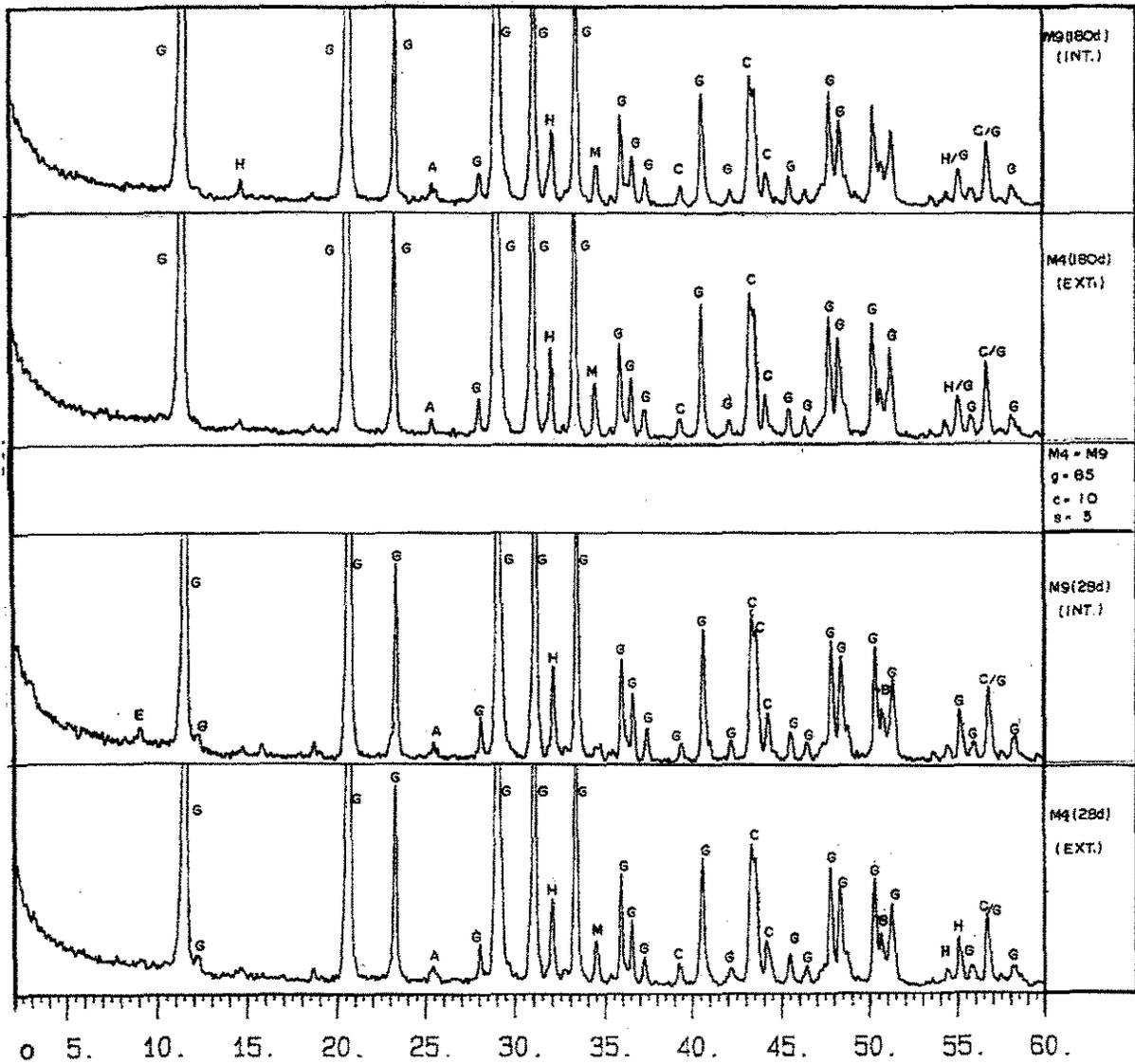
g = gesso                      c = cimento                      s = sílica ativa  
 A = anidrita                      B = C<sub>2</sub>S    C = calcita                      E = etringita                      G = gipsita                      H = hemi-hidrato M  
 = monosulfoaluminato                      T = thaumasita

**Figura 8.9 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28 e 180 dias (M2=externo e M7=interno)**



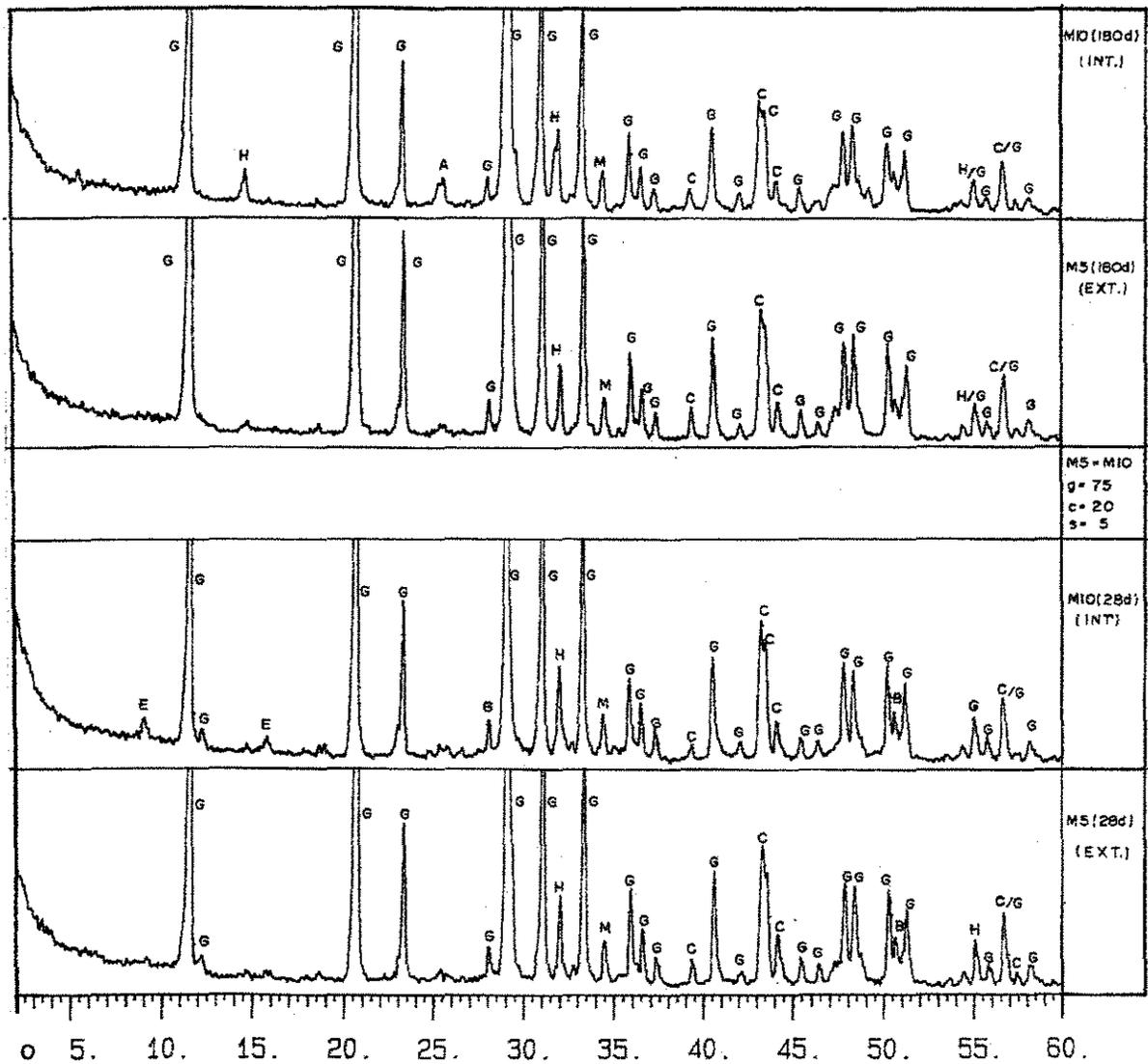
g = gesso                      c = cimento                      s = sílica ativa  
 A = anidrita                  B = C<sub>2</sub>S    C = calcita                      E = etringita                      G = gipsita                      H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato      T = thumasita

*Figura 8.10 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28 e 180 dias (M3=externo e M8=interno)*



g = gesso            c = cimento            s = sílica ativa  
 A = anidrita        B = C<sub>2</sub>S    C = calcita            E = etringita        G = gipsita        H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato    T = thaumasita

**Figura 8.11 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28 e 180 dias (M4=externo e M9=interno)**



g = gesso                      c = cimento                      s = sílica ativa  
 A = anidrita                  B = C<sub>2</sub>S    C = calcita                      E = etringita                  G = gipsita                      H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato      T = thaumasita

*Figura 8.12 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28 e 180 dias (M5=externo e M10=interno)*

## **8.9 Análise Térmica Diferencial (ATD) e Análise Termogravimétrica (ATG)**

As análises térmicas se referem ao grupo de métodos pelos quais algumas propriedades físicas de uma amostra são continuamente medidas, como sendo uma função da temperatura enquanto a amostra é submetida à uma mudança controlada de temperatura. Os efeitos do calor podem ser observados pois causam mudanças em muitas propriedades de uma amostra. Em análises térmicas, mudança na massa formam a base da Termogravimetria, enquanto as medidas das alterações de energia formam a base em análise Termo-Diferencial.

### **8.9.1 Análise Térmica Diferencial (ATD)**

A análise térmica diferencial é um procedimento que consiste no aquecimento linear da amostra em estudo, simultaneamente a um material inerte de referência como foi descrito no item 7.4.4 do capítulo 7. A diferença de temperatura entre ambos é medida em função da temperatura de aquecimento. Quando ocorre uma transformação na amostra envolvendo calor, a diferença de temperatura entre a amostra e a referência, pode ser positiva ou negativa. É positiva quando a reação é exotérmica e negativa quando é endotérmica.

Os resultados obtidos formam diagramas de variação de energia, em função da temperatura (Figuras 8.13 a 8.17 e C27 a C30 do Anexo C). Cumpre salientar que a análise dos diagramas será qualitativa, com a indicação dos compostos mais prováveis presentes nas misturas (Tabela 8.10).

*Tabela 8.10 – Compostos presentes nas misturas*

Compostos	Temperatura
1 – hemi-hidrato $\cong 150^{\circ}\text{C}$	$\cong 150^{\circ}\text{C}$
2 – anidrita solúvel	$\cong 180^{\circ}\text{C}$
3 - transformação da anidrita solúvel em insolúvel	$\cong 350$ a $450^{\circ}\text{C}$
4 - $\gamma\text{C}_2\text{S}$	$\cong 700^{\circ}\text{C}$

Os picos 1, 2 e 4 correspondem à reação endotérmica e o pico 3 à reação exotérmica.

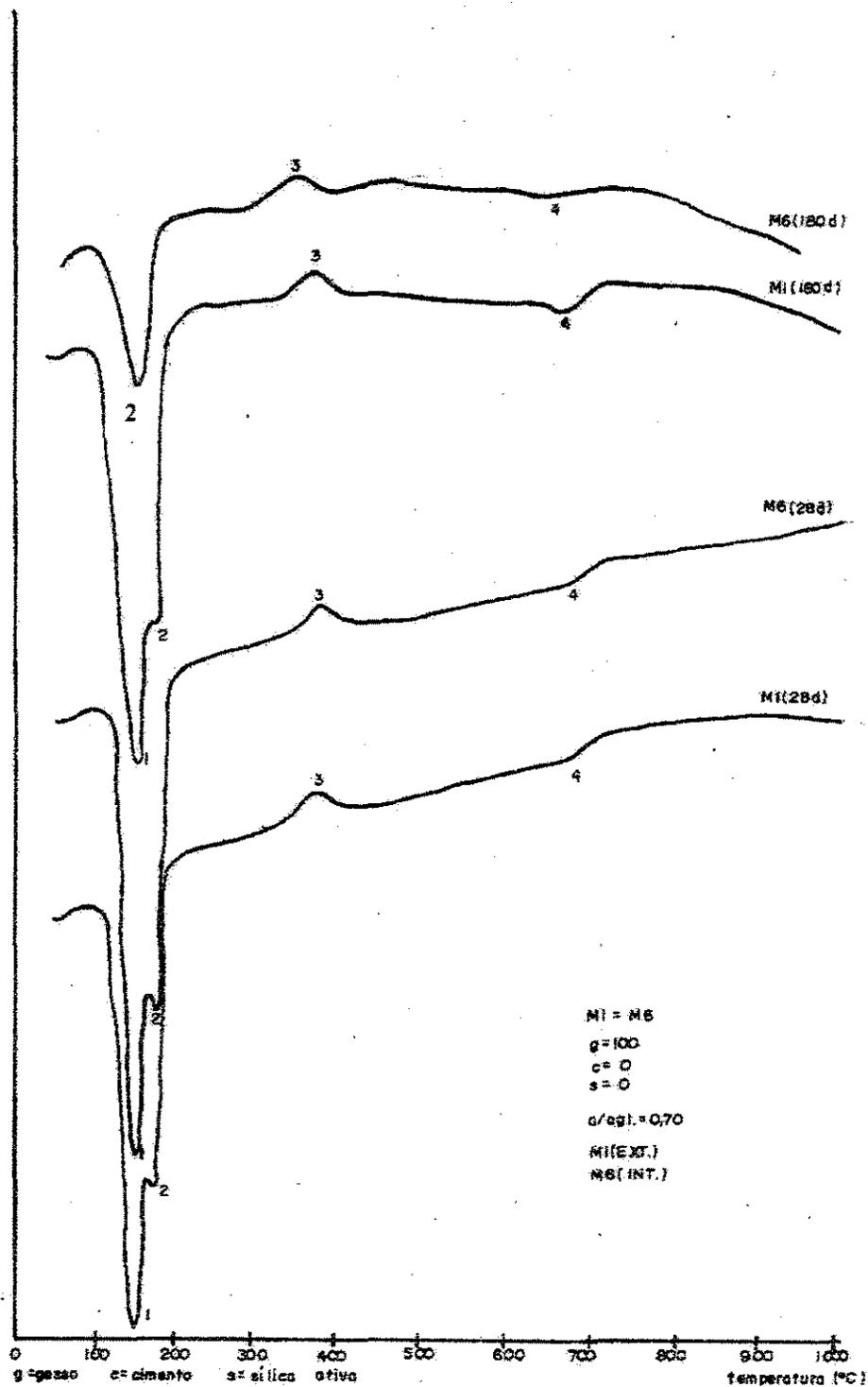
Nas pastas com 100% de gesso M1 e M6 (Figura 8.13), tanto aos 28 dias como aos 180 dias não houve variação nas perdas de energias. Na mistura M6 (cura interna) aos 180 dias ocorreu somente a transformação do hemi-hidrato em anidrita solúvel à temperatura de  $180^{\circ}\text{C}$ .

Nas misturas de gesso e cimento M2 e M7 (85/15/0) (Figura 8.14) e nas misturas, M3 e M8 (75/25/0) (Figura 8.15), observou-se que a mistura M8, aos 28 dias, apresentou uma variação referente à perda de energia atípica da anidrita solúvel em aproximadamente  $180^{\circ}\text{C}$ .

Nas misturas de gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) Figura 8.16 e M5 = M10 (75/20/5) (Figura 8.17) não foram observadas alterações na variação de perda de energia para as idades de 28 e 180 dias, tanto nas misturas internas como nas externas.

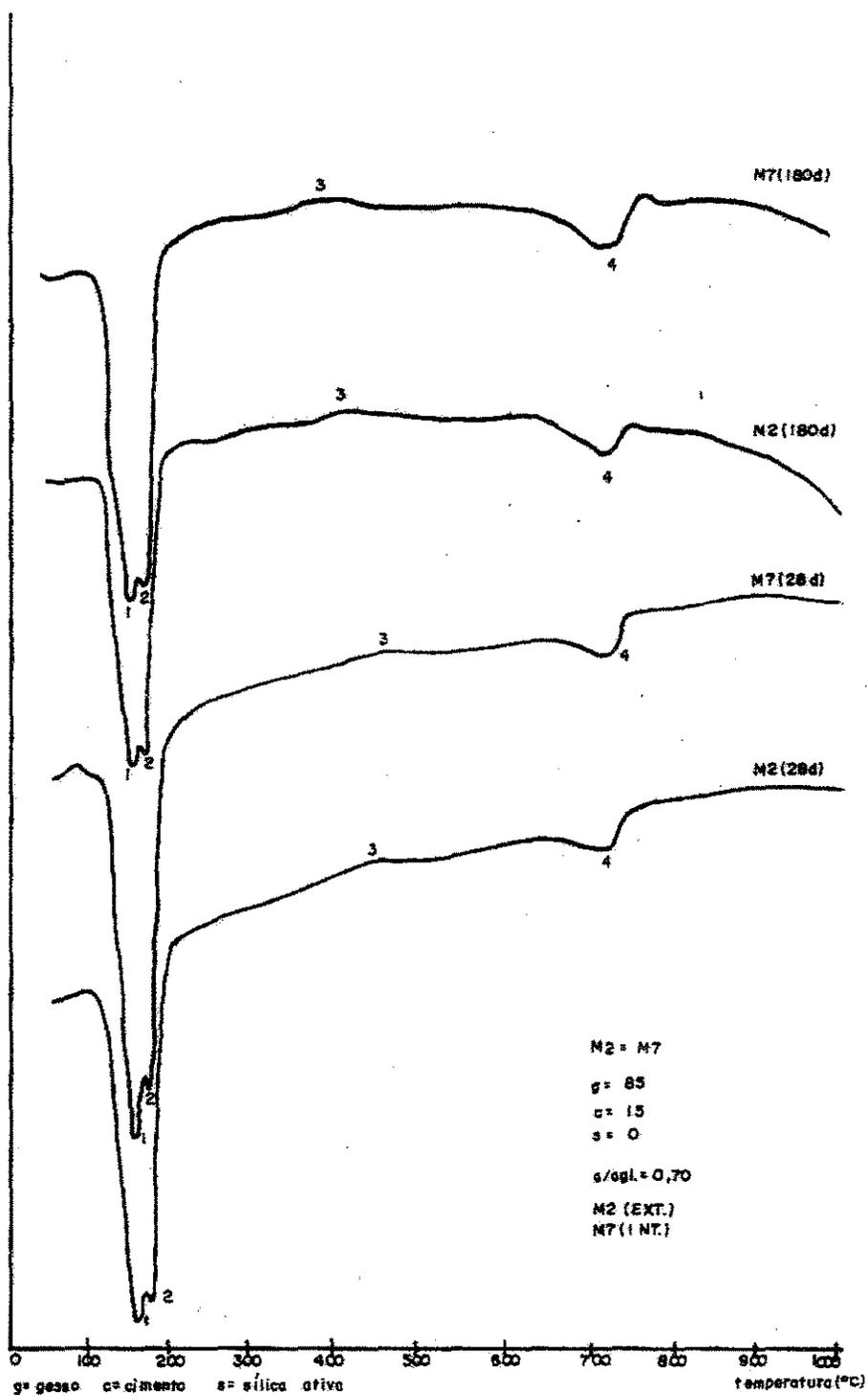
Comparando as misturas de gesso e cimento com as de gesso, cimento e sílica ativa não foram observadas grandes variações nos resultados.

Pequenas interferências nos diagramas estão relacionadas a choques ou vibrações externas ocorridas próximas ao equipamento, portanto desconsideradas da análise.



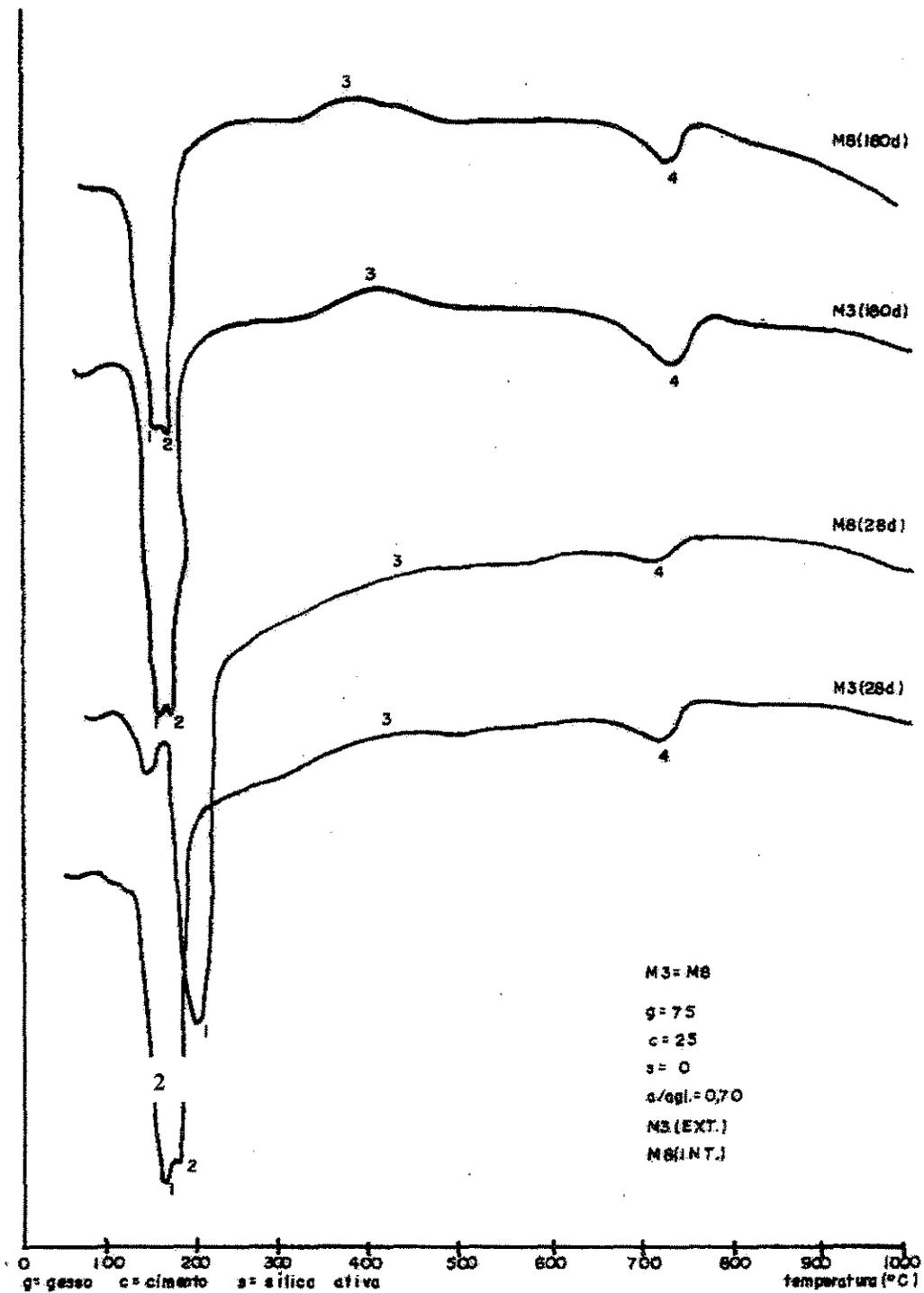
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma$ C<sub>2</sub>S

**Figura – 8.13** Comparação das curvas de ATD das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M1=externa e M6=interna)



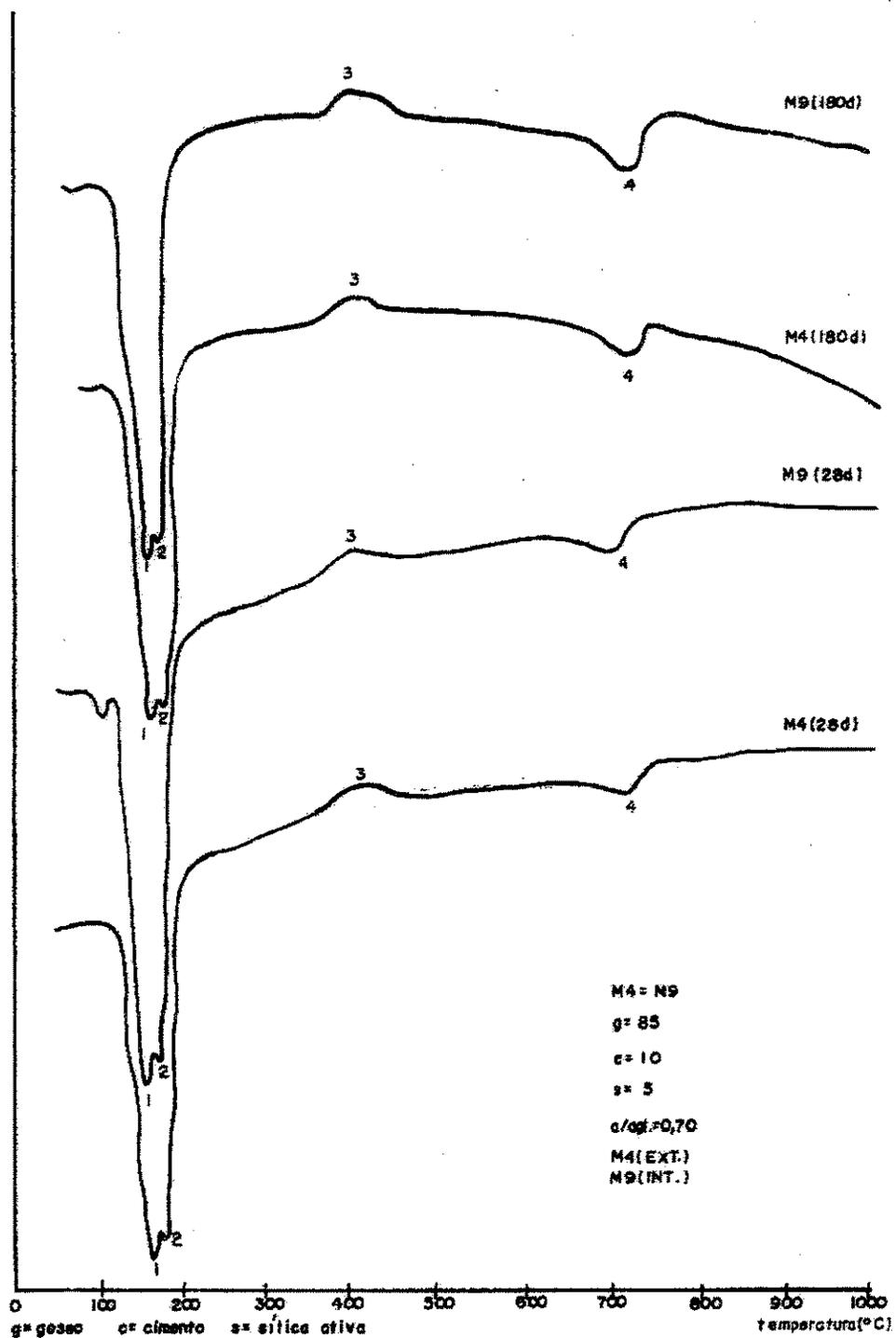
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$

*Figura – 8.14 Comparação das curvas de ATD das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M2=externa e M7=interna)*



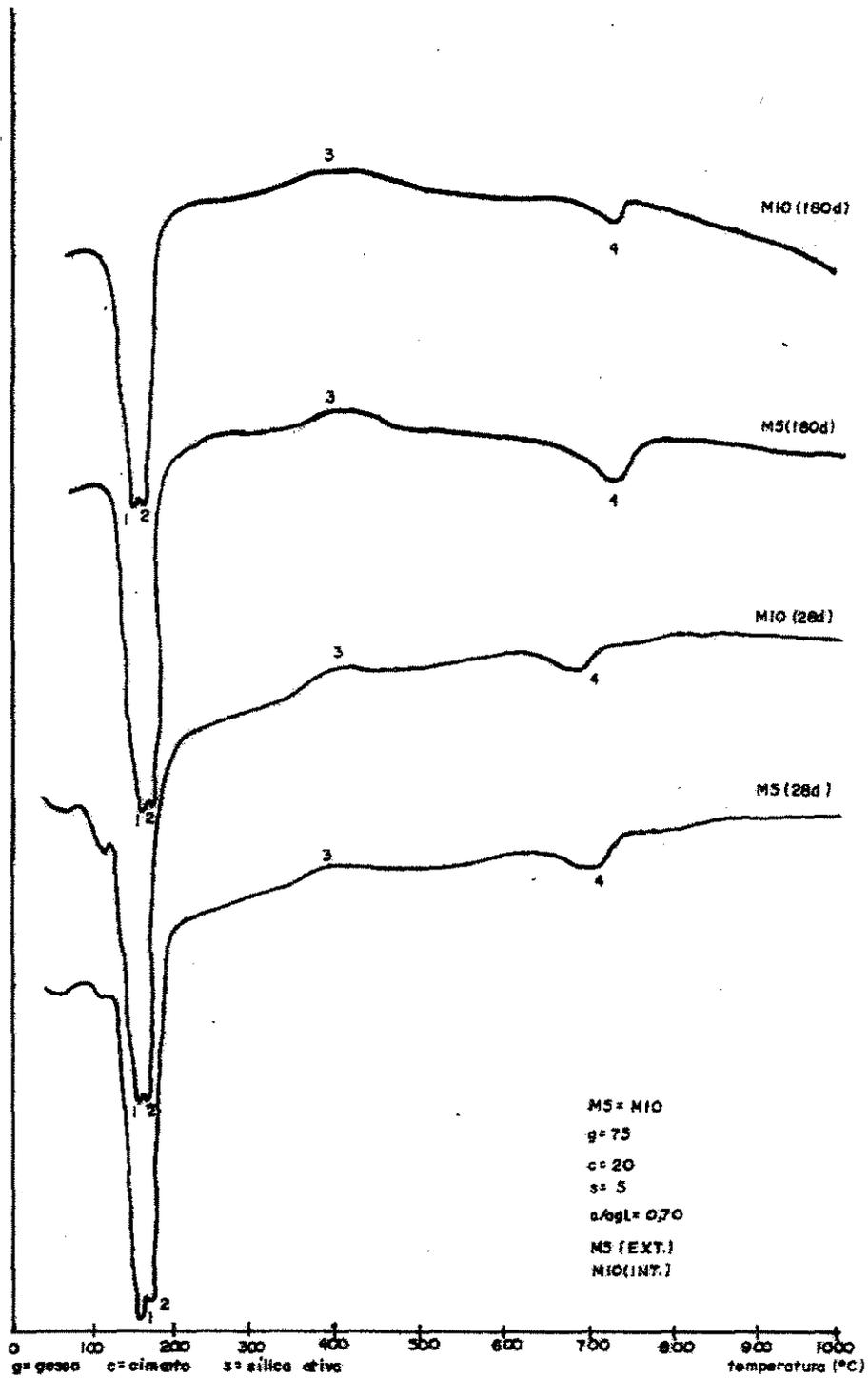
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$

*Figura – 8.15 Comparação das curvas de ATD das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M3=externa e M8=interna)*



1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$

*Figura – 8.16 Comparação das curvas de ATD das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M4=externa e M9=interna)*



1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$

*Figura – 8.17 Comparação das curvas de ATD das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M5=externa e M10=interna)*

## 8.9.2 Análise Termogravimétrica (ATG)

É uma técnica termo-analítica que se baseia no estudo da variação de massa de uma amostra quando submetida a um programa de aquecimento. Os resultados das análises são dados por curvas termogravimétricas, onde o eixo das abscissas estão as temperaturas variando de 23° C a 1000 °C e, no eixo das ordenadas, as perdas de massa (Figuras 8.18 a 8.22 e C31 a C34 do Anexo C). A Tabela 8.11 apresenta as temperaturas nas quais os compostos presentes nas misturas perdem massa.

*Tabela 8.11 – Perda de massa dos compostos presentes nas misturas*

Compostos	Temperatura
5 – água de cristalização	
do gesso	100 °C a 200 °C
6 – Liberação do CO <sub>2</sub>	650 °C a 750 °C

Nas pastas com 100% de gesso (M1 = M6; Figura 8.18) , somente a pasta M6 (cura interna), aos 180 dias, apresentou uma diminuição considerável da perda de água de cristalização do gesso devido à presença de grande quantidade de hemi-hidrato, como observado anteriormente. Nos demais diagramas houve uma semelhança no comportamento das misturas.

Nas misturas contendo gesso e cimento M2 = M7 (85/15) (Figura 8.19) e M3 + M8 (75/25) (Figura 8.20), respectivamente tanto para a idade de 28 dias como para a de 180 dias, não houve alterações significativas nos diagramas, o mesmo acontecendo com as misturas de gesso, cimento e sílica ativa.

Pequenas interferências nos diagramas estão relacionadas a choques ou vibrações externas ocorridas próximas ao equipamento, portanto desconsideradas da análise.

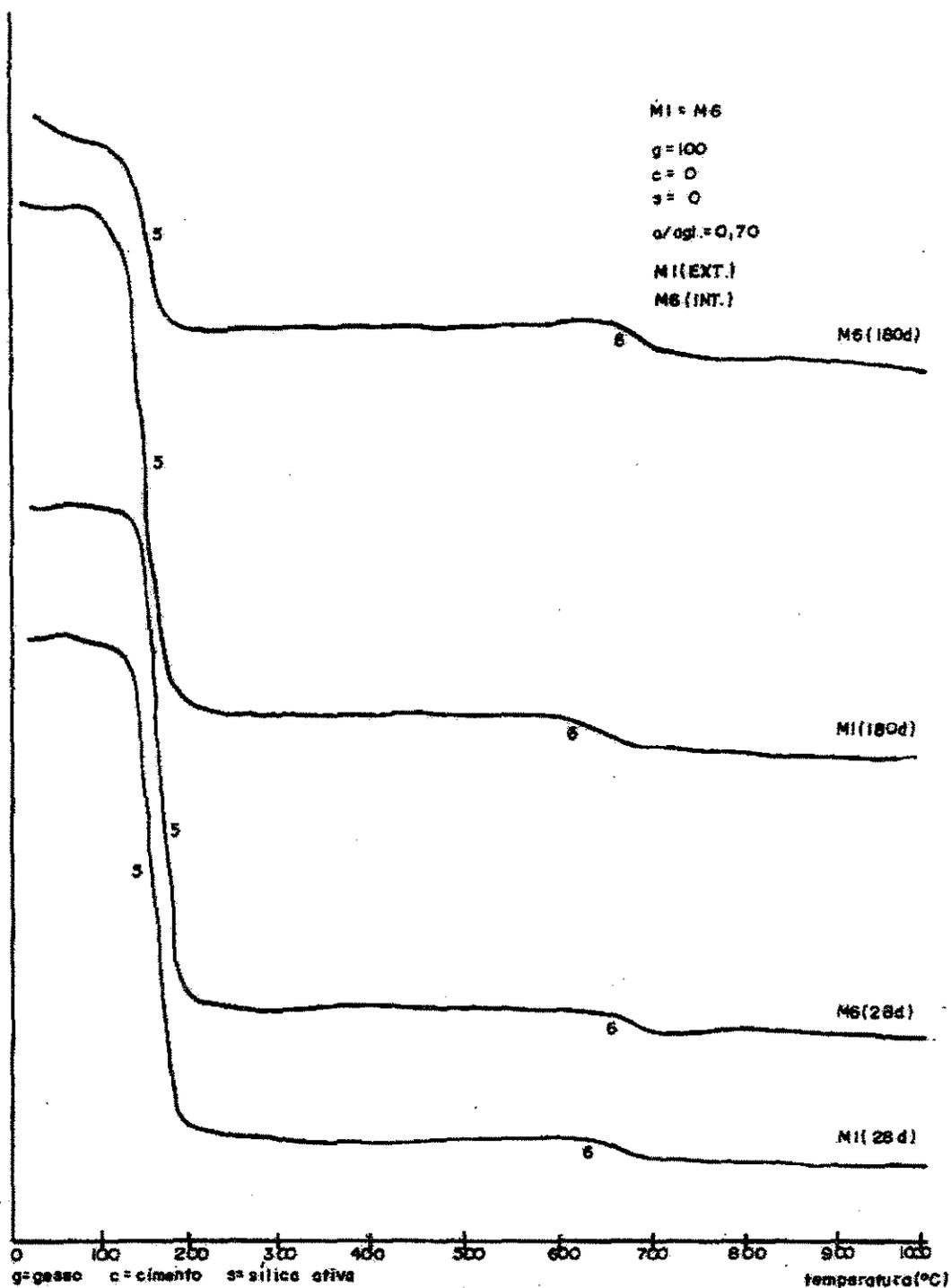
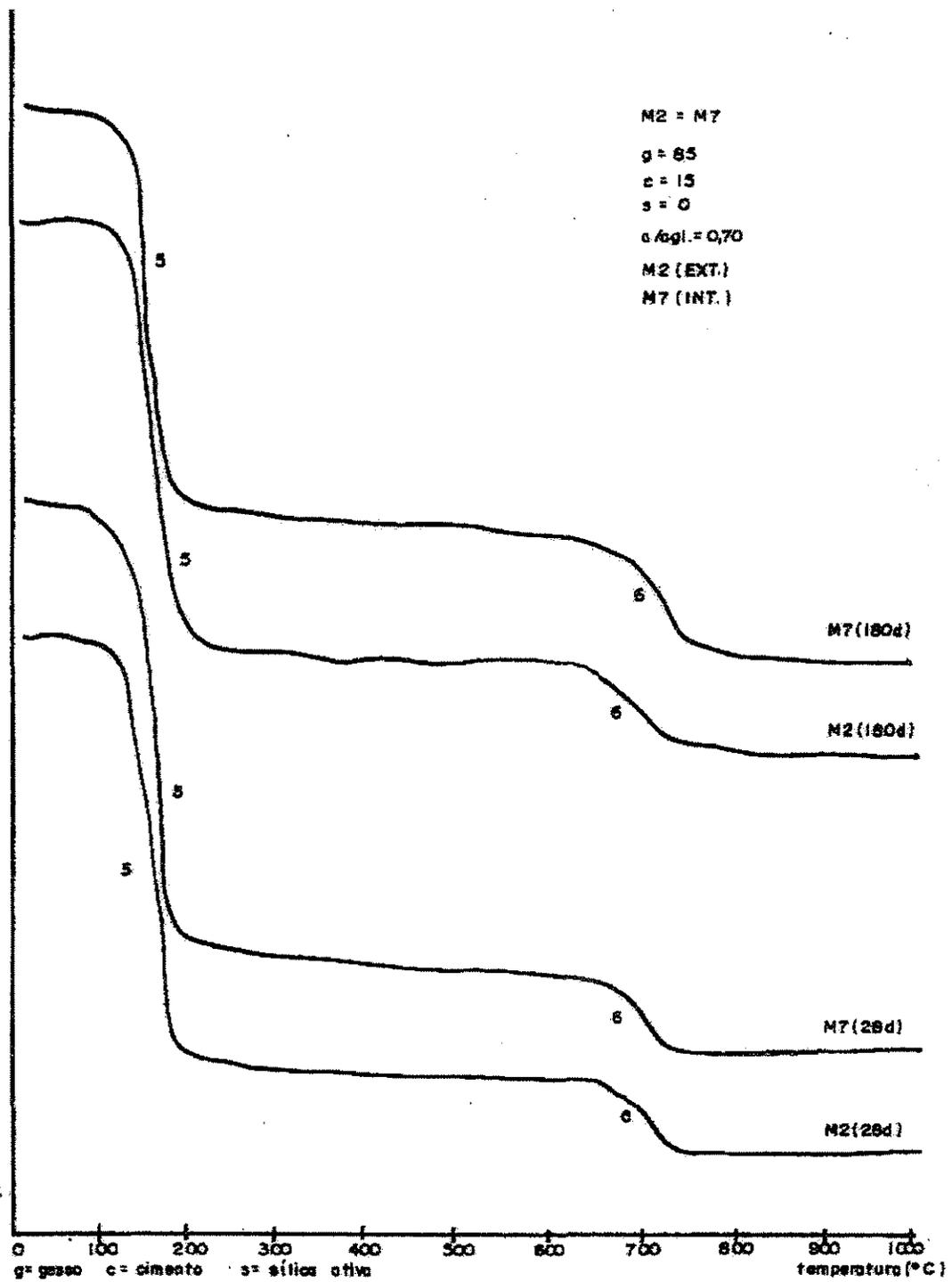
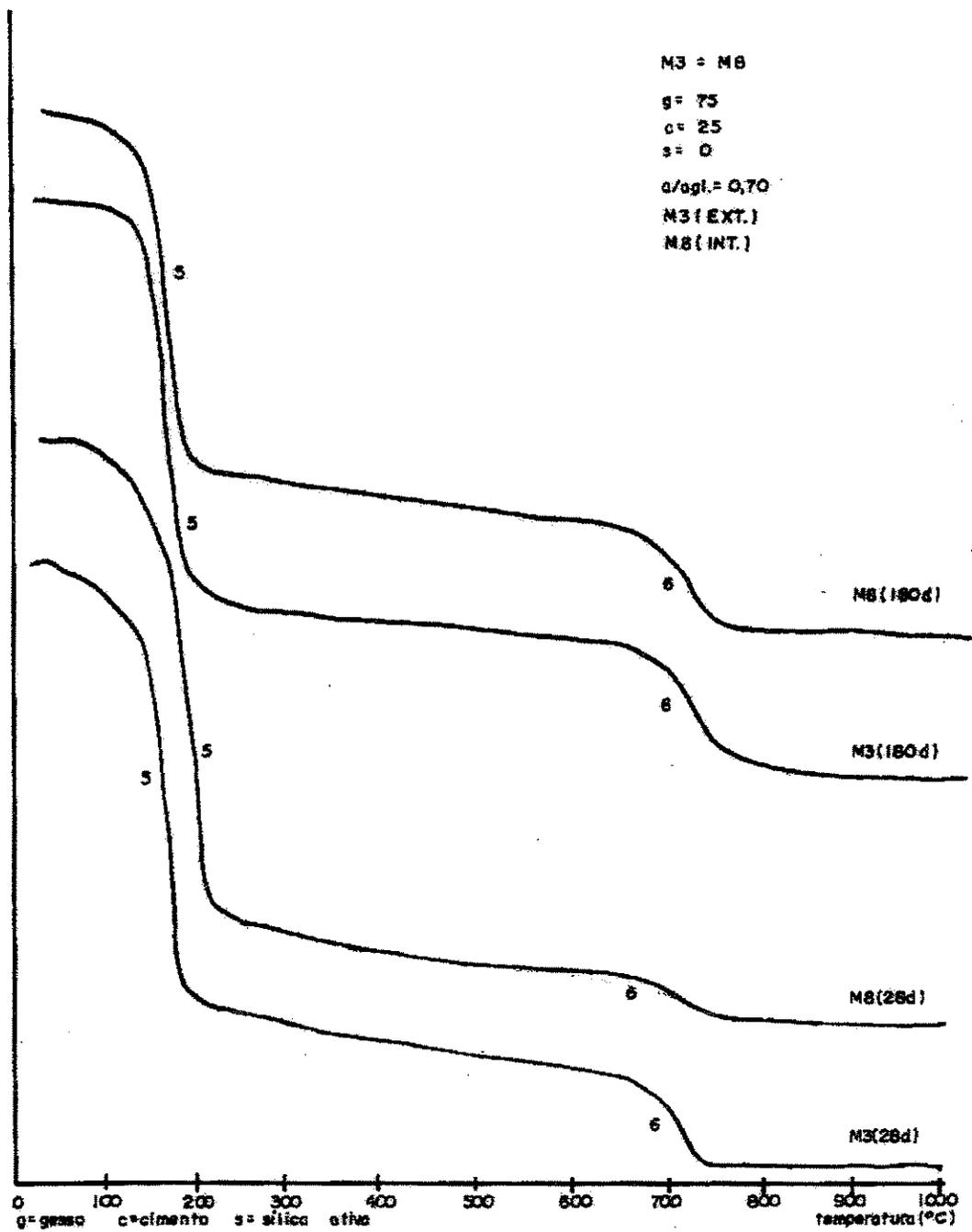


Figura – 8.18 Comparação das curvas de ATG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (MI=externa e M6=interna)



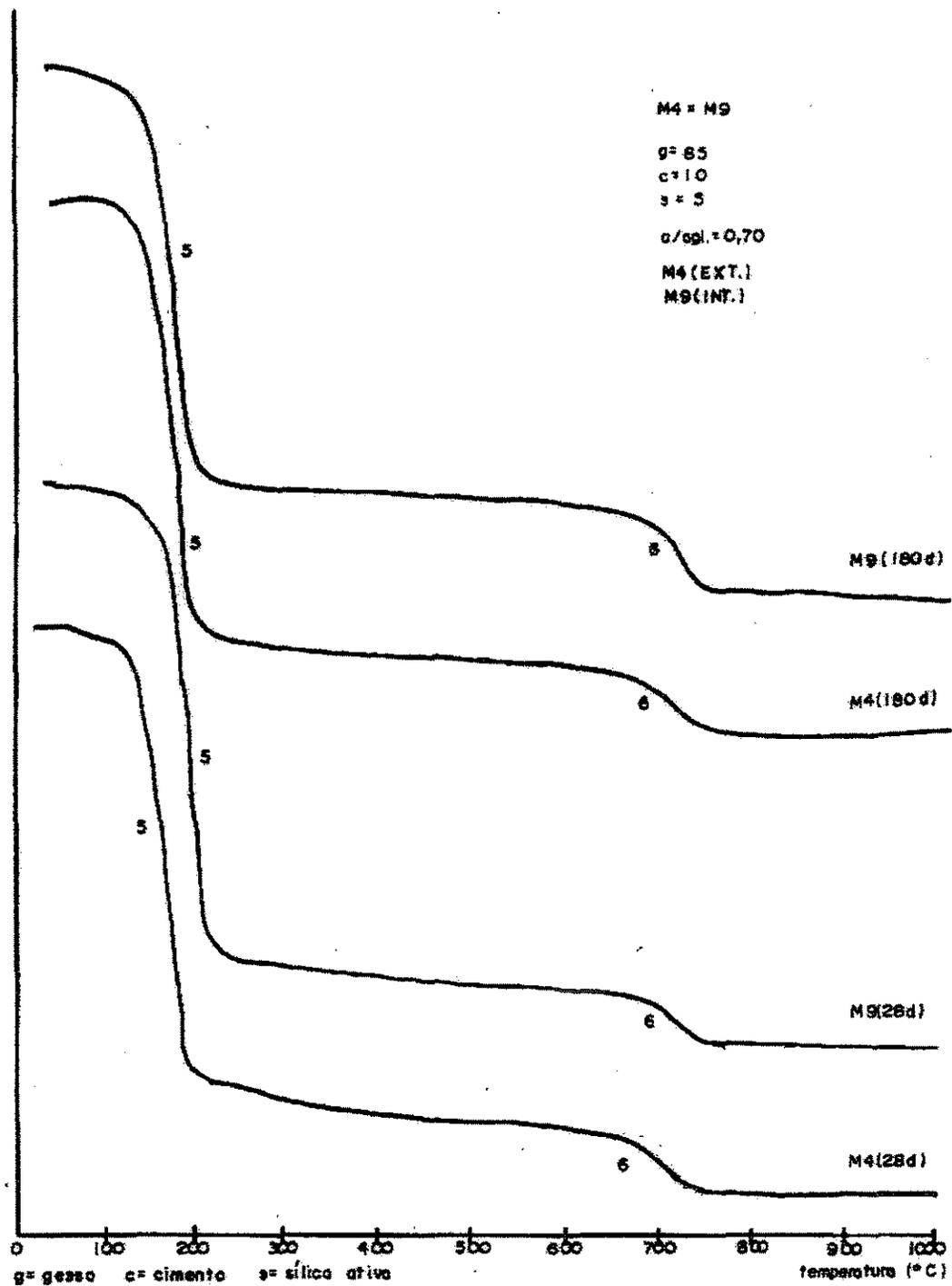
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura – 8.19 Comparação das curvas de ATG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M2=externa e M7=interna)



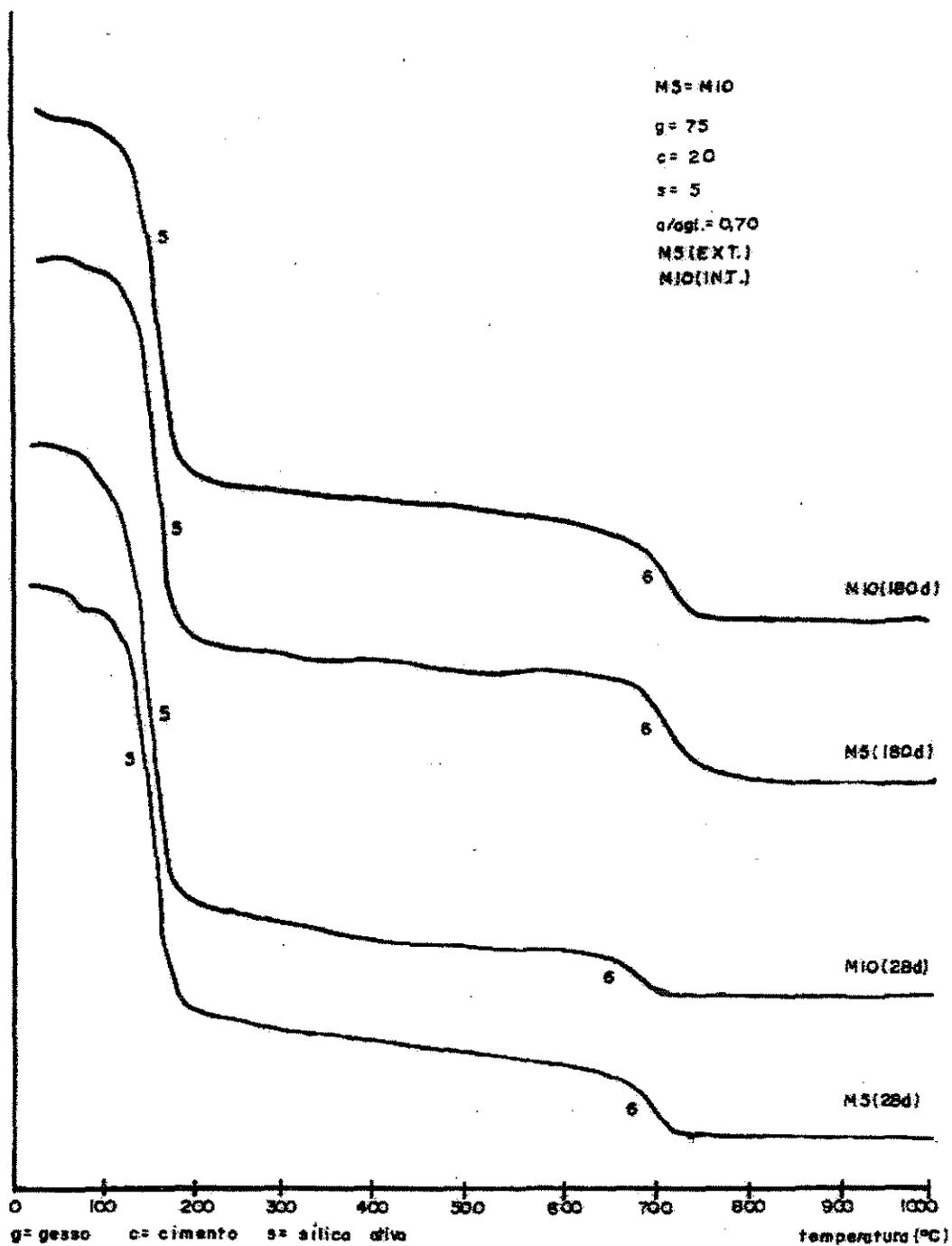
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura – 8.20 Comparação das curvas de ATG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M3=externa e M8=interna)



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura – 8.21 Comparação das curvas de ATG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M4=externa e M9=interna)



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

*Figura – 8.22 Comparação das curvas de ATG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28 e 180 dias (M5=externa e M10=interna)*

## 8.10 Análise dos revestimentos em painéis

Neste item avaliou-se o desempenho das misturas aplicadas em painéis de 80 x 80 cm em superfície interna e externa de blocos de concreto. A aplicação foi realizada em três camadas e os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 8.12.

**Tabela 8.12 - Resultados da aplicação da pasta, em cada camada, nos painéis.**

Variáveis	M1=M6	M2=M7	M3=M8	M4=M9	M5=M10
<b>Tempo de aplicação</b>	Foi possível aplicar a pasta até 16 min	Foi possível aplicar a pasta até 14 min	Foi possível aplicar a pasta até 13 min	Foi possível aplicar a pasta até 14 min	Foi possível aplicar a pasta até 14 min
<b>Acabamento</b>	Foi possível conseguir um acabamento liso				
<b>Aplicação</b>	Normal	Mais fácil de aplicar	Mais fácil de aplicar	Melhora na aplicação	Melhora na aplicação

M1 a M5 (externo); M6 a M10 (interno) – (g/c/s)

M1 = M6 (100/0/0); M2 =M7 (85/15/0); M3 = M8 (75/25/0); M4 = M9 (85/10/5); M5 = M10 (75/20/5)

A aplicação foi realizada em três camadas com desempenadeira de PVC e o acabamento da última camada com desempenadeira de aço. Não se observou qualquer dificuldade na aplicação, ficando mais fácil devido à melhora da trabalhabilidade quando foi adicionado cimento Portland e melhorando mais quando a sílica ativa foi adicionada à mistura. O tempo de aplicação da pasta foi contado a partir da mistura da água com o aglomerante.

O início da aplicação foi em 28 de agosto de 2000 e até 28 de fevereiro de 2001 a variação climática está descrita na tabela 8.13

**Tabela 8.13 – Períodos de duração climática (28/08/2000 a 24/02/2001)**

Período		ensolarado			Nublado			úmido			chuvoso		
Manhã		123			20			7			30		
Tarde		112			22			5			41		
Noite		---			---			13			29		
Total = 402		235			42			25			100		

Ago./00			Set./00			Out./00			Nov./00			Dez./00			Jan./01			Fev./01		
U.R.	T	T																		
%	máx	min																		
	°C	°C																		
66,8	23,0	14,7	70,5	24,2	16,4	64,0	28,8	19,9	71,8	27,1	18,0	74,0	27,6	18,9	76,5	28,6	21,4	72,2	28,6	21,2

U.R.(%) = UMIDADE RELATIVA MÉDIA - T. máx. (°C) = TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA - T. mín. (°C) = TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA (DADOS = Estação Meteorológica de Sorocaba, FATEC)  
 LOCAL DO ENSAIO: SOROCABA (CAMPUS DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE SOROCABA)  
 LATITUDE = - 23,50167 e LONGITUDE = - 47,45806

A análise dos revestimentos em painéis foi realizada por meio de observação visual (com lente de aumento) e tátil ao longo do tempo (Figuras D1 a D6 do Anexo D).

Nos painéis revestidos com pasta de gesso (100%) (M1 = M6), observou-se que no painel externo M1 a superfície ficou mais porosa devido à perda de massa superficial e menos resistente ao risco.

Nos painéis revestidos com a mistura de gesso e cimento M2 = M7 (85/15/0) e M3 = M8 (75/25/0), observou-se que as misturas M2 e M3 (cura externa) a superfície ficou mais porosa e menos resistente ao risco do que as misturas M7 e M8 (cura interna). No entanto, a mistura M3 (com mais cimento) obteve melhor desempenho em relação à M2.

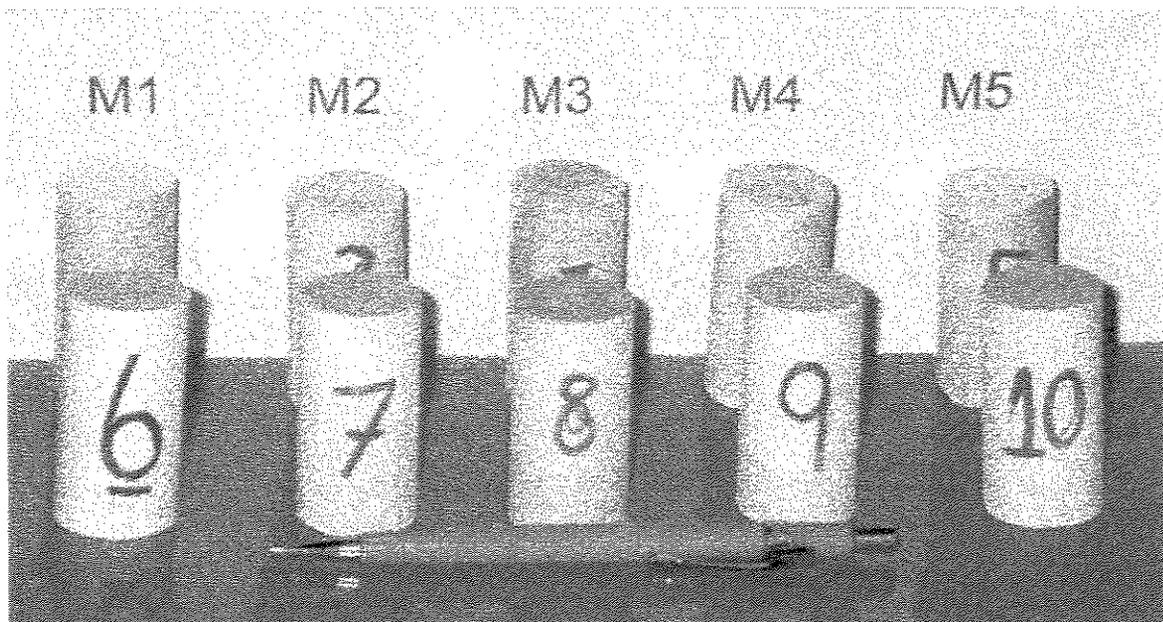
Nos painéis revestidos com a mistura de gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5) observou-se que nas misturas M4 e M5 (cura externa) a superfície ficou mais porosa e menos resistente ao risco do que as misturas M9 e M10 (cura interna). No entanto a mistura M5 (com mais cimento) obteve melhor desempenho em relação à M4.

Comparando os painéis com mistura de gesso e cimento com os de gesso, cimento e sílica ativa, pôde-se verificar que não houve grandes alterações com a adição da sílica ativa tanto para os painéis internos e, principalmente, nos externos.

Durante o período de 180 dias não se observou em todas as misturas nenhuma patologia no revestimento como fissuras, gretamento, despreendimento ou empolamentos, tanto nos painéis internos como, principalmente, nos externos.

Em todos os painéis externos, durante o período de 180 dias, observou-se o aparecimento de fungos de cor esverdeada, nos locais onde ocorreram uma permanência maior de umidade (locais com sombra).

Foi possível observar, também, nos revestimentos externos mesmo, aquelas misturas contendo cimento e cimento com sílica ativa, que nos locais de maior permanência de umidade o revestimento apresentou uma porosidade maior. Este fato ocorreu com maior intensidade nos corpos-de-prova colocados junto aos painéis, devido ao acúmulo de água em sua superfície (Figura 8.23).



*Figura 8.23 – Comparação visual dos corpos-de-prova submetidos à cura externa (M1 a M5) e à cura interna ao ar em laboratório (M6 a M10).*

## 9 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o comportamento das misturas de gesso, cimento Portland e sílica ativa para revestimento, quando submetidos à cura em ambiente interno, protegido das intempéries e em ambientes externo, sujeito às intempéries.

Para que este trabalho fosse levado a bom termo, foi necessário um levantamento bibliográfico sobre todos os materiais, as misturas destes materiais bem como do processo executivo da aplicação do revestimento. Com base nos resultados obtidos, foi desenvolvida a fase experimental, que procurou abranger o maior número possível de ensaios.

Deste estudo foi possível obter algumas conclusões descritas a seguir.

1 – A relação água/aglomerante de 0,70 é ideal para o preparo das pastas empregadas no estudo experimental (M1 e M6 = 100/0/0, M2 e M7 = 85/15/0, M3 e M8 = 75/25/0, M4 e M9 = 85/10/5 e M5 e M10 = 75/20/5). Esta relação água/aglomerante é adequada também para a sua aplicação, não diferenciando da utilizada na prática pelos gesseiros, cujas pastas de gesso apresentam relação água/aglomerante da ordem de 0,60 a 0,80.

2 – É preciso adicionar superplastificante nas pastas quando parte do gesso for substituído por cimento Portland. O mesmo ocorre quando parte do cimento for substituído por sílica ativa. Assim, obtém-se boa manuseabilidade da pasta mantendo-se a mesma relação água/aglomerante de 0,70.

3 – Na pasta com 100% de gesso e submetida à cura interna (M6) observou-se uma grande quantidade de hemi-hidrato nos difratogramas. Este fato ocorreu tanto aos 28 como aos 180 dias, indicando que nem todo hemi-hidrato se hidratou para formar o sulfato de cálcio bi-hidratado. Comportamento da pasta de gesso foi atípico pois nessas idades não se observam grandes quantidades de hemi-hidrato.

4 – As misturas contendo gesso e cimento M2 = M7 (85/15/0) e M3 = M8 (75/25/0) e as misturas de gesso, cimento e sílica ativa M4 = M9 (85/10/5) e M5 = M10 (75/20/5), mesmo absorvendo uma quantidade maior de água acarretaram em menor perda de massa em relação à pasta com 100% de gesso quando imersas em água.

5 – Os resultados obtidos mostraram que a adição de sílica ativa na mistura contendo cimento, reduziu a formação de etringita, especialmente nos revestimentos sujeito à umidade. Observou-se também que a sílica ativa não contribuiu para o aumento das resistências. Não se observou melhora na absorção de água com a adição de sílica ativa às misturas.

6 – A utilização do cimento Portland com escória de alto-forno foi benéfica, pois os sulfatos são ativadores da escória, propiciando um aumento da resistência do cimento ao longo do tempo. A dureza, medida pela resistência ao risco, aumentou, e a perda de massa em relação às pastas com 100% de gesso, diminuiu.

7 – Mesmo substituindo parte do gesso por cimento, e com a substituição de parte do cimento Portland por sílica ativa, os revestimentos externos apresentaram porosidade e perda de massa. Mas não apresentaram até a data de 180 dias, gretamentos, fissuras ou empolamento. Notou-se o aparecimento de fungos de cor esverdeada em todos os painéis, nos locais onde ocorreram uma permanência maior de umidade.

## **10 SUGESTÕES PARA PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA**

Com a comprovação do bom desempenho das pastas de gesso com cimento Portland de alto-forno e de sílica ativa na aplicação em locais sujeitos à umidade, e a redução da formação de etringita nas misturas de gesso com cimento Portland de alto-forno e sílica ativa, deve-se dar prosseguimento às investigações científicas.

Como sugestão para o prosseguimento da pesquisa, poderão ser efetuados:

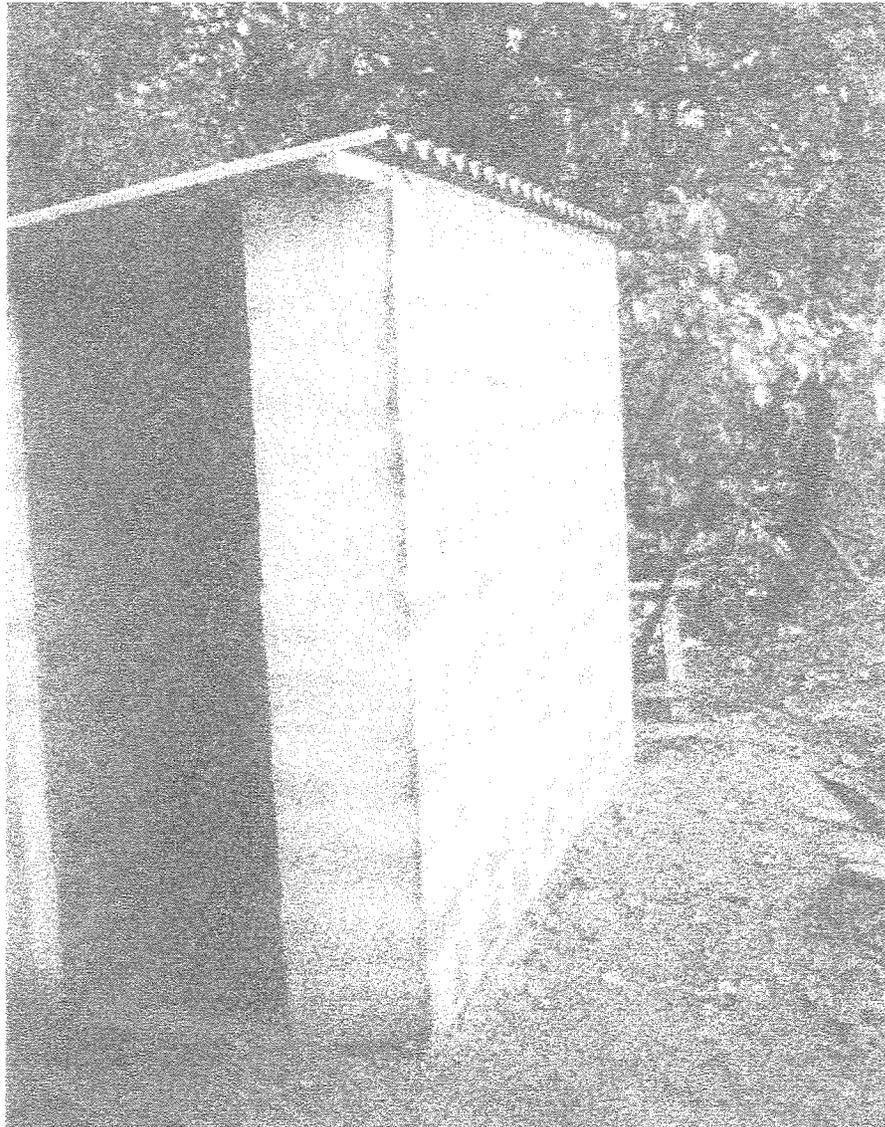
- 1 - Os mesmos ensaios utilizando cimento sem adições.
- 2 - Ensaio de microscopia.
- 3 - Análise do comportamento das misturas em idades mais avançadas, além dos 180 dias como foi feito neste trabalho experimental.
- 4 - Ensaio de arrancamento em diversos substratos, principalmente nos revestimentos aplicados externamente.
- 5 - Observar a causa da formação de fungos de cor esverdeada sobre o revestimento de gesso.
- 6 - Observar o comportamento das misturas com o emprego de aditivos impermeabilizantes.

## **11 ANEXOS**

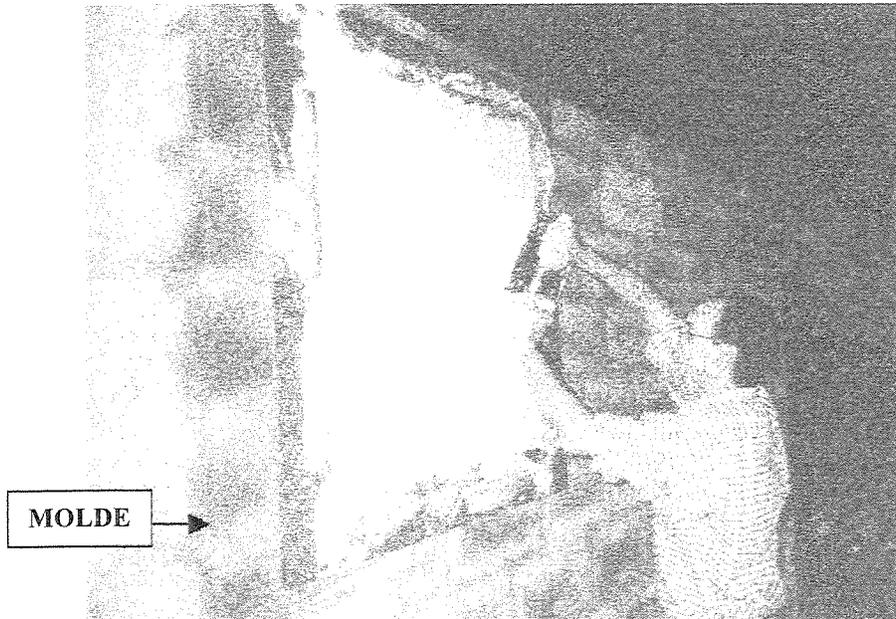
### **ANEXO A**

#### **PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E PAINÉIS DE ALVENARIA**

Neste anexo será apresentado uma série de fotografias da preparação dos ensaios bem como da elevação da alvenaria e a aplicação dos painéis das misturas, conforme descrito no Capítulo 7.



*Figura A1 – Construção da alvenaria em bloco de concreto, e cobertura com telhas de fibrocimento, para aplicação das diversas misturas.*



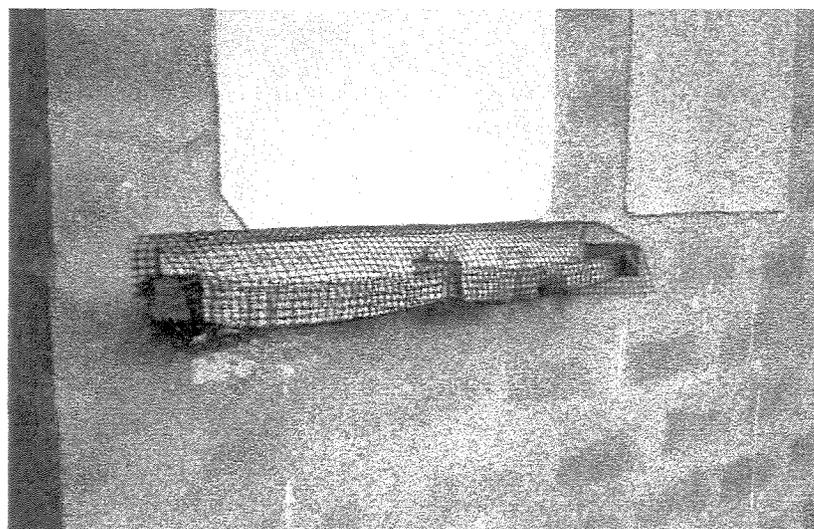
*Figura A2 – Aplicação do revestimento, utilizando um quadro de 80 x 80 cm e 4,5mm de espessura como molde e desempenadeira de PVC.*



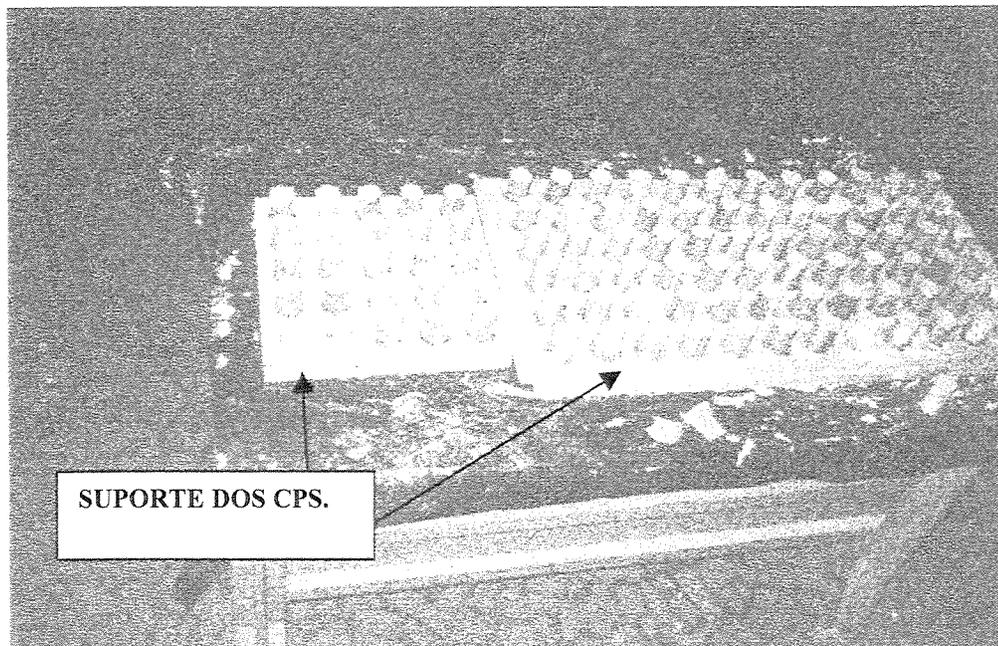
*Figura A3 – Revestimento interno aplicado (M6, M7, M8, M9, M10)*



*Figura A4 – Revestimento externo aplicado (M1, M2, M3, M4, M5)*



*Figura A5 – Detalhe do suporte dos corpos-de-prova submetidos à cura externa*



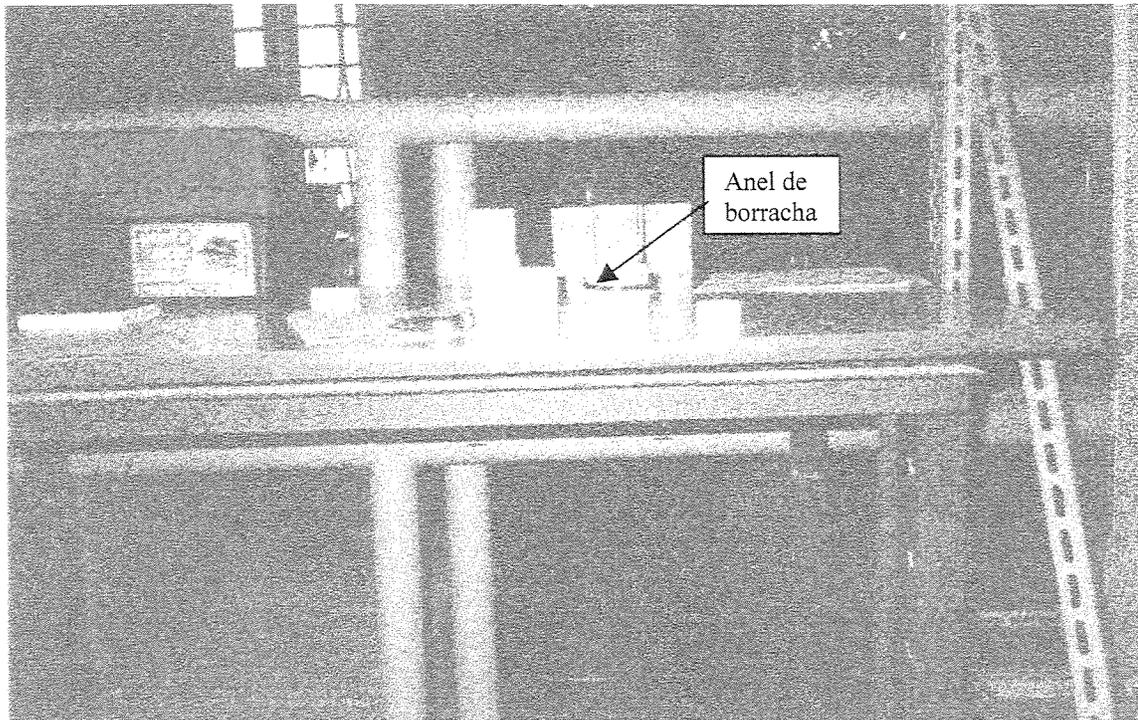
*Figura A6 – Moldagem dos corpos-de-prova de 2,75 x 5,50 cm utilizados para os ensaios de Resistência à Compressão, Resistência à Tração e Absorção Capilar.*



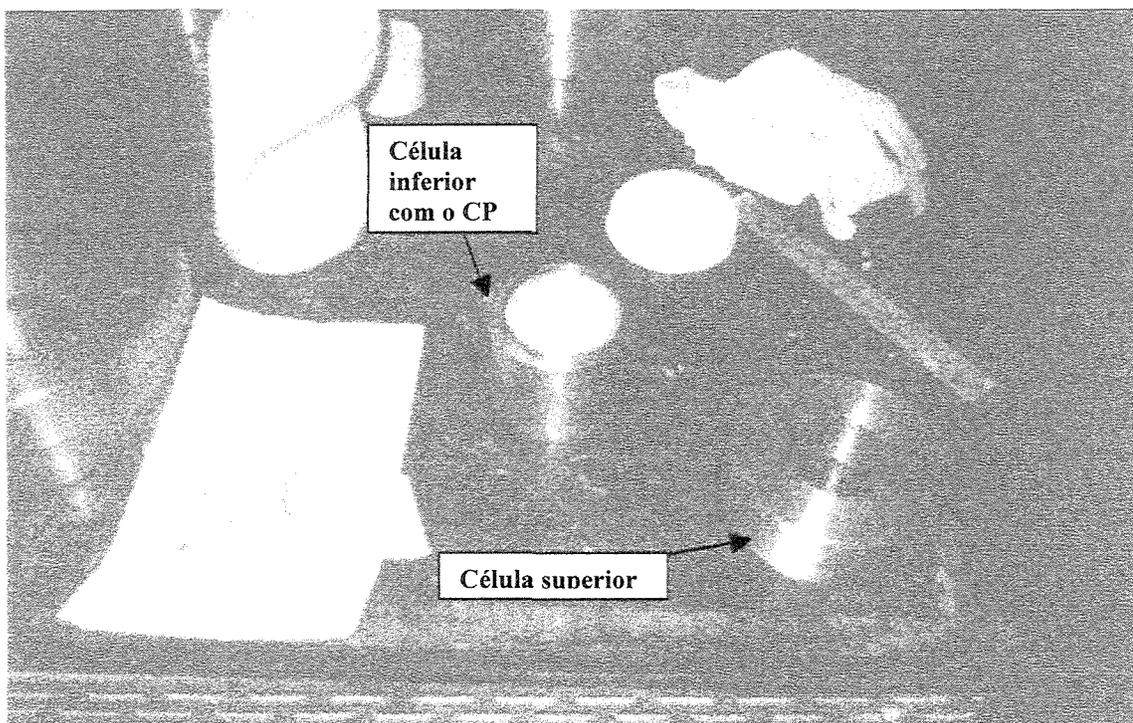
*Figura 7 - Moldagem dos corpos-de-prova de 5,0 x 10 cm e 4,0 x 4,0 x 16 cm utilizados para os ensaios de permeabilidade ao ar e expansibilidade longitudinal, respectivamente.*



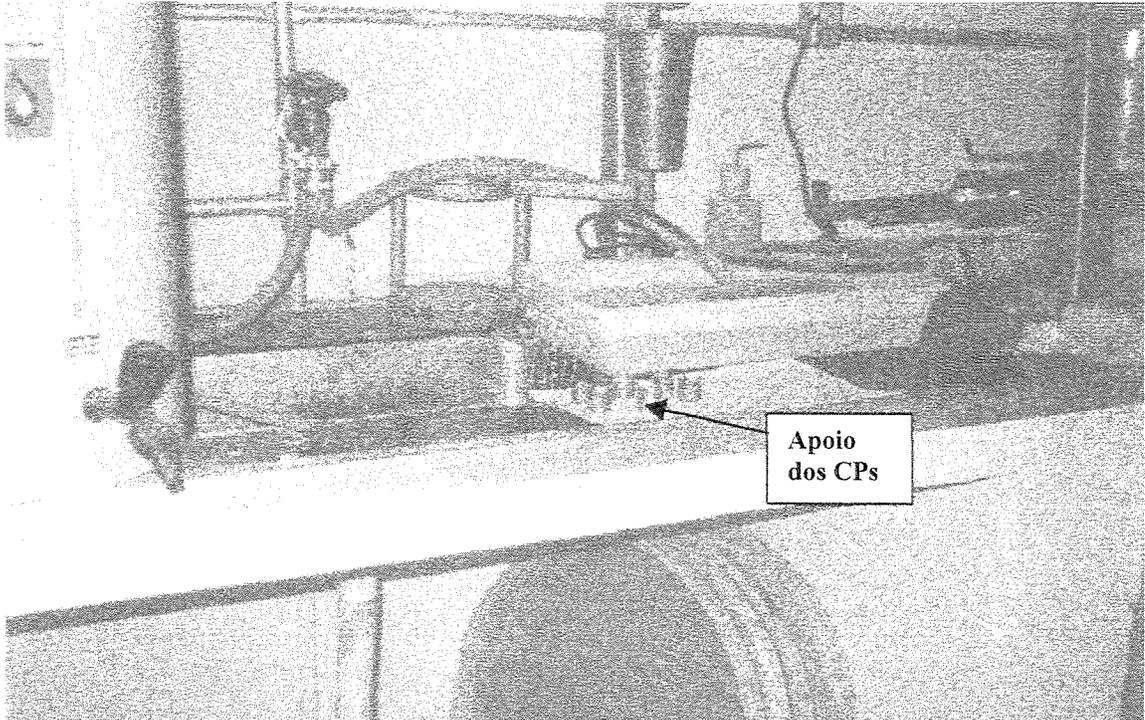
*Figura A8 – Desforma e cura ao ar em laboratório dos corpos-de-prova*



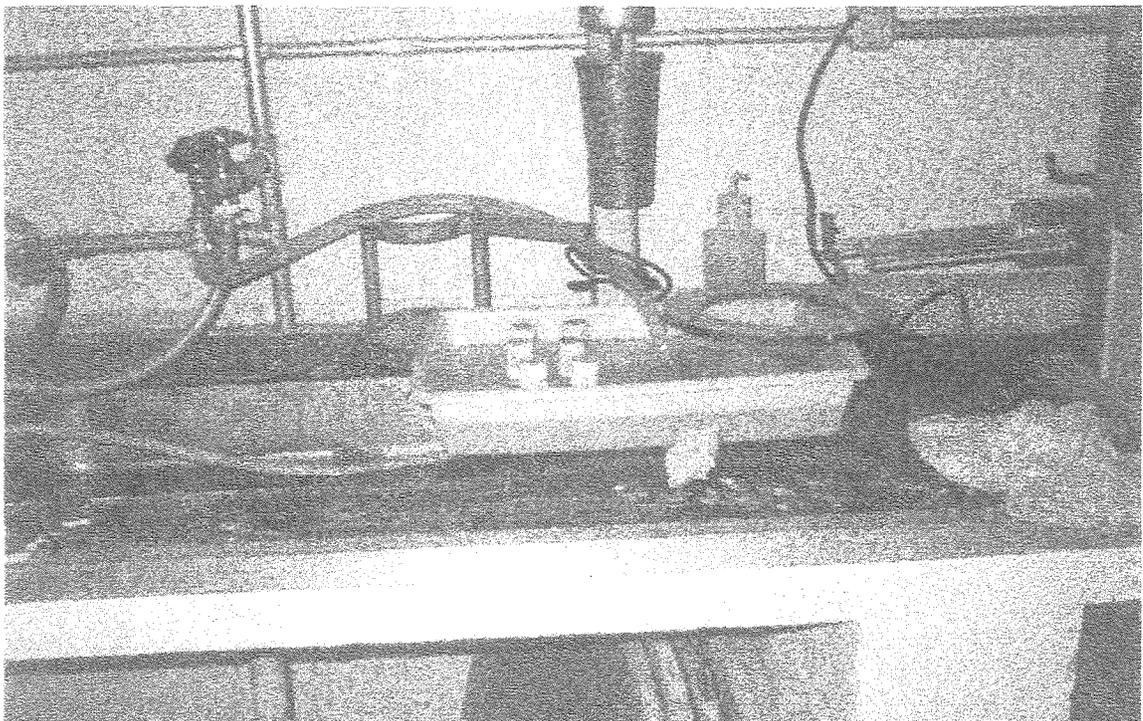
*Figura A9 – Preparo das amostras para o ensaio de permeabilidade ao ar.*



*Figura A10 – Amostra na célula inferior do permeabilímetro.*

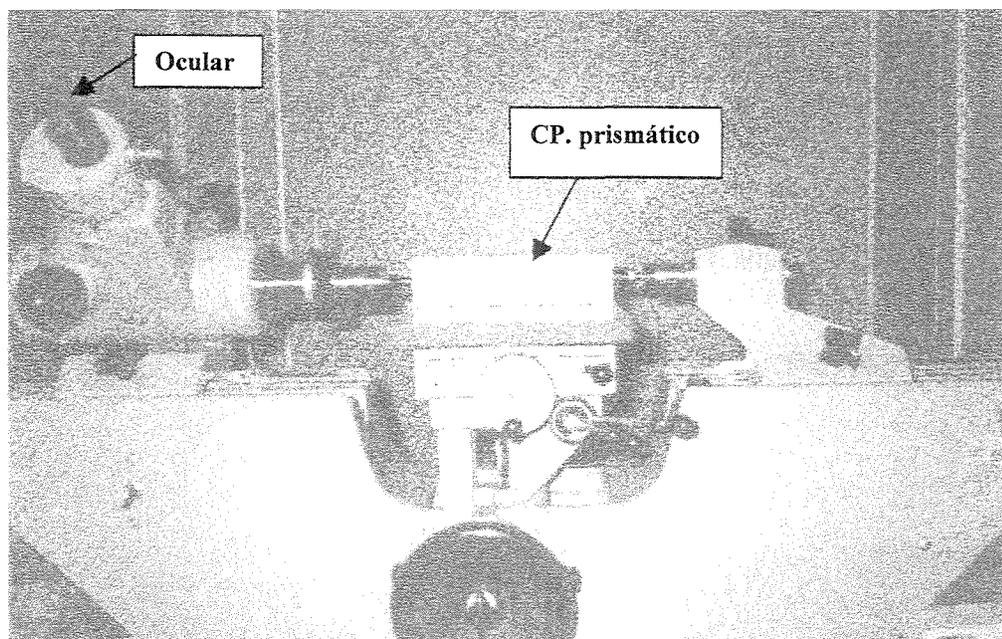


*Figura A11 – Bandeja e suporte de cobre para o ensaio de absorção por capilaridade*

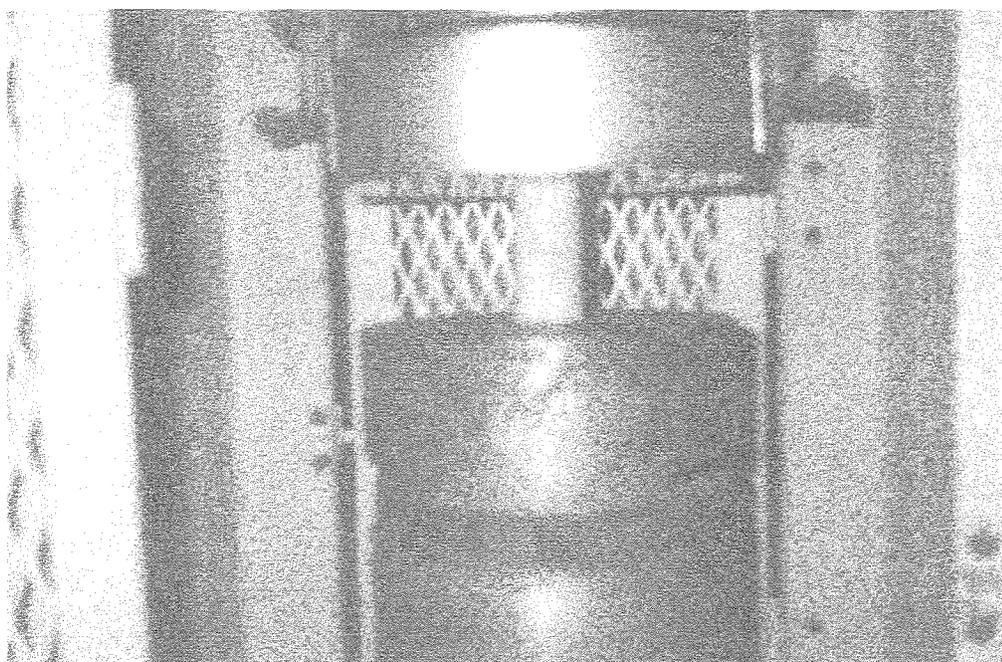


*Figura A12 – Ensaio de absorção capilar sendo realizado.*

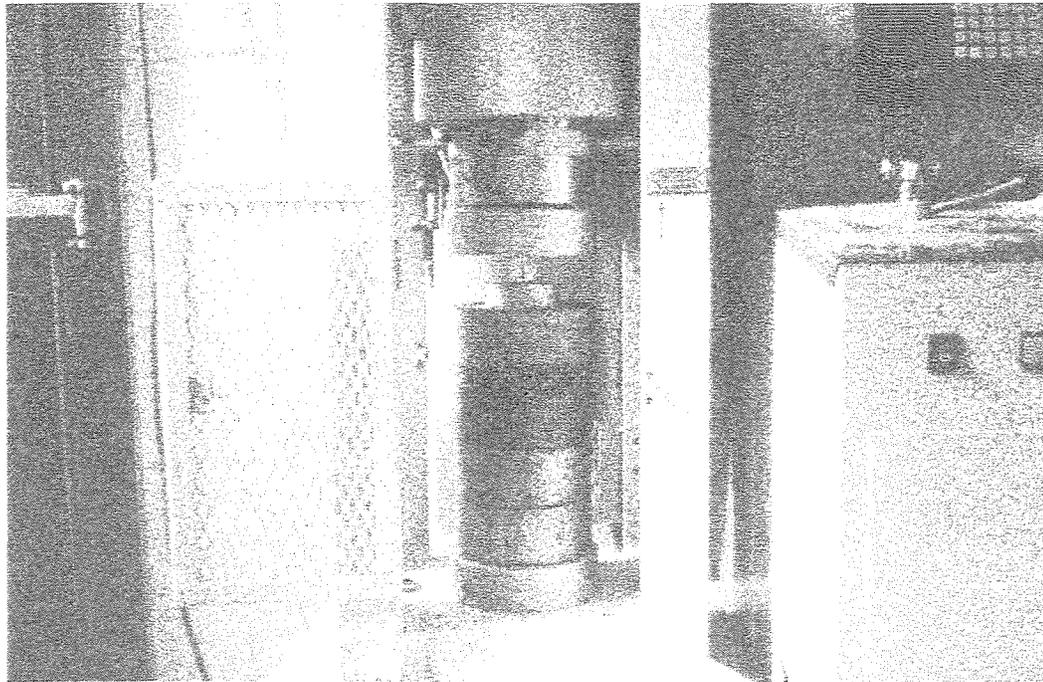
**ANEXO B**  
**FOTOGRAFIAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSÁIOS**



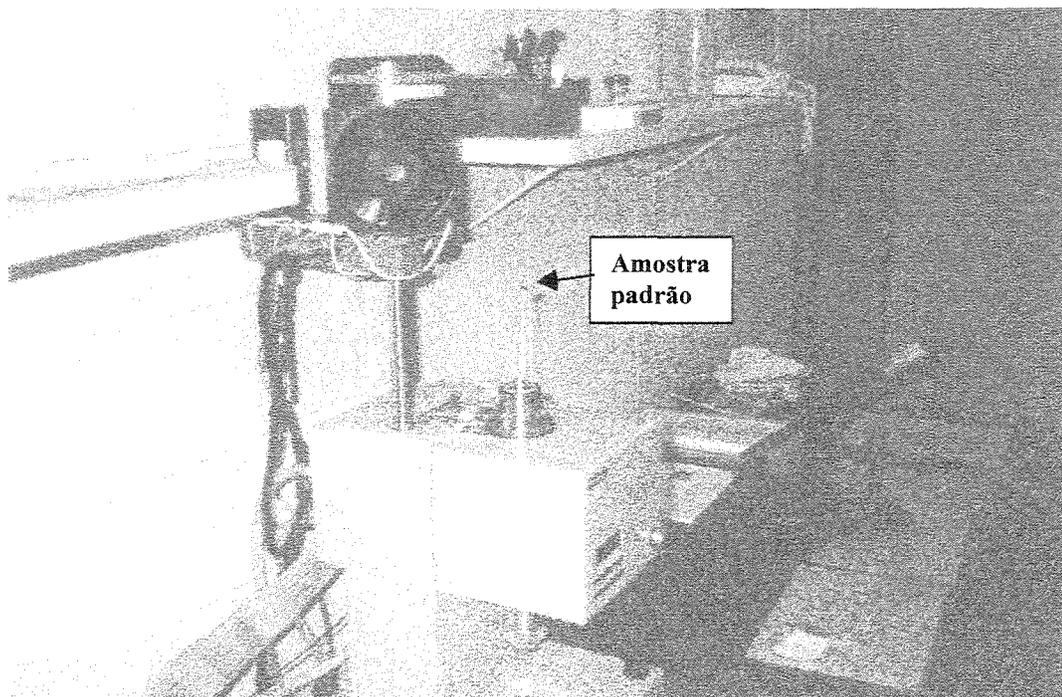
*Figura B1 – Ensaio de expansibilidade utilizando o metroscópio horizontal CARL-ZEISS JENA – FATEC/Sorocaba, precisão de décimos de milésimos de milímetros.*



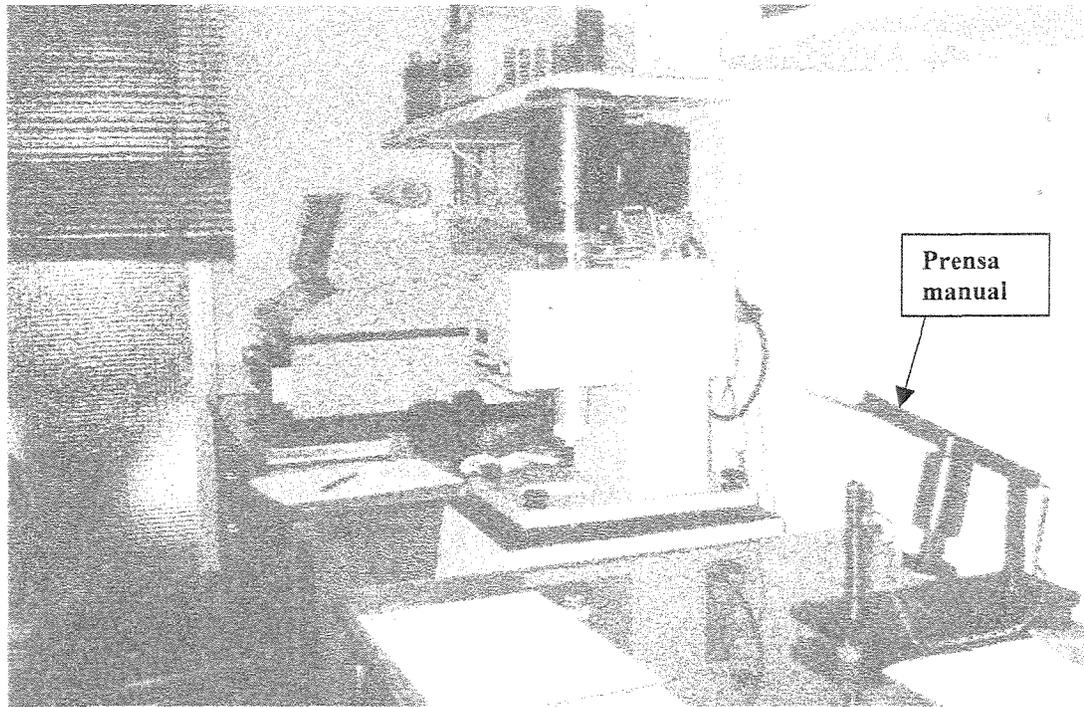
*Figura B2 – Ensaio de Resistência à compressão utilizando uma prensa eletro-hidráulica Forney Test Equipment com capacidade máxima de 1100 kN e faixa nominal 20 a 950 kN, precisão de 0,05 kN.*



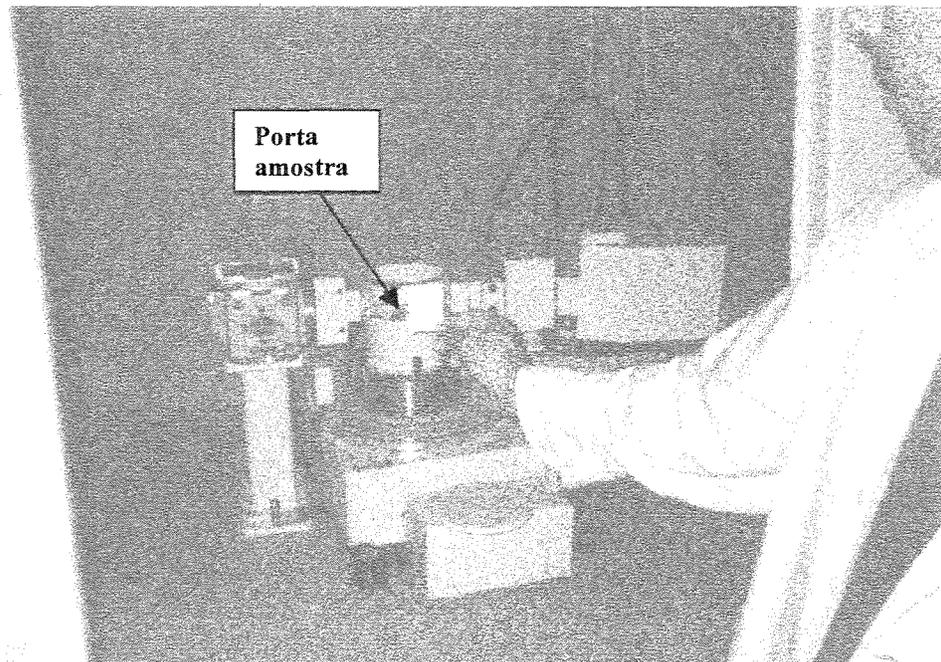
*Figura B3 – Ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral utilizando uma prensa eletro-hidráulica Forney Test Equipament com capacidade máxima de 1100 kN e faixa nominal 20 a 950 kN, precisão de 0,05 kN.*



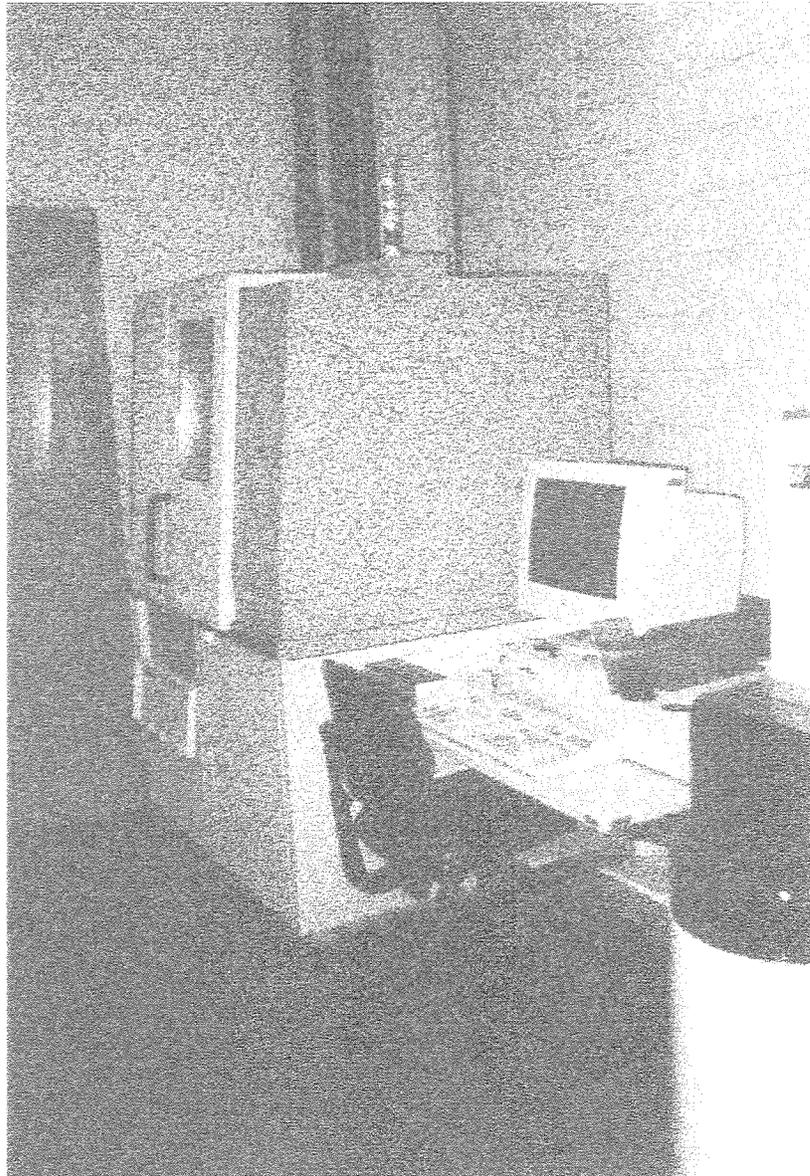
*Figura B4 – Balança Termogravimétrica – Rigaku Thermoflex TG 8110 - ABCP contendo a amostra padrão para realização dos ensaios de ATD e ATG*



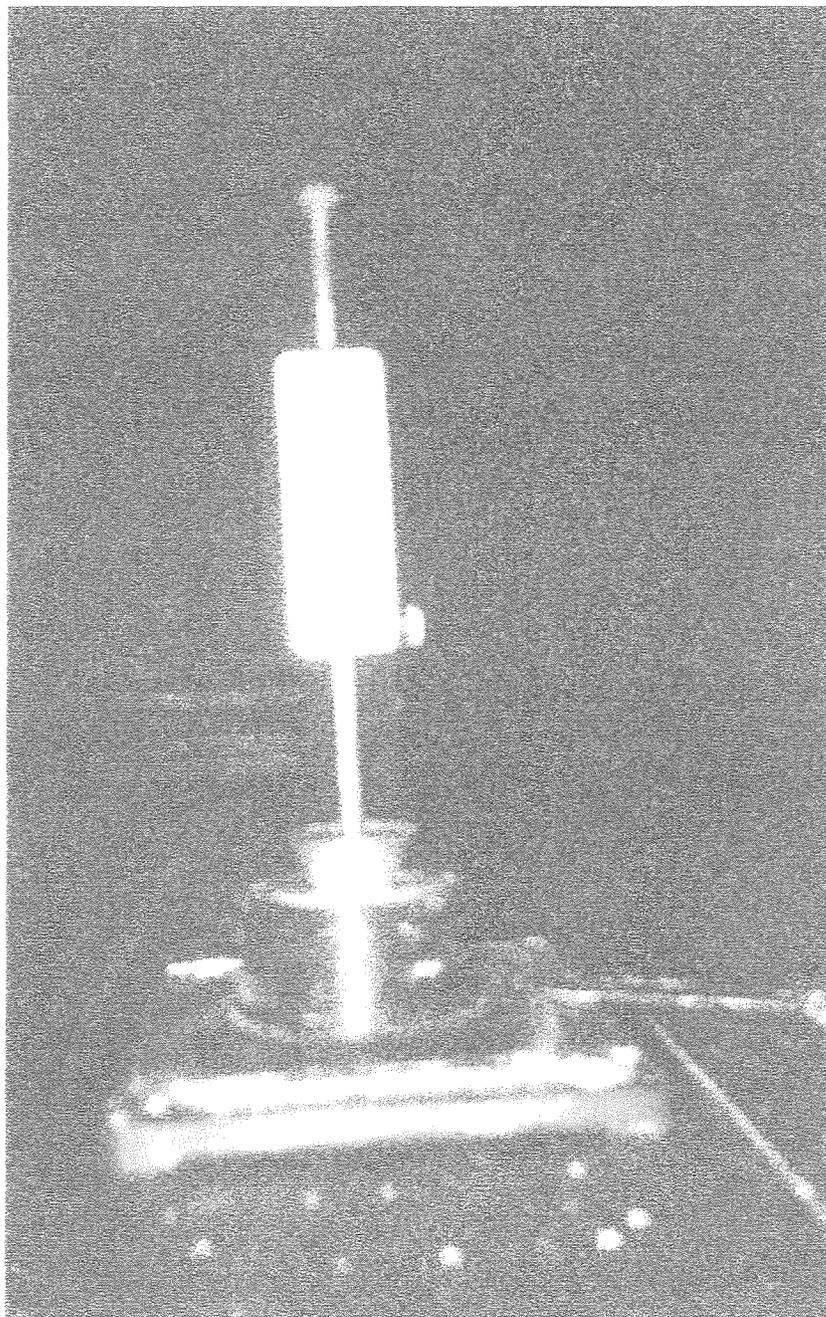
*Figura B5 – Balança Termogravimétrica - Rigaku Thermoflex TG 8110 - ABCP pronta para o ensaio de ATD e ATG, e detalhe da prensa manual para o preparo das amostras para o ensaio de difração de raios X.*



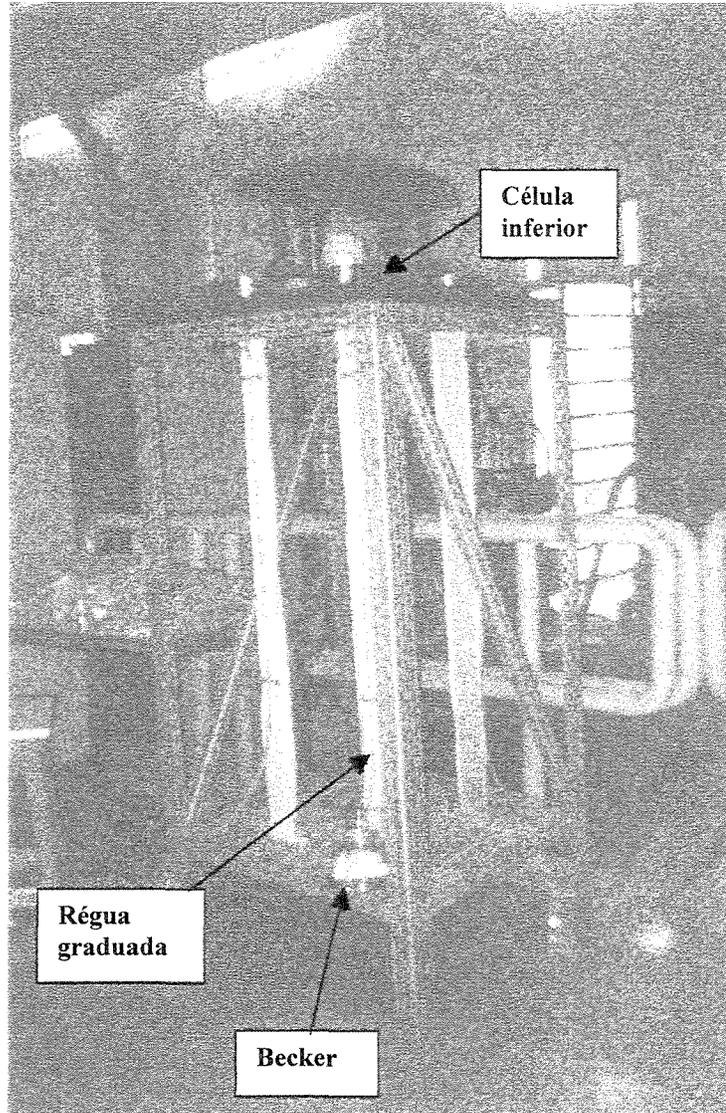
*Figura B6 – Amostra sendo colocada no difratômetro X-RAY da Rigaku -ABCP*



*Figura B7 – Diffractometer da Rigaku – ABCP pronto para o ensaio de difração de raios X.*



*Figura B8 – Ensaio de Consistência utilizando o equipamento de Vicat modificado*



*Figura B9 – Equipamento para realizar o ensaio de Permeabilidade ao ar – FEC/UNICAMP*

**ANEXO C**  
**RESULTADOS DOS ENSAIOS**

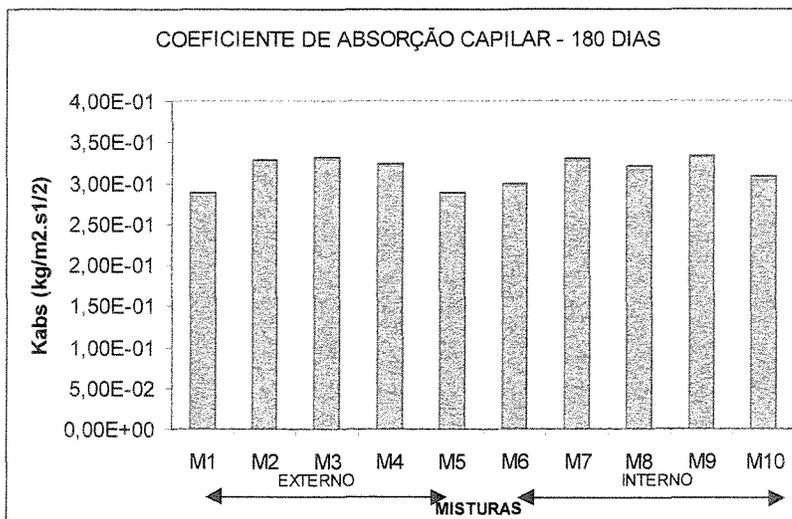
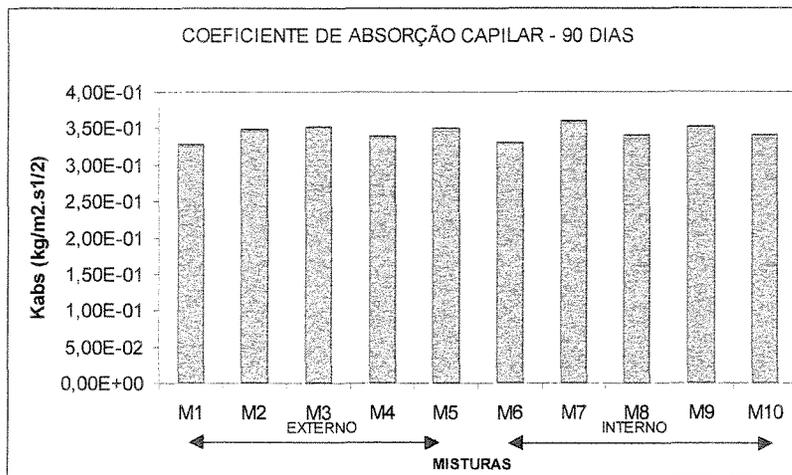
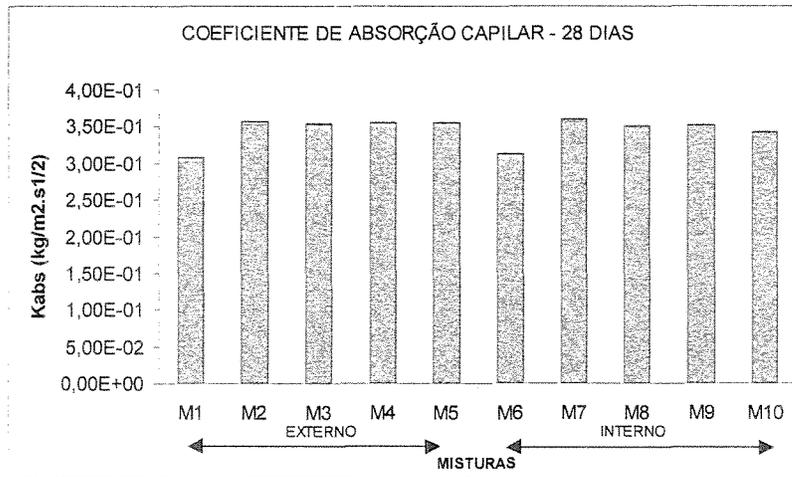


Figura C1 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28, 90 e 180 dias ( $K_{abs}$ )

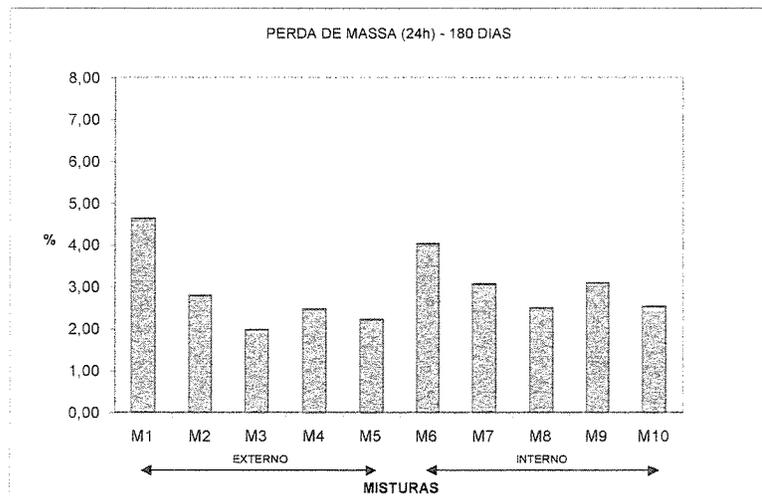
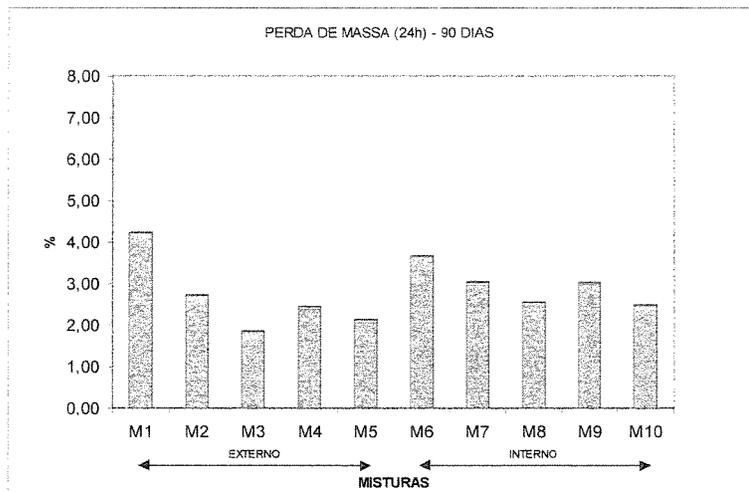
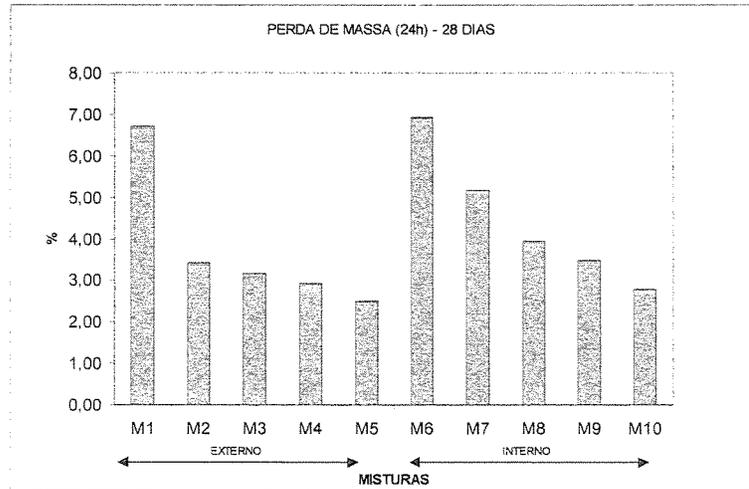
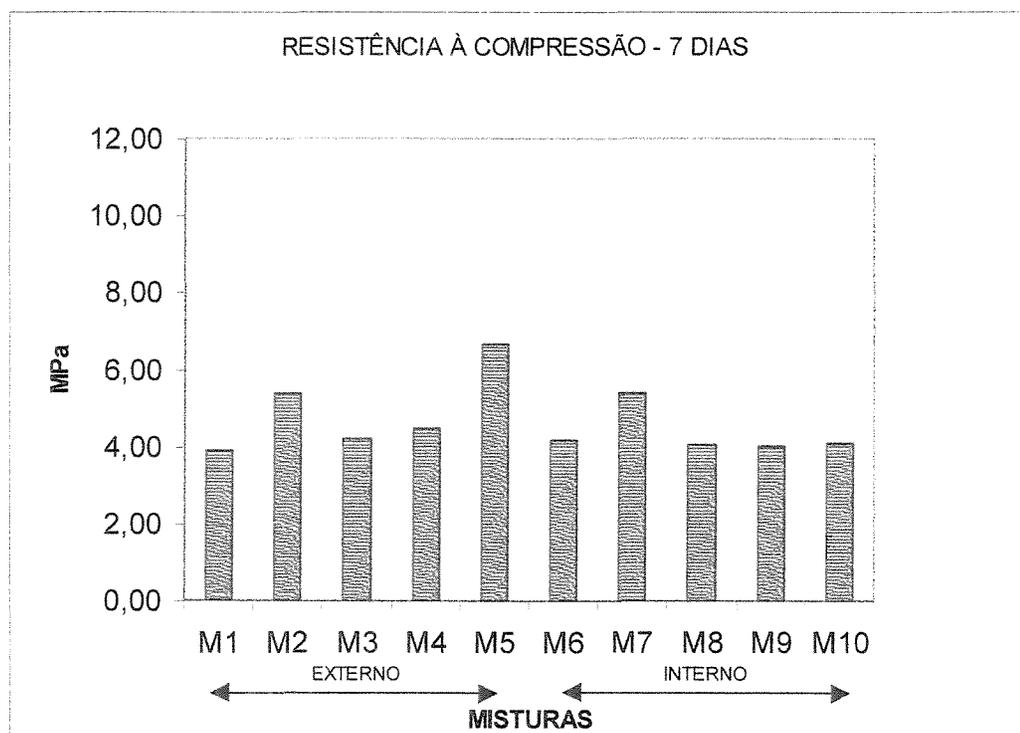
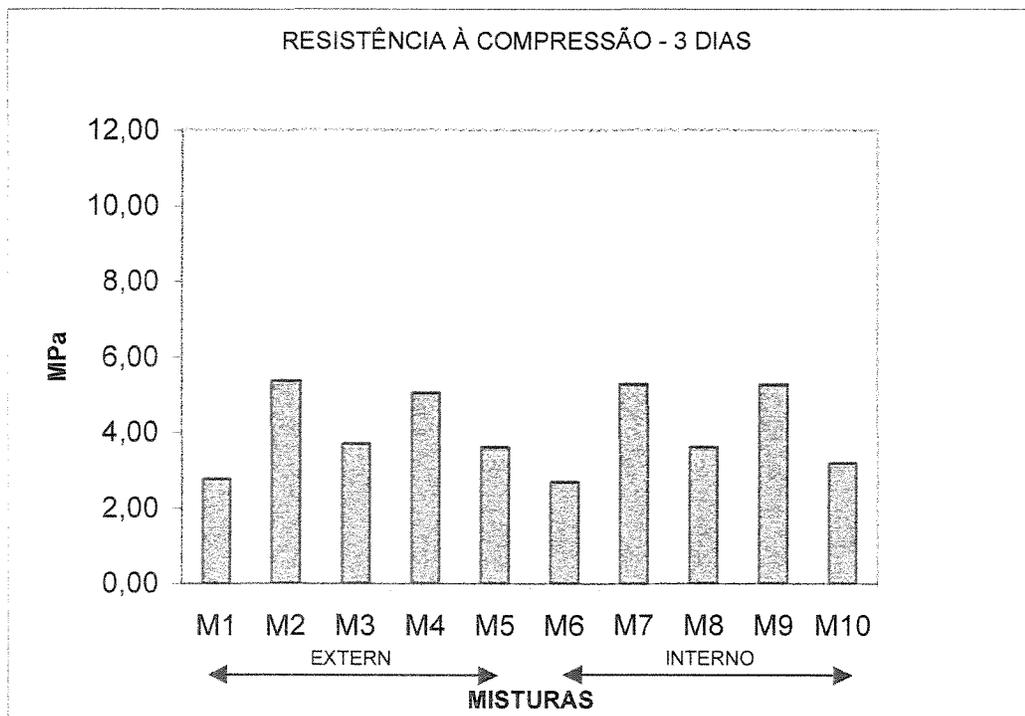
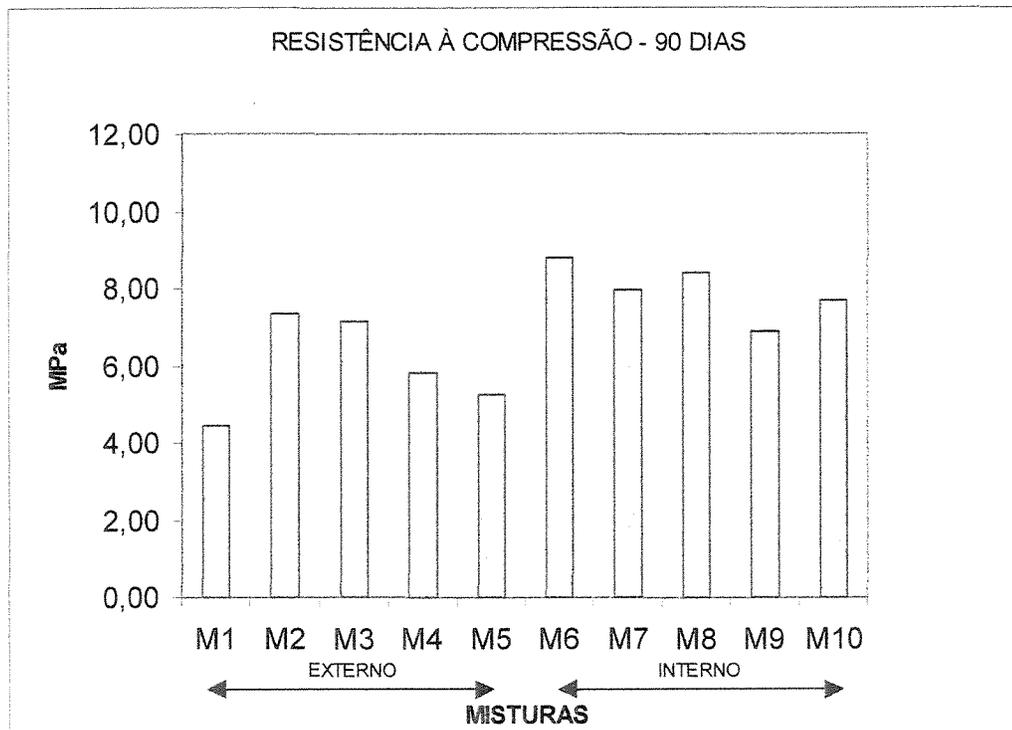
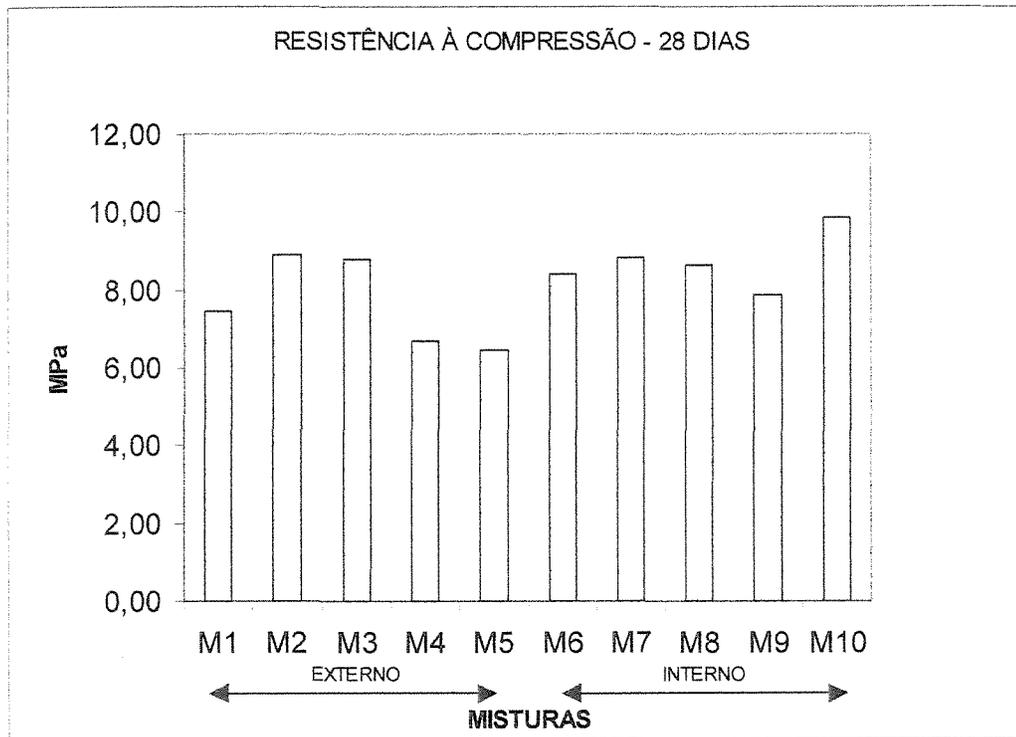


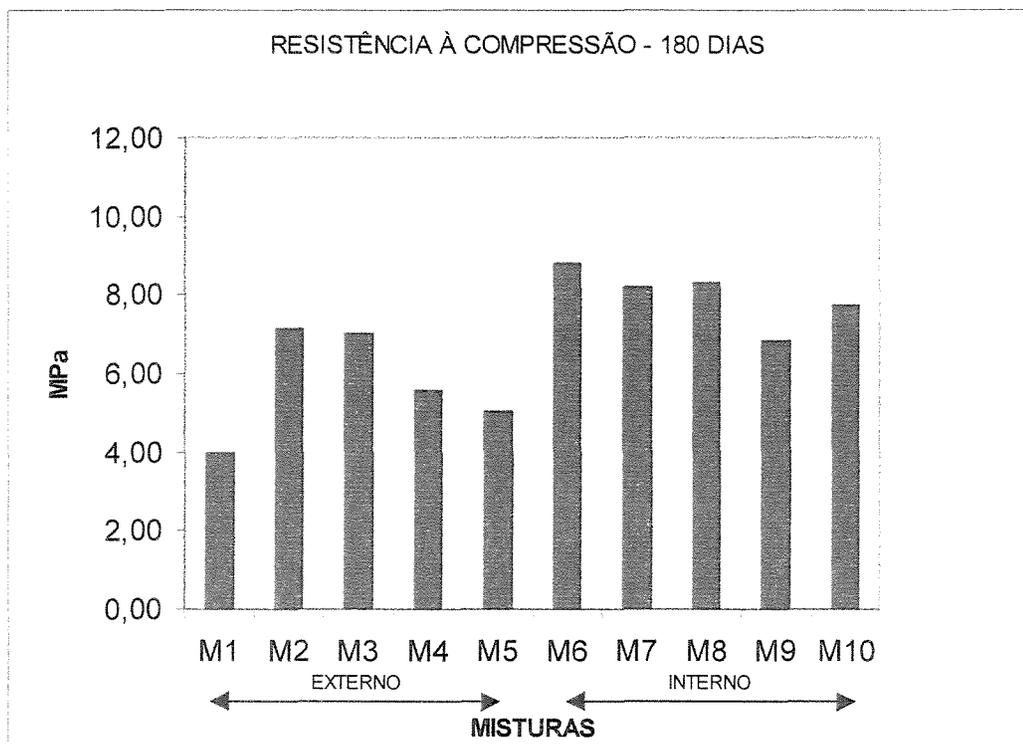
Figura C2 – Perda de massa após 24 horas de imersão em água aos 28, 90, 180 dias (%)



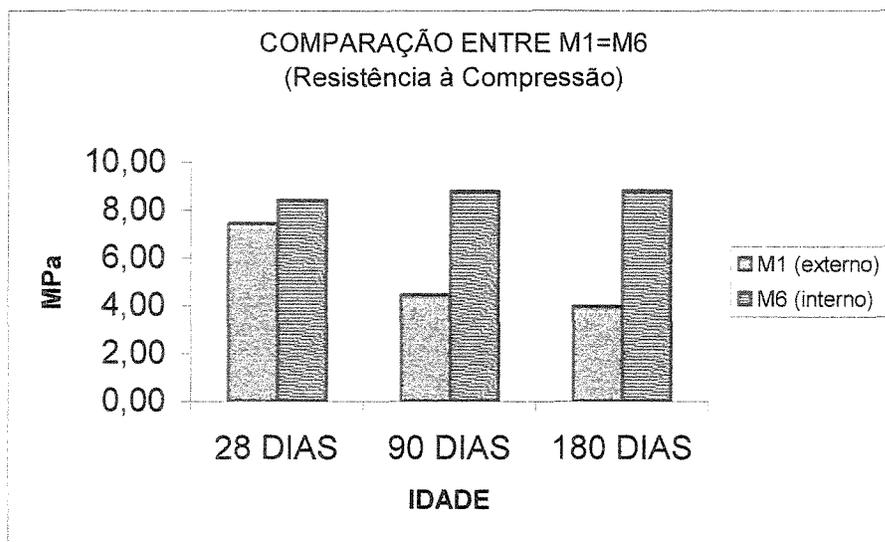
*Figura C3 – Resistência à Compressão aos 3 e 7 dias (MPa)*



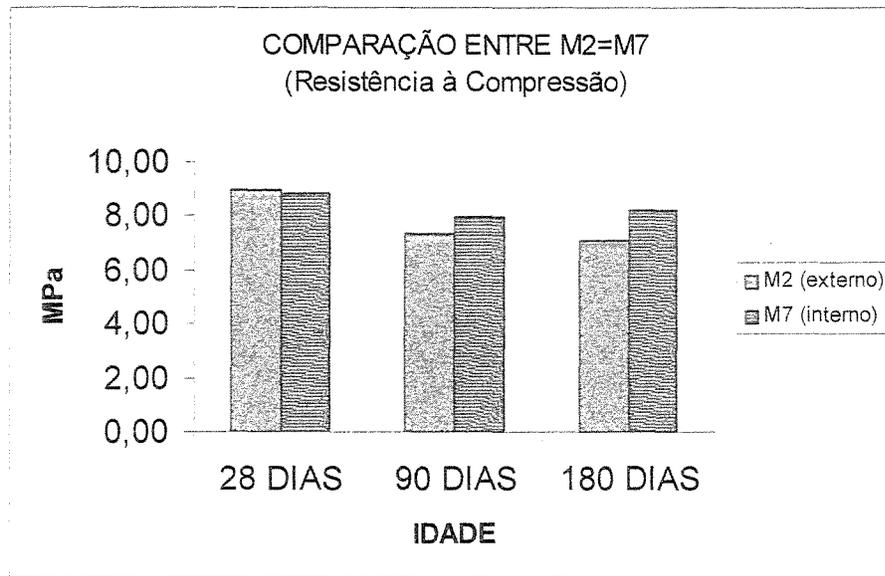
*Figura C4 – Resistência à Compressão aos 28 e 90 dias (MPa)*



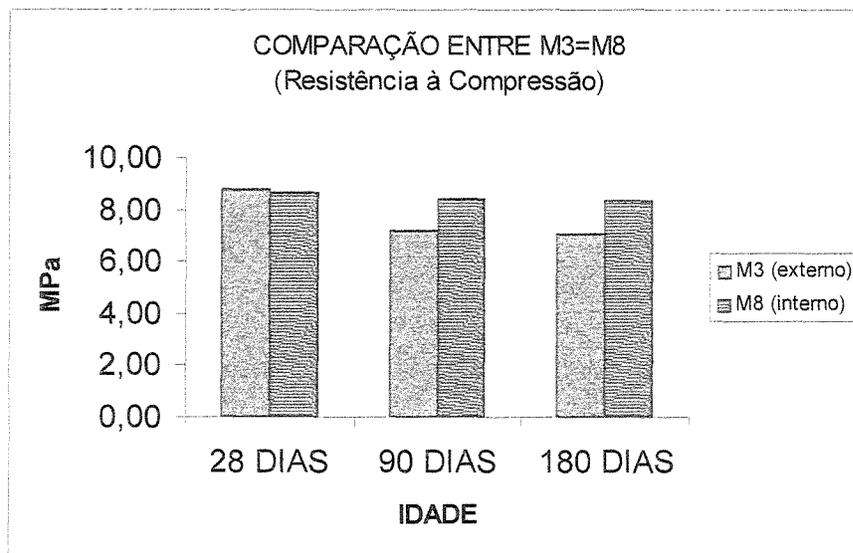
*Figura C5 – Resistência à Compressão aos 180 dias (MPa)*



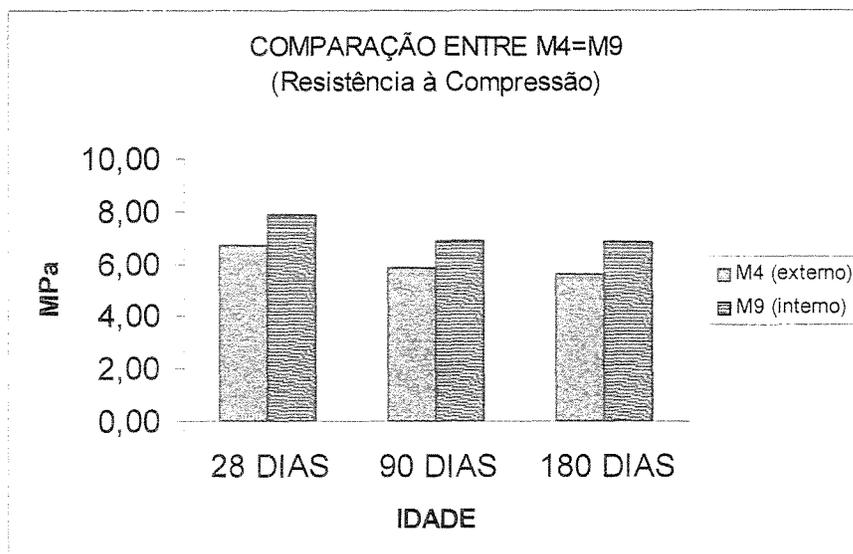
*Figura C6 - Comparação das resistências à compressão das misturas M1 e M6 (100/0/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



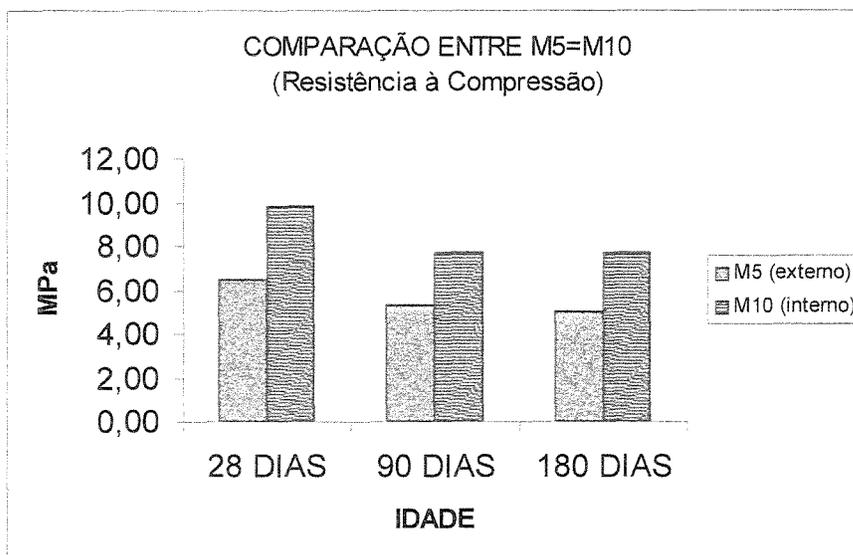
*Figura C7 - Comparação das resistências à compressão das misturas M2 e M7 (85/15/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



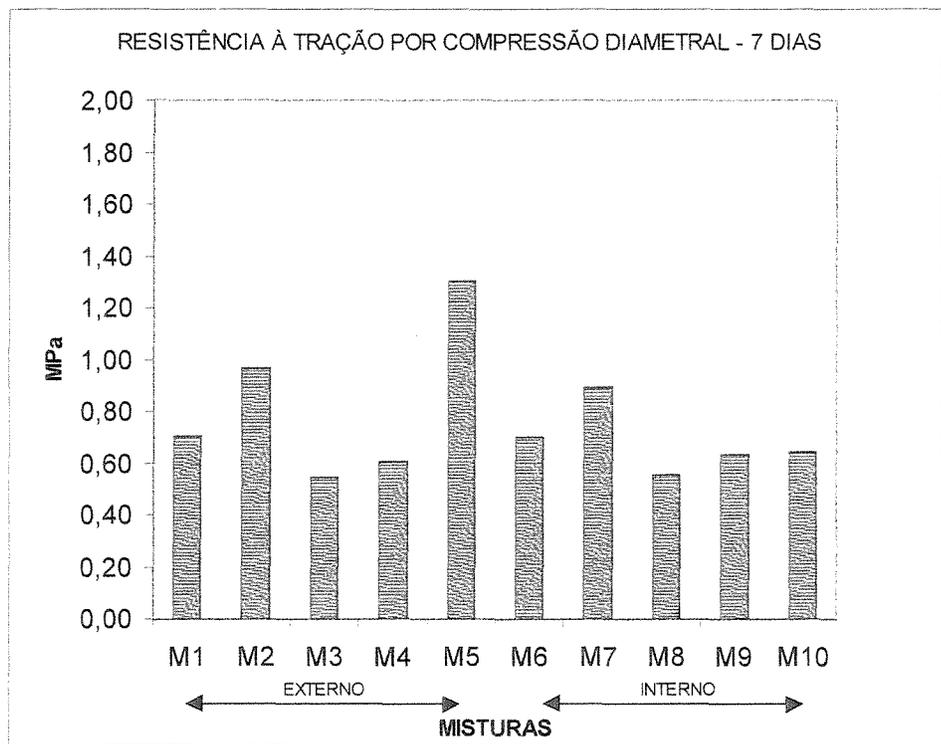
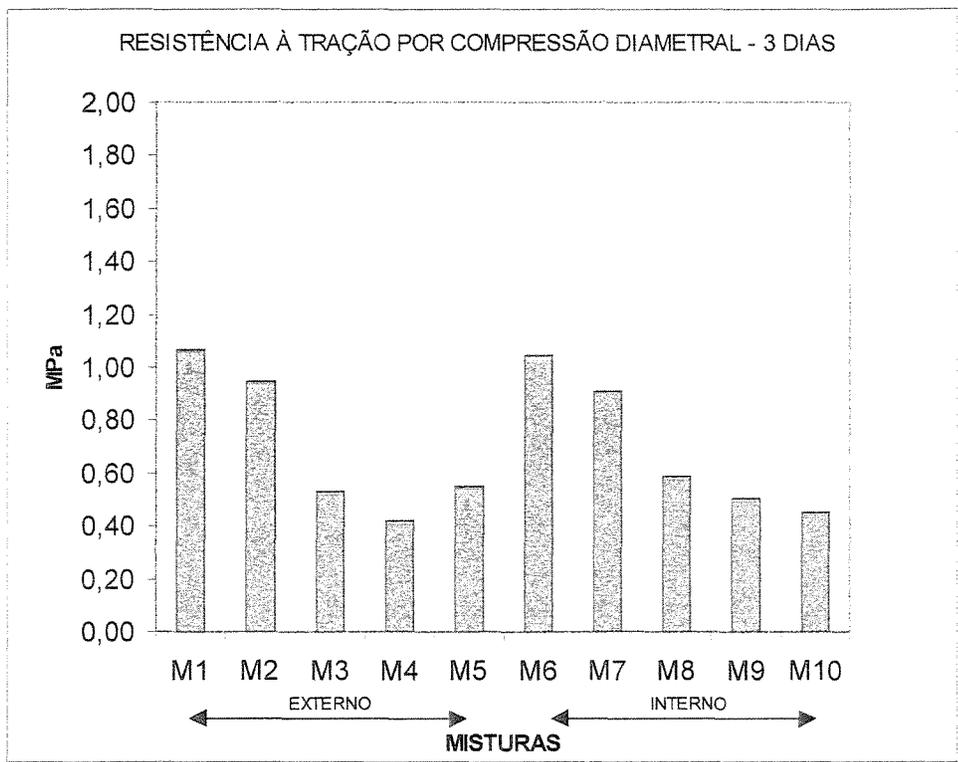
*Figura C8 - Comparação das resistências à compressão das misturas M3 e M8 (75/25/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C9 - Comparação das resistências à compressão das misturas M4 e M9 (85/10/5) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C10 - Comparação das resistências à compressão das misturas M5 e M10 (75/20/5) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C11 – Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 3 e 7 dias (MPa)*

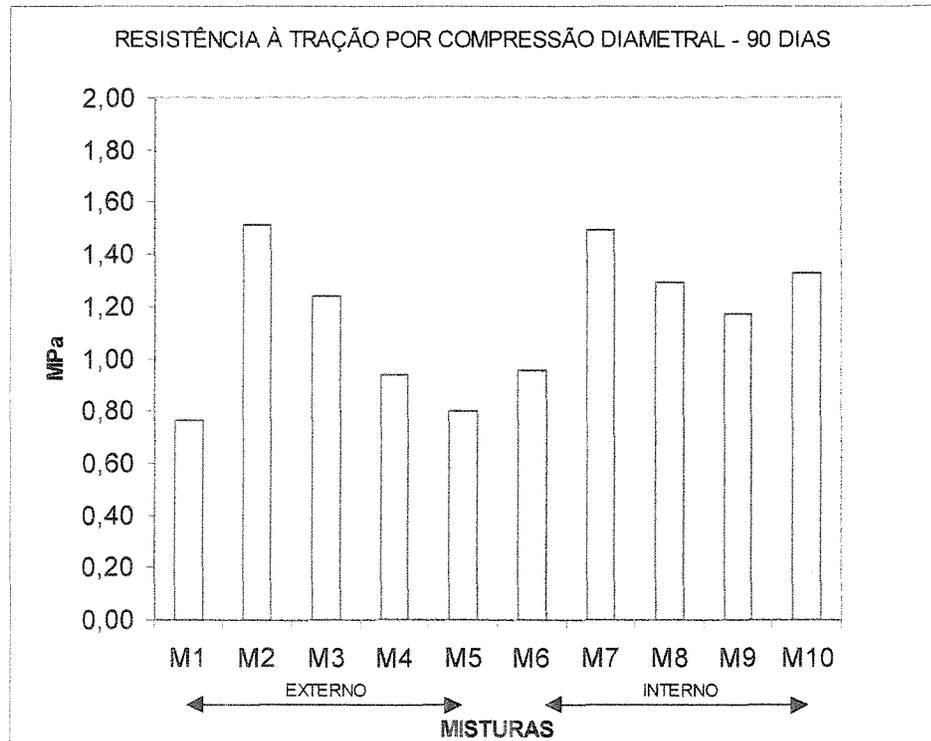
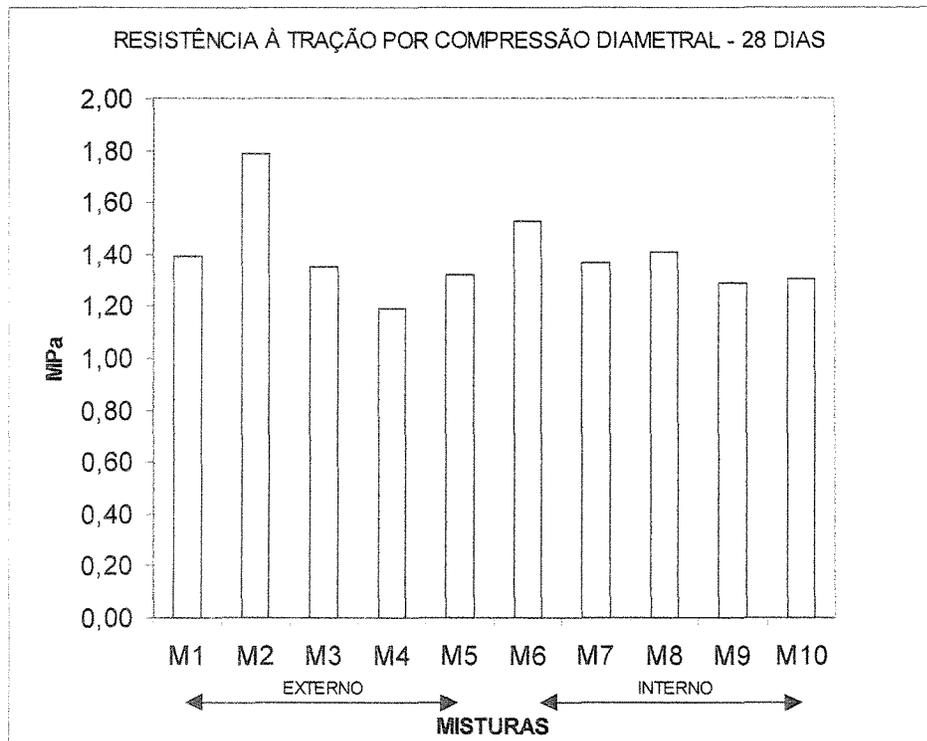


Figura C12 – Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 e 90 dias (MPa)

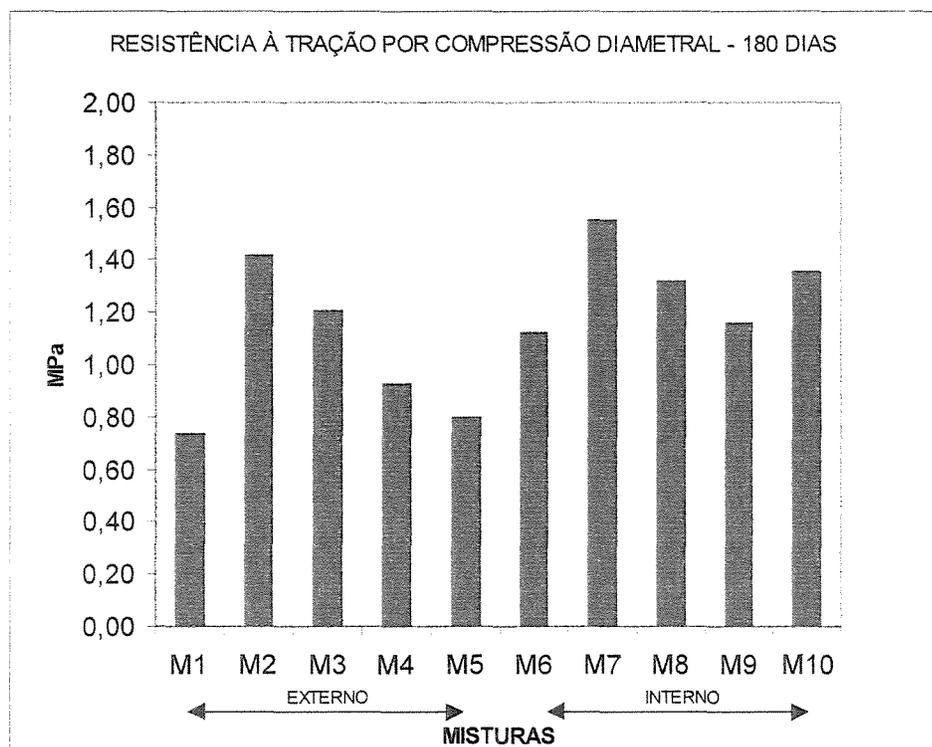


Figura C13 – Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 180 dias (MPa)

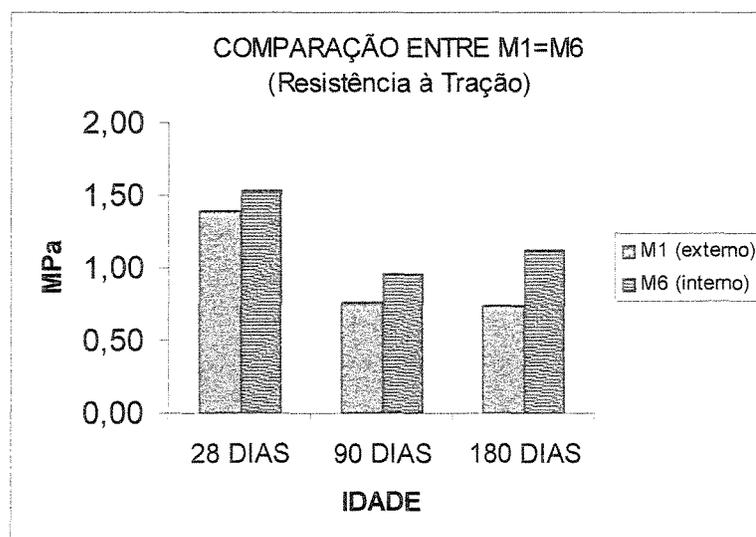
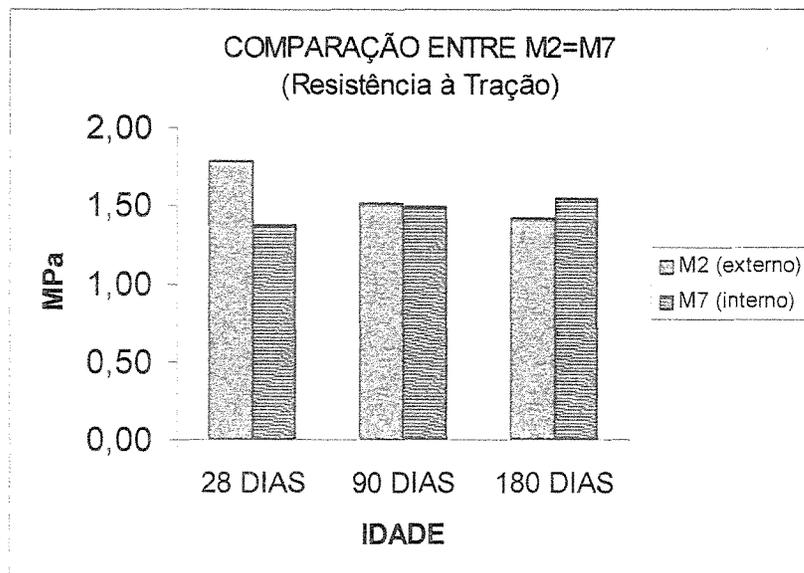
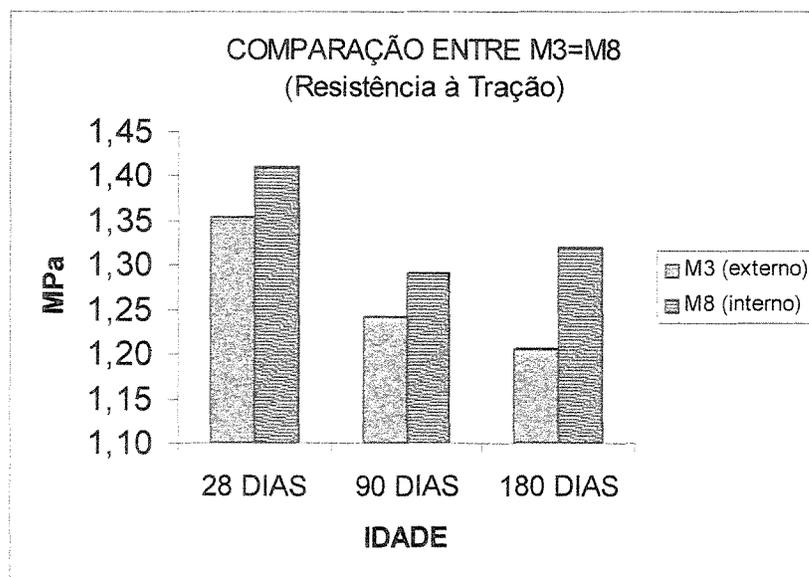


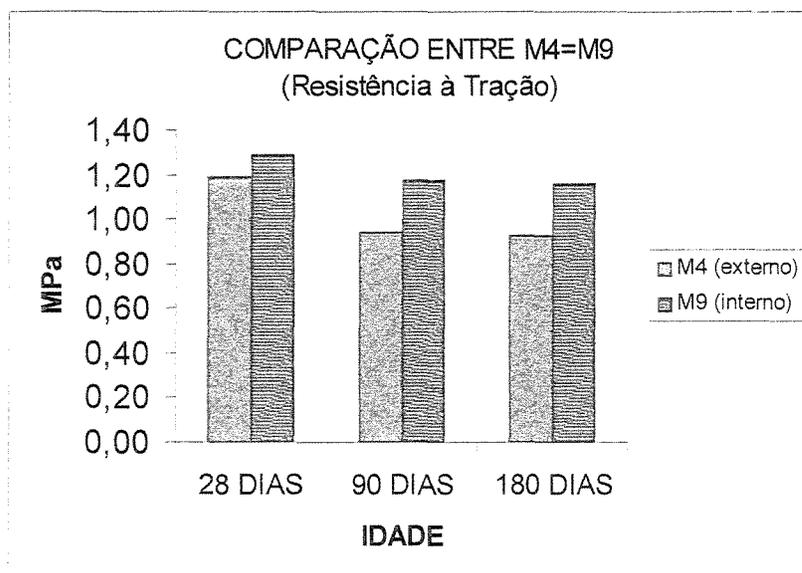
Figura C14 - Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M1 e M6 (100/0/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)



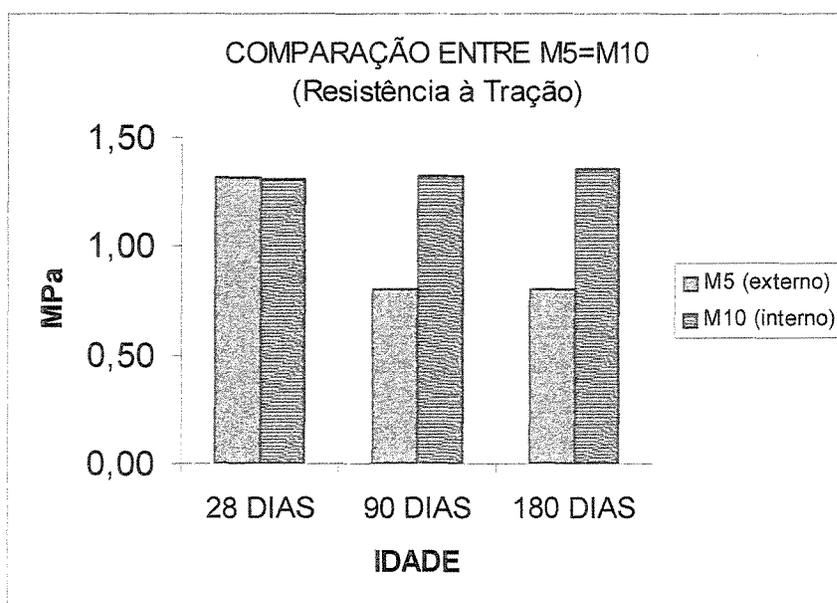
*Figura C15 - Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M2 e M7 (85/15/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C16 - Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M3 e M8 (75/25/0) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C17 - Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M4 e M9 (85/10/5) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*



*Figura C18 - Comparação das resistências à tração por compressão diametral das misturas M5 e M10 (75/20/5) aos 28, 90, e 180 dias (MPa)*

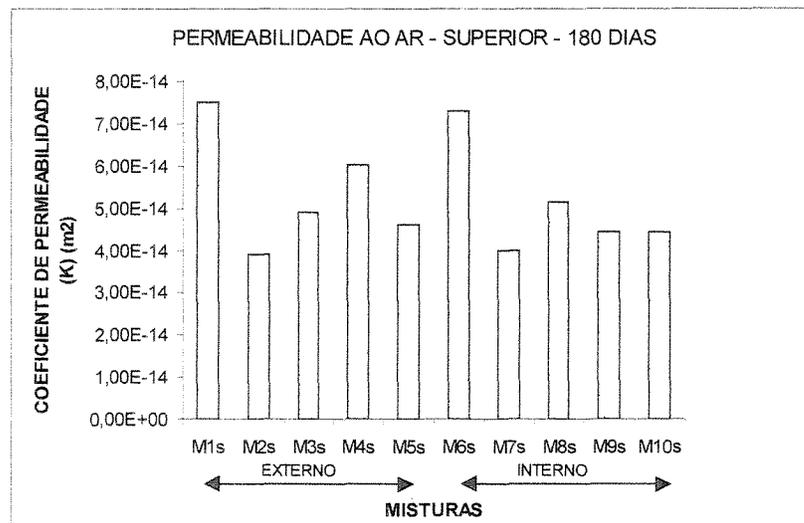
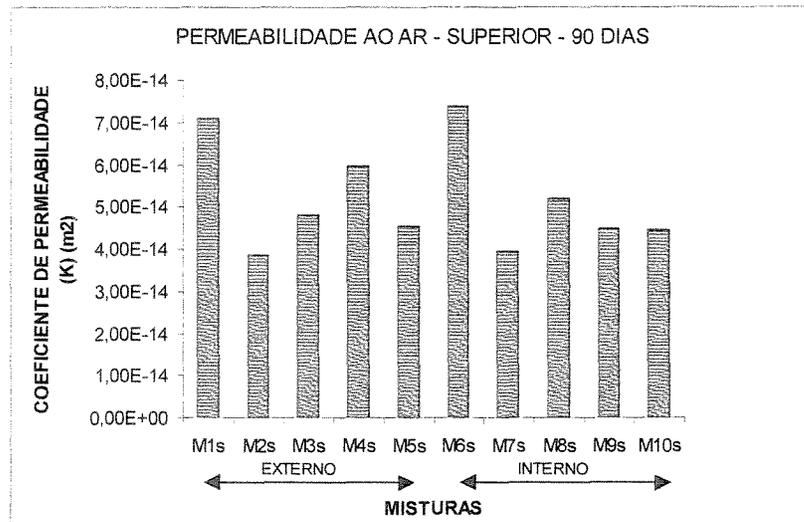
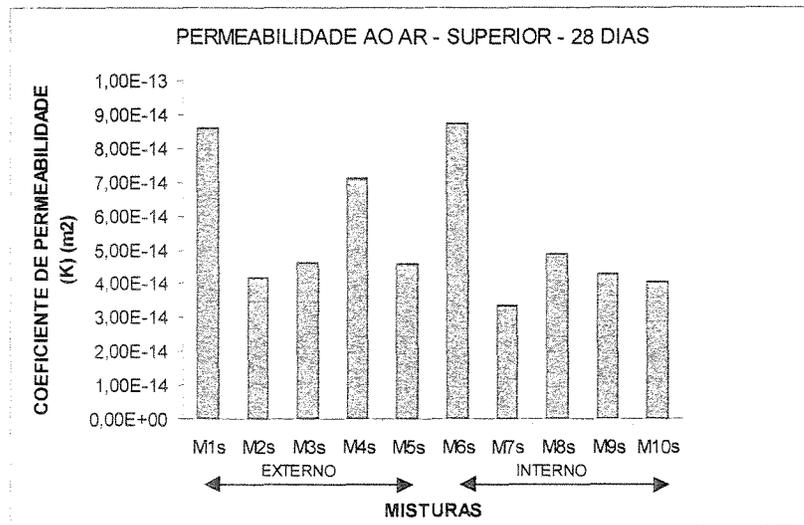


Figura C19 – Permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 28, 90 e 180 dias - amostra superior

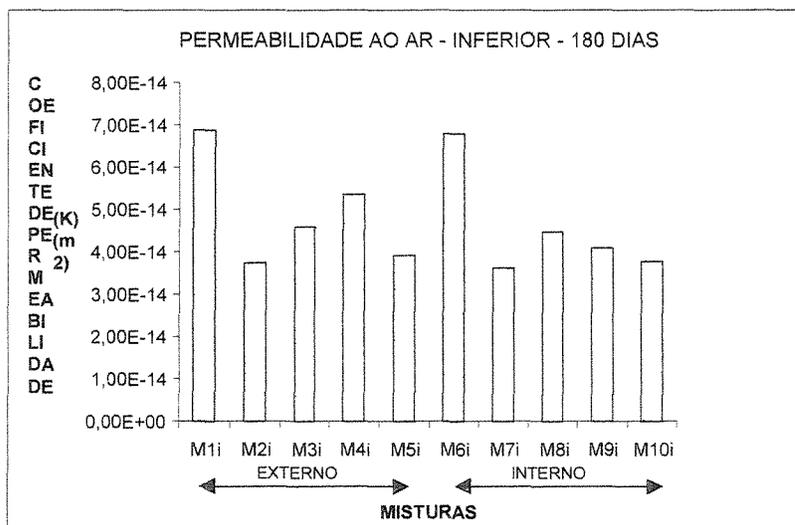
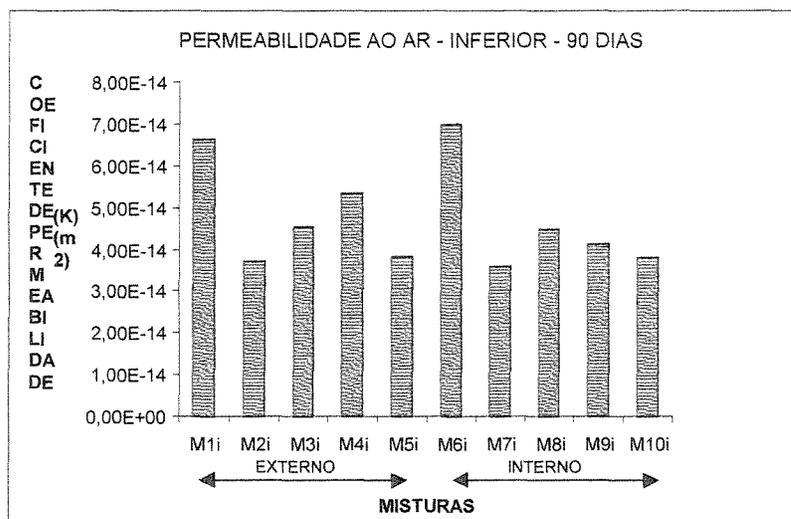
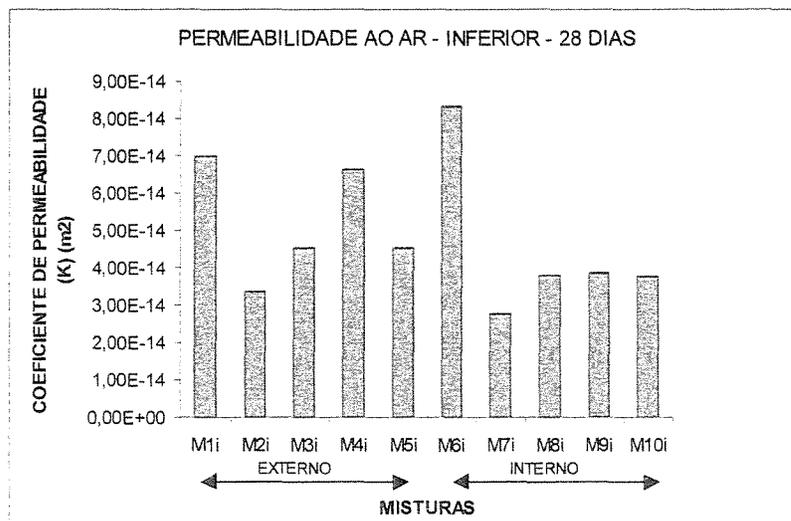
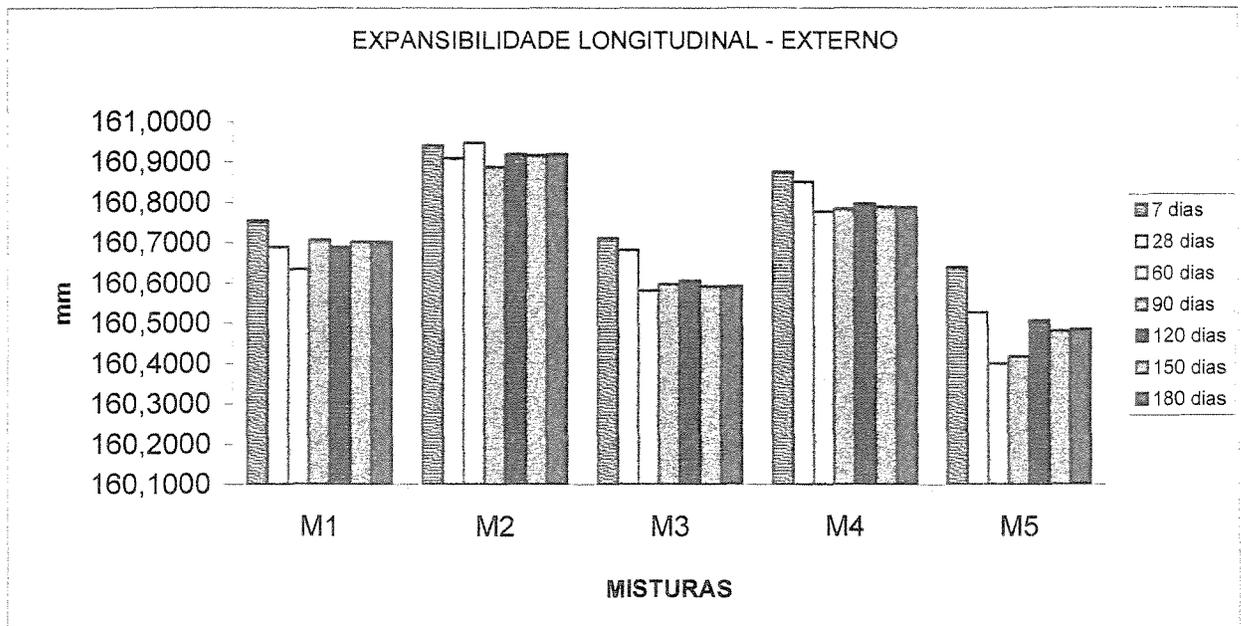
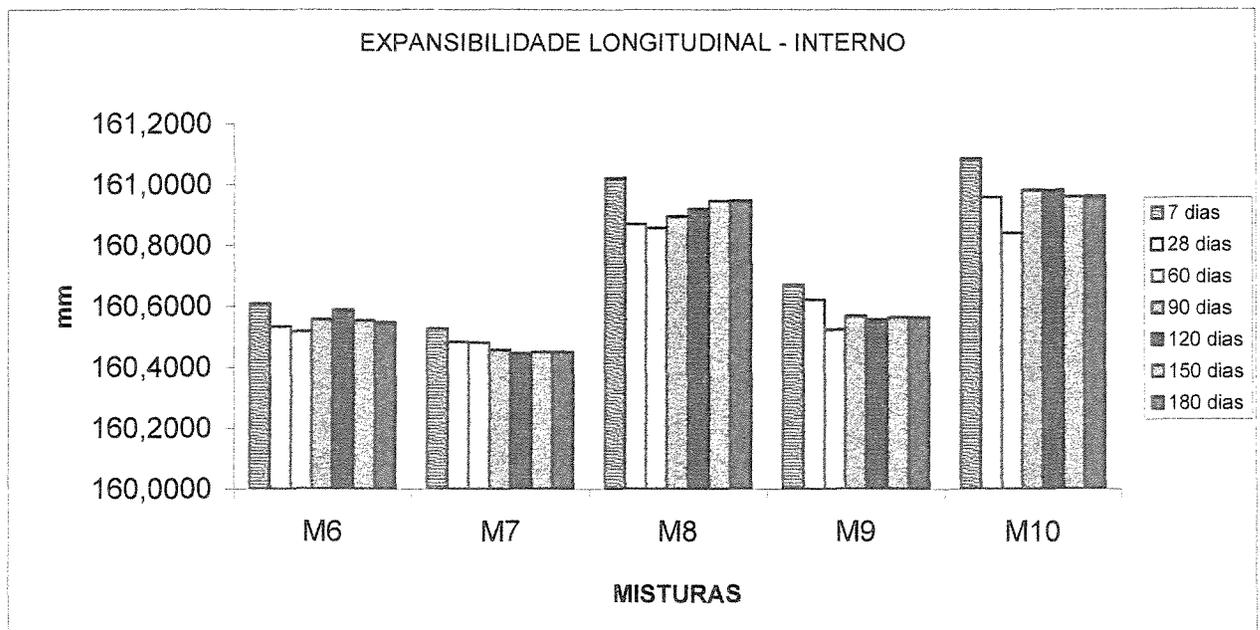


Figura C20 – Permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28, 90 e 180 dias - amostra inferior

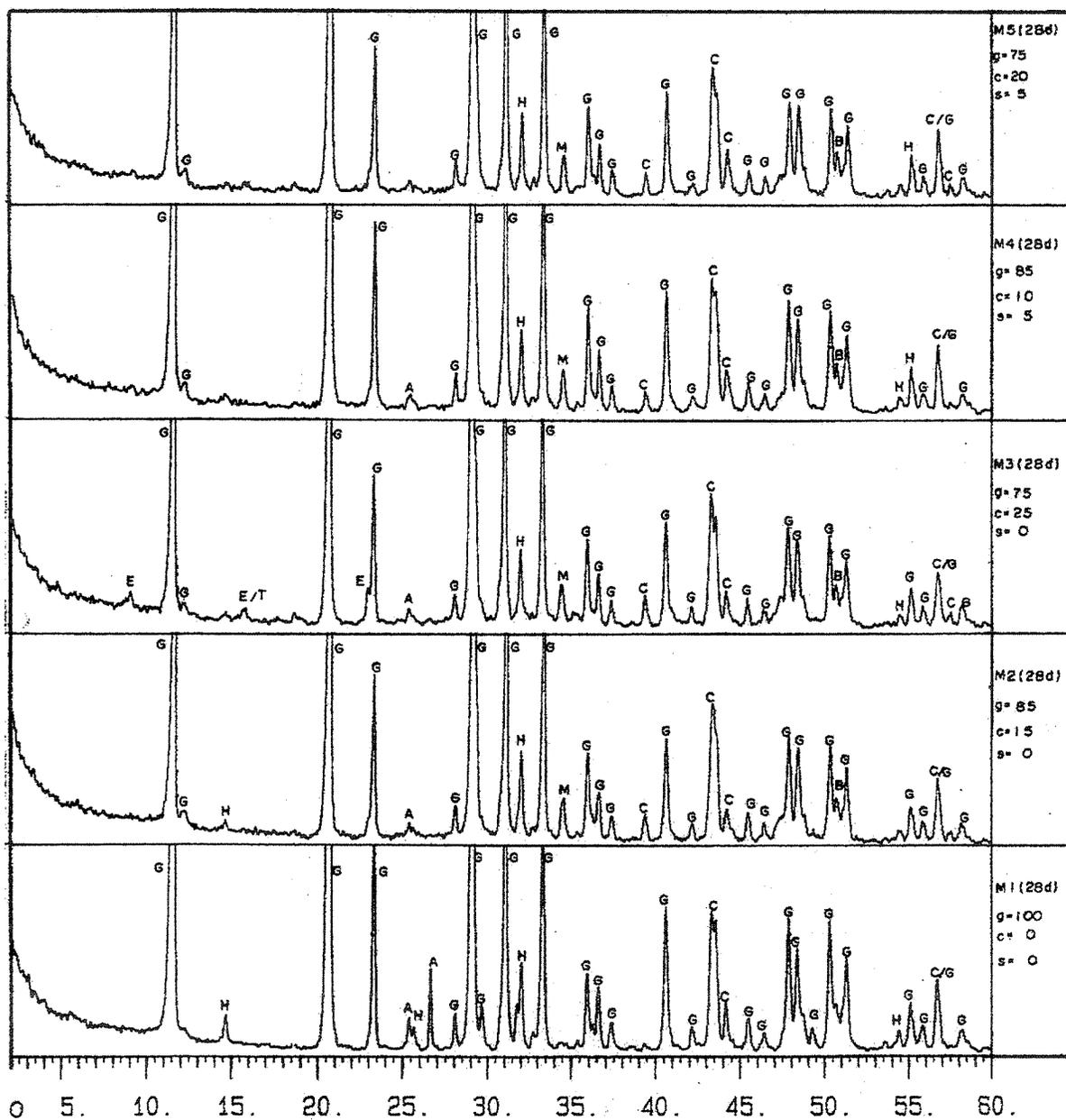


*Figura C21 – Expansibilidade Longitudinal (mm) das amostras externas, nas diferentes idades*



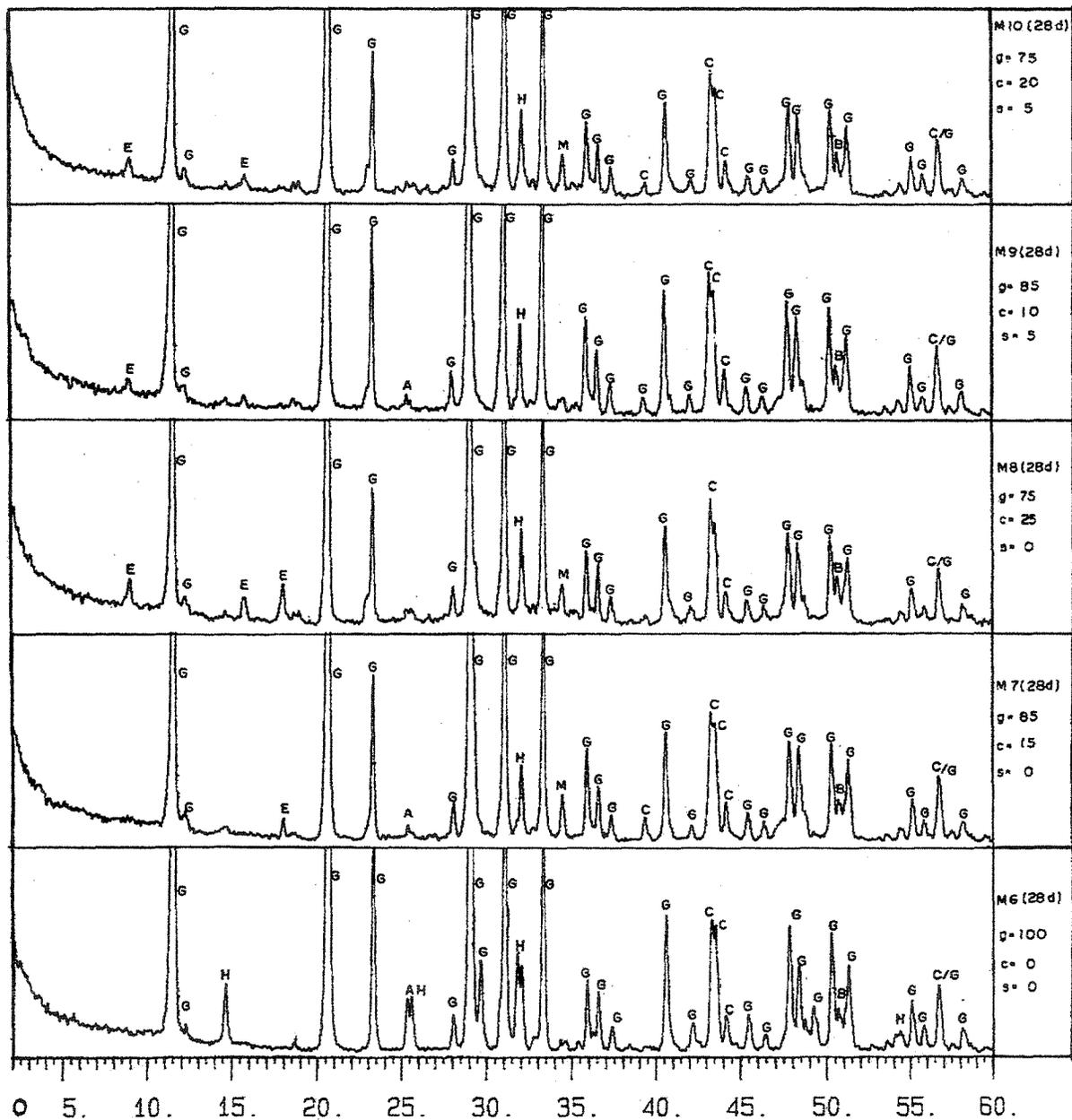
*Figura C22 – Expansibilidade Longitudinal (mm) das amostras internas, nas diferentes idades*

OBS: Como os corpos-de-prova foram moldados em fôrmas diferentes, analisou-se cada mistura individualmente tomando-se como referência a leitura efetuada aos 7 dias.



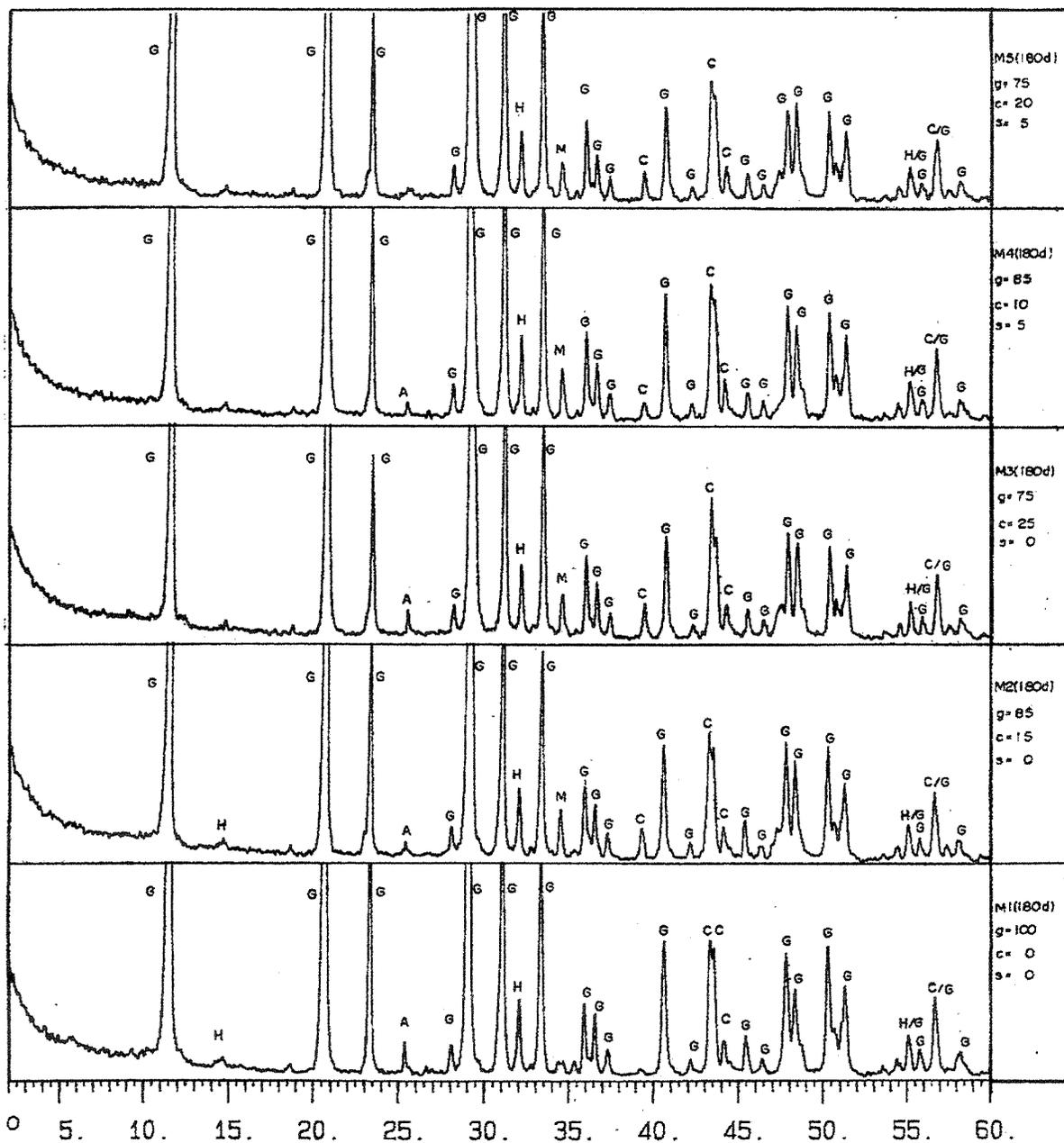
*g* = gesso      *c* = cemento      *s* = sílica ativa  
*A* = anidrita      *B* = C<sub>2</sub>S      *C* = calcita      *E* = etringita      *G* = gipsita      *H* = hemi-hidrato  
*M* = monosulfoaluminato      *T* = thaumasita

**Figura C23 – Difratoograma das misturas aplicadas externamente aos 28 dias**



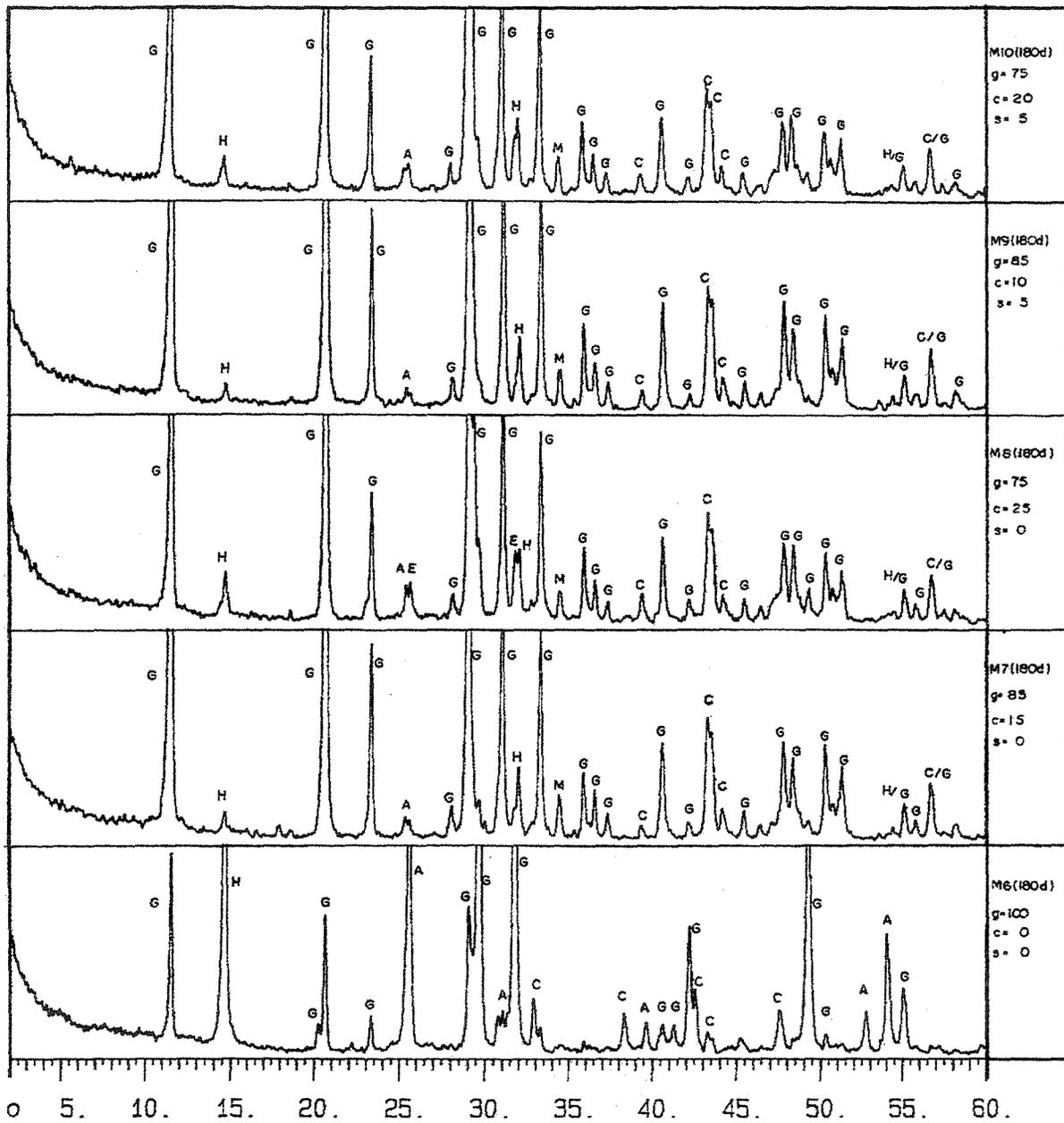
*g = gesso*      *c = cimento*      *s = sílica ativa*  
*A = anidrita*    *B = C<sub>2</sub>S*    *C = calcita*      *E = etringita*      *G = gipsita*      *H = hemi-hidrato*  
*M = monosulfoaluminato*      *T = thaumasita*

**Figura C24 – Difratoograma das misturas aplicadas internamente aos 28 dias**



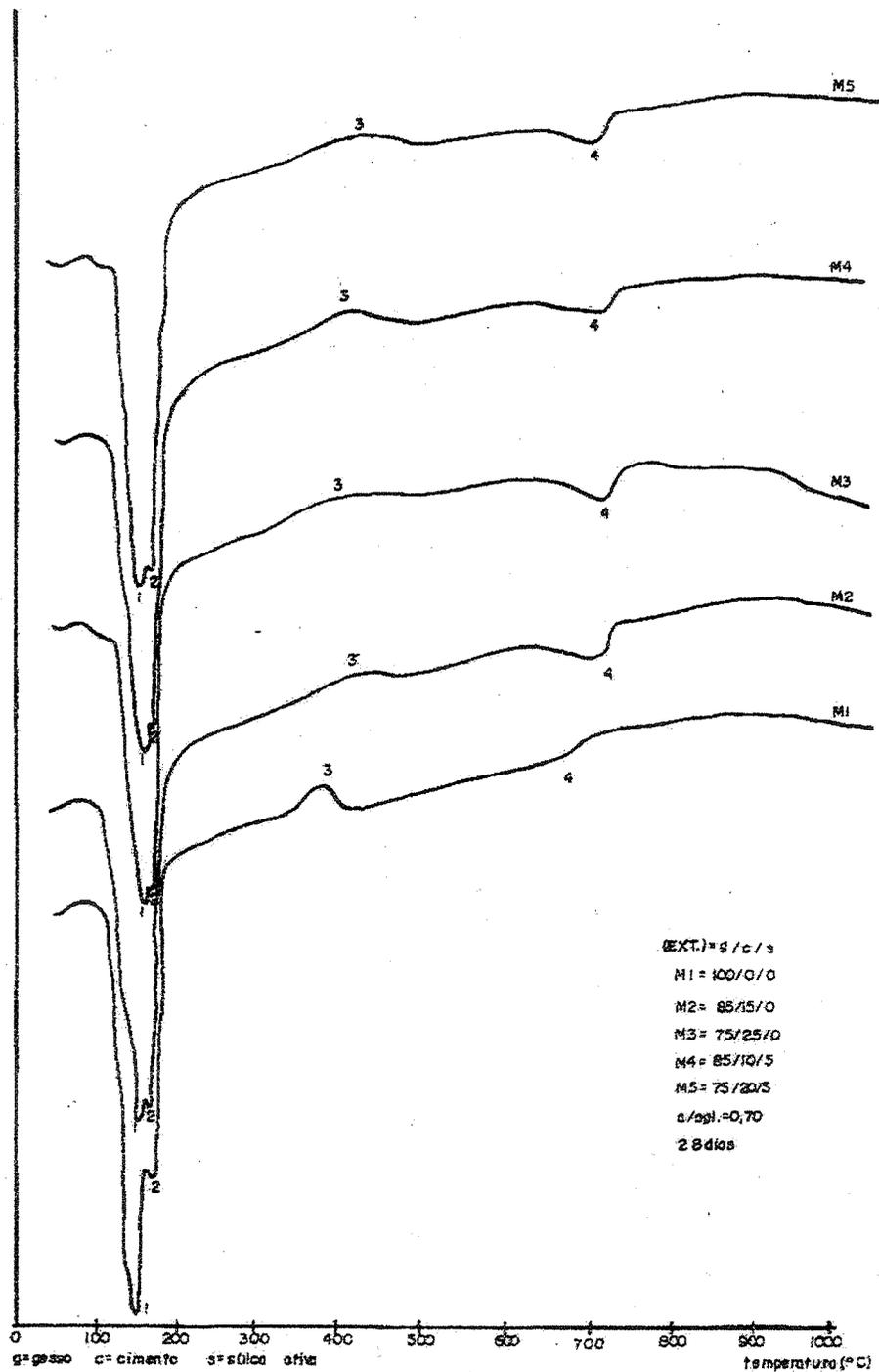
*g = gesso*      *c = cimento*      *s = sílica ativa*  
*A = anidrita*    *B = C<sub>2</sub>S*    *C = calcita*      *E = etringita*      *G = gipsita*      *H = hemi-hidrato*  
*M = monosulfoaluminato*      *T = thaumasita*

**Figura C25 – Difratoograma das misturas aplicadas externamente aos 180 dias**



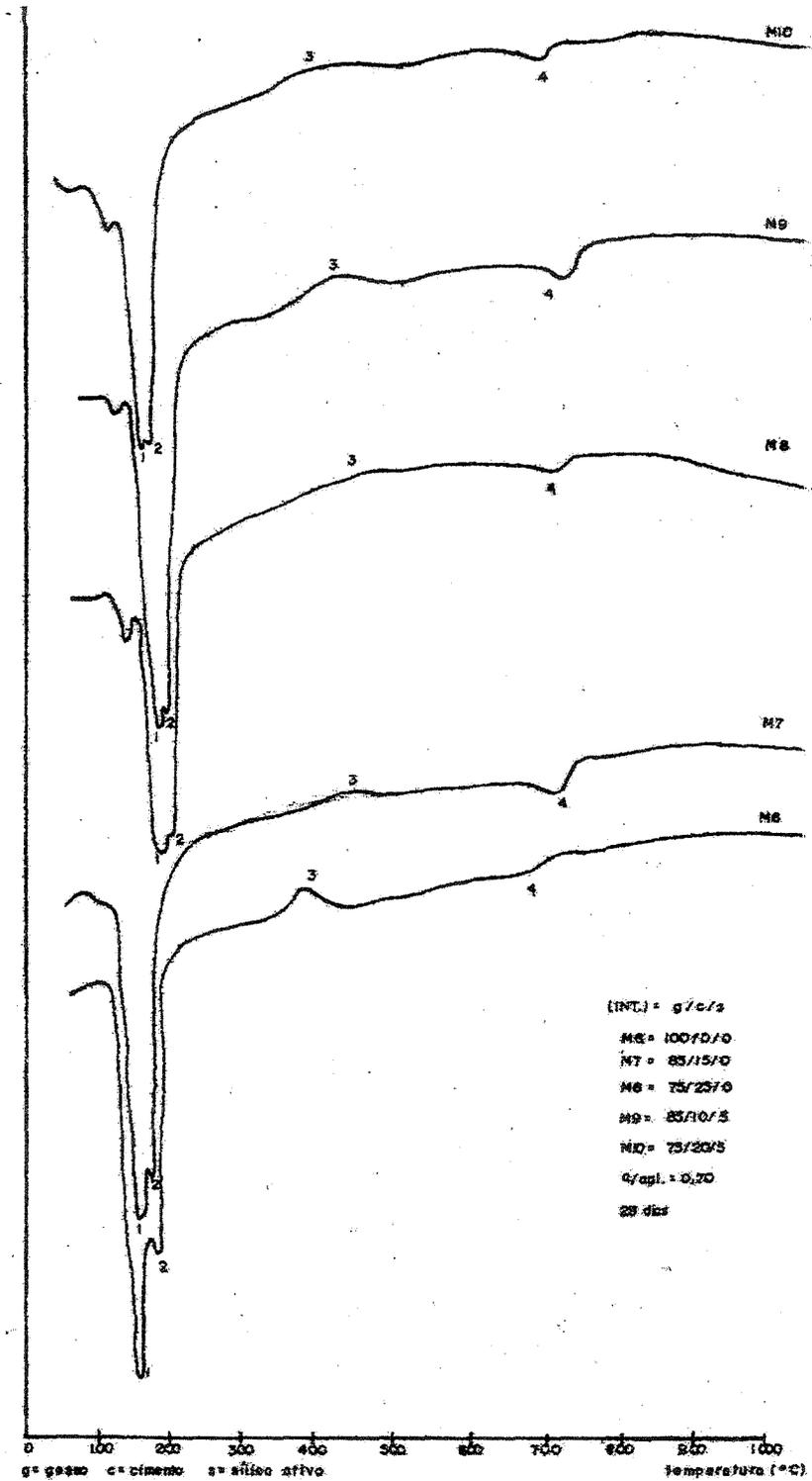
*g = gesso*      *c = cimento*      *s = sílica ativa*  
*A = anidrita*    *B =  $C_2S$*     *C = calcita*      *E = etringita*      *G = gipsita*      *H = hemi-hidrato*  
*M = monosulfoaluminato*      *T = thaumasita*

**Figura C26 – Difratoograma das misturas aplicadas internamente aos 180 dias**



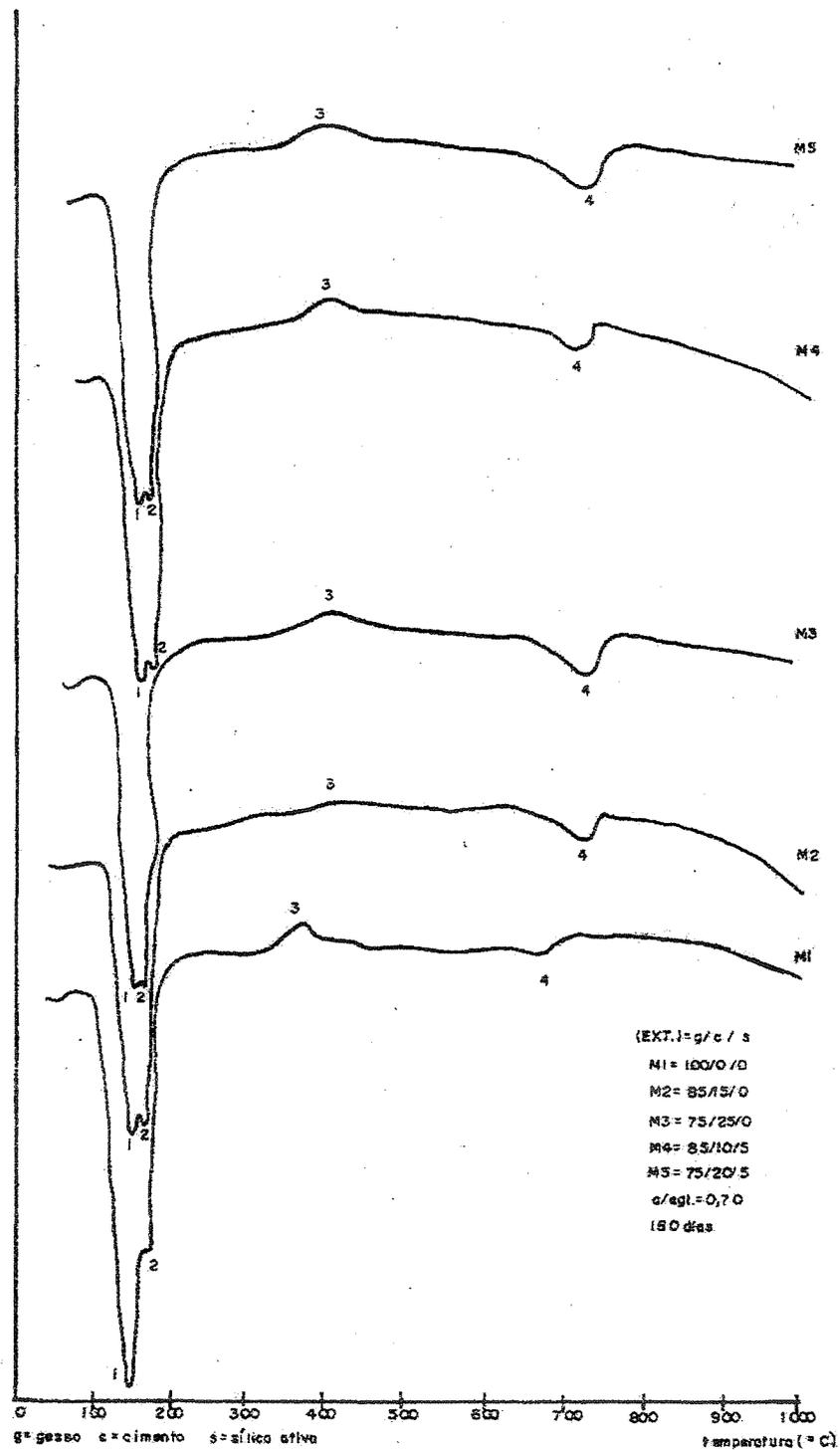
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma$ C<sub>2</sub>S

**Figura C27 – Curvas de análise térmica diferencial das misturas aplicadas externamente aos 28 dias.**



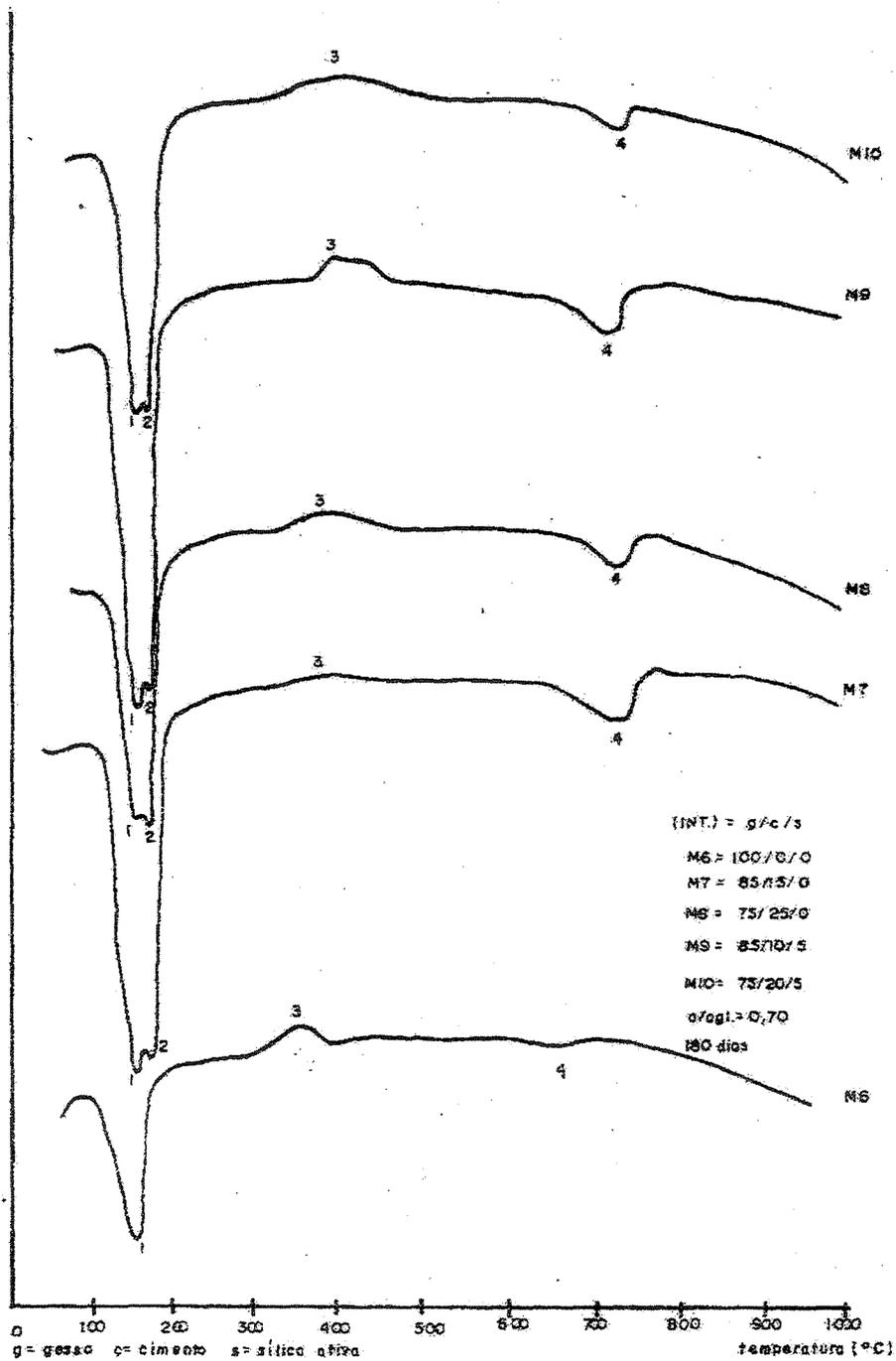
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma C_2S$

Figura C28 – Curvas de análise térmica diferencial das misturas aplicadas internamente aos 28 dias.



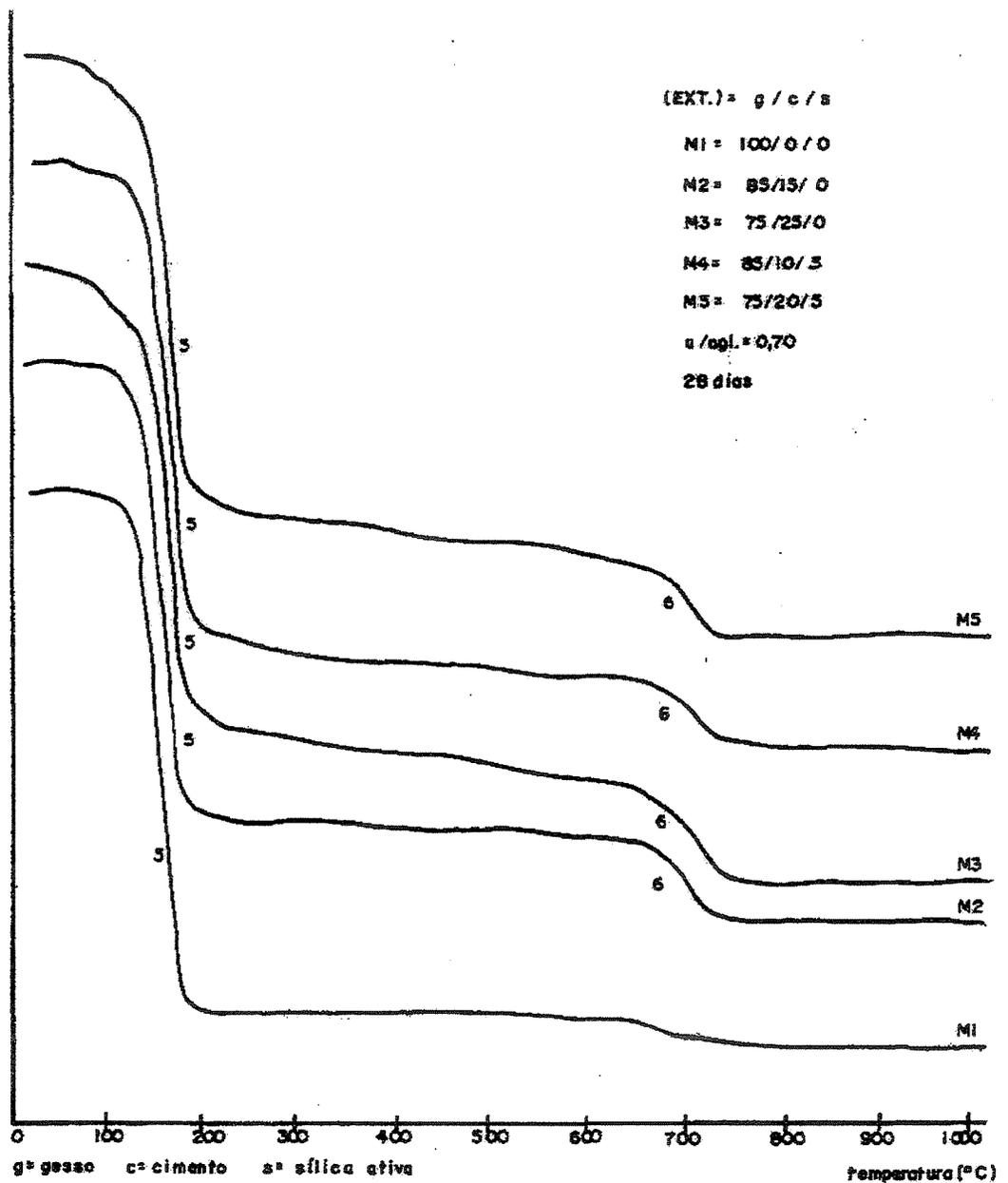
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma C_2S$

**Figura C29 – Curvas de análise térmica diferencial das misturas aplicadas externamente aos 180 dias.**



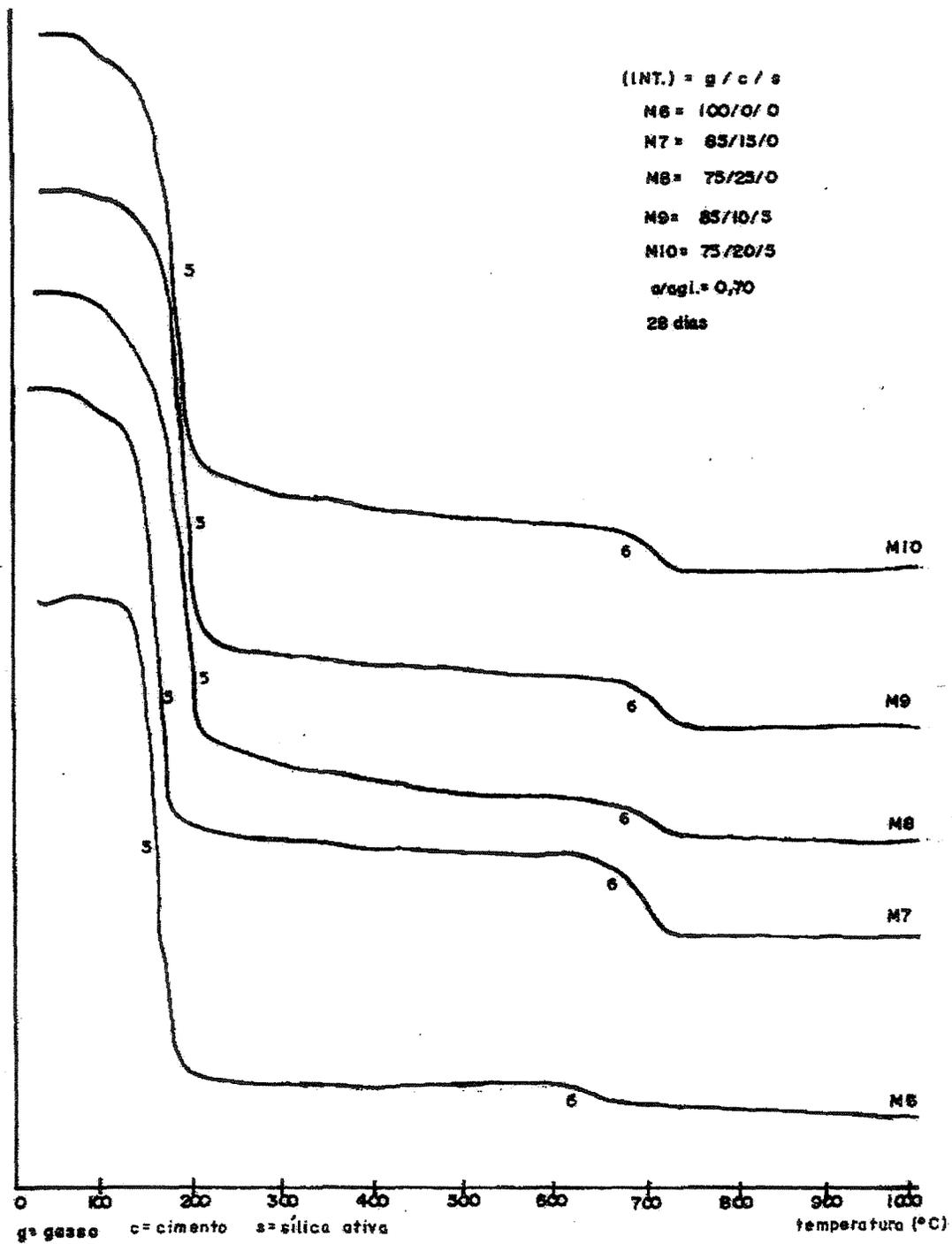
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$

**Figura C30 – Curvas de análise térmica diferencial das misturas aplicadas internamente aos 180 dias.**



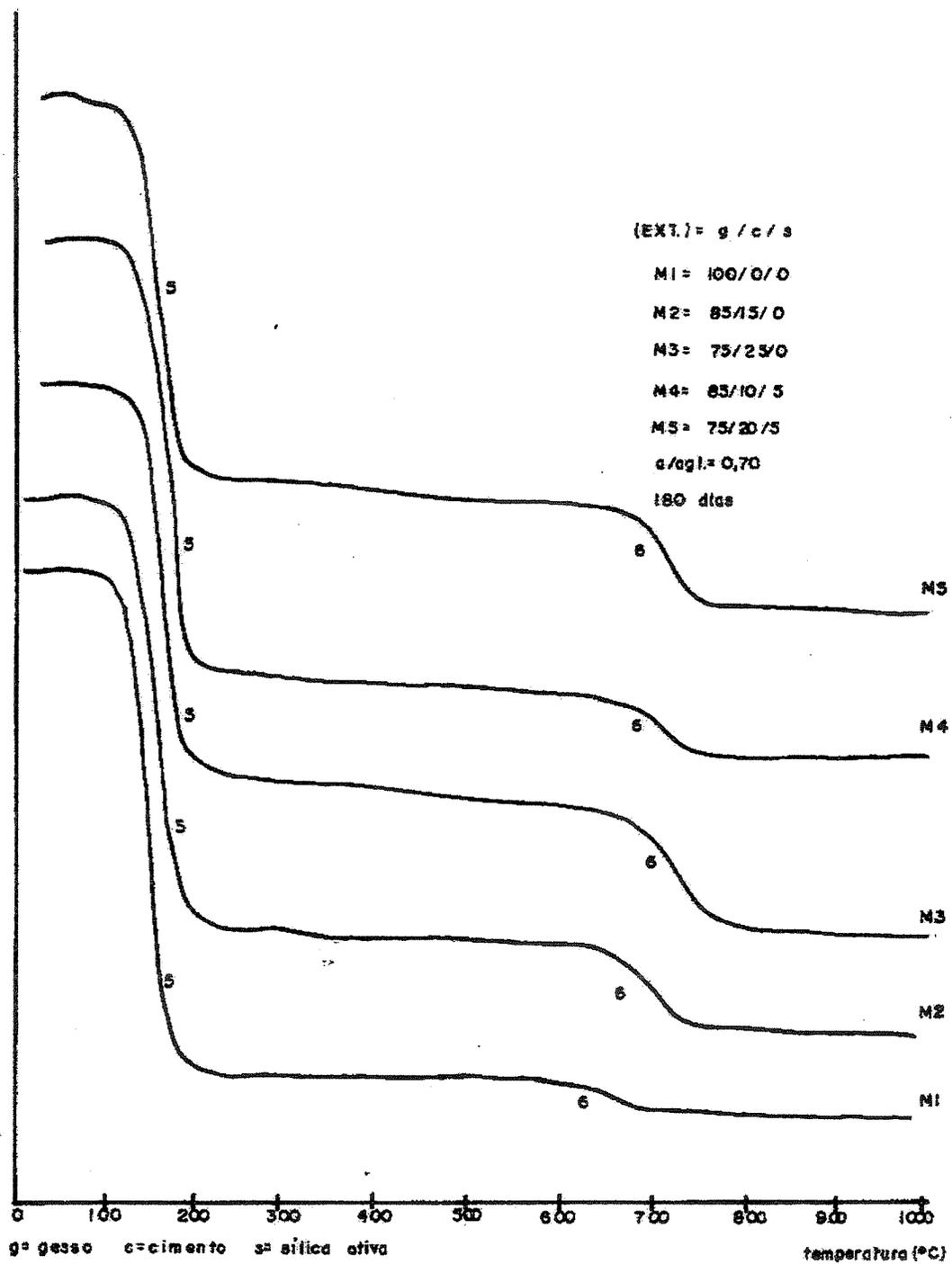
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura C31 – Curvas de análise termogravimétrica das misturas aplicadas externamente aos 28 dias.



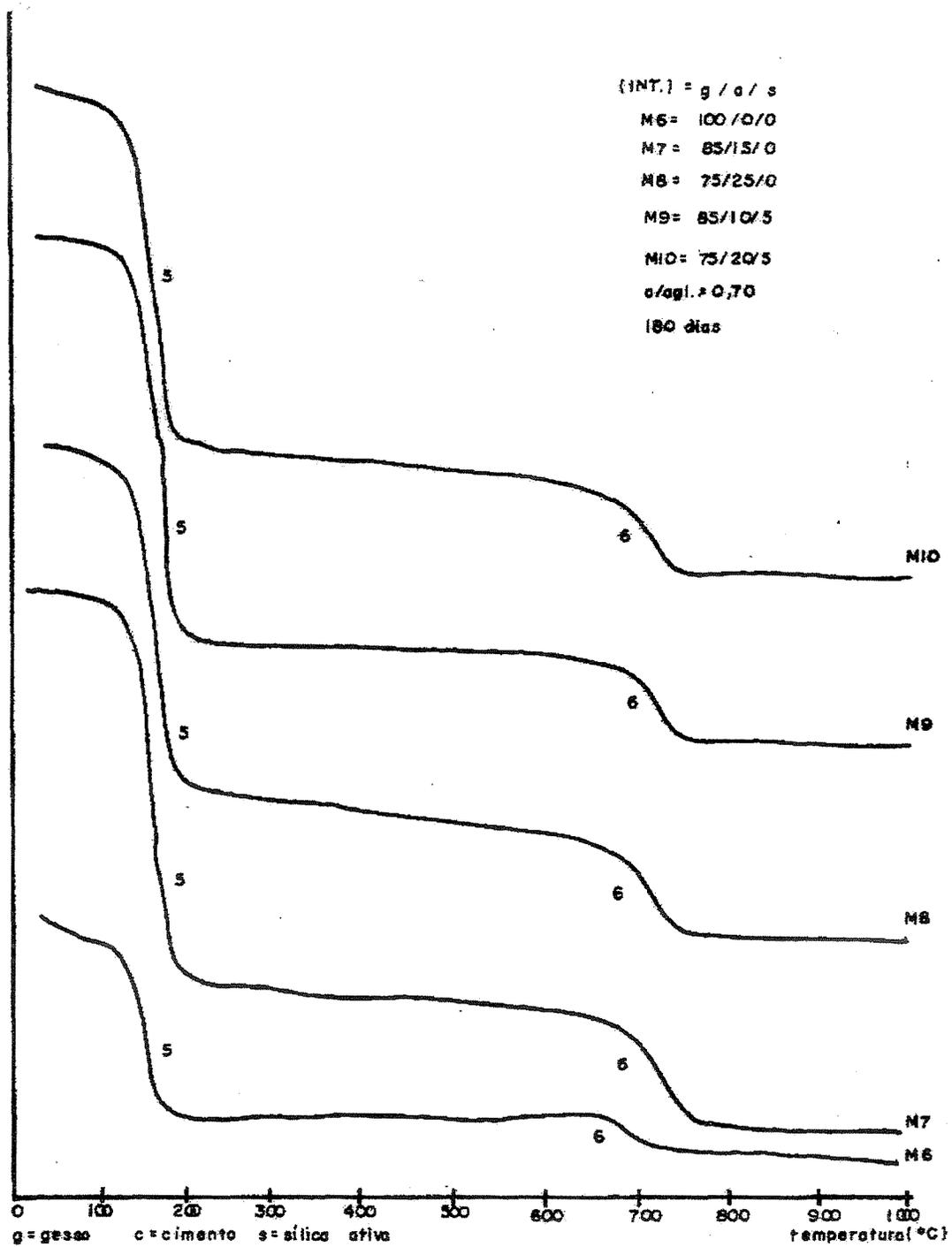
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura C32 – Curvas de análise termogravimétrica das misturas aplicadas internamente aos 28 dias.



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura C33 – Curvas de análise termogravimétrica das misturas aplicadas externamente aos 180 dias.



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>

Figura C34 – Curvas de análise termogravimétrica das misturas aplicadas internamente aos 180 dias.

*Tabela C1 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Compressão das misturas M1 a M5, que diferem de 15% (NBR7215/96) e desvio padrão*

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - externa (dias)				
			3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	90 DIAS	180 DIAS
M1 (externo)	100/0/0	28/Ago	31/Ago	04/Set	25/Set	26/Nov	24/Fev
			<del>1,05</del>	2,45	<del>6,75</del>	2,25	2,20
			1,75	2,20	3,95	2,90	2,35
			1,55	2,35	4,90	2,80	2,55
		media	1,65	2,33	4,43	2,65	2,37
		$\sigma$	0,10	0,10	0,48	0,29	0,14
		-15%	1,40	1,98	3,76	2,25	2,01
		+15%	1,90	2,68	5,09	3,05	2,72
M2 (externo)	85/15/0	29/Ago	01/Set	05/Set	26/Set	27/Nov	25/Fev
			3,30	3,10	<del>3,65</del>	4,20	4,10
			2,85	3,05	5,45	4,20	4,30
			3,45	3,45	5,15	4,70	4,30
		media	3,20	3,20	5,30	4,37	4,23
		$\sigma$	0,25	0,18	0,15	0,24	0,09
		-15%	2,72	2,72	4,51	3,71	3,60
		+15%	3,68	3,68	6,10	5,02	4,87
M3 (externo)	75/25/0	30/Ago	02/Set	06/Set	27/Set	28/Nov	26/Fev
			2,35	2,70	5,35	4,35	4,20
			2,35	2,30	5,35	4,25	4,30
			1,90	<del>1,80</del>	4,95	4,15	4,05
		media	2,20	2,50	5,22	4,25	4,18
		$\sigma$	0,21	0,20	0,19	0,08	0,10
		-15%	1,87	2,13	4,43	3,61	3,56
		+15%	2,53	2,88	6,00	4,89	4,81
M4 (externo)	85/10/5	31/Ago	03/Set	07/Set	28/Set	29/Nov	27/Fev
			2,95	2,8	3,65	3,5	3
			3,1	2,5	4,15	3,85	3,7
			2,95	2,7	4,1	3,05	3,25
		media	3,00	2,67	3,97	3,47	3,32
		$\sigma$	0,07	0,12	0,22	0,33	0,29
		-15%	2,55	2,27	3,37	2,95	2,82
		+15%	3,45	3,07	4,56	3,99	3,81
M5 (externo)	75/20/5	01/Set	04/Set	08/Set	29/Set	30/Nov	28/Fev
			2,45	4,25	4	3,35	3,2
			2,15	4,05	3,75	2,75	3,1
			1,85	3,6	3,75	3,3	2,7
		media	2,15	3,97	3,83	3,13	3,00
		$\sigma$	0,24	0,27	0,12	0,27	0,22
		-15%	1,83	3,37	3,26	2,66	2,55
		+15%	2,47	4,56	4,41	3,60	3,45

**Tabela C2 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Compressão das mistura M6 a M10, que diferem de 15% (NBR7215/96) e desvio padrão**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - interna (dias)				
			3	7	28	90	180
M6 (interno)	100/0/0	28/Ago	31/Ago	04/Set	25/Set	26/Nov	24/Fev
			1,50	2,35	6,70	5,50	5,40
			1,75	2,50	4,80	5,55	5,60
			1,55	2,60	5,20	4,60	4,70
		media	1,60	2,48	5,00	5,22	5,23
		$\sigma$	0,11	0,10	0,20	0,44	0,39
		-15%	1,36	2,11	4,25	4,43	4,45
		+15%	1,84	2,86	5,75	6,00	6,02
M7 (interno)	85/15/0	29/Ago	01/Set	05/Set	26/Set	27/Nov	25/Fev
			2,90	3,50	4,65	4,50	4,50
			3,45	2,95	5,60	4,85	5,00
			3,05	3,15	5,45	4,85	5,10
		media	3,13	3,20	5,23	4,73	4,87
		$\sigma$	0,23	0,23	0,42	0,16	0,26
		-15%	2,66	2,72	4,45	4,02	4,14
		+15%	3,60	3,68	6,02	5,44	5,60
M8 (interno)	75/25/0	30/Ago	02/Set	06/Set	27/Set	28/Nov	26/Fev
			3,35	2,55	5,00	4,85	5,10
			2,15	2,55	5,00	5,30	4,90
			2,15	2,15	5,40	4,85	4,85
		media	2,15	2,42	5,13	5,00	4,95
		$\sigma$	0,00	0,19	0,19	0,21	0,11
		-15%	1,83	2,05	4,36	4,25	4,21
		+15%	2,47	2,78	5,90	5,75	5,69
M9 (interno)	85/10/5	31/Ago	03/Set	07/Set	28/Set	29/Nov	27/Fev
			3,10	2,15	4,65	4,20	4,00
			3,35	2,45	4,45	4,10	4,05
			2,95	2,55	4,95	4,00	4,15
		media	3,13	2,38	4,68	4,10	4,07
		$\sigma$	0,16	0,17	0,21	0,08	0,06
		-15%	2,66	2,03	3,98	3,49	3,46
		+15%	3,60	2,74	5,39	4,72	4,68
M10 (interno)	75/20/5	01/Set	04/Set	08/Set	29/Set	30/Nov	28/Fev
			1,85	2,55	5,70	5,20	4,05
			2,05	2,20	5,15	4,00	4,65
			1,80	2,55	6,70	4,50	5,10
		media	1,90	2,43	5,85	4,57	4,60
		$\sigma$	0,11	0,16	0,64	0,49	0,43
		-15%	1,62	2,07	4,97	3,88	3,91
		+15%	2,19	2,80	6,73	5,25	5,29

**Tabela C3 – Valores das cargas (kN)descontados no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Tração das misturas M1 a M5, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - externa (dias)				
			3 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	90 DIAS	180 DIAS
M1 (externo)	100/0/0	28/Ago	31/Ago	04/Set	25/Set	26/Nov	24/Fev
			2,75	1,60	3,25	1,85	1,80
			2,15	1,75	3,15	1,80	1,65
			2,70	1,70	3,55	1,80	1,80
		media	2,53	1,68	3,32	1,82	1,75
		$\sigma$	0,27	0,06	0,17	0,02	0,07
		-15%	2,15	1,43	2,82	1,54	1,49
		+15%	2,91	1,94	3,81	2,09	2,01
M2 (externo)	85/15/0	29/Ago	01/Set	05/Set	26/Set	27/Nov	25/Fev
			2,30	2,30	4,35	3,65	3,50
			2,10	2,35	4,35	3,65	3,45
			2,35	2,25	4,05	3,50	3,15
		media	2,25	2,30	4,25	3,60	3,37
		$\sigma$	0,11	0,04	0,14	0,07	0,15
		-15%	1,91	1,96	3,61	3,06	2,86
		+15%	2,59	2,65	4,89	4,14	3,87
M3 (externo)	75/25/0	30/Ago	02/Set	06/Set	27/Set	28/Nov	26/Fev
			1,15	1,40	3,55	2,85	2,75
			1,25	1,15	3,00	3,10	3,00
			1,40	1,35	3,10	2,90	2,85
		media	1,27	1,30	3,22	2,95	2,87
		$\sigma$	0,10	0,11	0,15	0,11	0,10
		-15%	1,08	1,11	2,73	2,51	2,44
		+15%	1,46	1,50	3,70	3,39	3,30
M4 (externo)	85/10/5	31/Ago	03/Set	07/Set	28/Set	29/Nov	27/Fev
			1,45	1,50	3,00	2,15	2,05
			1,00	2,15	2,65	2,55	2,40
			1,00	1,40	2,85	2,00	2,15
		media	1,00	1,45	2,83	2,23	2,20
		$\sigma$	0,00	0,05	0,14	0,23	0,15
		-15%	0,85	1,23	2,41	1,90	1,87
		+15%	1,15	1,67	3,26	2,57	2,53
M5 (externo)	75/20/5	01/Set	04/Set	08/Set	29/Set	30/Nov	28/Fev
			1,35	3,00	3,25	1,60	2,10
			1,15	3,35	3,15	2,10	1,65
			1,45	2,95	3,00	2,00	1,95
		media	1,32	3,10	3,13	1,90	1,90
		$\sigma$	0,12	0,18	0,10	0,22	0,19
		-15%	1,12	2,64	2,66	1,62	1,62
		+15%	1,51	3,57	3,60	2,19	2,19

*Tabela C4 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Tração das misturas M6 a M10, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão*

Mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - interna (dias)				
			3	7	28	90	180
M6 (interno)	100/0/0	28/Ago	31/Ago	04/Set	25/Set	26/Nov	24/Fev
			2,35	1,70	3,80	1,95	2,85
			2,40	1,65	3,55	2,50	2,50
			2,70	1,65	3,55	2,35	2,65
		media	2,48	1,67	3,63	2,27	2,67
		$\sigma$	0,15	0,02	0,12	0,23	0,14
		-15%	2,11	1,42	3,09	1,93	2,27
		+15%	2,86	1,92	4,18	2,61	3,07
M7 (interno)	85/15/0	29/Ago	01/Set	05/Set	26/Set	27/Nov	25/Fev
			2,10	2,05	3,05	3,45	3,65
			2,10	2,30	<del>4,25</del>	3,65	3,80
			2,30	2,00	3,45	3,55	3,60
		media	2,17	2,12	3,25	3,55	3,68
		$\sigma$	0,09	0,13	0,20	0,08	0,08
		-15%	1,84	1,80	2,76	3,02	3,13
		+15%	2,49	2,43	3,74	4,08	4,24
M8 (interno)	75/25/0	30/Ago	02/Set	06/Set	27/Set	28/Nov	26/Fev
			1,60	<del>2,00</del>	3,10	3,10	3,45
			1,25	1,40	3,15	3,25	3,05
			1,35	1,25	3,80	2,85	2,90
		media	1,40	1,33	3,35	3,07	3,13
		$\sigma$	0,15	0,08	0,32	0,16	0,23
		-15%	1,19	1,13	2,85	2,61	2,66
		+15%	1,61	1,52	3,85	3,53	3,60
M9 (interno)	85/10/5	31/Ago	03/Set	07/Set	28/Set	29/Nov	27/Fev
			<del>0,85</del>	1,55	3,15	2,95	2,50
			1,30	1,45	3,05	2,55	2,85
			1,10	1,50	3,00	2,85	2,90
		media	1,20	1,50	3,07	2,78	2,75
		$\sigma$	0,10	0,04	0,06	0,17	0,18
		-15%	1,02	1,28	2,61	2,37	2,34
		+15%	1,38	1,73	3,53	3,20	3,16
M10 (interno)	75/20/5	01/Set	04/Set	08/Set	29/Set	30/Nov	28/Fev
			1,05	1,55	3,30	3,30	3,70
			<del>1,60</del>	1,70	3,00	3,10	3,00
			1,10	1,35	3,00	3,05	2,95
		media	1,08	1,53	3,10	3,15	3,22
		$\sigma$	0,03	0,14	0,14	0,11	0,34
		-15%	0,91	1,30	2,64	2,68	2,73
		+15%	1,24	1,76	3,57	3,62	3,70

**Tabela C5 – Valores, média e desvio padrão do ensaio de expansibilidade longitudinal aos 7, 28, 60, 90, 120, 150, 180 dias**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - externa (dias)							
			inicial	7 dias	28 dias	60 dias	90 dias	120 dias	150 dias	180 dias
M1	100/0/0		160,0000	160,7410	160,7000	160,6776	160,8000	160,6634	160,7000	160,6991
			160,0000	161,1643	161,1083	160,9834	160,9782	161,0057	161,0060	161,0061
			160,0000	160,3586	160,2606	160,2423	160,3405	160,3971	160,3990	160,3989
			media	160,0000	160,7548	160,6896	160,6344	160,7062	160,6887	160,7017
		$\sigma$		0,4030	0,4239	0,3724	0,3290	0,3051	0,3035	0,3036
M2	85/15/0		160,0000	160,7612	160,6876	160,6942	160,6858	160,6954	160,6880	160,6980
			160,0000	160,8994	160,8447	160,9236	160,8158	160,8747	160,8952	160,8850
			160,0000	161,1626	161,1938	161,2260	161,1632	161,1867	161,1658	161,1750
			media	160,0000	160,9411	160,9087	160,9479	160,8883	160,9189	160,9163
		$\sigma$		0,2039	0,2591	0,2667	0,2468	0,2466	0,2396	0,2403
M3	75/25/0		160,0000	160,6694	160,6877	160,5699	160,5338	160,5990	160,5770	160,5771
			160,0000	160,9456	160,8689	160,8710	160,8364	160,8748	160,8600	160,8601
			160,0000	160,5216	160,4889	160,3024	160,4204	160,3448	160,3402	160,3400
			media	160,0000	160,7122	160,6818	160,5811	160,5969	160,6062	160,5924
		$\sigma$		0,2152	0,1901	0,2845	0,2151	0,2551	0,2602	0,2604
M4	85/10/5		160,0000	160,8005	160,9620	160,6950	160,7588	160,7472	160,7608	160,7607
			160,0000	161,1576	161,0363	161,1276	161,0166	161,0472	161,0516	161,0514
			160,0000	160,6676	160,5547	160,5116	160,5766	160,5931	160,5550	160,5552
			media	160,0000	160,8752	160,8510	160,7781	160,7840	160,7958	160,7881
		$\sigma$		0,2534	0,2593	0,3163	0,2211	0,2309	0,2495	0,2493
M5	75/20/5		160,0000	160,7711	160,6341	160,5112	160,5083	160,6046	160,5782	160,5800
			160,0000	160,4738	160,3477	160,2363	160,2795	160,3788	160,3875	160,3870
			160,0000	160,6688	160,5966	160,4556	160,4687	160,5391	160,4810	160,4891
			media	160,0000	160,6379	160,5261	160,4010	160,4188	160,5079	160,4822
		$\sigma$		0,1610	0,1567	0,1453	0,1223	0,1162	0,0964	0,0966
mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - interna (dias)							
M6	100/0/0		160,0000	160,7389	160,6462	160,5546	160,5812	160,5961	160,5980	160,5979
			160,0000	160,4454	160,4385	160,4860	160,4418	160,4785	160,5100	160,4909
			160,0000	160,6430	160,5210	160,5198	160,6515	160,6940	160,5562	160,5563
			media	160,0000	160,6091	160,5352	160,5201	160,5582	160,5896	160,5547
		$\sigma$		0,1497	0,1046	0,0343	0,1067	0,1079	0,0440	0,0639
M7	85/15/0		160,0000	160,4776	160,4176	160,4532	160,4371	160,4432	160,4394	160,4395
			160,0000	160,6882	160,6858	160,6833	160,7029	160,6424	160,6440	160,6439
			160,0000	160,4204	160,3451	160,3086	160,2356	160,2552	160,2681	160,2680
			media	160,0000	160,5287	160,4828	160,4817	160,4585	160,4469	160,4505
		$\sigma$		0,1410	0,1795	0,1890	0,2344	0,1936	0,1882	0,1882
M8	75/25/0		160,0000	161,1104	160,9566	160,8620	160,8033	160,8584	160,8586	160,8587
			160,0000	160,8563	160,7453	160,7556	160,8536	160,8968	160,9462	160,9460
			160,0000	161,0983	160,9117	160,9588	161,0338	161,0073	161,0373	161,0374
			media	160,0000	161,0217	160,8712	160,8588	160,8969	160,9208	160,9474
		$\sigma$		0,1433	0,1113	0,1016	0,1212	0,0773	0,0894	0,0894
M9	85/10/5		160,0000	160,5820	160,4837	160,3400	160,4750	160,4002	160,4505	160,4506
			160,0000	160,5200	160,4671	160,4541	160,4968	160,4811	160,4526	160,4530
			160,0000	160,9139	160,9167	160,7792	160,7366	160,7936	160,7900	160,7898
			media	160,0000	160,6720	160,6225	160,5244	160,5695	160,5583	160,5644
		$\sigma$		0,2118	0,2549	0,2279	0,1452	0,2078	0,1964	0,1961
M10	75/20/5		160,0000	161,4880	161,4097	161,3622	161,4746	161,4215	161,4271	161,4272
			160,0000	160,6891	160,5185	160,3316	160,4109	160,4845	160,4024	160,4029
			160,0000	161,0818	160,9503	160,8332	161,0651	161,0390	161,0546	161,0547
			media	160,0000	161,0863	160,9595	160,8423	160,9835	160,9817	160,9614
		$\sigma$		0,3995	0,4457	0,5154	0,5365	0,4711	0,5187	0,5185

*Tabela C6 – Valores, média e desvio padrão do ensaio de absorção capilar e perda de massa aos 28, 90 e 180 dias*

28 DIAS misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
M1	0,0384	0,0494	3,07E-01	0,35	6,72	0,3
M2	0,0371	0,0498	3,57E-01	0,21	3,42	0,28
M3	0,0376	0,0502	3,53E-01	0,16	3,16	0,27
M4	0,0361	0,0487	3,56E-01	0,21	2,93	0,26
M5	0,0363	0,0490	3,56E-01	0,13	2,51	0,12
M6	0,0383	0,0494	3,13E-01	0,08	6,93	0,03
M7	0,0368	0,0496	3,61E-01	0,15	5,17	0,15
M8	0,0375	0,0500	3,51E-01	0,09	3,94	0,08
M9	0,0361	0,0487	3,53E-01	0,21	3,48	0,19
M10	0,0366	0,0488	3,42E-01	0,36	2,78	0,37

90 DIAS misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
M1	0,0369	0,0486	3,28E-01	0,27	4,23	0,25
M2	0,0369	0,0493	3,49E-01	0,2	2,74	0,2
M3	0,0369	0,0495	3,52E-01	0,18	1,87	0,22
M4	0,0368	0,0489	3,39E-01	0,18	2,46	0,19
M5	0,0359	0,0484	3,51E-01	0,1	2,15	0,09
M6	0,0370	0,0488	3,29E-01	0,09	3,69	0,09
M7	0,0378	0,0506	3,60E-01	0,19	3,06	0,16
M8	0,0382	0,0503	3,41E-01	0,1	2,56	0,06
M9	0,0363	0,0488	3,53E-01	0,12	3,04	0,17
M10	0,0367	0,0489	3,42E-01	0,44	2,49	0,38

180 DIAS misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
M1	0,0366	0,0469	2,88E-01	0,25	4,64	0,25
M2	0,0367	0,0484	3,29E-01	0,2	2,81	0,49
M3	0,0367	0,0486	3,32E-01	0,21	1,98	0,21
M4	0,0351	0,0466	3,24E-01	0,2	2,48	0,2
M5	0,0355	0,0458	2,88E-01	0,08	2,25	0,08
M6	0,0375	0,0481	2,99E-01	0,09	4,05	0,04
M7	0,0370	0,0487	3,30E-01	0,15	3,08	0,15
M8	0,0382	0,0497	3,21E-01	0,07	2,49	0,07
M9	0,0369	0,0488	3,34E-01	0,16	3,11	0,16
M10	0,0376	0,0486	3,08E-01	0,4	2,55	0,4

**Tabela C7 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 28 dias**

Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1s	8,59E-14	2,71E-14
M2s	4,16E-14	2,77E-15
M3s	4,60E-14	3,43E-15
M4s	7,08E-14	1,97E-14
M5s	4,56E-14	2,81E-15
M6s	8,74E-14	0,00E+00
M7s	3,34E-14	3,01E-16
M8s	4,85E-14	0,00E+00
M9s	4,26E-14	6,44E-15
M10s	4,06E-14	6,77E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1i	6,99E-14	9,31E-15
M2i	3,38E-14	3,41E-15
M3i	4,52E-14	2,23E-15
M4i	6,63E-14	8,38E-15
M5i	4,52E-14	0,00E+00
M6i	8,32E-14	1,32E-14
M7i	2,76E-14	2,89E-15
M8i	3,80E-14	7,79E-16
M9i	3,88E-14	2,04E-15
M10i	3,77E-14	4,25E-15

**Tabela C8 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 90 dias**

Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1s	7,08E-14	1,97E-14
M2s	3,85E-14	1,60E-15
M3s	4,81E-14	6,24E-16
M4s	5,96E-14	1,92E-15
M5s	4,52E-14	4,43E-15
M6s	7,38E-14	7,39E-15
M7s	3,94E-14	2,10E-15
M8s	5,19E-14	2,18E-15
M9s	4,48E-14	3,80E-15
M10s	4,44E-14	2,13E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1i	6,63E-14	1,85E-14
M2i	3,72E-14	1,12E-15
M3i	4,56E-14	5,61E-16
M4i	5,35E-14	1,54E-15
M5i	3,83E-14	3,95E-16
M6i	6,99E-14	3,96E-15
M7i	3,59E-14	6,96E-16
M8i	4,48E-14	2,71E-15
M9i	4,13E-14	3,23E-15
M10i	3,80E-14	3,12E-15

**Tabela C9 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 180 dias**

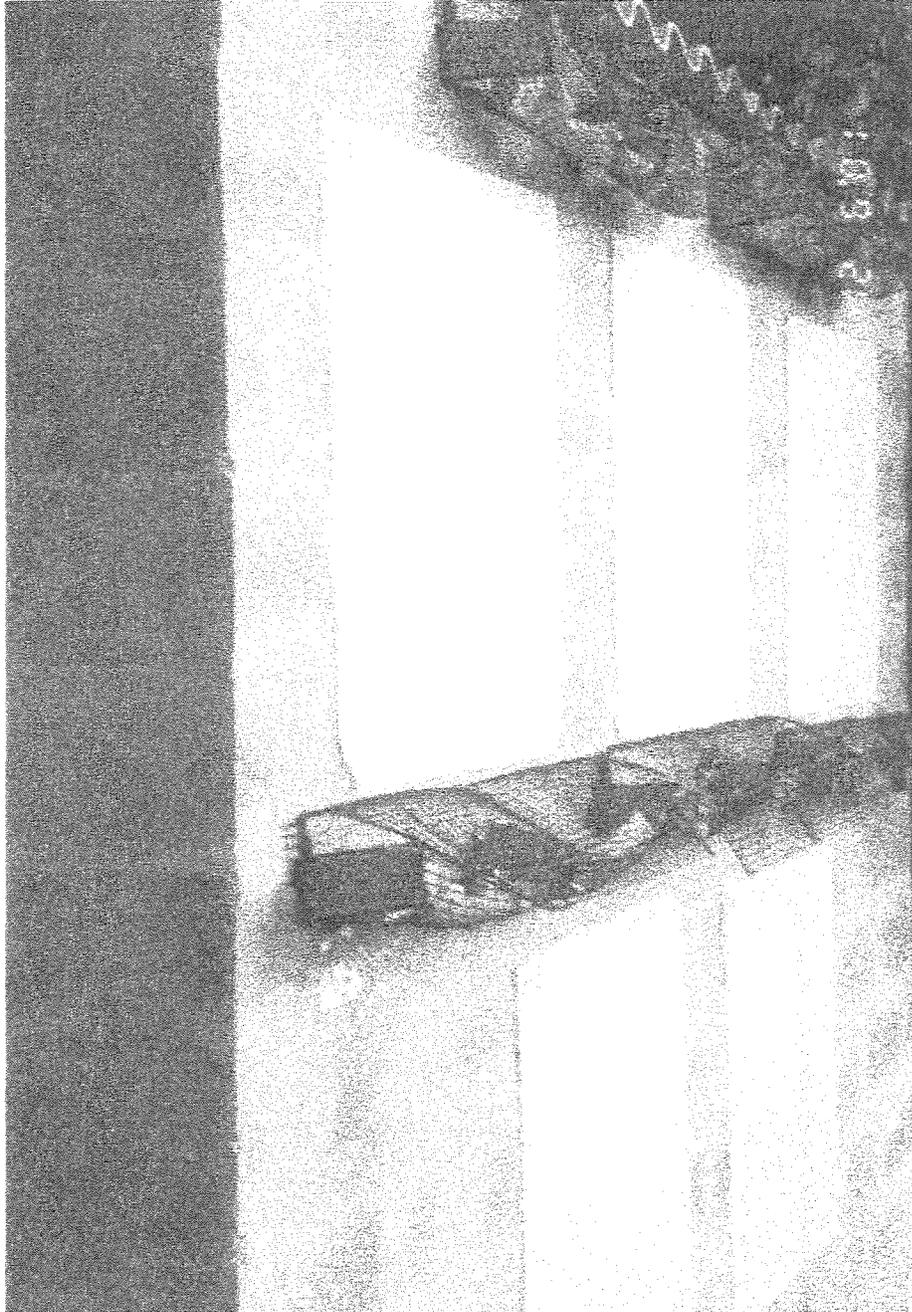
Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1s	7,49E-14	2,55E-14
M2s	3,88E-14	1,22E-15
M3s	4,90E-14	6,48E-16
M4s	6,02E-14	9,79E-16
M5s	4,60E-14	4,59E-15
M6s	7,28E-14	5,74E-15
M7s	3,97E-14	8,51E-16
M8s	5,14E-14	0,00E+00
M9s	4,44E-14	4,28E-15
M10s	4,44E-14	1,07E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
M1i	6,90E-14	2,15E-14
M2i	3,74E-14	1,51E-15
M3i	4,60E-14	1,14E-15
M4i	5,35E-14	3,09E-15
M5i	3,91E-14	2,48E-15
M6i	6,81E-14	6,28E-15
M7i	3,61E-14	1,06E-15
M8i	4,48E-14	3,80E-15
M9i	4,09E-14	3,63E-15
M10i	3,77E-14	4,25E-15

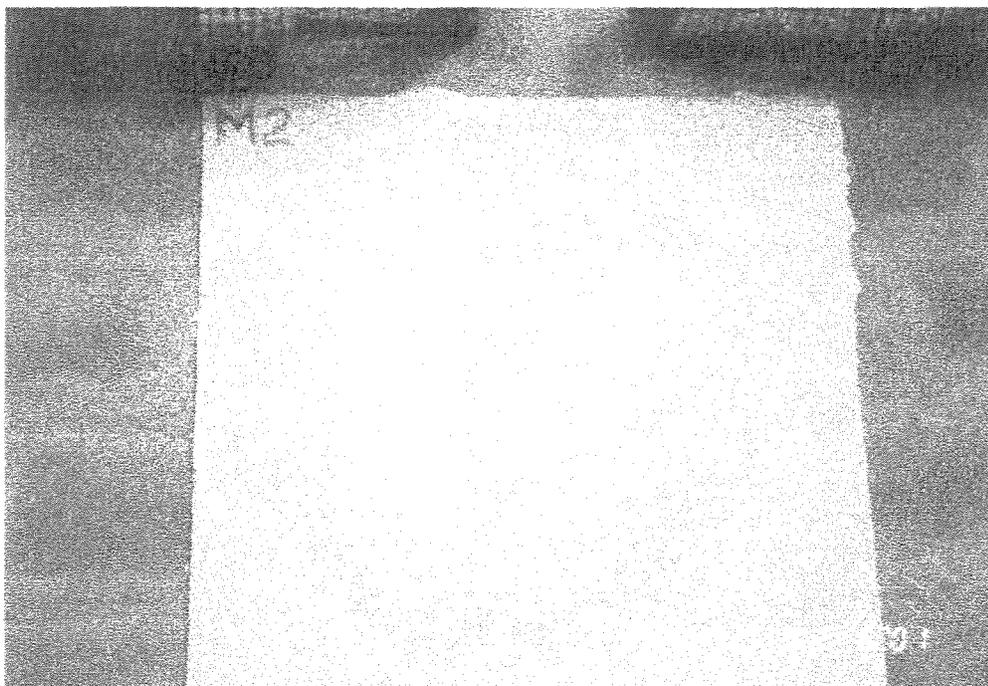
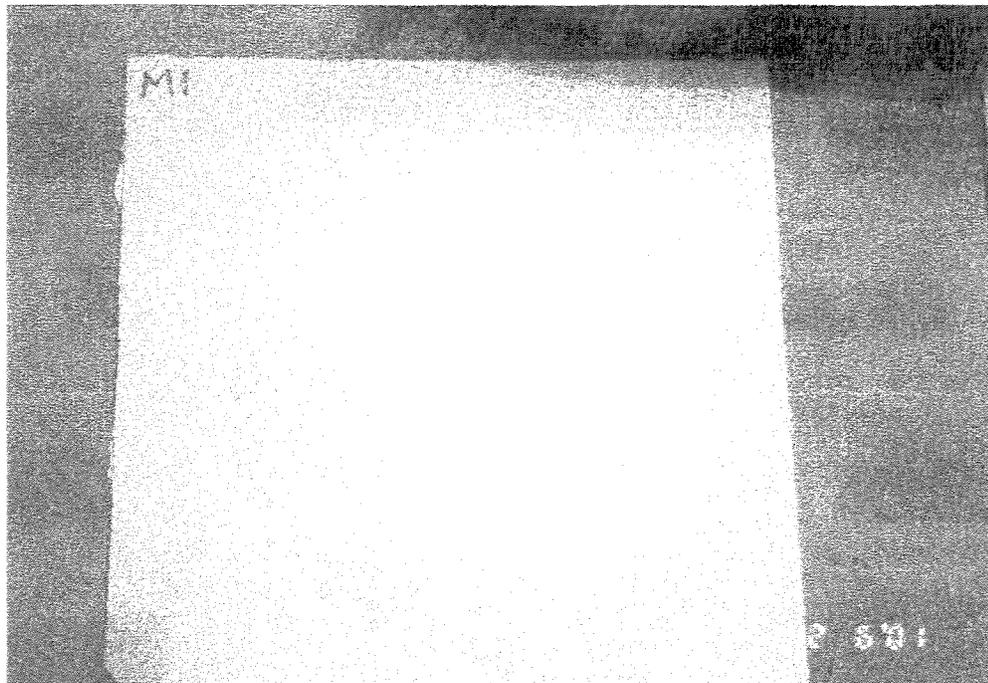
**ANEXO D**  
**FOTOGRAFIAS DOS PAINÉIS E CORPOS-DE-PROVA COM CURA EXTERNA**



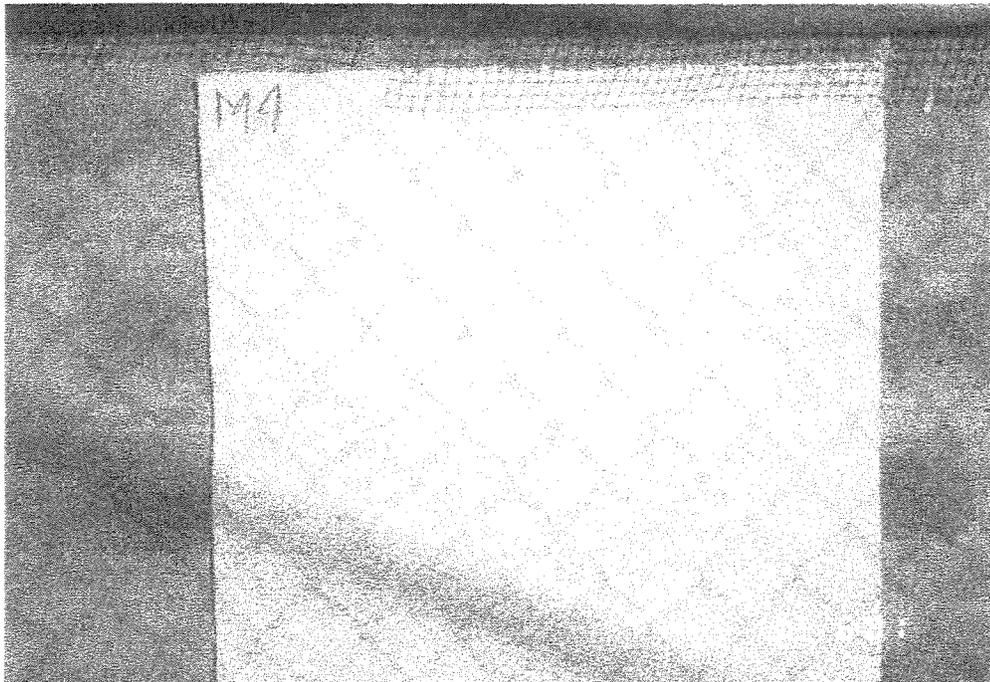
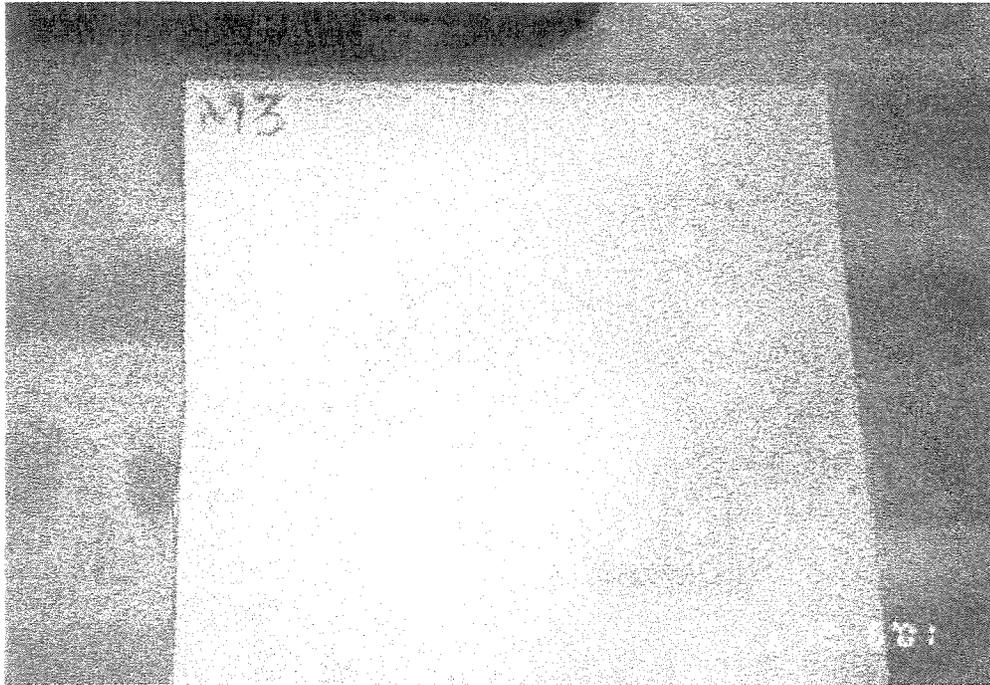
*Figura D1 – Painel externo aos 7 dias*



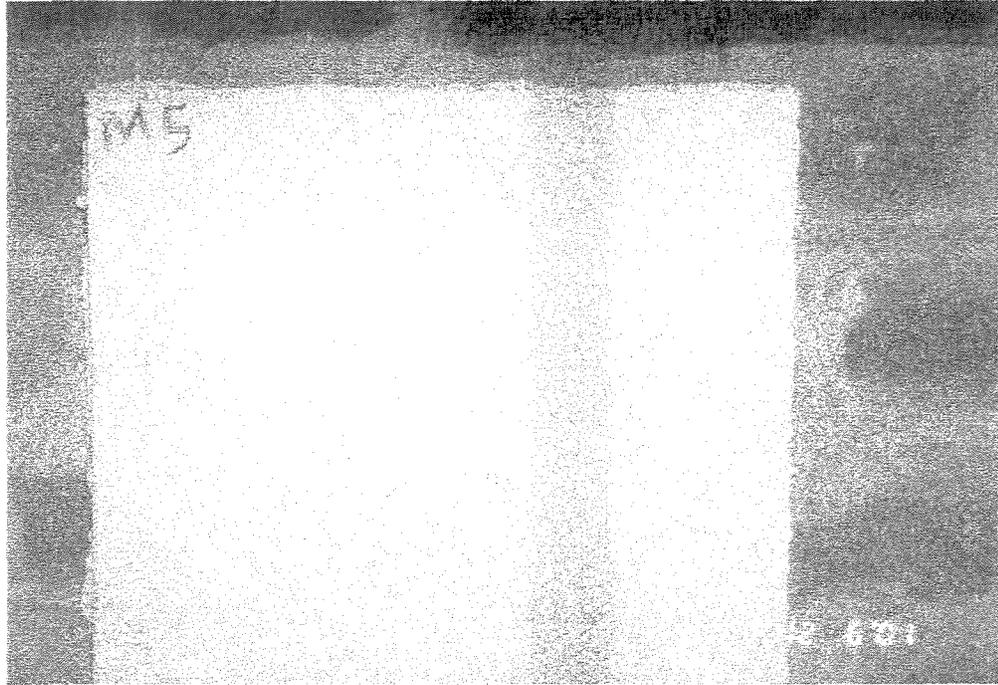
*Figura D2 – Painel externo aos 180 dias*



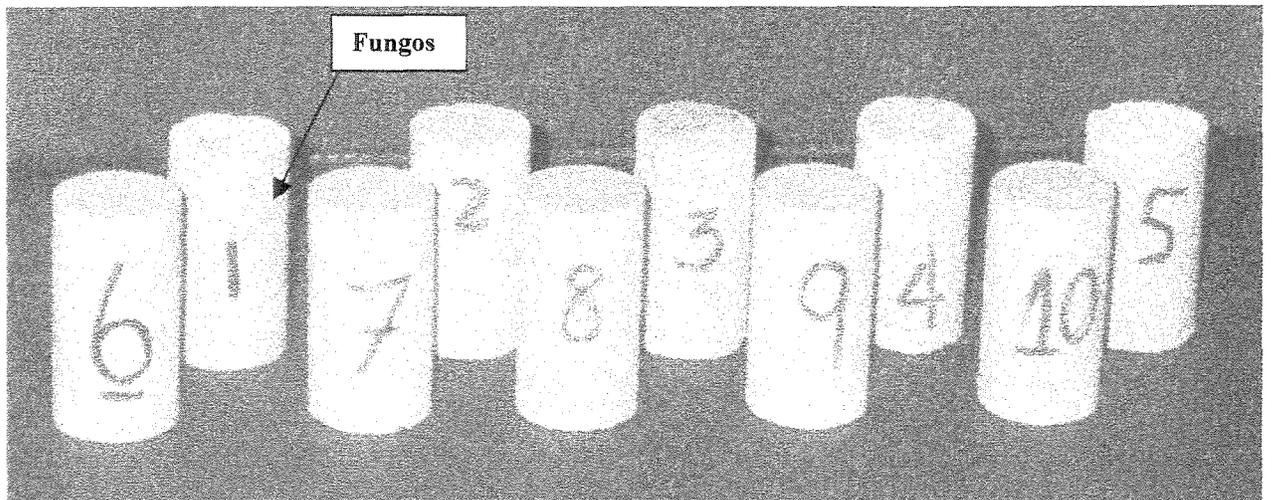
*Figura D3 – Painel M1 (100/0/0) e M2 (85/15/0) aos 240 dias*



*Figura D4 – Painel M3 (75/25/0) e M4 (85/10/5) aos 240 dias*



*Figura D5 – Painel M5 (75/20/5) aos 240 dias*



*Figura D6 – Comparação visual dos corpos-de prova submetidos à Cura externa (M1 a M5) e Cura ao ar no Laboratório (M6 a M10)*

## 12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 AÍTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo/SP. Ed. Pini. 2000.
- 02 ANTUNES, R. P. N.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V. M. **Trabalhabilidade em obra. Consistência e calor de hidratação das pastas de gesso**. III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Vitória/ES. 1999. p.95-105.
- 03 ASSO, O. F. **Materiales de Construcción**. 7ª edição. Madrid: Ed. Dossat SA, 1973.
- 04 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão**. Rio de Janeiro, 1996. 8p.
- 05 \_\_\_\_\_.NBR 7222. Argamassa e Concreto – **Determinação da Resistência à Tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994. 3p.
- 06 \_\_\_\_\_.NBR 11582. Cimento Portland – **Determinação da expansibilidade de Le Chatelier**. Rio de Janeiro, 1991. 2p.
- 07 \_\_\_\_\_.NBR 12127. Gesso para construção – **Determinação das propriedades físicas do pó**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

- 08 \_\_\_\_ .NBR 12128. Gesso para construção – **Determinação das propriedades físicas da pasta**. Rio de Janeiro, 1991. 3p.
- 09 \_\_\_\_ .NBR 12129. Gesso para construção – **Determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro, 1991. 5p.
- 10 \_\_\_\_ .NBR 13207. **Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro, 1994. 2p.
- 11 BASTOS, E. S. **Influência da adição de cimento Portland e sílica ativa em pastas e argamassas de gesso**. Universidade Estadual de Campinas – Departamento de Arquitetura e Construção. Iniciação Científica, relatório interno, Processo Fapesp 98/15210-9. p. 40.
- 12 BATIC, O. R.; MILANESI, C. A.; MAIZA, P. J.; MARFIL, S. A.. **Secondary ettringite formation in concrete subject to different curing conditions**. Cement and Concrete Research. 2000. p.1407-1412.
- 13 BAUER. L. A. F. **Materiais de Construção**. 5ª edição. São Paulo/SP; Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995. Vol 1 e 2.
- 14 BENSTED, J. **Thaumasite-Un prodotto di deterioramento delle strutture di cemento indurito**. Exploration and Production Division. Grã Bretanha, 1987. p.5-9.
- 15 CAMARINI, G. **Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto forno submetidas à cura térmica**. São Paulo/SP, 1995. 252 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica de São Paulo - USP.
- 16 CAMARINI, G.; CINCOTTO, M. A. **Cura térmica: Características do início de hidratação dos cimentos com escória**. 4º Congresso Brasileiro de Cimento. São Paulo/SP, 1996. p. 21-36.

- 17 CARVALHO, F. P.; PEREIRA, R.; SHIKAMA, R. **A gipsita do Rio Cupari-Estado do Pará.** XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Porto Alegre, 1974. Vol.6.
- 18 CARVALHO, M. F. **Determinação da resistência de aderência em pasta de gesso com diversos substratos.** Seminário da disciplina Aglomerantes Minerais I-Mestrado em Edificações Unicamp. Campinas, 2000. p 1-16.
- 19 CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. **O gesso como material de construção. Composição química 1ª parte.** Tecnologia de Edificações. Ed. Pini. São Paulo/SP, 1988.
- 20 \_\_\_\_\_. **O gesso como material de construção. Composição química 2ª parte.** Tecnologia de Edificações. Ed. Pini. São Paulo/SP, 1988.
- 21 CINCOTTO, M. A.; DIAS, A. M. N. **Tempo de pega.** Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.
- 22 CINCOTTO, M. A.; MIYAKE, E. T.; SHIRAKAWA, M. A. **Hidratação do gesso de construção.** Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.
- 23 CINCOTTO, M. A.; JAWOROSKI, H. G. **Calcinação do gipso - Fornos.** Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.
- 24 CINCOTTO, M. A.; KAZMIERCZAK, C. S. **Composição química e mineralógica e estrutura cristalina da gipsita.** Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.
- 25 COLLEPARDI, M. **Thaumasite formation and deterioration in historic buildings.** Cement and Concrete Composites 21. USA, 1999. p. 147-154.

- 26 DENG, M.; MINGSHU, T. Formation and expansion of ettringite crystals. Cement and Concrete Research. USA, 1994. Vol. 24. p. 119-126.
- 27 DJANIKIAN, J. G. **Aspectos da hidratação do cimento Portland em misturas com teores elevados de sulfato de cálcio.** São Paulo, 1987. 128 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica de São Paulo-USP.
- 28 FESTA, J. **Le Plâtre et ses applications traditionnelles et modernes.** Paris/França. Ed. Eyrolles. 1990.
- 29 GAIDO, A. **Manual de materiais.** 1ª edição. São Paulo/SP. Departamento de Obras Públicas. 1986.
- 30 HINCADIE, H.; ANGELA, M.; OLIVEIRA, C. T. A.; TAKEASHI, M. S.; CINCOTTO, M. A.; SELMO, S. M. S. **Revestimento de gesso liso-Avaliação da aderência e dureza superficial, sobre diversos substratos.** Gypsum Fair,97. Olinda/PE, 1997. p. 119-126.
- 31 \_\_\_\_\_. **Revestimento de Gesso I.** Publicação da Revista Técnica nº21 e nº22. São Paulo/SP, 1996
- 32 INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Estudo de viabilidade de recuperação dos Edifícios do “Sistema COAN”. Parecer n.5.250 de 1989. Relatores: Ercio Thomaz; Maria Alba Cincotto; Paulo Roberto do Lago Helene. Relatório, nº 19.110. p. 32.
- 33 JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. **Hidration of Portland cement in structure and performance of cements.** London; Ed. Bornes P. Applied Science Publishers, 1983.
- 34 JASTRZEBSKI, D. Z. **The nature and properties of Engineering Materials.** 2ª edição. Canadá. Ed. John Wiley & Sons Inc., 1976.

- 35 JENNINGS, H. M.; PRATT, P. L. On the reactions leading to calcium silicate hydrate, calcium hydroxide and ettringite during the hydration of cement. In 7º Internacional Congress on the Chemistry of Cement. Paris, 1980. Vol 2. 6 p.
- 36 JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativado com silicatos de sódio**. São Paulo/SP, 1995. 189 p.. Tese (Doutorado) Escola Politécnica de São Paulo - USP.
- 37 KATTAR, J. E.; ALMEIDA, N. J. **Cimento Portland**. Publicação Holdercim do Brasil. 3ª edição. Santo André. Ed. Holdercim Brasil SA. 1999.
- 38 KAZMIERCZAK, C. S. **Composição química e mineralógica, estrutura cristalina da gipsita**. Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990. 5 p.
- 39 KLOVER, K. **Setting and hardening of gypsum-Portland cement-silica fume blends, part 1: Temperature and setting expansion**. Cement and Concrete Reserch. USA, 1998. Vol. 28n n°03. p. 423-437.
- 40 \_\_\_\_\_. **Setting and hardening of gypsum-Portland cement-silica fume blends, part 2: Early strength, DTA, XRD, and observations**. Cement and Concrete Reserch. USA, 1998. Vol. 28n n°04. p. 523-531.
- 41 \_\_\_\_\_. **Strength and water absorption for gypsum-cement-silica fume blend of improved performance**. Advances in Cement Reserch. USA, 1998. Vol. 28n n°02. p. 81-92.
- 42 LASOTA, E. J. P.; DWECK, J. **Protótipo para determinação do tempo de pega de gesso por microprocessamento**. In 1º Simpósio Latino-Americano de gesso. Olinda, 1997.
- 43 LEA, F. M. **The chemistry of cement and concrete**. 3ª edição. London. Ed. Arnold. 1970.

- 44 LIBÓRIO, J. B. L. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho com adição de sílica ativa: Propriedades mecânicas, durabilidade e características da microscopia.** São Paulo/SP, 2000. 265 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica de São Paulo-USP.
- 45 LOU, Z.; XIANYU, X.; HAN, R. **On ettringite and modification of slag cement.** In 7<sup>o</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Paris, 1980. 12 p.
- 46 MASSAT, P. Y.; BIGAS, J. P.; OLLIVER, J. P. **Mesure de la perméabilité à l'air des bétons au moyen d'un perméamètre à charge variable. Materials and Structures.** USA, 1995. P. 401-405
- 47 MAYOR, G. G. **Teoria e Problemas de Materiais de Construção.** 1<sup>a</sup> edição, coleção Shaum. São Paulo/SP. Ed. Mcgraww-Hill, 1984.
- 48 METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** 2<sup>a</sup> edição. São Paulo/SP. Ed. Pini, 1994.
- 49 MURAT, M.; FOUCAULT, M. **Sulfates de calcium et materiaux dérivés. Materiaux et Constructions.** Paris, 1982. p. 63-91.
- 50 NAKAGAWA, K.; ISOZAKI, K.; WATANABE, Y. **Hydration and strength of normal Portland cement admixed with anhydrous calcium sulfate.** 7<sup>o</sup> International Congress on the Chemistry of Cement. Paris, 1980. Vol. 2. 6 p.
- 51 NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2<sup>a</sup> edição. São Paulo/SP. Ed. Pini, 1997.
- 52 NOLHIER, M. **Construire en Plâtre.** Paris/França. Ed. L'Harmattan, 1986.
- 53 NORTON, F. H. **Introdução à Tecnologia Cerâmica.** São Paulo/SP. Ed. Edgard Blucher. 1973.

- 54 PEREIRA, E. B. **Perfil analítico da gipsita**. Rio de Janeiro. Departamento Nacional da Produção Mineral. 1973. 19 p.
- 55 PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de Construção**. 7ª edição. Porto Alegre. Ed. Globo, 1982.
- 56 POMMERSHEIM, J.; CHANG, J. Kinetics of hydration of tricalcium aluminate in the presence of gypsum. **Cement and Concrete Research**, USA, 1988. Vol.18, nº 6.
- 57 REJL, L.; DUD'A, R. **A grande Enciclopédia dos Mineirais**. Ed. Neografia. Eslováquia, 1994.
- 58 RODRIGUES, H. C. F. **Equivalência entre resultados de resistência à compressão de cimento Portland segundo os métodos de ensaio Brasileiro, Europeu e Norte Americano**. São Paulo/SP, 1993. Tese (Mestrado) Escola Politécnica de São Paulo-USP.
- 59 SANTOS, I. S. S.; AGOPYAN, V. A. **Influência da relação água-gesso nas propriedades mecânicas do fibrogesso**. São Paulo/SP. Boletim Técnico da EPUSP. BT/PCC/48, 1990.
- 60 SCRIVENER, K. L.; WIEKER, W. **Advances in hydration of low, ambient and elevated temperatures**. ICCI, 9<sup>th</sup>, New Delhi/Índia. Vol. 1. 1992.
- 61 SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. São Paulo/SP, 1998. 232 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica de São Paulo-USP.
- 62 TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academic Press Ltda, London, 1992.
- 63 TOTANI, Y. **The hydration of blast furnace slag cement**. ICCI, 7<sup>th</sup>, Paris. Vol. 2. 1980.
- 64 UCHIKAWA, H. **Effect of blending componentes on hydration and structure formation**. ICCI, 8<sup>th</sup>, Brasil. Vol.1. 1986.

65 VAN VLACK; LAWRENCE, H. **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 4ª edição. Rio de Janeiro; Ed. Campus. 1984.

66 VERÇOSA, E. J. **Materiais de Construção**. Porto Alegre; Ed.Sagra. Vol.1. 1984.

67 WHITTAKER, A. G; WELLS, V. E. **Gypsum In Portland Cement Pastes**. Missouri, USA, Publicado em Rock Products – Cement Section, 1945. p. 7.

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE