

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE AGLOMERANTE À BASE DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO E SÍLICA ATIVA.**

José Antonio De Milito

**Campinas**

**2007**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE AGLOMERANTE À BASE DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO E SÍLICA ATIVA.**

José Antonio De Milito

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

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Edificações.

**Campinas, SP**  
**2007**

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

D395a De Milito, José Antonio  
Avaliação do desempenho de aglomerante à base de gesso com cimento Portland de alto forno e sílica ativa. / José Antonio De Milito.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Gladis Camarini  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Gesso. 2. Cimento Portland. 3. Sílica. 4. Revestimentos. I. Camarini, Gladis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Performance assessment of gypsum cement based rendering materials containing Portland blast-furnace slag cement and condensed silica fume

Palavras-chave em Inglês: Plaster of paris, Portland slag cement, Condensed silica fume, Plaster finish coat

Área de concentração: Edificações

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Lia Lorena Pimentel, Rosa Cristina Cecche Derval dos Santos Rosa e Vitor Antonio Ducatti

Data da defesa: 07/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE AGLOMERANTE À BASE DE  
GESSO COM CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO E SÍLICA ATIVA.**

**José Antonio De Milito**

Tese de Doutorado aprovado pela banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Gladis Camarini**  
**Presidente e Orientadora/UNICAMP**



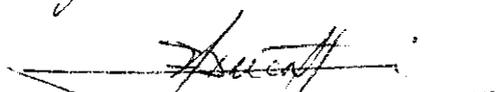
**Prof. Dr. Lia Lorena Pimentel**  
**PUC-Campinas**



**Prof. Dr. Rosa Cristina Cecche Lintz**  
**PUC-Campinas**



**Prof. Dr. Derval dos Santos Rosa**  
**UNICAMP**



**Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti**  
**UNICAMP**

**Campinas, 07 de fevereiro de 2007**

2007-28603

## Dedicatória

A todos a quem amo, 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. E aos meus pais (*in memoriam*) pelo legado da vida.

## **Agradecimentos**

À Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. 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.

Ao LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, pelos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura.

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.

Aos amigos Eng. MSc Fábio Usuda e Eng.Dr. Carlos Alberto Gaspareto 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.

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

<b>Sumário</b>	<b>Páginas</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	xii
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xxv
<b>Lista de Abreviações</b> .....	xxix
<b>RESUMO</b> .....	xxxí
<b>ABSTRACT</b> .....	xxxii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivo .....	3
1.2 Justificativa .....	3
1.3 Estrutura do trabalho .....	4
<b>2.RESIDUOS INDUSTRIAIS EMPREGADOS COM OS AGLOMERANTES</b> .....	7
2.1 Cinza volante .....	10
2.2 Cinza de casca de arroz .....	13
2.3 Escória de alto-forno .....	16
2.4 Sílica ativa .....	23
<b>3 AGLOMERANTES MINERAIS TRADICIONAIS</b> .....	28
3.1 Cal .....	29
3.1.1 Produção da cal .....	30
3.1.2 Calcinação .....	31
3.1.3 Hidratação da cal .....	32
3.1.4 O uso da cal como aglomerante .....	34
3.1.5 Análises da cal por Análise Térmica Diferencial, Termogravimetria, microscopia e Difração de raios-X .....	35
3.1.5.1 Análise da cal por Análise Térmica Diferencial (DTA) .....	35
3.1.5.2 Análise da cal por Análise Termogravimétrica (TG) .....	37
3.1.5.3 Análise da cal por Microscopia Eletrônica de Varredura .....	39
3.1.5.4 Análise da cal por Difração de raios-X .....	40

3.2 Gesso .....	41
3.2.1 Produção do Gesso .....	42
3.2.2 Desidratação e calcinação da gipsita .....	44
3.2.3 Hidratação e Tempo de Pega .....	45
3.2.4 Tempo útil das pastas de gesso.....	49
3.2.5 Análise do Gesso por TG, DTA, Difração de raios-X e Microscopia ...	49
3.3 Cimento Portland .....	53
3.3.1 Produção do Cimento Portland .....	54
3.3.2 Composição do Cimento Portland .....	58
3.3.3 Hidratação do Cimento Portland .....	62
3.3.4 Pasta endurecida do Cimento Portland .....	67
3.3.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	68
3.3.4.2 Análise Térmica Diferencial.....	70
3.3.4.3 Difração de raios-X.....	71
3.4 Cimento Portland de Alto-Forno .....	73
3.4.1 Hidratação do Cimento Portland de Alto-forno .....	75
3.4.2 Pasta endurecida do Cimento Portland de Alto-Forno .....	75
3.4.2.1 Análise Térmica Diferencia e Termogravimetria.....	76
3.4.2.2 Difração de raios-X.....	77
3.4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	78
<b>4 COMPÓSITOS A BASE DE GESSO .....</b>	<b>81</b>
4.1 Estudos no Mundo.....	81
4.2 Estudos no Brasil.....	86
4.3 Efeito da Qualidade de Adição de Gipsita em pastas de Cimento Portland	90
4.4 Deterioração dos Produtos de Cimento devido à Etringita .....	94
4.4.1 Mecanismo da formação dos cristais de Etringita.....	96
4.5 Deterioração dos produtos de cimento devido a Thaumassita .....	101
4.6 Melhoria do desempenho das misturas utilizando Gesso, Cimento Portland e Sílica ativa .....	104
<b>5 REVESTIMENTO DE ARGAMASSA CONVENCIONAL E DE GESSO LISO</b>	<b>107</b>

5.1	Revestimento com argamassa convencional .....	108
5.1.1	Preparo dos substratos .....	108
5.1.2	Preparo da Argamassa .....	110
5.1.3	Aderência das Argamassas convencionais em diversos substratos ..	112
5.1.4	Aplicação manual das argamassas .....	113
5.1.5	Principais patologias dos revestimentos argamassados .....	117
5.2	Revestimento de gesso liso .....	125
5.2.1	Preparo dos substratos .....	125
5.2.2	Preparo da pasta .....	127
5.2.3	Aderência das pastas de gesso em diversos substratos .....	128
5.2.4	Aplicação manual da pasta .....	131
5.2.5	Principais patologias .....	133
5.3	Comparativo entre as revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso .....	135
5.3.1	Comparativo entre revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso quando a aplicação e as suas patologias	135
5.3.2	Comparativo entre revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso quando ao custo de aplicação .....	137
<b>6</b>	<b>INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>141</b>
6.1	Materiais Utilizados .....	141
6.1.1	Gesso .....	141
6.1.2	Cimento .....	142
6.1.3	Sílica Ativa.....	144
6.1.4	Superplastificante .....	144
6.2	Misturas Experimentais .....	144
6.2.1	Preparo da Mistura.....	146
6.2.2	Preparo dos Corpos-de-Prova .....	148
6.2.3	Preparo das amostras para os ensaios da Análise Térmica Diferencial, Análise Termogravimétrica e Difração de raios-X .....	150

6.2.4 Preparo das amostras para o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	151
6.3 Ensaio da Pasta no Estado Fresco .....	152
6.3.1 Consistência .....	152
6.3.2 Pega.....	153
6.4 Ensaio da Pasta no Estado Endurecido .....	153
6.4.1 Absorção Capilar e Perda de Massa .....	153
6.4.2 Resistência à Compressão .....	155
6.4.3 Resistência à Tração .....	155
6.4.4 Análise Térmica Diferencial e Análise Termogravimétrica .....	156
6.4.5 Difração de Raios-X .....	157
6.4.6 Permeabilidade ao Ar .....	157
6.4.7 Expansibilidade Longitudinal .....	159
6.4.8 Aderência .....	161
6.4.9 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	164
6.4.10 Aplicação das pastas em painéis de alvenaria .....	165
<b>7 RESULTADOS E ANÁLISES .....</b>	<b>169</b>
7.1 Consistência .....	169
7.2 Pega .....	170
7.3 Absorção Capilar e Perda de Massa.....	172
7.3.1 Absorção inicial – uma hora.....	173
7.3.2 Perda de massa após 24 horas.....	175
7.4 Resistência à Compressão .....	178
7.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	181
7.6 Permeabilidade ao Ar .....	183
7.7 Expansibilidade Longitudinal .....	186
7.8 Difração de Raios-X .....	188
7.9 Análise Térmica.....	194
7.9.1 Análise Térmica Diferencial (ATD) .....	194
7.9.2 Análise Termogravimétrica (ATG) .....	199

7.10	Análise dos Resultados em Painéis .....	203
7.11	Ensaio de Aderência .....	207
7.12	Comparativo entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso.....	209
7.13	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	212
7.13.1	Misturas em ambiente externo.....	212
7.13.2	Misturas em ambiente interno.....	217
7.13.3	Comparativo entre as misturas externas com a interna.....	222
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>225</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>229</b>
<b>10</b>	<b>APENDICE</b> .....	<b>241</b>
A	Técnicas de Análise.....	242
A1	Difração de raios-X.....	242
A1.1	Origem do fenômeno da difração.....	243
A1.2	Condições para difração.....	244
A1.3	Equipamentos de difração de raios-X.....	246
A1.4	Interpretação de difratogramas de Difração do pó.....	251
A.2.	Microscopia .....	259
A2.1	Microscópio Óptico.....	260
A2.2	Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET).....	262
A2.3	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	264
A3	Análise térmica .....	269
A3.1	Análise Térmica Diferencial (DTA) .....	269
A3.2	Análise Termogravimétrica (TG) .....	274
B	Ensaio realizados.....	280
B1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	280
B2	Difração de raios-X.....	293
B3	Análise Térmica Diferencial.....	299
B4	Termogravimetria.....	305
B5	Absorção capilar em uma hora.....	311

B6	Perda de massa em 24 horas.....	311
B7	Resistência à compressão.....	314
B8	Resistência à tração.....	316
B9	Permeabilidade ao ar.....	318
B10	Expansibilidade longitudinal.....	322
C	Controle Estatístico.....	324

## Lista de Figuras

	Páginas
2.1 Difratoograma representativo da cinza volante da Usina Termoelétrica de Candiota RS .....	11
2.2 Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante típica (a) partículas esféricas vítreas, (b) uma plenosfera .....	12
2.3 Difratoograma de raios-X da cinza de casca de arroz .....	15
2.4 Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza de casca de arroz típica (a) 15 min de moagem, (b) 20 horas de moagem .....	15
2.5 Curva calorimétrica da hidratação de escória na presença de sulfato e vários teores de hidróxido de cálcio .....	20
2.6 Difratoograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída .....	22
2.7 (a) aspecto geral da escória de alto-forno e (b) detalhe do cristal .....	23
2.8 Efeito fíler da sílica ativa .....	26
2.9 Difratoograma de raios-X da sílica ativa .....	27
2.10 Microscopia da sílica ativa. (a) forma e tamanho da partícula da sílica ativa (b) aglomerado de sílica ativa .....	28
3.1 Esquema simplificado da industrialização da cal .....	31
3.2 Curva DTA da cal hidratada .....	36
3.3 Curva TG para o hidróxido de cálcio (a) e carbonato de cálcio (b) .....	38
3.4 Curva TG da cal hidratada .....	38
3.5 (a) Imagens de eletros secundários da cal hidratada aumento 10.000 vezes. (b) aumento do detalhe em 30.000 vezes .....	39
3.6 Difratoograma da cal hidratada .....	40
3.7 Fluxograma do processo de produção do gesso .....	43
3.8 Exemplo de curva de hidratação de uma pasta de gesso .....	46

3.9	Curvas TG e DTA da mistura de carbono e sulfato de cálcio dihidratado a uma temperatura de até 1300 °C em nitrogênio .....	51
3.10	Difratograma da pasta de gesso submetida a cura externa .....	52
3.11	Micrografia da pasta de gesso.....	52
3.12	Fluxograma do processo de fabricação do Cimento Portland .....	56
3.13	Resistência à compressão dos principais compostos do cimento .....	61
3.14	Esquema da hidratação do cimento Portland comum .....	63
3.15	Representação da dissolução-precipitação do C <sub>3</sub> S (a) depois de 1 s (b) depois de 1 min. (c) depois de 1 hora .....	65
3.16	Representação da nucleação e crescimento dos cristais no final do período de indução .....	65
3.17	Crescimento dos produtos hidratados durante os períodos intermediário e final, fase silicato .....	65
3.18	Crescimento dos produtos hidratados durante os períodos intermediário e final.....	67
3.19	Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do cimento Portland Tipo II .....	68
3.20	Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do cimento Portland Tipo II – aumento 20.000 vezes .....	69
3.21	Análise térmica diferencial da pasta de cimento Portland.....	71
3.22	Difratograma do cimento Portland comum anidro e em pasta submetido à cura normal em 2, 28 e 90 dias .....	72
3.23	Análise térmica e termogravimétrica da pasta de cimento Portland Tipo III (a) aos 28 dias, (b) aos 280 dias .....	76
3.24	Difratograma do cimento de alto-forno anidro submetido à cura normal por 2, 28, e 90 dias .....	77
3.25	Micrografia de grão de escória rodeado por CH e C-S-H – AF <sub>4</sub> .....	78
3.26	Micrografia do empilhamento de placas de CH entremeadas com o C-S-H e AF <sub>2</sub> .....	79
3.27	Micrografia da fase AFm em poros, com detalhe – AF <sub>4</sub> .....	79

4.1 Difratoograma da pasta de cinza volante, fluorgesso e cimento .....	84
4.2 Curva DTA da pasta de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland , cura ao ar por 3 dias (A), por 28 dias (B) e em água por 28 dias (C) ...	84
4.3 Micrografia da pasta endurecida de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland curada ao ar por 91 dias .....	85
4.4 Microscopia da pasta de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland cura ao ar por 28 dias. ....	85
4.5 (a) gretamento e perda de massa; (b) oxidação da armadura; (c) fungos .....	88
4.6 Taxa de liberação de calor, clínquer 1 e clínquer 2 .....	91
4.7 Taxa de liberação de calor, clínquer 3 e clínquer 4 .....	92
4.8 Taxa de liberação de calor, clínquer 5 .....	92
4.9 Micrografia dos cristais de etringita .....	95
4.10 Micrografia da formação de etringita retardada em concreto curado à 80 °C.....	96
4.11 Esquema de retardamento da pega devido à interação do C <sub>3</sub> A .....	97
4.12 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 2 e 3 horas .....	98
4.13 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 10 e 45 minutos .....	99
4.14 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 45 minutos .....	99
4.15 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 10 minutos .....	100
4.16 Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa – falsa pega ..	100
4.17 Esquema do processo químico para produzir thaumasita e etringita .	101
4.18 Micrografia da Thaumasita .....	102
4.19 Difratoograma da thaumasita e etringita .....	103
5.1 Diversas formas de aplicação do chapisco.....	109
5.2 Assentamento das taliscas superiores e inferiores .....	114

5.3 Detalhe da colocação das taliscas nos tetos utilizando o nível de referência .....	115
5.4 Detalhe da execução das guias e do emboço .....	116
5.5 Detalhe da aplicação do reboco .....	117
5.6 Vesícula formada no reboco. No centro da vesícula, material pulverulento escuro .....	118
5.7 Aspecto típico do deslocamento do reboco devido ao óxido de magnésio .....	120
5.8 Fissuras mapeadas devido a retração da argamassa de base .....	122
5.9 Fissuras do revestimento por expansão da argamassa de assentamento .....	123
5.10 Resistência de aderência dos revestimentos de gesso, sob substrato de alvenaria cerâmica, em função da relação água/gesso da pasta .....	129
5.11 Variação da resistência de revestimento de gesso liso, sobre as bases indicadas na legenda e respectivas relação água/gesso .....	130
5.12 (a) gretamento do revestimento, (b) fungos emboloradores, (c) lixiviação do revestimento, (d) oxidação das barras de aço .....	134
6.1 Detalhe do suporte e fixação dos moldes em PVC dos corpos-de-prova .....	149
6.2 Porta-amostra e prensa .....	151
6.3 Sputter Coater BAL-TEC SCD 050 .....	151
6.4 Bandeja perfurada para imersão dos corpos-de-prova .....	154
6.5 Suporte para os corpos-de-prova.....	154
6.6 Disposição do corpo-de-prova .....	156
6.7 Aparelho de permeabilidade ao ar .....	158
6.8 Metroscópio Horizontal .....	160
6.9 Exemplo de medição no Metroscópio Horizontal .....	160
6.10 Aplicação e nivelamento da mistura .....	161
6.11 Moldagem dos corpos-de-prova .....	162

6.12	Fixação das placas de aço sobre os corpos-de-prova .....	162
6.13	Instalação do aparelho sobre o corpo-de-prova .....	163
6.14	Instalação do aparelho sobre o revestimento dos painéis .....	163
6.15	Microscópio Eletrônico de Varredura JSM5900LV .....	164
6.16	Localização dos painéis.....	165
6.17	Vista dos painéis externos .....	165
6.18	Detalhe do suporte dos corpos-de-prova.....	167
7.1	Coeficiente de absorção capilar em uma hora.....	173
7.2	Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água.....	176
7.3	Resistência à compressão.....	179
7.4	Resistência À tração por compressão diametral .....	182
7.5	Resultados da Permeabilidade ao ar amostra superior.....	185
7.6	Resultados da Permeabilidade ao ar amostra inferior.....	185
7.7	Expansibilidade longitudinal.....	187
7.8	Comparação de difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A1=A4).....	190
7.9	Comparação de difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A2=A5).....	191
7.10	Comparação de difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A3=A6).....	192
7.11	Comparação das curvas DTA das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A1=A4).....	196
7.12	Comparação das curvas DTA das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A2=A5).....	197
7.13	Comparação das curvas DTA das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A3=A6).....	198
7.14	Comparação das curvas TG das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A1=A4).....	200
7.15	Comparação das curvas TG das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A2=A5).....	201

7.16 Comparação das curvas TG das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos (A3=A6).....	202
7.17 Comparação visual das corpos-de-prova submetidos à cura externa (A1 a A3) e à cura interna (A4 a A6) por um período de 180 dias.....	205
7.18 Painel de pasta com 100% de gesso (cinco anos).....	206
7.19 Painel de pasta com 75% gesso e 25% cimento Portland (cinco anos).....	206
7.20 Painel de pasta com 75% gesso, 25% cimento Portland e 5% sílica ativa (cinco anos).....	207
7.21 Micrografia da mistura A1 (100% gesso) ampliada 1000 vezes – cura externa.....	212
7.22 (a) Detalhe da micrografia da mistura A1 (Figura 7.21) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A1 (Figura 7.21) ampliada 1500 vezes.....	213
7.23 (c) Detalhe da micrografia da mistura A1 (Figura 7.22) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A1 (Figura 7.22) ampliada 3000 vezes.....	213
7.24 Micrografia da mistura A2 (75% gesso e 25% cimento) ampliada 1000 vezes – cura externa.....	214
7.25 (a) Detalhe da micrografia da mistura A2 (Figura 7.24) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A2 (Figura 7.24) ampliada 1500 vezes.....	215
7.26 (c) Detalhe da micrografia da mistura A2 (Figura 7.25) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A2 (Figura 7.25) ampliada 3000 vezes.....	215
7.27 Micrografia da mistura A3 (75% gesso, 25% cimento e 5% sílica ativa) ampliada 1000 vezes – cura externa.....	216
7.28 (a) Detalhe da micrografia da mistura A3 (Figura 7.27) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A3 (Figura 7.27) ampliada 1500 vezes.....	216

7.29 (c) Detalhe da micrografia da mistura A3 (Figura 7.28) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A3 (Figura 7.28) ampliada 3000 vezes.....	217
7.30 Micrografia da mistura A4 (100% gesso) ampliada 1000 vezes – cura interna.....	218
7.31 (a) Detalhe da micrografia da mistura A4 (Figura 7.30) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A4 (Figura 7.30) ampliada 1500 vezes.....	218
7.32 (c) Detalhe da micrografia da mistura A4 (Figura 7.31) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A4 (Figura 7.31) ampliada 3000 vezes.....	218
7.33 Micrografia da mistura A5 (75% gesso e 25% cimento) ampliada 1000 vezes – cura interna.....	219
7.34 (a) Detalhe da micrografia da mistura A5 (Figura 7.33) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A5 (Figura 7.33) ampliada 1500 vezes.....	220
7.35 (c) Detalhe da micrografia da mistura A5 (Figura 7.34) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A5 (Figura 7.34) ampliada 3000 vezes.....	220
7.36 Micrografia da mistura A6 (75% gesso, 25% cimento e 5% sílica ativa) ampliada 1000 vezes – cura interna.....	221
7.37 (a) Detalhe da micrografia da mistura A6 (Figura 7.36) ampliada 1500 vezes. (b) Detalhe da micrografia da mistura A6 (Figura 7.36) ampliada 1500 vezes.....	221
7.38 (c) Detalhe da micrografia da mistura A6 (Figura 7.37) ampliada 1500 vezes. (d) Detalhe da micrografia da mistura A6 (Figura 7.37) ampliada 3000 vezes.....	222
7.39 (a) Micrografia da mistura A1 ampliada 3000 vezes (cura externa) (b) Micrografia da mistura A4 ampliada 3000 vezes (cura interna).....	223

7.40 (a) Micrografia da mistura A2 ampliada 3000 vezes (cura externa)	
(b) Micrografia da mistura A5 ampliada 3000 vezes (cura interna).....	223
7.41 (a) Micrografia da mistura A3 ampliada 3000 vezes (cura externa)	
(b) Micrografia da mistura A6 ampliada 3000 vezes (cura interna).....	224
A1 Origem do fenômeno de Difração.....	243
A2 Condições para ocorrer difração de raios-X.....	245
A3 Configurações de um tubo de raio-X.....	247
A4 Esquema de um difratômetro de Raios-X.....	248
A5 Difratograma da mistura de gesso e cimento Portland.....	249
A6 Difratograma do gesso calcinado a 110 °C.....	251
A7 Cartão ASTM de arquivo de difração do pó da etringita.....	248
A8 Esquema de funcionamento do microscópio ótico.....	260
A9 Sistema de aquisição de imagem por microscopia ótica .....	261
A10 Imagem polida do clínquer vista no microscópio ótico .....	262
A11 Esquema de funcionamento de um microscópio Eletrônico de Transmissão .....	263
A12 Componentes básicos de um microscópio eletrônico de varredura ....	265
A13 Interação feixe-amostra e tipos de sinais .....	266
A14 Imagens por elétrons secundários da mistura de gesso e cimento portland (a) e a análise por EDS da região (b) .....	267
A15 Esquema de preparação da amostra a ser analisada no MEV .....	270
A16 Sistema DTA básico .....	270
A17 Curva DTA ideal .....	271
A18 Curvas DTA características .....	272
A19 Curva DTA da cal hidratada.....	273
A20 Curvas termogravimétricas características .....	275
A21 Curvas de TG da cal hidratada.....	276
A22 Sistema de análise Termogravimétrica .....	277
A23 Balança Termogravimétrica para ensaios de DTA e TG .....	278

B1 (a) Micrografia da mistura A1=100% gesso ampliação 1000 vezes	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura externa)....	281
B2 Micrografia da mistura A1=100% gesso (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4 , cura externa.....	281
B3 Micrografia da mistura A1=100% gesso (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura externa.....	282
B4 (a) Micrografia da mistura A2=75% gesso e 25% cimento ampliação 1000 vezes.	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura externa)....	283
B5 Micrografia da mistura A2=75% gesso e 25% cimento (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura externa.....	283
B6 Micrografia da mistura A2=75% gesso e 25% cimento (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura externa.....	284
B7 (a) Micrografia da mistura A3=75% gesso, 20% cimento, 5% sílica ativa ampliação 1000 vezes.	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura externa)....	285
B8 Micrografia da mistura A3=75% gesso, 20% cimento e 5% sílica ativa (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura externa.....	285
B9 Micrografia da mistura A3=75% gesso, 25% cimento e 5% sílica ativa (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura externa.....	286
B10 (a) Micrografia da mistura A4=100% gesso ampliação 1000 vezes	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura interna).....	287
B11 Micrografia da mistura A4=100% gesso (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4 , cura interna.....	287
B12 Micrografia da mistura A4=100% gesso (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura interna.....	288
B13 (a) Micrografia da mistura A5=75% gesso e 25% cimento ampliação 1000 vezes.	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura interna).....	289

B14 Micrografia da mistura A5=75% gesso e 25% cimento (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura interna.....	289
B15 Micrografia da mistura A5=75% gesso e 25% cimento (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura interna.....	290
B16 (a) Micrografia da mistura A6=75% gesso, 20% cimento, 5% sílica ativa ampliação 1000 vezes.	
(b) Microscopia (a) dividida nos quadrantes 1,2,3 e 4 (cura interna).....	291
B17 Micrografia da mistura A6=75% gesso, 20% cimento e 5% sílica ativa (ampliação 1500 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura interna..	291
B18 Micrografia da mistura A6=75% gesso, 25% cimento e 5% sílica ativa (ampliação 3000 vezes) nos quadrantes 1,2,3 e 4, cura interna..	292
B19 Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço (A1=A4) aos 28,180 dias e 3 anos.....	293
B20 Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço (A2=A5) aos 28,180 dias e 3 anos.....	294
B21 Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço (A3=A6) aos 28,180 dias e 3 anos.....	295
B22 Comparação dos difratogramas das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 28 dias.....	296
B23 Comparação dos difratogramas das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 180 dias.....	297
B24 Comparação dos difratogramas das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 3 anos.....	298
B25 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço (A1=A4) aos 28,180 dias e 3 anos.....	299
B26 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço (A2=A5) aos 28,180 dias e 3 anos.....	300
B27 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço (A3=A6) aos 28,180 dias e 3 anos.....	301

B28 Comparação das curvas de DTA das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 28 dias.....	302
B29 Comparação das curvas de DTA das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 180 dias.....	303
B30 Comparação das curvas DTA das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 3 anos.....	304
B31 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço (A1=A4) aos 28,180 dias e 3 anos.....	305
B32 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço (A2=A5) aos 28,180 dias e 3 anos.....	306
B33 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço (A3=A6) aos 28,180 dias e 3 anos.....	307
B34 Comparação das curvas de TG das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 28 dias.....	308
B35 Comparação das curvas de TG das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 180 dias.....	309
B36 Comparação das curvas TG das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna) aos 3 anos.....	310
B37 Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28, 180 dias e 3 anos.....	311
B38 Coeficiente de absorção capilar aos 28 dias.....	311
B39 Coeficiente de absorção capilar aos 180 dias.....	312
B40 Coeficiente de absorção capilar aos 3 anos.....	312
B41 Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água aos 28 dias.....	313
B42 Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água aos 180 dias.....	313
B43 Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água aos 3 anos.....	314
B44 Resistência À compressão (MPa) aos 28, 180 dias e 3 anos.....	314
B45 Resistência à compressão (MPa) aos 28 dias.....	315

B46 Resistência à compressão (MPa) aos 180 dias.....	315
B47 Resistência à compressão (MPa) aos 3 anos.....	316
B48 Resistência à tração (MPa) aos 28, 180 dias e 3 anos.....	316
B49 Resistência à tração (MPa) aos 28 dias.....	317
B50 Resistência à tração (MPa) aos 180 dias.....	317
B51 Resistência à tração (MPa) aos 3 anos.....	318
B52 Resultados da permeabilidade ao ar aos 28, 180 dias e 3 anos amostra superior.....	318
B53 Resultados da permeabilidade ao ar aos 28, 180 dias e 3 anos amostra inferior.....	319
B54 Resultados da permeabilidade ao ar aos 28 dias amostra inferior.....	319
B55 Resultados da permeabilidade ao ar aos 28 dias amostra superior.....	320
B56 Resultados da permeabilidade ao ar aos 180 dias amostra inferior.....	320
B57 Resultados da permeabilidade ao ar aos 180 dias amostra superior...	321
B58 Resultados da permeabilidade ao ar aos 3 anos amostra inferior.....	321
B59 Resultados da permeabilidade ao ar aos 3 anos amostra superior.....	322
B60 Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28, 180 dias e 3 anos.....	322
B61 Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28, 180 dias e 3 anos – externo.....	323
B62 Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28, 180 dias e 3 anos – interno.....	323
C1 Coeficiente de Absorção Capilar aos 28 dias.....	324
C2 Coeficiente de Absorção Capilar aos 180 dias.....	325
C3 Coeficiente de Absorção Capilar aos 3 anos.....	326
C4 Resistência à Compressão aos 28 dias.....	326
C5 Resistência à Compressão aos 180 dias.....	327
C6 Resistência à Compressão aos 3 anos.....	327
C7 Resistência à Tração aos 28 dias.....	328
C8 Resistência à Tração aos 180 dias.....	328
C9 Resistência à Tração aos 3 anos.....	329

C10 Permeabilidade ao ar – superior – aos 28 dias.....	329
C11 Permeabilidade ao ar – superior – aos 180 dias.....	330
C12 Permeabilidade ao ar – superior – aos 3 anos.....	330
C13 Permeabilidade ao ar – inferior – aos 28 dias.....	331
C14 Permeabilidade ao ar – inferior – aos 180 dias.....	331
C15 Permeabilidade ao ar – inferior – aos 3 anos.....	332

## Lista de Tabelas

## Páginas

2.1 Classificação, composição e características das partículas de subprodutos silicosos utilizados como adição ao cimento Portland ou ao concreto .....	9
2.2 Composição típica das escórias de alto-forno produzidas no Brasil ...	17
2.3 Compostos hidratados produzidos pela ativação da escória .....	21
2.4 Composição química típica de algumas sílicas ativas .....	24
2.5 Composição química e principais propriedades físicas da sílica ativa e os limites estabelecidos pela ABNT .....	27
3.1 Propriedades da cal virgem e da cal hidratada .....	34
3.2 Compostos presentes na cal hidratada .....	41
3.3 Compostos formados na calcinação da gipsita .....	44
3.4 Seqüência de reações no processo até a clinquerização e resfriamento .....	55
3.5 Cimentos disponíveis no mercado brasileiro .....	57
3.6 Compostos do cimento Portland, suas abreviações e composições ..	58
3.7 Prováveis compostos formados do cimento Portland, nas fases anidras e hidratadas .....	73
3.8 Teores de escória no cimento Portland de acordo com a ABNT .....	74
4.1 Quantidades de SO <sub>3</sub> em cimentos normalizados pela ABNT .....	94
5.1 Traços do emboço para diversas bases .....	110
5.2 Traços do reboco .....	111
5.3 Resumo das patologias dos revestimentos em argamassa .....	124
5.4 Desvios máximos de prumo e planeza para os substratos que vão receber revestimento de gesso.....	126

5.5 Etapas e tempos aproximado de execução da aplicação manual do gesso para consumo de 45 litros de pasta = 1 saco de gesso .....	133
5.6 Vantagens comparativas de utilização do revestimento de gesso liso para revestimento convencional .....	136
5.7 Preço unitário composto resumido dos revestimentos de paredes e tetos – abril de 2006 .....	138
5.8 Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em diversas combinações convencionais .....	139
6.1 Análise Química do gesso .....	142
6.2 Análise física do pó da pasta e propriedades mecânicas do gesso ....	142
6.3 Análise química do cimento .....	143
6.4 Análise física e mecânica do cimento .....	143
6.5 Análise química e física da sílica ativa .....	144
6.6 Misturas ensaiadas .....	146
6.7 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.....	147
6.8 Quantidades de corpos-de-prova 5 x 10 cm por mistura – Para o ensaio de Permeabilidade ao ar .....	147
6.9 Quantidade de corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm por mistura – Para o ensaio de Expansibilidade .....	148
7.1 Consistência das misturas (penetração).....	170
7.2 Tempo de início e fim de pega.....	171
7.3 Resultados do coeficiente de absorção capilar em uma hora.....	173
7.4 Perda de massa após 24 horas de água.....	176
7.5 Resistência à compressão.....	178
7.6 Resistência À tração por compressão diametral.....	181
7.7 Resultados médios obtidos de permeabilidade ao ar.....	184
7.8 Resultados obtidos na expansibilidade longitudinal (mm).....	186
7.9 Compostos prováveis presentes na mistura.....	188

7.10 Compostos presentes nas misturas.....	195
7.11 Perda de massa dos compostos presentes nas misturas.....	199
7.12 Resultados da aplicação das pastas, em cada camada nos painéis.	203
7.13 Períodos de duração climática.....	204
7.14 Tensão de arrancamento em blocos de concreto cura interna.....	208
7.15 Tensão de arrancamento em blocos de concreto cura externa.....	208
7.16 Preço unitário composto das pastas de gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa.....	209
7.17 Composição de custos do revestimento de paredes e tetos em diversas combinações convencionais.....	210
7.18 Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em gesso.....	210
7.19 Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa.....	211
A1 Tabelas para identificação dos compostos, resumo dos cartões da ASTM.....	253
A2 Resultado da análise do difratograma da mistura de 75% gesso e 25% cimento Portland da Figura A5.....	257
A3 Resultado da análise do difratograma do gesso calcinado à 110 °C da Figura A6.....	258
B1 Misturas ensaiadas.....	280
C1 Valores das cargas (KN) descontados no cálculo das médias no ensaio de Resistência à Compressão das misturas A1 a A3 que diferem de 15% e desvio padrão.....	333
C2 Valores das cargas (KN) descontados no cálculo das médias no ensaio de Resistência à Compressão das misturas A4 a A6 que diferem de 15% e desvio padrão.....	334

C3	Valores das cargas (KN) descontados no cálculo das médias no ensaio de Resistência à Tração das misturas A1 a A3 que diferem de 15% e desvio padrão.....	335
C4	Valores das cargas (KN) descontados no cálculo das médias no ensaio de Resistência à Tração das misturas A4 a A6 que diferem de 15% e desvio padrão.....	336
C5	Valores médios e desvio padrão do ensaio de expansibilidade longitudinal aos 7, 28, 180 dias e 3 anos.....	337
C6	Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 28 dias.....	338
C7	Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 180 dias.....	338
C8	Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 3 anos.....	338
C9	Média e desvio padrão do ensaio de absorção capilar e perda de massa aos 28, 180 dias e 3 anos.....	339

## 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

$\text{CO}_2$  = Anidro 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 =  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

FSC = Fator de Saturação do Calcário

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

IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

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

M = MgO

MA = Módulo de Alumina

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

MgO = Óxido de Magnésio

MS = Módulo de Sílica

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 desempenho de aglomerante à base de Gesso com Cimento Portland de Alto Forno e Sílica Ativa**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 339p. Tese de Doutorado. Departamento de Arquitetura e Construção, UNICAMP, 2007.

O gesso é um aglomerante que tem sido muito empregado em revestimento de paredes. Apresenta um bom desempenho, é econômico e de fácil aplicação, mas limitado ao uso interno devido a sua sensibilidade à água. Algumas tentativas têm sido realizadas para melhorar a sua utilização em ambientes sujeitos à umidade. Neste sentido, pesquisas avançam na tentativa de empregar diferentes adições como resinas epóxi, polímeros, cimentos, escórias, impermeabilizantes, entre outros. O objetivo desta tese foi avaliar o desempenho das misturas de gesso com cimento Portland de Alto Forno e sílica ativa nos revestimentos internos e externos sujeitos à umidade. Para isso verificaram-se as propriedades macroscópicas das misturas por meio de ensaios físicos, químicos, físico-químicos e também a avaliação microestrutural utilizando a microscopia eletrônica de varredura. As misturas foram aplicadas em revestimentos de painéis de alvenaria de blocos de concreto e observados visualmente por um período de cinco anos. Além da observação visual foi verificada a resistência de aderência das misturas aplicadas internamente e externamente. Dos resultados obtidos observou-se uma possível coexistência entre o gesso e o cimento e que a adição de sílica ativa na mistura reduz a formação de etringita, principalmente nos revestimentos externos, sujeitos à umidade. A adição de cimento Portland melhora na abrasão e perda de massa, mesmo em idades mais avançadas. Assim, devido ao elevado custo de algumas adições, e as dificuldades de trabalhar com outros tipos de adição na obra, a adição de cimento Portland e sílica ativa ao gesso permitem uma melhoria de resistência, obtendo um revestimento de baixo custo e de fácil manuseio.

**Palavras-chave:** Gesso; Cimento Portland de Alto-Forno; Sílica Ativa, Revestimento.

## ABSTRACT

DE MILITO, José Antonio. **Performance assessment of gypsum cement based rendering materials containing Portland blast-furnace slag cement and Condensed silica fume.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 339p. Dr Eng. Thesis. Departamento de Arquitetura e Construção, UNICAMP, 2007.

Plaster of Paris is a binding material being used in masonry as a plaster finish coat. Despite being economical, having good performance as and ease with which it is applied in building, its use is limited to indoors. Some attempts have been made to improve its performance in external environment. In that sense, researches advance in the attempt at using several admixtures like epoxy resins, polymers, cements slags, waterproofing materials among other things. The objective of this thesis is to assess the performance of certain mixtures of rendering material containing plaster of Paris, slag cement and condensed silica fume when applied in the internal and external plaster finish coat. The macroscopic properties of the mixtures were analyzed through physical and chemical tests and also in SEM. Mixtures were applied on coatings of brick and mortar and visually inspected within five years. Bond strengths of the mixtures were measured, both in internal and external walls. Results showed compatibility between plaster of Paris and slag cement and that presence of condensed silica fume in the mixture reduced the formation of ettringite, especially in the external coatings. The addition of Portland blast-furnace slag cement reduced the abrasion and the loss of mass, even in older ages. Therefore, due to the high cost of some admixtures, and the difficulty in working with other kinds of admixtures in the construction sites, the mentioned additions to the plaster rendering allow a mechanical strength improvement, thus resulting in low cost and good workability of the plaster finish coat.

**Key Words:** Plaster of Paris; Portland slag cement; Condensed silica fume; Plaster finish coat

# 1 INTRODUÇÃO

A utilização 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 limitado ao uso interno devido a sua sensibilidade à água. O gesso é solúvel em água e com a presença de umidade há proliferação de fungos emboloradores. O cimento é um dos aglomerantes mais utilizados no mundo, mas para a sua fabricação consome muita energia e matéria prima. Além disso, não é comparável com o gesso quanto ao endurecimento rápido e ao seu acabamento, pois não é empregado em forma de pasta porque apresenta fissuras mapeadas devido à sua retração, e sim usado para produção de argamassas e concreto, mas é resistente à água.

Devido ao bom desempenho do gesso em revestimento interno algumas tentativas têm sido realizadas para melhorar o seu uso em ambientes sujeitos à umidade. Neste sentido pesquisas avançam empregando diferentes adições como: epóxi, polímeros, cimentos, escórias, impermeabilizantes entre outros.

As misturas de cimento Portland e gesso não são usualmente utilizadas, porque podem resultar na formação da etringita para baixos teores de gesso, ou de thaumasita quando o teor de gesso é maior. Ambos etringita e thaumasita causam expansão resultando numa posterior deterioração do revestimento.

No Brasil no início dos anos de 1980 a COHAB-SP realizou um empreendimento utilizando 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. 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 hidratar-se e, conseqüentemente, o painel adquirir uma resistência maior. A deterioração dos painéis culminou com a demolição de todo o conjunto habitacional (IPT, 1989).

Outro caso registrado em 1999 foi à 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.

Em trabalho anterior realizado por De Milito (2001) foi avaliado o comportamento de misturas de gesso, cimento Portland e sílica ativa em diferentes proporções e relação água aglomerante de 0,70, submetidas a ambientes interno e externo por um período de 28 e 180 dias. As misturas também foram aplicadas sobre painéis de alvenaria de bloco de concreto para observar o desempenho do revestimento ao longo do tempo

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 na 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 aparecimento de fissuras ou gretamentos visíveis na superfície dos revestimentos e nem tampouco o aparecimento de fungos emboloradores.

A partir desses resultados verificou-se a necessidade de realizar uma análise mais aprofundada de desempenho ao longo do tempo das misturas que se mostraram

promissoras neste trabalho.

## **1.1 Objetivos**

Avaliar o desempenho do aglomerante de gesso, cimento Portland de alto forno e sílica ativa nos revestimentos internos e externos sujeitos à umidade por um período de três anos observando a macroestrutura das misturas por meio de ensaios físicos, químicos, físico-químicos e a avaliação microestrutural utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura. Constatação visual, ao longo do tempo, do desempenho das misturas aplicadas internamente e externamente em painéis de alvenaria de bloco de concreto e a resistência de aderência.

## **1.2 Justificativa**

Como o revestimento de gesso está sendo largamente utilizado e tem custo até duas vezes menor do que os revestimentos argamassados (Tabela 7.16 a 7.19), é de grande interesse por parte da construção civil poder aplicar o aglomerante de gesso, cimento Portland e sílica ativa 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 comparando com os revestimentos tradicionais como o chapisco, emboço e reboco.

Após a experiência nacional realizada no início dos anos de 1980 pela COHAB-SP nada foi feito utilizando a mistura de gesso com cimento Portland, embora sabendo que mistura de cimento com gesso não seja quimicamente estável, com o avanço da tecnologia do cimento, atualmente há diferentes tipos de cimento Portland, com elevados teores de adição, e com a adição de sílica ativa, foi avaliado em trabalho anterior (De Milito, 2001) a possível coexistência de sucesso entre o gesso e o cimento Portland.

Com o auxílio dos ensaios de Difração de Raios-X, Microscopia Eletrônica de

Varredura, Expansibilidade Longitudinal, Análise Térmica Diferencial e Análise Termogravimétrica observou-se o não aparecimento de elementos expansivos nas misturas de gesso com cimento Portland responsável pela desagregação progressiva dos revestimentos. Através do ensaio de Resistência à Compressão observou-se que a adição de cimento à mistura aumenta a resistência à abrasão dos revestimentos. Pelo ensaio de permeabilidade ao ar verificou-se que a adição de sílica ativa deixou a mistura menos porosa.

Portanto a contribuição desta pesquisa é desenvolver um aglomerante misto de fácil manuseio a base de gesso, cimento Portland de alto forno e sílica ativa, materiais estes encontrados no mercado brasileiro, capaz de ser aplicado em revestimentos sujeitos a umidade, utilizando aglomerantes tradicionais da construção civil.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Para desenvolver este trabalho, procurou-se realizar um levantamento bibliográfico atualizado sobre a utilização das diversas técnicas de análise para avaliar o comportamento da mistura de gesso, cimento Portland e sílica ativa bem como um histórico sobre as diversas adições ao gesso como: cimento Portland, escórias, impermeabilizantes entre outros. Desta forma, o *capítulo 2* descreve os resíduos industriais empregados com os aglomerantes, no *capítulo 3* faz algumas considerações sobre a cal, o gesso, o cimento Portland comum e com escória. Os compósitos à base de gesso e cimento Portland foram estudados no *capítulo 4*. No *capítulo 5* foram estudados os revestimentos de argamassa convencional e de gesso liso bem como um comparativo de custos entre eles. Em seguida, no *capítulo 6*, encontra-se a investigação experimental utilizada no desenvolvimento deste trabalho em um período de cinco anos.

O *capítulo 7* apresenta os resultados e a discussão dos mesmos. Avalia 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 para avaliar a porosidade das misturas, 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. E o estudo das microscopias das diversas misturas. Fez-se também uma análise dos revestimentos de gesso aplicado em paredes interna e externa de blocos de concreto aos 28, 180 dias e ao longo de cinco anos. No *capítulo 8*, estão as conclusões relativas às diversas misturas e a descrição de algumas propostas para a continuidade da pesquisa.

No apêndice “A” descrevemos as principais técnicas e métodos de análise microestrutural como: difração de raios-X, microscopia ótica e eletrônica, e as análises térmicas, com a intenção de auxiliar na compreensão dos resultados obtidos por estas técnicas utilizadas nesta tese.

No apêndice “B” diversos resultados de ensaios que não constam nos capítulos, sobre microscopia eletrônica de varredura, difração de raios-X, análise térmica diferencial, termogravimetria, absorção capilar, perda de massa, resistência à compressão, resistência à tração, permeabilidade ao ar, expansibilidade longitudinal, e no apêndice “C” o controle estatístico dos dados obtidos em laboratório utilizando estatística descritiva e análise de variância.

## **2 RESÍDUOS INDUSTRIAIS EMPREGADOS COM OS AGLOMERANTES**

Para melhorar algumas propriedades dos aglomerantes, tanto no estado fresco como no endurecido, é comum utilizar-se de adições. No caso do cimento Portland, além de aditivos químicos na sua utilização, são adicionados materiais de natureza inorgânica na sua fabricação. As razões para se utilizar às adições inicialmente foi de ordem econômica. As adições geralmente custam menos que o cimento Portland. Depois foi o aumento do custo da energia, que representa a principal parcela do custo da produção do cimento. Outro fator que motivou o uso de adições minerais foi proporcionado, por um lado, pela preocupação com o meio ambiente com relação à obtenção das matérias primas necessárias à produção do cimento Portland e, por outro, para dispor os resíduos industriais como as cinzas volantes, cinzas da casca do arroz, escoria granulada de alto forno ou a sílica ativa (NEVILLE, 1997).

Geralmente, essas adições consistem de materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, sob condições adequadas, contribuem para a formação de compostos hidratados, melhorando o desempenho de argamassas e concretos. Estas propriedades cimentantes e pozolânicas das adições são exploradas incorporando-as tanto no cimento Portland como nas diferentes argamassas e concretos. Ressalta-se que estas adições não foram introduzidas somente pela disponibilidade ou pela economia mais também conferem muitas propriedades desejáveis ao cimento tanto no estado fresco como no endurecido (NEVILLE, 1997).

Mehta (1989) classificou os subprodutos industriais em cinco categorias, baseando-se no desempenho desses materiais, quando adicionados ao cimento Portland, sendo descritas a seguir e resumidas na Tabela 2.1.

- a) *Adições minerais com propriedades cimentantes* consistem essencialmente de partículas finas de silicato vítreo modificado consideravelmente pela presença de grandes quantidades de íons cálcio, magnésio e alumínio. Quantidades pequenas de cimento Portland ou de outros ativadores (como álcalis ou gipsita) são necessários para acelerar a hidratação e a velocidade de desenvolvimento da resistência desta classe de adições minerais, na qual enquadram-se a escória de alto-forno e algumas cinzas volantes (teor de CaO > 20%).
- b) *Adições minerais com propriedades cimentantes e pozolânicas* . Em alguns casos a composição do silicato vítreo pode não ser uniforme. É possível que parte do vidro seja um aluminossilicato, embora o restante seja um silicato vítreo, contendo grandes quantidades de cálcio e magnésio. Neste caso, o produto será parcialmente cimentante e parcialmente pozolânico, enquadrando-se nesta categoria as cinzas volantes com teor de cálcio entre 10 e 20%. Este tipo de subproduto não é encontrado no Brasil.
- c) *Adições minerais com atividade pozolânica elevada* são subprodutos que contêm, principalmente, sílica amorfa com elevada área específica. Nesta categoria enquadram-se a sílica ativa e a cinza da casca de arroz convenientemente processada.
- d) *Adições minerais com atividade pozolânica normal* são subprodutos compostos basicamente de silicato vítreo, modificado por alumínio e ferro, como, por exemplo, a cinza volante com teor de cálcio inferior a 10%.
- e) *Adições minerais de baixa reatividade* são subprodutos que devem ser finamente pulverizados, para desenvolver níveis aceitáveis de resistência em conjunto com o cimento Portland. Enquadram-se nesta categoria a escória de alto-forno esfriada lentamente e as cinzas de grelha.

**Tabela 2.1 – Classificação, composição e características das partículas de subprodutos silicosos utilizados como adição ao cimento Portland ou ao concreto (MEHTA, 1989)**

Classificação	Composição química e Mineralógica	Características das partículas
<b>1 - CIMENTANTE</b> Escória de alto-forno com resfriamento brusco	A maioria dos silicatos vítreos contendo cálcio, magnésio e alumínio. Podem existir pequenas quantidades de compostos cristalinos do grupo das melilitas e mervinita.	Material granular com 5% a 15% de umidade. Antes de ser usada é seca e moída (Blaine de 400 a 500 m <sup>2</sup> /kg)> As partículas têm textura rugosa.
<b>2 – CIMENTANTE E POZOLÂNICA *</b> Cinza volante com elevado teor de cálcio (> 10%)	A maioria dos silicatos vítreos contendo cálcio, magnésio e alumínio. Pequenas quantidades de material cristalino presente, geralmente consiste de quartzo e C <sub>3</sub> A. Cal livre e periclásio podem estar presentes. CS e C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S em carvões com elevado teor de enxofre. O teor de carbono não queimado é da ordem de 2%.	Material pulverulento com 10-15% de partículas maiores do que 45µm (Blaine de 300-400 m <sup>2</sup> /kg). A maioria das partículas é esferoidal com diâmetro inferior a 20µm. Geralmente a superfície das partículas é lisa mas não tão limpa quanto a cinza volante com baixo teor de cálcio.
<b>3 – ALTAMENTE POZOLÂNICAS</b> a – sílica ativa	Essencialmente sílica na forma não cristalina	Pó extremamente fino apresentando partículas sólidas e esferoidais, em sua maioria com diâmetro inferior a 0,1µm (cerca de 20000 m <sup>2</sup> /kg de área específica por adsorção de nitrogênio).
b – Cinza de casca de arroz produzida por incineração controlada	Essencialmente sílica na forma não cristalina	Geralmente as partículas são inferiores a 45µm, mas altamente celulares (cerca de 60000 m <sup>2</sup> /kg de área específica por adsorção de nitrogênio).
<b>4 – POZOLÂNICAS</b> Cinza volante com baixo teor de cálcio (<10%)	Maioria dos silicatos vítreos contendo alumínio e ferro. Pequenas quantidades de material cristalizado presente, geralmente composto de quartzo, mulita, hematita e magnetita> A quantidade de carbono não queimado normalmente é inferior a 5% mas podendo chegar a 10%.	Material pulverulento correspondendo a 15-30% de partículas maiores do que 45µm (Blaine de 250-350 m <sup>2</sup> /kg). A maioria das partículas são sólidas e esferoidais com diâmetro médio de 20µm. Podem estar presentes cenosferas e plerosferas.
<b>5 – OUTRAS</b> a – Escória de alto-forno resfriada lentamente.	Apresenta minerais com silicatos cristalizados e pequena quantidade de material não cristalizado.	Os materiais devem ser pulverizados até partículas extremamente pequenas, para desenvolver atividades cimentantes ou pozolânica satisfatórias. As partículas moídas têm textura rugosa
b – Cinza de grelha, cinza de casca de arroz queimada ao ar		

\* Não encontrada no Brasil

Neste capítulo serão abordados os seguintes materiais que normalmente são utilizados junto ao cimento Portland: cinza volante, cinza de casca de arroz, escória granulada de alto forno e sílica ativa. Cabe ressaltar que neste trabalho foram utilizadas somente as escórias granuladas de alto forno, ou simplesmente escória, como adição ao cimento, vindo de fábrica, e a sílica ativa adicionada às misturas.

## **2.1 Cinza volante**

O reaproveitamento de resíduos industriais pela indústria da construção não é algo recente. Subprodutos de carvão, como as cinzas volantes, têm sido usados extensivamente no concreto de cimento Portland há, aproximadamente, 50 anos (KELLY & WILIANS, 1995).

A combustão do carvão pulverizado, geralmente para a produção de energia elétrica, se dá em altas temperaturas, entre 1200 e 1600 °C, num ambiente gasoso oxidante. O tempo de permanência das partículas em chama oxidante é, em média, de 2 segundos, proporcionando condições suficientes para a fusão total ou parcial da matéria mineral. Dois tipos de cinzas são formados: as cinzas pesadas (cinza de grelha) e a cinza volante.

As cinzas pesadas são cinzas de textura mais grosseira que caem no fundo da fornalha em tanques de resfriamento e retiradas, hidraulicamente, por fluxo de água. Representam em média de 15 a 20% das cinzas produzidas.

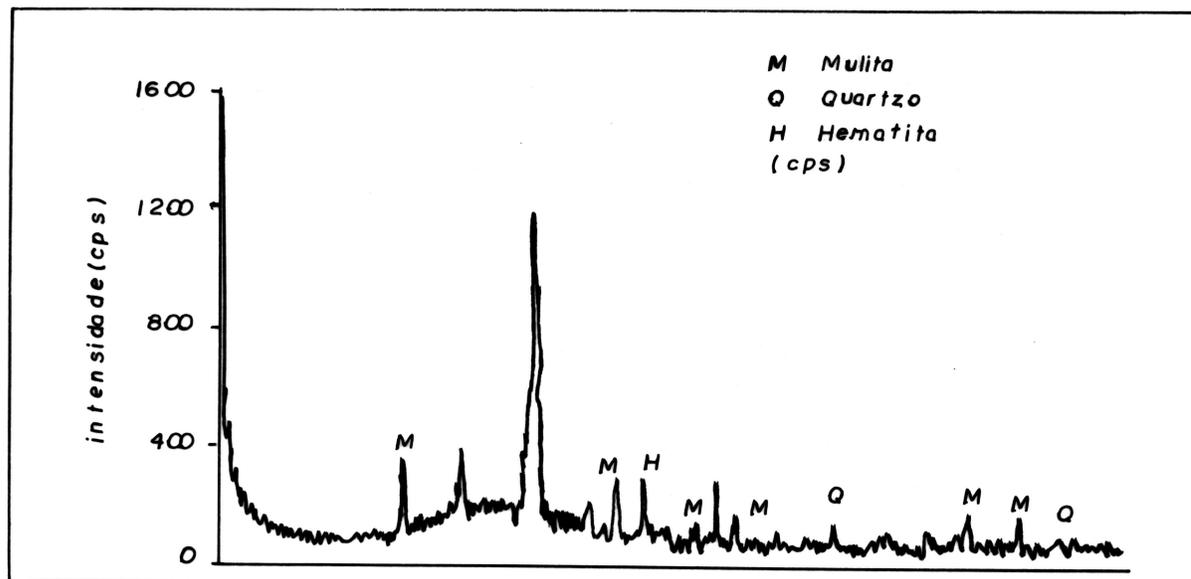
Cinza volante são as cinzas de textura mais fina arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas da caldeira e removidas do gás por precipitadores eletrostáticos (SILVA, 1999).

As cinzas pesadas têm pouca aplicação no mercado brasileiro. Em outros países como na Inglaterra e EUA são utilizadas como agregados, especialmente na indústria de blocos de concreto leve e de maior resistência térmica. O principal uso da cinza volante esta no setor da construção pode-se citar: aplicação em concretos, fabricação de cimento Portland pozolânico, em argamassas, aterros estruturais, bases

estabilizadas e solos modificados e estabilizados de rodovias, e como fíler em mistura betuminosa (ÂNGULO, 2002).

Segundo Mehta (1994), com base nas diferenças de composição mineralógica e propriedades, as cinzas volantes podem ser divididas em duas categorias que diferem entre si principalmente quanto ao teor de cálcio. A cinza da primeira categoria, contém menos do que 10% de CaO total, é geralmente um produto de combustão do antracito e carvões betuminoso. A cinza de segunda categoria, contendo normalmente de 15 a 30% de CaO, é geralmente um produto de combustão de lignito ou de carvões sub-betuminosos.

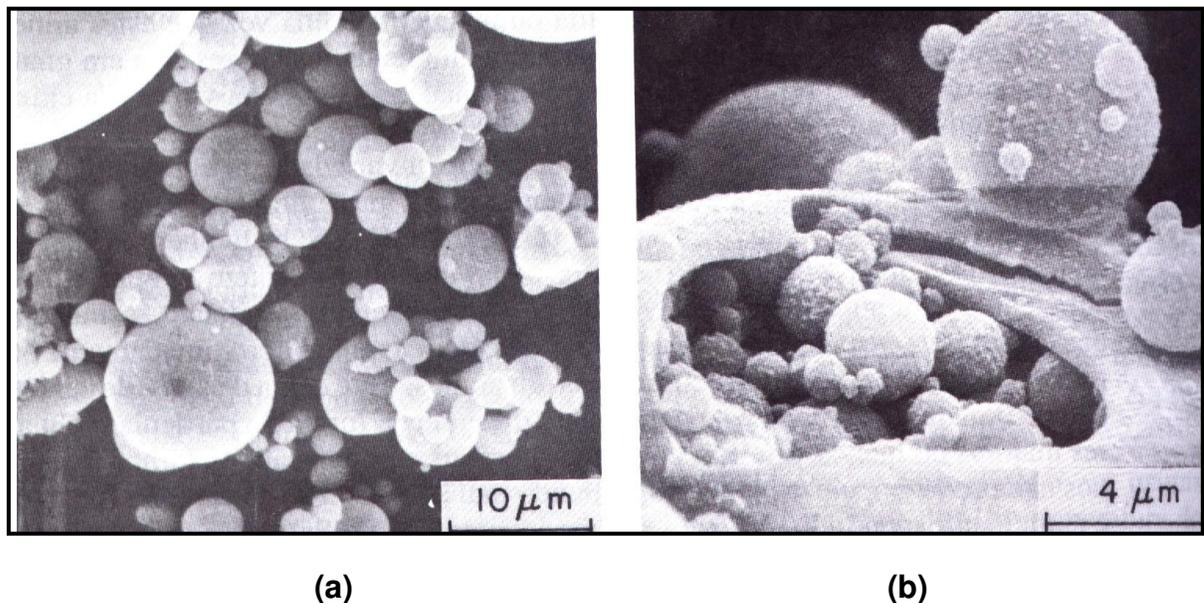
As cinzas volantes de baixo teor de cálcio, devido à proporção elevada de sílica e alumina, consistem principalmente de vidros de aluminossilicatos. Dependendo da finura na qual o carvão foi moído antes da combustão, estão provavelmente presentes em todas as cinzas volantes, resíduos de quartzo, mulita, hematita ou magnetita. A análise por difração de raios-X confirma que os principais minerais cristalinos em cinzas volantes de baixo teor de cálcio são quartzo, mulita e hematita (Figura 2.1).



**Figura 2.1 – Difratograma representativo da cinza volante da Usina termoeletrica de Candiota RS (SILVA, 1999)**

Os cristais de quartzo, mulita, hematita ou magnetita, não são reativos à temperatura ambiente. A sua presença em grandes proporções tende a reduzir a reatividade da cinza volante. No entanto, a cinza volante com alto teor de cálcio é mais reativa porque contém a maior parte do cálcio na forma de compostos cristalinos reativos, tais como  $C_3A$ ,  $CS$ , e  $C_4A_3S$ . A maioria das cinzas volantes, de baixo ou de alto teor de cálcio, contém, aproximadamente, 60 a 85% de vidro, 10 a 30% de compostos cristalinos, e até cerca de 10% de carvão não queimado. O carbono está geralmente presente na forma de partículas celulares maiores do que  $45\mu m$ . Grandes quantidades de carbono na cinza volante destinada a emprego como aditivo mineral para concretos e argamassas são consideradas prejudiciais porque as partículas celulares de carbono tendem a aumentar o consumo de água.

Na micrografia da Figura 2.2 mostra que a maior parte das partículas de cinza volante ocorrem como esferas sólidas de vidro (Figura 2.2 a), mas às vezes pode estar presente um pequeno número de esferas ocas, chamadas cenosferas (completamente vazias) e plenosferas (preenchidas com muitas esferas pequenas) (Figura 2.2b) (Mehta, 1994).



**Figura 2.2 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza volante típica (a) partículas esféricas e vítreas, (b) uma plenosfera (MEHTA, 1994)**

As cinzas volantes são menos reativas quando comparadas com a sílica ativa, mas têm efeito sobre o concreto no estado plástico por favorecer a trabalhabilidade devido a retardar o início de pega com redução da quantidade de reações de hidratação enquanto o concreto está fresco (MEHTA & MONTEIRO, 1994), e, principalmente, efeitos sobre o concreto endurecido, como:

- Retardar a velocidade do ganho de resistência mecânica.
- Reduzir o calor de hidratação devido a ele ser menor e melhor distribuído ao longo do tempo, comparando-o ao calor liberado pelo clínquer ao hidratar.
- Minimizar a permeabilidade do concreto por fatores tais como o efeito das reações pozolânicas fixar o hidróxido de cálcio minimizando sua solubilidade.
- Minimizar a retração e o aparecimento de microfissuras por contração térmica devido ao menor calor de hidratação.
- Diminuir a possibilidade da ocorrência das reações álcali-agregados.

Os teores ideais da adição de cinzas volantes estão entre 15 e 25% da massa de cimento (FREITAS, 2005).

## **2.2 Cinza de casca de arroz**

A utilização da cinza de casca de arroz como material pozolânico vem sendo intensamente investigado desde a década de 1970, principalmente na Índia e nos EUA. Mas, somente a partir da década de 1980, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto de alto desempenho, a preocupação em se obter um máximo de pozolanidade do material se tornou premente. A queima da casca de arroz produz uma quantidade significativa de cinzas (em torno de 20% em massa). Grande parte dessas cinzas apresenta características pozolânicas, ou seja, isoladamente, as cinzas não têm valor

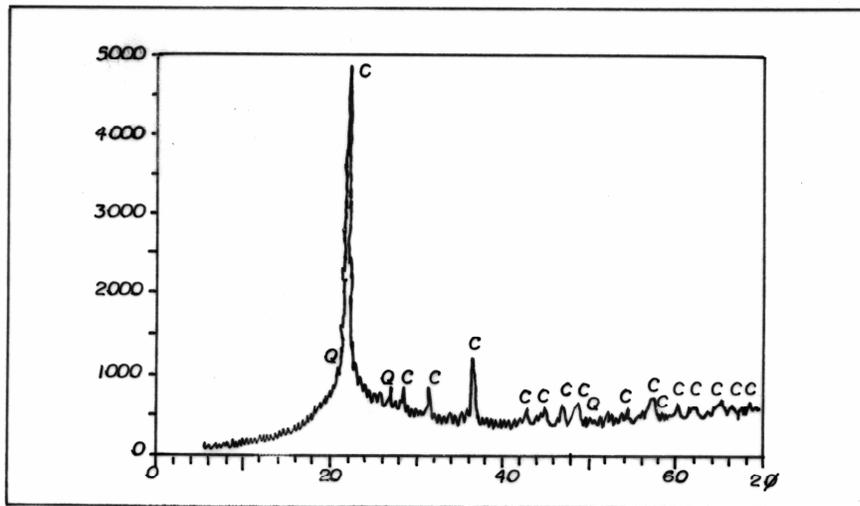
aglomerante, mas, quando finamente moída e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e formam compostos cimentantes (PRUDÊNCIO, 2003).

A casca de arroz é uma cobertura lenhosa do grão, apresenta elevada dureza, alto teor de sílica, composta de aproximadamente 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica de base anidra. Quando queimada, a lignina e a celulose podem ser removidas, resultando uma estrutura celular e porosa. Queimada parcialmente, a casca de arroz gera uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, possui cor preta. Inteiramente queimada, resulta numa cor acinzentada, branca ou púrpura, dependendo das impurezas presentes e das condições de queima. Temperatura elevada e longo tempo de exposição geram cinzas, branco-rosadas, o que indica a presença de sílica nas suas formas cristalinas: cristobalita e tridimita. No entanto as cinzas de casca de arroz devem ser queimadas em temperaturas baixas, entre 500 e 800 °C, para que a cinza resultante tenha boa condutividade pozolânica. A queima em temperaturas mais elevadas causa a cristalização das cinzas e, conseqüentemente, a diminuição da sua reatividade (PRUDÊNCIO, 2003).

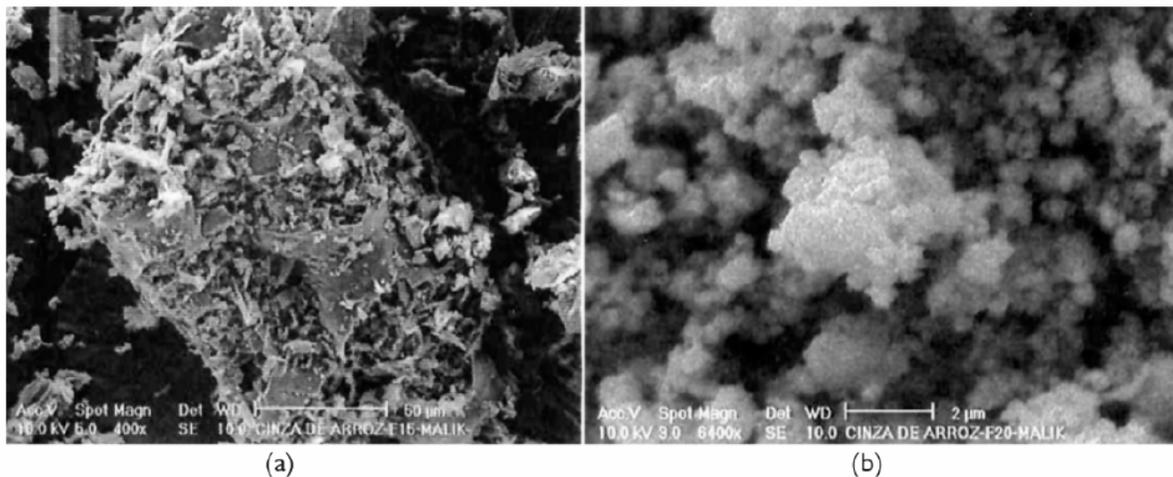
Estudos experimentais realizados na Universidade da Califórnia mostram que, quando a temperatura de queima da casca de arroz é baixa e o tempo de exposição à alta temperatura é pequeno, a sílica contida na cinza é amorfa, A cinza nessas condições apresenta alta porosidade interna e superfície específica de 50 a 110m<sup>2</sup>/g quando medida por adsorção de nitrogênio (MEHTA, 1994). Essas cinzas apresentam boa atividade pozolânica, sendo consideradas um excelente material para uso como adição em cimento Portland.

No difratograma da Figura 2.3 observa-se que a cinza de casca de arroz possui vários picos pela presença de cristais de sílica. O bom desempenho apresentado por essas cinzas pode ser justificado pela elevada superfície específica que possui a sílica presente nas cinzas de casca de arroz e pelo efeito fíler gerado pela presença de carbono não combusto, que é um material extremamente fino (PRUDÊNCIO, 2003).

A micrografia da Figura 2.4 mostra a diminuição do tamanho do grão em função do tempo de moagem. O grau de moagem da cinza de casca de arroz influencia significativamente o seu desempenho, medido pelo índice de atividade pozolânica.



**Figura 2.3 – Difratoograma de raios-X da cinza de casca de arroz. C = cristobalita; Q = quartzo (PRUDÊNCIO, 2003)**



**Figura 2.4 – Micrografia eletrônica de varredura de uma cinza de casca de arroz típica (a) 15 min. de moagem, (b) 20 horas de moagem (PRUDÊNCIO 2003)**

Quanto mais fina for a cinza de casca de arroz o índice de pozolanicidade tende a cair, provavelmente devido à dificuldade de dispersar as partículas muito finas na argamassa; entretanto, a demanda de água diminui nas argamassas com o aumento do grau de moagem. Fato atribuído à destruição progressiva da estrutura esponjosa da cinza (PRUDÊNCIO, 2003).

## 2.3 Escória de alto-forno

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 se observaram 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).

A escória 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. A uma temperatura aproximada de 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 : o ferro para

posterior refino e a escória líquida para ser utilizada junto do cimento Portland (CAMARINI, 1995).

Após sair do alto-forno a escória pode ser resfriada de duas maneiras. Pode ser deixada resfriar lentamente onde ela se cristaliza, e nestes casos ela pode ser utilizada como agregado para produzir concreto, em asfalto e como lastro, mas ela tem pouco valor hidráulico, não sendo usada como material cimentante. 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, podem proporcionar bons resultados (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 MgO e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mas isso não muda drasticamente as propriedades hidráulicas da escória (AITCIN, 2000).

A Tabela 2.2 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 2.2 – Composição típica das escórias de alto-forno produzidas no Brasil (JOHN, 1995)**

Componentes	Escória básica	Escória ácida
CaO	40 - 50	24 – 39
$\text{SiO}_2$	30 - 35	38 – 55
$\text{Al}_2\text{O}_3$	11 - 18	8 – 19
MgO	2,5 - 9	1,5 – 9
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	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 (CAMARINI, 1995).

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 (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).

Para que a escória tenha propriedades aglomerantes ela precisa ser ativada. 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).

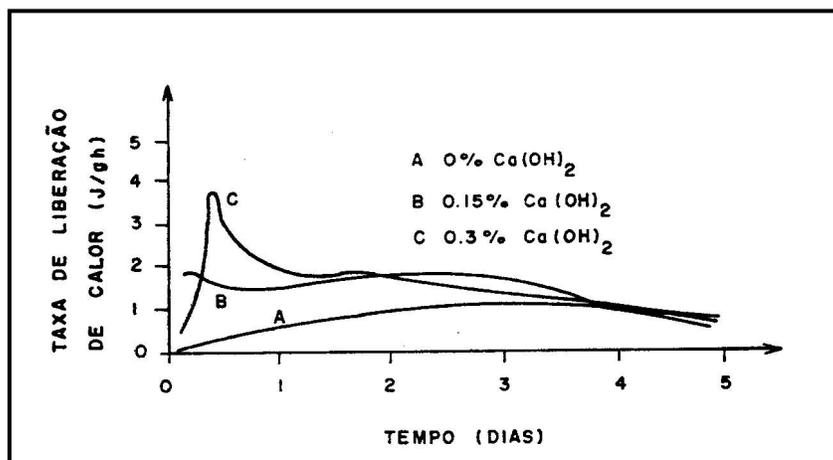
É importante a ação dos ativadores no processo de hidratação da escória, pois permite que o pH da solução mantenha-se elevado, como já exposto. Estudos apontam que o melhor ativador depende fundamentalmente da composição da escória de alto-forno utilizada, sendo o cimento Portland, os sulfatos de cálcio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

Na ativação da escória 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).

Na ativação da escória 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 (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. Ocorre também a formação do C-S-H (CAMARINI, 1995).

As curvas calorimétricas da Figura 2.5 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 (CAMARINI, 1995). 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 2.5 – Curva calorimétrica da hidratação de escória na presença de sulfato e vários teores de hidróxido de cálcio (CAMARINI, 1985)**

Quando da ativação da escória pelo hidróxido de cálcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , o mesmo 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).

Na ativação da escória pelo silicato de sódio as 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  $\text{SiO}_4^{4-}$ , observa-se rapidamente a formação de C-S-H e  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  (SILVA 1998).

O hidróxido de sódio (NaOH) 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 (SILVA, 1998).

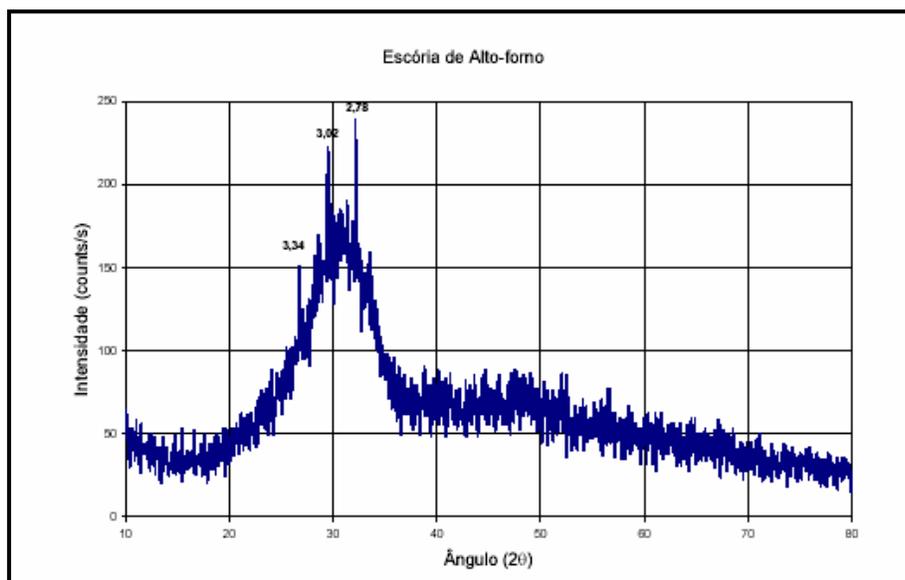
A Tabela 2.3, mostra os compostos hidratados produzidos pelos vários tipos de ativadores da escória.

**Tabela 2.3 – Compostos hidratados produzidos pela ativação da escória ( CAMARINI, 1995)**

<b>Tipo de ativador</b>	<b>Fases cristalinas</b>	<b>Comentários</b>
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, Aftm, hidrogranada, hidrotalcita	- A hidrotalcita nem sempre é identificável

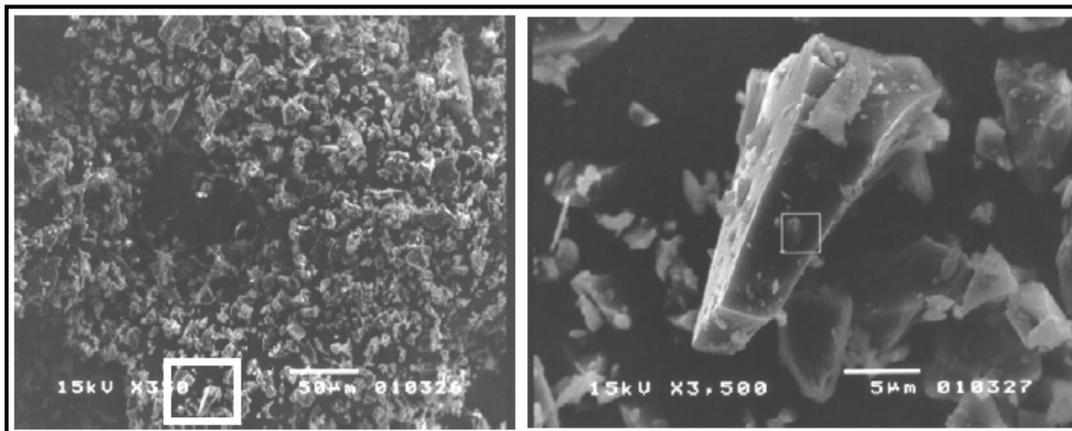
Observa-se na Tabela 2.3 que, para qualquer tipo de ativador, ocorre a formação de um composto comum: o C-S-H. Esse composto é muito importante pois preenche os espaços, aglutina outras fases cristalinas hidratadas e adere bem à escória anidra e ao agregado (CAMARINI, 1995).

Na caracterização da microestrutura da escória granulada de alto forno utilizaram-se as técnicas de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura. Na difração de raios-X (Figura 2.6) o espectro apresenta três picos que acusam a presença de quartzo- $\text{SiO}_2$  (3,34), calcita- $\text{CaCO}_3$  (2,78) e silicato de cálcio- $\text{Ca}_x\text{Si}_y\text{O}_2$  (3,02) (BOURGUIGNON, 2004)



**Figura 2.6 – Difratograma de raios-X da escória granulada de alto-forno moída (BOURGUIGNON, 2004)**

Na microscopia eletrônica de varredura são observados os aspectos dos compostos presentes nas fases anidra e hidratada dos compósitos que apresentam escória granulada de alto-forno em sua composição. A Figura 2.7 apresenta as micrografias da escória granulada de alto-forno. Nesta figura observa-se a predominância de elementos como cálcio e silício nos cristais (BOURGUIGNON, 2004).



(a)

(b)

**Figura 2.7 – (a) Aspecto geral da escória de alto-forno e (b) detalhe do cristal (BOURGUIGNON, 2004)**

## 2.4 Sílica Ativa

A sílica ativa é um material cimentante, 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, mas somente ao final dos anos 1970 na Escandinávia, e no início dos anos 1980, na América do Norte, é que a sílica ativa começou a ser utilizada como material cimentante suplementar no concreto (AITCIN, 2000). 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 1980, em diversos países, levaram a uma rápida aceitação em quase toda a parte do mundo em menos de cinco anos (AITCIN, 2000).

A sílica ativa, também denominada fumo de sílica, 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. Durante a redução da sílica, dentro do arco elétrico, um subóxido de silício, 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) (AITCIN ,2000).

A Tabela 2.4 mostra a composição química da sílica ativa.

**Tabela 2.4 – Composição Química típica de algumas sílicas ativas (AITCIN, 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 2.4, a sílica ativa é composta principalmente de sílica, e o seu teor 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).

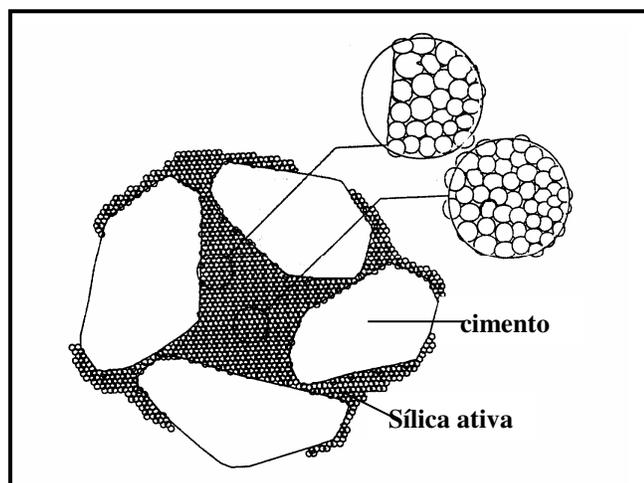
Estruturalmente, a sílica ativa é composta de sílica vítrea. O resfriamento do vapor de SiO e a sua oxidação para SiO<sub>2</sub> acontece rapidamente e o tetraedro do SiO<sub>2</sub> não tem tempo de se organizar para constituir a forma da sílica cristalina. Fisicamente, as partículas de sílica ativa 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 15.000m<sup>2</sup>/kg a 25.000.m<sup>2</sup>/kg, a área específica de um cimento Portland comum é de aproximadamente 3.500 m<sup>2</sup>/kg (AITCIN, 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 tenha produzido melhorias mais significativas no concreto (NEVILLE, 1997).

A ação da sílica ativa é, primeiramente baseada em suas propriedades químicas, como o efeito pozolânico, em que a sílica ativa reage com os íons de hidróxido de cálcio da solução alcalina que a envolve, formando como produto desta reação estruturas C-S-H semelhante às resultantes da hidratação dos silicatos presentes no clínquer de cimento (ACI 363R-92, 2001). Em segundo lugar, é também baseada na propriedade física do efeito microfíler, as partículas da sílica ativa introduzem-se facilmente, quando bem defloculadas pelo superplastificante, nos espaços entre os grãos de cimento (Figura 2.8). Isto faz com que se reduza o espaço disponível para a água atuando como pontos de nucleação de produtos da hidratação

do cimento. O efeito microfíler também é o responsável pelo aumento da fluidez em concretos com baixa relação água/aglomerante (AITCIN, 2000). Estas propriedades têm as seguintes conseqüências sobre as características do concreto fresco ou endurecido segundo (MEHTA & MONTEIRO, 1994):

- aumento da resistência à compressão e à tração;
- aumento da coesão com menor segregação e exsudação;
- redução da permeabilidade e da porosidade;
- aumento da durabilidade do concreto;
- aumento da resistência à abrasão.

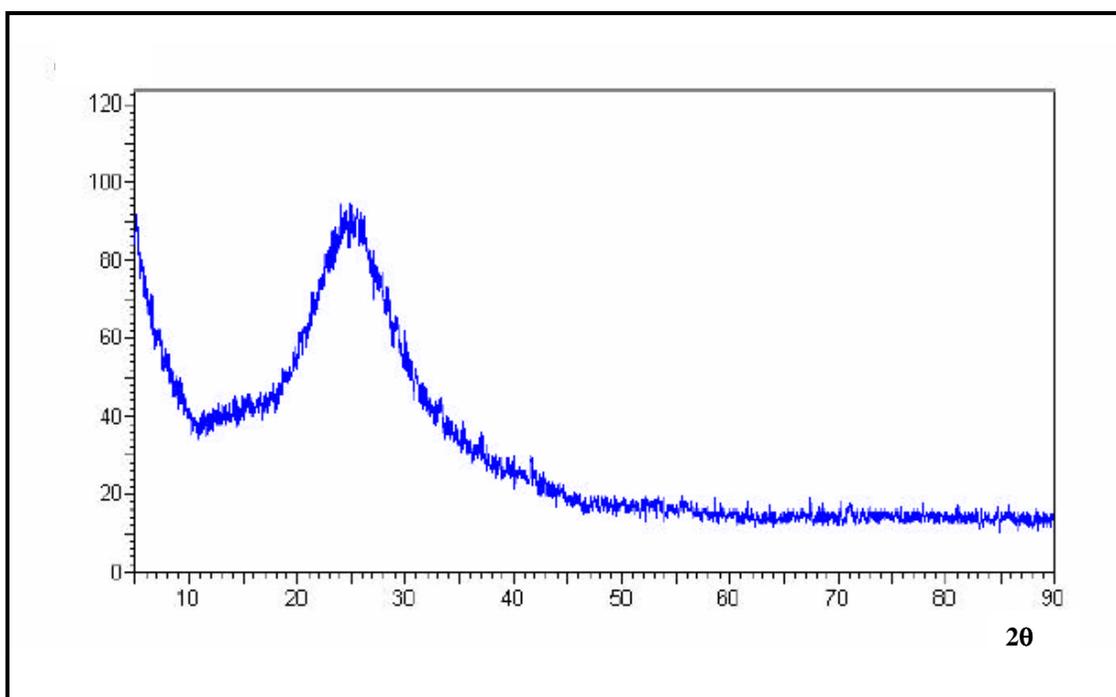


**Figura 2.8 – Efeito fíler da sílica ativa (AITCIN, 2000)**

Na caracterização da microestrutura de uma sílica ativa composta conforme Tabela 2.5 foi utilizada inicialmente a técnica de difração de raios-X. Por difração de raios-X observou-se à ausência de fases cristalinas no material, confirmada pela ausência de picos no difratograma e pela formação de um pico largo, relacionado ao holo amorfo centrado entorno de  $25^\circ$  de  $2\theta$  (Figura 2.9). Portanto, trata-se de uma sílica ativa amorfa, que apresenta bom efeito cimentício ( KORMANN, 2002).

**Tabela 2.5 Composição química e principais propriedades físicas da sílica ativa e os limites estabelecidos pela ABNT**

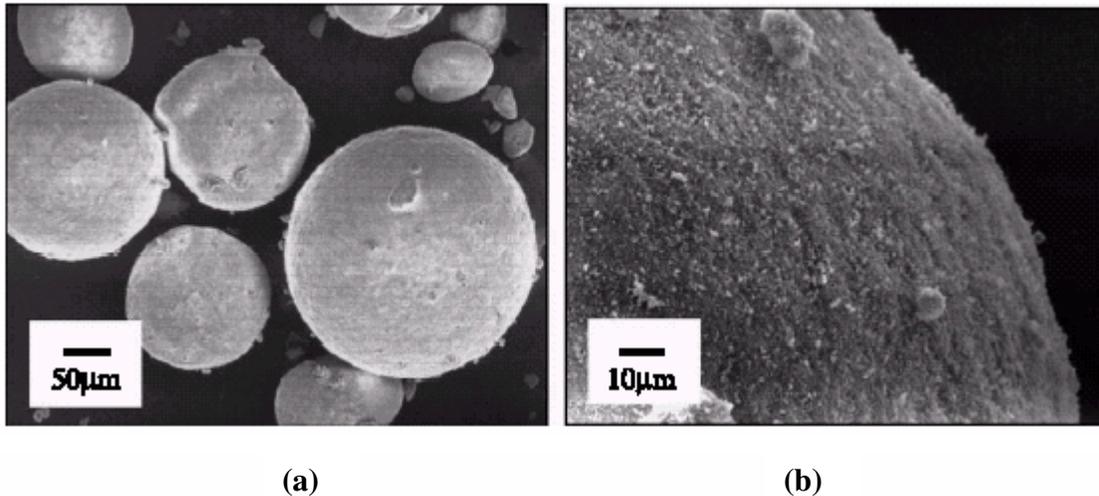
Compostos	Análise da sílica ativa	Limites da ABNT (1997)
SiO <sub>2</sub> (%)	96,4	mín. 5,0
Na <sub>2</sub> O (%)	0,25	—
K <sub>2</sub> O (%)	0,73	—
Perda ao fogo (%)	1,98	máx. 6,0
Na <sub>2</sub> O equivalente (%)	0,70	máx 1,5
umidade	0,90	máx 3,0



**Figura 2.9 – Difratograma de raios-X da sílica ativa (KORMANN, 2002)**

A micrografia da Figura 2.10 apresenta as características da partícula de sílica ativa e as morfologias do produto hidratado. Na Figura 2.10(a) observa-se que nos aglomerados de sílica ativa as partículas geralmente são esféricas e na Figura 2.10(b)

observa-se um aglomerado de partículas muito pequenas de sílica ativa. Alguns aglomerados têm uma dimensão maior do que 100 $\mu\text{m}$  de diâmetro (YAJUN, 2003).



**Figura 2.10 – Microscopia da sílica ativa. (a) forma e tamanho da partícula da sílica ativa (b) aglomerado de sílica ativa (YAJUN, 2003)**

Como visto neste capítulo, há muito tempo busca-se destino adequado e prático para os rejeitos industriais, sendo que muito deles apresentam grande volumes de descarte como a casca do arroz (cinza de casca de arroz), cinza da queima do carvão industrial, escórias de siderurgia e de fundição de metais (escórias de alto-forno). Hoje partes desses resíduos são incorporados em aglomerantes aéreos e hidráulicos dando um destino melhor, que além de colaborar com o meio ambiente, também conferem muitas propriedades desejáveis. Verifica-se portanto, que tanto do ponto de vista técnico, ambiental e econômico, justifica-se a utilização desses rejeitos.

### **3 AGLOMERANTES MINERAIS TRADICIONAIS**

Os aglomerantes tradicionais: cal, gesso e cimento, classificam-se em hidráulicos e aéreos. São definidos como hidráulicos os aglomerantes que não só endurecem através de reações com água, como também formam um produto resistente à água, como o cimento Portland. Os aglomerantes que não apresentam bom desempenho quando em contato com a água são definidos como aglomerantes aéreos, não são hidráulicos porque seus produtos de hidratação não resistem à água (MEHTA,1994).

Os cimentos Portland são os principais aglomerantes hidráulicos e a cal e o gesso são os aglomerantes aéreos empregados atualmente na construção civil.

Neste capítulo serão abordados os aglomerantes aéreos e hidráulicos tradicionais: a cal, o gesso e o cimento Portland, ressaltando, no entanto, que para o desenvolvimento desta tese somente foi utilizado o gesso e o cimento Portland. A inclusão da cal tem como intuito descrever os principais aglomerantes utilizados na construção civil.

#### **3.1 Cal**

Mesmo tendo evidência da presença da cal ao longo da maior parte da existência da humanidade, foi somente a partir da civilização egípcia que o produto começa a aparecer com frequência nas construções. Do Egito a cal passou para a Grécia, a seguir para Roma e depois para outras regiões mediterrâneas (GUIMARÃES, 1998).

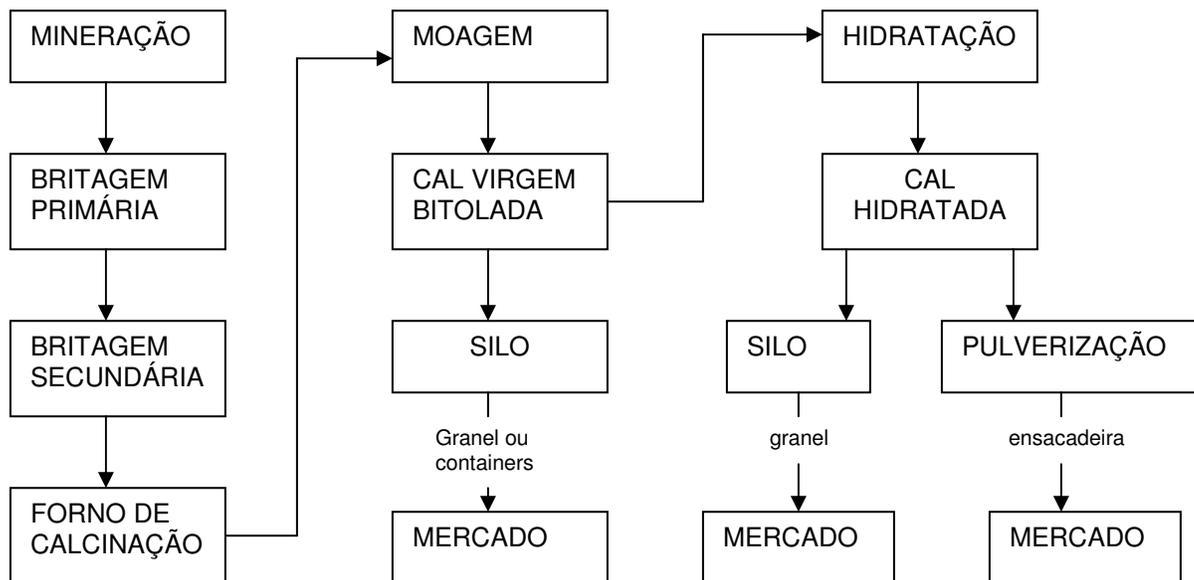
No Brasil a indústria de cal iniciou suas atividades por volta de 1549, quando das instalações das primeiras “caieiras” para a fabricação da cal virgem a partir de conchas marinhas, para as argamassas de revestimento e pintura do casario da cidade de Salvador da Bahia. De 1549 até a década de 1930 a fabricação de cal no Brasil foi voltada, principalmente, para as obras de construção civil e, um pouco para as indústrias de açúcar, tratamento de águas potáveis e de couro. Com o grande surto da construção civil, o crescimento das indústrias de açúcar, o aparecimento da indústria de celulose, e da siderurgia, levaram a partir da década de 1950, a indústria brasileira de calcinação de calcários e dolomitos para um rápido desenvolvimento (GUIMARÃES, 1998).

### **3.1.1 Produção da Cal**

Dentre as rochas e minerais utilizados pelo homem, destacam-se as rochas carbonatadas, que constituem 0,25% do volume da crosta terrestre. Essas rochas são constituídas pelos minerais: calcita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$  - romboédrico), aragonita (carbonato de cálcio –  $\text{CaCO}_3$  - ortorombico) e a dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$  – carbonato de cálcio e carbonato de magnésio - romboédrico). Os elementos que acompanham mais freqüentemente a calcita e a dolomita são: alumínio, titânio, sódio, bário, estrôncio, chumbo, cádmio, vanádio, cromo, cobalto, níquel, cobre, gálio, zircônio, molibdênio e estanho (GUIMARÃES, 1998).

A cal é o principal produto derivado dos calcários ou dolomitos, obtida através de calcinação. Podem ser fabricadas em fornos rudimentares, de pequena produção, ou em forno de alta tecnologia para grandes quantidades. A Figura 3.1 mostra um fluxograma resumido da fabricação das cales.

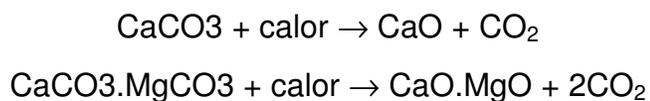
A maioria da cal produzida no Brasil resulta da calcinação de calcários/dolomitos de idades geológicas diferentes. Em geral, na região sul-sudeste predominam as cales provenientes dos dolomitos e calcários magnesianos, e na região nordeste-norte-centro, as resultantes de calcários calcíticos.



**Figura 3.1 – Esquema simplificado de industrialização da cal (GUIMARÃES, 1990)**

### 3.1.2 Calcinação

Na calcinação a decomposição térmica dos calcários ou dolomitos resulta na formação de dois produtos: cal e o dióxido de carbono. Esta reação, quimicamente bem estabelecida em relação às massas moleculares, é reversível para ambos os carbonatos de cálcio e de magnésio. O resultado da calcinação dos carbonatos de cálcio e de cálcio-magnésio são, respectivamente, os óxidos de cálcio (CaO) e cálcio-magnésio (CaO-MgO), denominados de cal virgem ou cal aérea ou cal viva. A representação química da reação é apresentada a seguir:



Fatores como: propriedades da carga do fogo, tipo de combustível, desempenho do forno e reações químicas, influenciam na calcinação.

A qualidade química do produto depende, primeiro, das características e das impurezas contidas na rocha que lhe deu origem, recebendo o nome de *cal cálcica* o produto com alto teor em óxido de cálcio; *cal dolomítica*, quando possui a relação entre os óxidos de cálcio e de magnésio igual a molecular CaO/MgO; e de *cal magnesiana* quando possui teores de óxido de magnésio intermediário entre a cal cálcica e a cal dolomítica.

A qualidade da cal também depende do forno e da habilidade do seu operador. Quando é operado com habilidade (em relação ao controle da temperatura e do tempo de permanência) o forno de calcinação produz cal virgem de alta reatividade, denominada “soft” ou “gorda” ou “rica”. Já o forno operado principalmente visando a produção, produz cal virgem “hard” ou “dura” de alta densidade e baixa reatividade (GUIMARÃES, 1998).

Os fornos utilizados para a calcinação da cal podem ser: fornos primitivos, fornos descontínuos de alvenaria, fornos contínuos de alvenaria, Fornos metálicos verticais de cuba simples, fornos verticais de cubas múltiplas, fornos verticais de leito fluidizado, fornos metálicos rotativos horizontais, fornos horizontais de câmaras rotativas ou fixas, fornos de estruturas mistas, fornos DSO e fornos Kunne-Chisaki (GUIMARÃES, 1998).

No Brasil na região nordeste-norte ainda se usa os fornos rudimentares para a produção da cal, mas a grande maioria das fábricas moderna utiliza os fornos rotativo horizontal ou vertical.

### **3.1.3 Hidratação da cal**

A hidratação da cal virgem é obtida mediante a adição de água, processo usualmente conhecido por extinção da cal, e o hidróxido resultante denomina-se “cal extinta” no caso de ter sido realizada no local do emprego do material, no canteiro de obras (pasta de cal). Quando a extinção se processa na fábrica o hidróxido resultante é denominado de “cal hidratada”.

A cal hidratada oferece sobre a cal virgem algumas vantagens, entre elas a maior facilidade de manuseio, transporte e armazenamento. Sendo um produto seco (pó), oferece maior facilidade de mistura na execução das argamassas do que a pasta de cal resultante da extinção da cal viva (BAUER, 1994).

A reação da cal virgem com água é altamente exotérmica, com calor liberado da ordem de 272 cal/g e 211 cal/g, respectivamente, para a cal virgem cálcica e dolomítica. Na variedade cálcica de grande pureza, o processo é violento. Na variedade magnésiana, o processo é mais lento, conseqüentemente, a produção de calor é menor, assim como o aumento de volume (CINCOTTO, 1977).

A hidratação, pode ser considerada como uma reação reversível, uma vez que a desidratação, realizada por aquecimento, regenera a cal virgem, volatilizando a água liberada, segundo as equações abaixo:

Cal virgem de alto teor cálcico:  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{calor}$

Cal virgem dolomítica normal:  $\text{CaO} \cdot \text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO} + \text{calor}$

Cal virgem dolomítica sob pressão:  $\text{CaO} \cdot \text{MgO} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{pressão} \rightleftharpoons \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{pressão}$

A cal virgem de alto teor de cálcio, mesmo superqueimada, hidrata-se mais facilmente do que a cal dolomítica. Esta, devido ao óxido de magnésio supercalcinado, requer o uso de pressão para hidratação completa. Admitindo-se hidratação completa, a cal cálcica deverá apresentar 24,3% e a cal dolomítica 27,2% de água combinada.

Em contato com a água, a cal virgem, apresenta uma grande afinidade pela umidade, adsorvendo-a nos seus poros. Devido à sua higroscopicidade elevada, a adsorção continua simultaneamente ao processo de hidratação que se inicia. Com a penetração da água nos poros, o calor de hidratação liberado gera forças de expansão internas causando a desintegração completa, em um pó ou em um gel, dependendo da quantidade de água utilizada na hidratação. A água assimilada fica combinada sob a forma de hidróxido de cálcio ou de magnésio. Na prática, é necessário empregar um excesso de água para a hidratação, em relação à quantidade de água teórica, para atingir-se a hidratação completa, uma vez que parte dela é perdida pela evaporação causada pelo calor de hidratação. Conseqüentemente, se for adicionado somente a quantidade teórica de água requerida pela hidratação, a cal não estará completamente

hidratada. Para hidratar a cal cálcica são necessários, estequiometricamente, 32,1% de água. Mas o volume de água utilizada é pelo menos de 52% da massa da cal virgem (CINCOTTO, 1977).

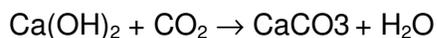
A Tabela 3.1 mostra as propriedades da cal virgem e da cal hidratada.

**Tabela 3.1 – Propriedades da cal virgem e da cal hidratada (GUIMARÃES, 1998)**

Propriedades	Cal virgem	Cal hidratada
Composição Química	CaO ou CaO-MgO	Ca(OH) <sub>2</sub> ou Ca(OH) <sub>2</sub> Mg(OH) <sub>2</sub>
Sistema de cristalização	Cúbico	Hexagonal
Porosidade	18 a 48%	-
Massa específica	3.000 a 3.500 kg/m <sup>3</sup>	2.300 a 2.900 kg/m <sup>3</sup>
Densidade aparente	880 a 960 kg/m <sup>3</sup>	400 a 640 kg/m <sup>3</sup>
Mohs	2 a 3	2 a 3
Coeficiente de expansão	138 x 10 <sup>-7</sup> °C	3,34 x 10 <sup>-5</sup> °C
Condutividade térmica	0,0015 a 0,002 Cal/Cm/Seg/°C	-
Calor específico	0,17 a 0,32	0,27 a 0,37
Calor de formação	151.900 a 143.750 Cal/Mole	8.000 a 15.300 Cal/Mole
Ângulo de repouso	50 a 55 °C	70 °C
Solubilidade	-	1,33g CaO/l a 10 °C

### 3.1.4 O uso da cal como aglomerante

A cal hidratada é utilizada em mistura com areia e água, em proporções adequadas, na elaboração de argamassas. As argamassas têm consistência plástica, e endurecem por recombinação do hidróxido de cálcio e/ou de magnésio com o gás carbônico presente na atmosfera, reconstituindo o carbonato original, cujos cristais ligam de maneira permanente os grãos de agregado utilizado. O endurecimento é lento e ocorre de fora para dentro da camada de argamassa, exigindo uma certa porosidade que permita a evaporação de água e a penetração do gás carbônico do ar atmosférico. A reação de carbonatação é a seguinte:



Essa reação ocorre na temperatura ambiente e exige a presença de água (BAUER, 1994).

É importante ressaltar que a hidratação incompleta da cal virgem tem efeitos negativos em argamassas de assentamento e de revestimento. A hidratação se dá com expansão, e, se ela se realiza após a aplicação da argamassa no revestimento, resulta em um empolamento ou na formação de vesículas. As vesículas são causadas pela hidratação do óxido de cálcio, e o empolamento pela hidratação do óxido de magnésio. Se a hidratação se dá em uma argamassa de assentamento, a expansão é observada pelo aparecimento de fissuras horizontais no revestimento.

Considerando que no Brasil não há hidratação sob pressão, para as cales magnesianas e dolomíticas há sempre óxido de magnésio presente.

É importante ressaltar, também, as propriedades físicas da cal utilizadas como aglomerantes, tais como finura, plasticidade e retenção de água. Estas propriedades, além da trabalhabilidade e da capacidade de incorporação de areia, que não constam das especificações, determinam a facilidade e a eficiência com a qual a argamassa pode ser aplicada (CINCOTTO, 1977).

### **3.1.5 Análises da cal por Análise Térmica Diferencial, Termogravimetria, Microscopia e Difração de raios-X**

As técnicas de análise são utilizadas para avaliar os materiais. As mais aplicadas são: a Difração de raios-X, Análise térmica diferencial (DTA), Termogravimetria (TG) e a Microscopia. Neste capítulo serão abordados alguns exemplos da utilização dessas técnicas na cal.

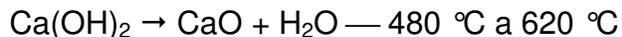
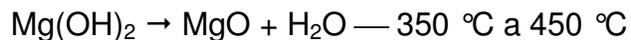
#### **3.1.5.1 Análise Térmica Diferencial (DTA).**

A análise térmica diferencial (DTA) é a técnica termoanalítica na qual é registrada a temperatura de uma amostra em estudo, comparativamente à temperatura

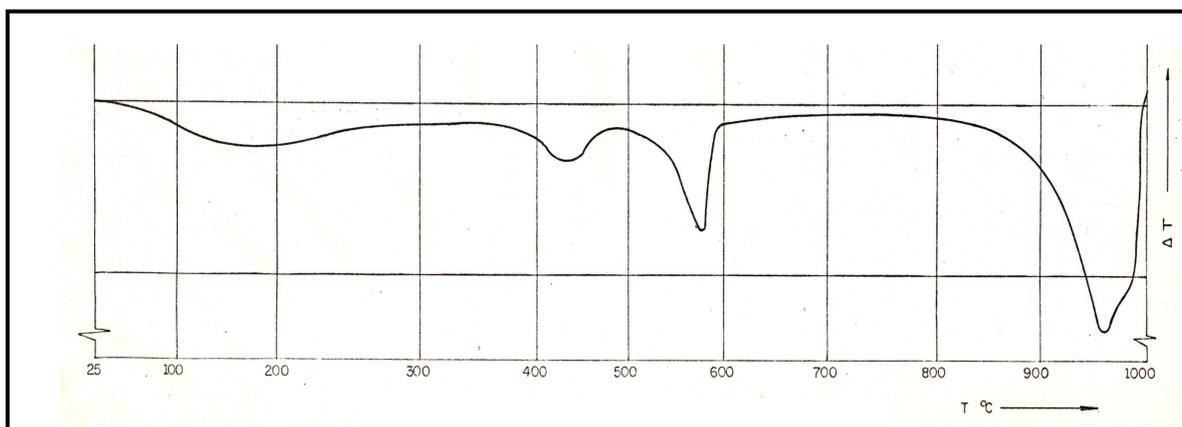
de um material termicamente inerte. As mudanças de temperaturas são devidas a variações de entalpia do sistema ou a reações endotérmicas ou exotérmicas, variação de formas alotrópicas, reação de oxidação e de redução (CINCOTTO, 1977).

Os hidróxidos e os carbonatos de cálcio e de magnésio são termicamente ativos, pois exibem picos endotérmicos de desidroxilação e de dissociação, respectivamente. Sendo esses dois compostos presentes da cal hidratada, a análise térmica diferencial é uma técnica útil no estudo da sua composição química.

Considerando que além dos fatores que normalmente influem sobre a curva DTA (fatores instrumentais, características da amostra) deve-se levar em conta a atmosfera em que a análise é realizada. Desta maneira, pode-se discutir alguns aspectos das curvas DTA de cales hidratadas, partindo das seguintes reações de decomposição e intervalos de variação de temperatura:



A Figura 3.2 mostra a curva DTA da amostra de cal hidratada, fração retida na peneira nº200 em ar atmosférico.



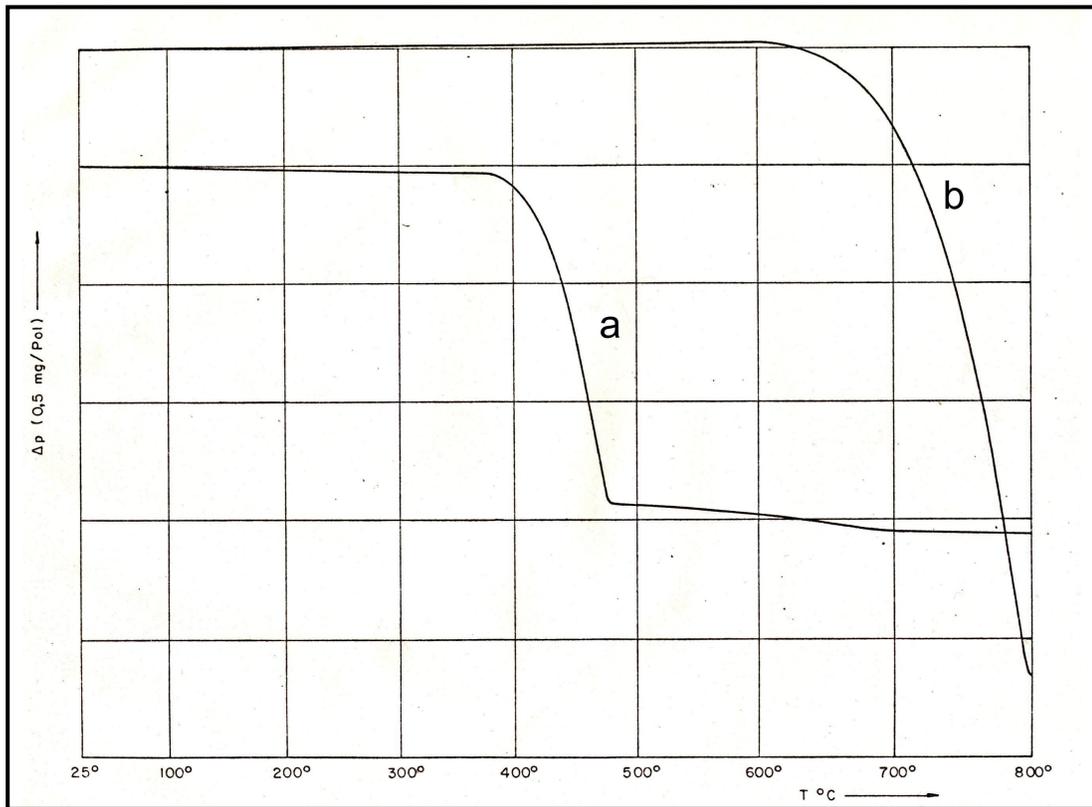
**Figura 3.2 – Curva DTA da cal hidratada (CINCOTTO, 1977)**

### 3.1.5.2 Análise Termogravimétrica (TG)

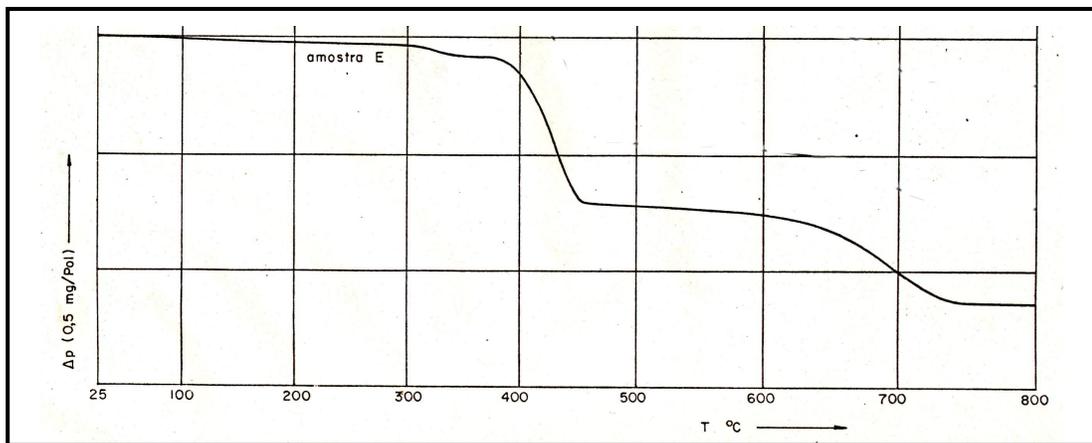
Pela termogravimetria, cuja variação de massa da amostra é registrada em função da temperatura, obtém-se uma curva que fornece informações referentes à estabilidade térmica e composição inicial da amostra, dos compostos intermediários e dos resíduos, se este existir. No caso da cal hidratada, as condições feitas para a termogravimetria são válidas, sendo que os dados obtidos, combinados aos da análise química, permitem o cálculo da composição real das amostras quando os teores de óxidos combinados (hidratados e carbonatados) e não combinados, e uma comparação com os mesmos valores prováveis obtidos por cálculo baseado na análise química.

- a) Os teores de hidróxido de magnésio, de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio são deduzidos das perdas de massa indicadas pelas inflexões das curvas TG.
- b) Correspondentemente, a esses valores estão associados teores de óxido de cálcio e de magnésio combinados.
- c) A diferença entre os teores de óxidos totais obtidos pela análise química e os teores dos óxidos combinados dados pela termogravimetria indicam os teores de óxidos não combinados. No caso particular do cálcio é levado em conta, também o teor combinado como sulfato de cálcio.

Na curva TG do carbonato de cálcio (Figura, 3.3b), tem-se uma inflexão nítida entre 620 °C e 800 °C correspondente a 100% de perda nesse intervalo. Para o hidróxido de cálcio (Figura, 3.3a), nota-se ligeiras inclinações situada entre 372 °C e 472 °C. Após 472 °C ainda se observa perda de peso até 690 °C. Para o hidróxido de magnésio a perda de água é iniciada à temperatura ambiente e intensa a 620 °C, diminuindo gradativamente acima de 134 °C, sendo nula próxima a 287 °C; nessa temperatura há uma mudança brusca na perda de peso, e a maior parte da água combinada é perdida até 416 °C; o teor remanescente é perdido lentamente até 819 °C.



**Figura 3.3 – Curva TG para o hidróxido de cálcio (a) e carbonato de cálcio (b) (CINCOTTO, 1977)**



**Figura 3.4 – Curva TG da cal hidratada (CINCOTTO, 1977)**

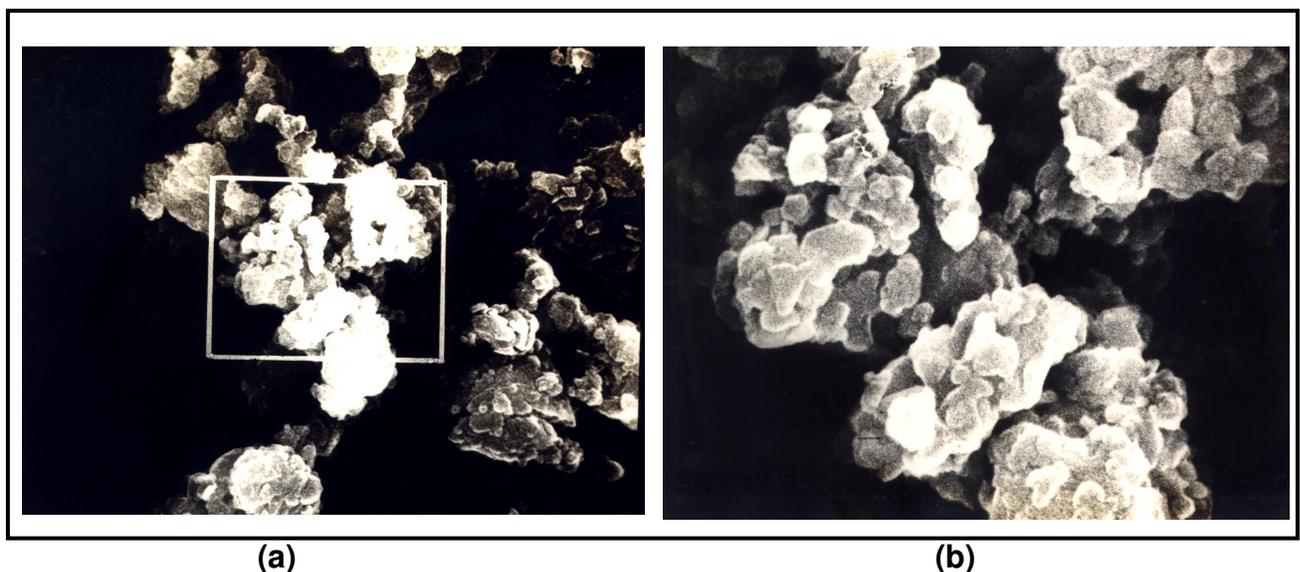
Portanto, para as curvas TG dos compostos individuais da cal hidratada (Figura 3.4), e resumindo o que foi descrito para as curvas TG dos compostos individuais

(Figura 3.3), admite-se, aproximadamente, que até 300 °C houve perda de umidade; entre 300 °C e 380 °C desidroxilação do hidróxido de magnésio; entre 380°C e 620 °C desidroxilação do hidróxido de cálcio e finalmente, entre 620 °C e 740 °C dissociação do carbonato de cálcio (CINCOTTO, 1977).

### 3.1.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise de imagens através do microscópio eletrônico de varredura vem colaborar para melhorar o nível de conhecimento dos materiais, sendo uma ferramenta importante para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processo e a sua utilização.

Na micrografia da Figura 3.5a observa-se o aspecto da parte fina da amostra da cal hidratada, sob o aumento de 10.000 vezes, onde se nota aglomerados de microcristais em placas e na Figura 3.5b a zona central da Figura 3.5a, como indicado, sob o aumento de 30.000 vezes em relação à amostra original (CINCOTTO, 1977).

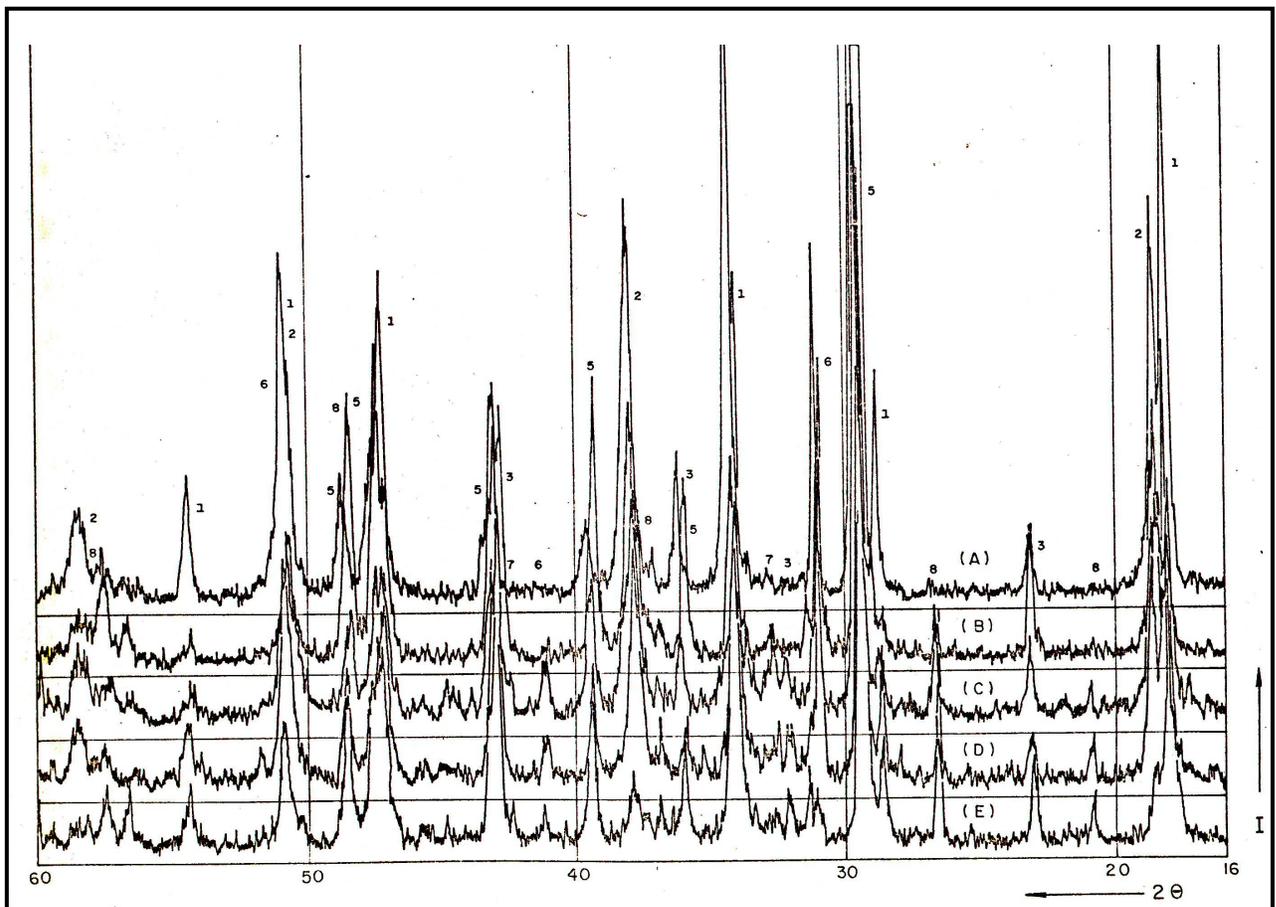


**Figura 3.5 – (a) Imagens de eletrons secundários da cal hidratada aumento 10.000 vezes. (b) aumento do detalhe em 30.000 vezes (CINCOTTO, 1977)**

### 3.1.5.4 Difração de raios-X

É uma técnica importante porque permite identificar qualitativamente os principais compostos de um material, e cada material cristalino dá origem a um único difratograma de raios-X.

O difratograma da Figura 3.6 foi obtido de uma amostra de cal retida na peneira nº200, no processo de peneiramento a seco.



**Figura 3.6 – Difratograma da cal hidratada (CINCOTTO, 1977)**

Observa-se neste difratograma as raias principais dos compostos presentes em determinados ângulos de difração (Tabela, 3.2).

**Tabela 3.2 – Compostos presentes na cal hidratada por análise de DRX (CINCOTTO, 1977)**

<b>Compostos</b>	<b>Ângulo 2<math>\theta</math></b>
1 – Hidróxido de cálcio	34,08
2 – Hidróxido de magnésio	28,02
3 – Óxido de cálcio	37,76
4 – Óxido de magnésio	42,90
5 – Carbonato de cálcio	29,40
6 – Carbonato de magnésio	32,60
7 – Carbonato de cálcio e magnésio	30,90
8 - Quartz	26,60

Pela tradição, múltipla utilidade e benefícios sociais e econômicos, a cal é o principal produto derivado dos calcários ou dolomitos bem como das conchas calcárias. Sua obtenção é simples, mas requer conhecimento e habilidade para alcançar o padrão de qualidade ideal. Outra característica do produto é a ampla possibilidade de sua escala de fabricação, em fornos rudimentares, de pequena produção, até fornos de alta tecnologia e produção volumosa, o que a tornou conhecida em todo o mundo.

Nesta tese a cal não foi empregada como aglomerante, mas somente o gesso e o cimento Portland. A inclusão da cal neste capítulo tem como intuito descrever os principais aglomerantes aéreos e hidráulicos utilizados na construção.

### **3.2 Gesso**

O gesso é um dos mais antigos materiais de construção fabricados pelo homem, como a cal e a terracota. Sua obtenção consiste em um aquecimento a uma temperatura não muito elevada, cerca de 160°C, e uma posterior redução a pó, de um mineral relativamente abundante na natureza: a *pedra de gesso* ou a *gipsita*.

O emprego do gesso remonta ao 8° milênio a.C. As argamassas em gesso e cal serviram de suporte em afrescos decorativos e na realização de recipientes. Na África, foi com um gesso de altíssima resistência que os bárbaros construíram as barragens e canais, que garantiram, por muitos séculos, a irrigação (PERES et al. 2001).

Na França, após a invasão Romana, iniciou-se o conhecimento de processos construtivos chamados de pedreiros de gesso. O modelo de construção utilizado constituía-se do emprego do gesso voltado ao aproveitamento das construções de madeira. A partir do século XII e por todo o fim da Idade Média, as construções utilizando as argamassas com gesso eram desejadas por oferecerem diversas vantagens. O gesso para estuque e alisamento já era conhecido. A Renascença foi marcada pelo domínio do emprego do gesso para a decoração e, na época do barroco, foi largamente chamado de gesso de estuque. A generalização do emprego do gesso na construção civil, na França deve-se, em grande parte, a uma lei de Luis XIV, promulgada em 1667 (PERES et al. 2001). No século XVIII, a utilização do gesso na construção foi tão generalizada na França, a ponto de, do montante das construções existente, 75% dos hotéis e a totalidade dos prédios públicos e populares serem realizados em panos de madeira e argamassa de gesso, e para as novas construções ou as reformas, cerca de 95% serem feitas em gesso. Nessa época, a fabricação de gesso era empírica e rudimentar. Porém, Lavoisier, em 1768, apresentou à Academia de Ciência Francesa o primeiro estudo científico dos fenômenos que são a base da preparação do gesso. No século XIX, os trabalhos de diversos autores, particularmente, os de Vant'Hoff e, sobretudo, o de Le Chatelier, permitiu abordar uma explicação científica para a desidratação da gipsita.

A partir do século XX, em função da evolução industrial, os equipamentos para a fabricação do gesso deixaram de ter um conceito rudimentar e passaram a agregar maior tecnologia, assim como a melhoria tecnológica dos produtos passou a facilitar suas formas de emprego pelo homem (PERES et al. 2001).

### **3.2.1 Produção do 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

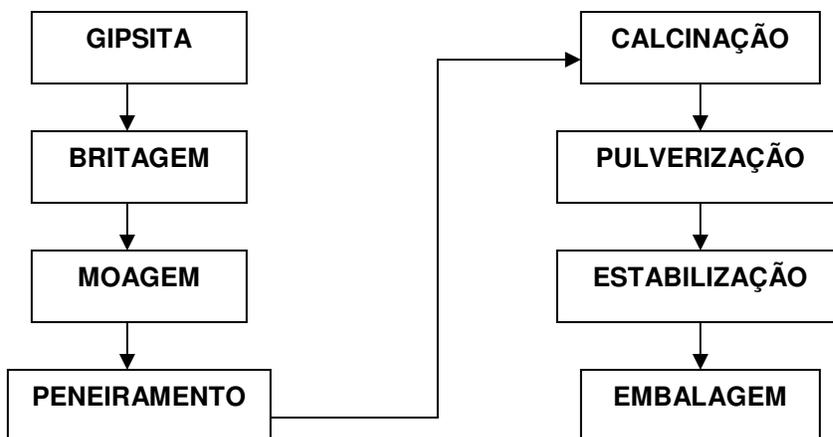
magnésio. As impurezas variam até um limite máximo de 6%. Esse processo é obtido em fornos, com temperaturas e tempos controlados.

O forno tem uma influência no processo da calcinação e no produto final. 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 e o de marmitta rotativo (PEREIRA,1973).

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 e blocos. Para os revestimentos em painéis, a pasta ou a argamassa de gesso, pode ser aplicada de forma manual ou projetada mecanicamente.

O processo de produção do gesso de forma geral compreende as operações unitárias mostradas na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Fluxograma do Processo de Produção do Gesso (PERES et al, 2001)**

### 3.2.2 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 3.3).

**Tabela 3.3 – Compostos obtidos na calcinação da gipsita (PEREIRA, 1973)**

Compostos	Composição Química	Temperatura de obtenção	OBS
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	–	Matéria prima
Hemi-hidrato $\alpha$ ou $\beta$	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$	100 a 180 °C	gesso
Anidrita III	$\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$	180 a 300 °C	Solúvel e instável, reativa, re-hidratando-se
Anidrita II	$\text{CaSO}_4$	300 a 700 °C	Supercalcinada e insolúvel
Anidrita I	$\text{CaO} + \text{SO}_2/\text{SO}_3$	Acima de 1200 °C	Gesso morto, cal virgem
Carbonato de cálcio	$\text{CaCO}_3$	-	impureza
Carbonato de magnésio	$\text{MgCO}_3$	-	impureza
Sílica	$\text{SiO}_2$	-	impureza
Óxido de ferro	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	impureza
Óxido de alumínio	$\text{Al}_2\text{O}_3$	-	impureza
Óxido de cálcio	$\text{CaO}$	-	impureza
Anidro sulfúrico	$\text{SO}_3$	-	impureza
Anidro carbônico	$\text{CO}_2$	-	impureza

$\epsilon$  = pequena quantidade de água combinada (  $0,06 < \epsilon < 0,11$  )

A natureza do produto obtido (hemi-hidrato  $\alpha$  ou  $\beta$ , as Anidritas tipo 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. Esse processo é o mais utilizado (PEREIRA,1973).

A calcinação por via úmida se dá sob pressão de água saturante, dentro de autoclaves de pressão ou pressão atmosférica, mas dentro de soluções salinas em ponto de ebulição. Deste sistema de calcinação obtém-se o hemi-hidrato  $\alpha$ . Na construção civil utiliza-se o hemi-hidrato  $\beta$ , o hemi-hidrato  $\alpha$  é a base dos gessos especiais para moldagem (próteses dentárias, moldagem de precisão).

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 °C 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 °C a 700 °C, é denominada 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. 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 (PEREIRA,1973).

### **3.2.3 Hidratação e Tempo de Pega**

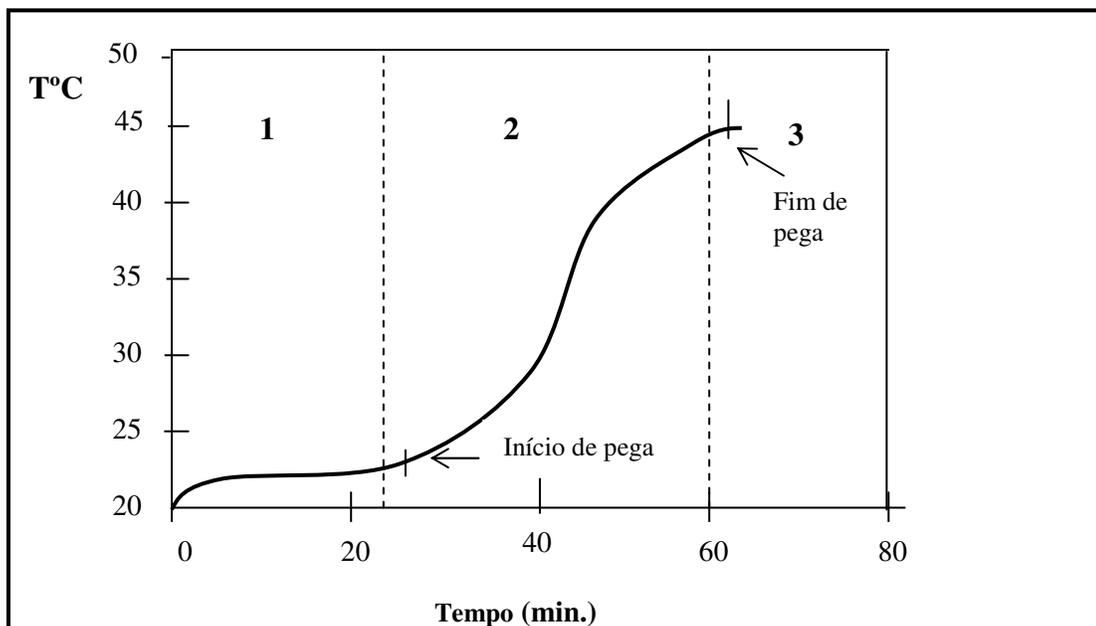
Os hemi-hidratos e os sulfatos anidros solúveis resultantes da calcinação da gipsita, em presença de água, à temperatura ambiente, reconstituem rapidamente o

sulfato bi-hidratado original. Essa combinação se faz com a produção de uma fina malha cristalizada, interpenetrada, responsável pela coesão do conjunto. Tal fenômeno, conhecido pelo nome de *pega do gesso*, é acompanhado de elevação da temperatura, por ser a hidratação uma reação exotérmica.

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 ocorre por dissolução-precipitação, ou seja, ao entrar em contato com a água o gesso dissolve-se dando origem a uma solução de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , 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 3.8):



**Figura 3.8 – Exemplo de curva de hidratação de uma pasta de gesso (ANTUNES et al, 1999)**

*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 do contato entre o pó de gesso e a 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 de gesso finamente moídos 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).

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 ou a pega do gesso. A relação água/gesso, cujo aumento provoca um aumento do tempo de pega, e a ação da temperatura, têm 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, observado por calorimetria (Figura 3.8), é o instante em que a taxa de crescimento da temperatura ultrapassa 0,1 °C/min (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 sua combinação 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 rápida 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).

### **3.2.4 Tempo útil das pastas de gesso**

Como já visto, o endurecimento das pastas de gesso pode ser explicado através da reação de hidratação que se inicia no momento em que a água entra em contato com o pó. A consistência da pasta começa a ser alterada no final do período de indução pela presença dos núcleos de cristalização e vai aumentando progressivamente com a formação da microestrutura adquirindo cada vez mais resistência mecânica até o seu completo endurecimento (ANTUNES & JOHN, 2000).

No Brasil, o método utilizado para medir tempo de pega das pastas de gesso é o proposto pela NBR 12128 (ABNT, 1991), por analogia ao ensaio empregado para cimentos e, por este motivo, apresenta algumas limitações, pois o cimento possui um intervalo de utilização diferente. Pastas, argamassas e concretos de cimento são utilizados antes que sua pega se inicie, ou seja, o tempo disponível para o seu preparo, transporte e aplicação é o tempo de início de pega. Para as pastas de gesso aplicadas manualmente, esse princípio não pode ser adotado. Na prática de obra, as relações água/aglomerante utilizadas são elevadas o que proporciona pastas extremamente

fluídas de aplicação imediata impossível. Para a aplicação é necessário aguardar que as pastas de gesso atinjam a faixa de consistência adequada, determinada pelo gesseiro. A consistência da pasta só começa a ser alterada no final do período de indução, ou seja, pouco antes do início de pega, só após este período é possível a sua utilização. Até o final do período de indução não há dihidrato formado, enquanto no início de pega determinado pela agulha de Vicat, aproximadamente 10% de dihidrato já está formado (ANTUNES & JOHN, 2000).

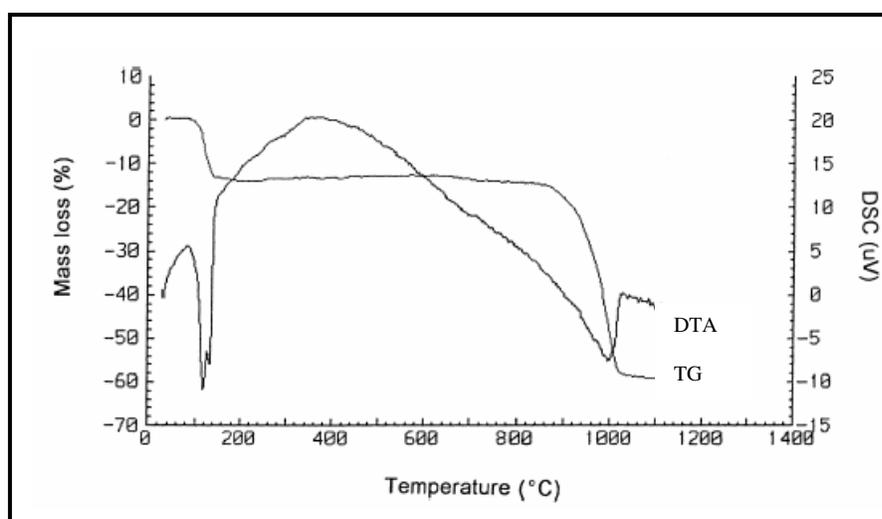
Antunes & John (2000) concluíram que o início da utilização da pasta de gesso teoricamente começaria antes do início de pega determinado pela agulha de Vicat. Como a relação água/aglomerante utilizadas neste ensaio são inferiores às utilizada sem obra, o tempo de início de pega acaba sendo inferior ao tempo necessário para que a pasta com relação água/aglomerante de obra adquira consistência adequada para ser utilizada. No caso do fim de pega determinado pela agulha de Vicat a relação é inversa, isto é, no instante em que ocorre o fim de pega a pasta já está rígida, não sendo possível a sua utilização, portanto, tornando os tempos de início e fim de pega determinada pela NBR 12128 (ABNT, 1991) de pouca utilidade para o gesseiro. Portanto devemos utilizar o conceito de *tempo útil* que é o tempo disponível para a aplicação do gesso, ou seja, o intervalo de tempo em que a pasta se encontra dentro da faixa de consistência adequada para utilização (ANTUNES & JOHN, 2000). O endurecimento das pastas de gesso pode ser explicado através da reação de hidratação que se inicia no momento em que a água entra em contato com o pó. A consistência da pasta começa a ser alterada no final do período de indução pela presença dos núcleos de cristalização e vai aumentando progressivamente com a formação da microestrutura adquirindo cada vez mais resistência mecânica até o seu completo endurecimento (ANTUNES & JOHN, 2000).

### **3.2.5 Análise do gesso por TG, DTA, Difração de raios-X e Microscopia**

É grande a importância do uso das técnicas de análise modernas, onde se podem verificar as diversas propriedades físicas dos materiais e a sua formação. As

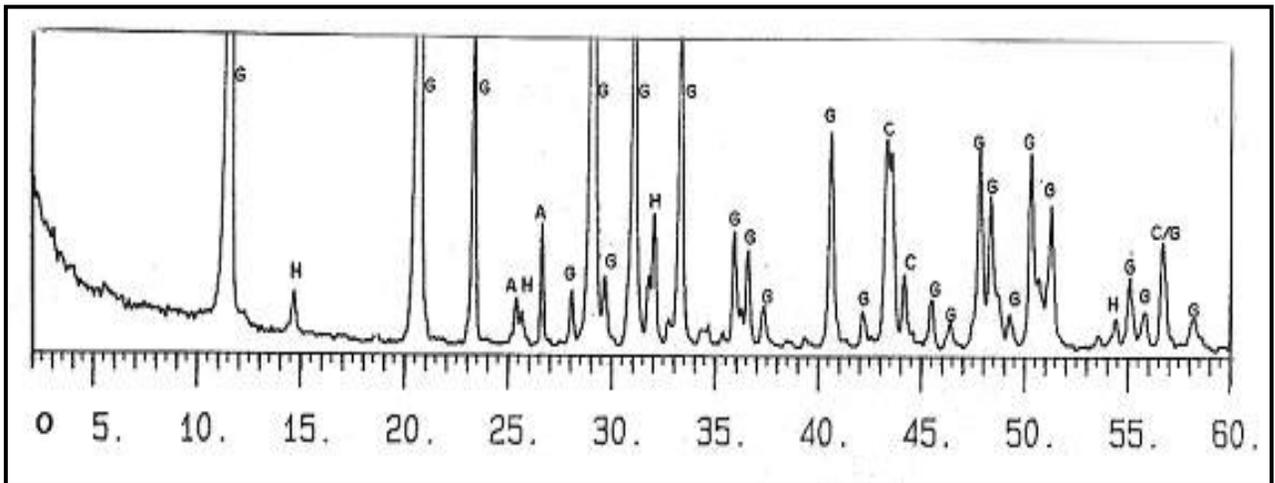
análises térmicas se referem ao grupo de métodos pelos quais algumas propriedades físicas de uma amostra são continuamente medidas. Mudanças na massa formam a base da Termogravimetria; enquanto as medidas das alterações de energia formam a base da análise Térmica Diferencial. Na difração de raios-X as substâncias cristalinas difratam e, dependendo do ângulo de inclinação dos raios difratados à substância cristalina é caracterizada.

Na Figura 3.9 tem-se curvas típicas de TG e DTA de uma mistura de gesso e carbono. A Figura apresenta o resultado obtido através do aumento gradativo da temperatura de 5 °C/min até a temperatura de 1300 °C. Observa-se que entre 80 °C e 200 °C ocorre uma perda de água de hidratação do sulfato de cálcio. Uma pequena massa é perdida entre 650 °C e 750 °C devido à oxidação de uma parte do carbono da mistura. O carbono é oxidado em dióxido de carbono entre 600 °C e 900 °C. A reação entre o carbono e o sulfato de cálcio ocorre entre 750 °C e 1080 °C. Entre 1080 °C e 1300 °C a curva de TG desce constantemente isso é atribuído a decomposição do  $C_aSO_4$  em  $C_aO$  a partir de 1000 °C. Na curva DTA observa-se os compostos presentes na mistura: hemi-hidrato aproximadamente à 120 °C, anidrita solúvel à 160 °C, a transformação da anidrita solúvel em insolúvel à 400 °C e a partir de 1000 °C, provavelmente, gesso morto e cal virgem (MERWE et al, 1999).



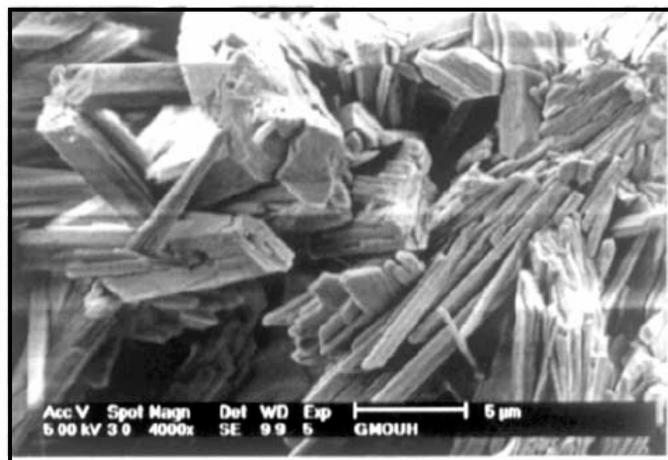
**Figura 3.9 – Curvas TG e DTA da mistura de carbono e sulfato de cálcio dihidratado a uma temperatura de até 1300°C em nitrogênio com acréscimo a cada 5°C/min. (MERWE et al, 1999)**

No difratograma da Figura 3.10 observa-se os compostos formados a partir de uma pasta de gesso aos 28 dias. Os elementos presentes são: (A) anidrita, (G) Gipsita, (H) Hemi-hidrato, (C) Calcita (DE MILITO, 2001).



**Figura 3.10 – Difratograma da pasta de gesso aos 28 dias (DE MILITO, 2001)**

Na micrografia da pasta de gesso da Figura 3.11 observa-se a formação de núcleos onde os cristais de gesso têm formatos e tamanhos diferentes, e uma porosidade caracterizada por macroporos, microporos e microfendas.



**Figura 3.11 – Micrografia da pasta de gesso (GMOUH et al, 2003)**

O gesso é um material largamente utilizado na construção civil como revestimento, tem a vantagem de endurecer rapidamente e proporcionar um acabamento fino, mas está limitado ao uso interno devido a sua sensibilidade a água. Como visto, o gesso é um aglomerante aéreo, seus produtos de hidratação não resistem à água. Para melhorar o seu desempenho em lugares úmidos é possível adicionar cinza volante, epóxi ou cimento como será discutido no próximo capítulo.

### **3.3 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 capazes de unir fragmentos minerais entre si de modo a formar um todo compacto (KATTAR et al, 1999).

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 produzindo o primeiro concreto. Somente no século XVIII registrou-se um avanço na 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 CO<sub>2</sub>. 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.

### **3.3.1 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  $\text{CaO} + \text{CO}_2$  e 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. Com exceção de um pequeno resíduo de óxido de cálcio que não teve tempo suficiente para reagir no interior do forno, 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).

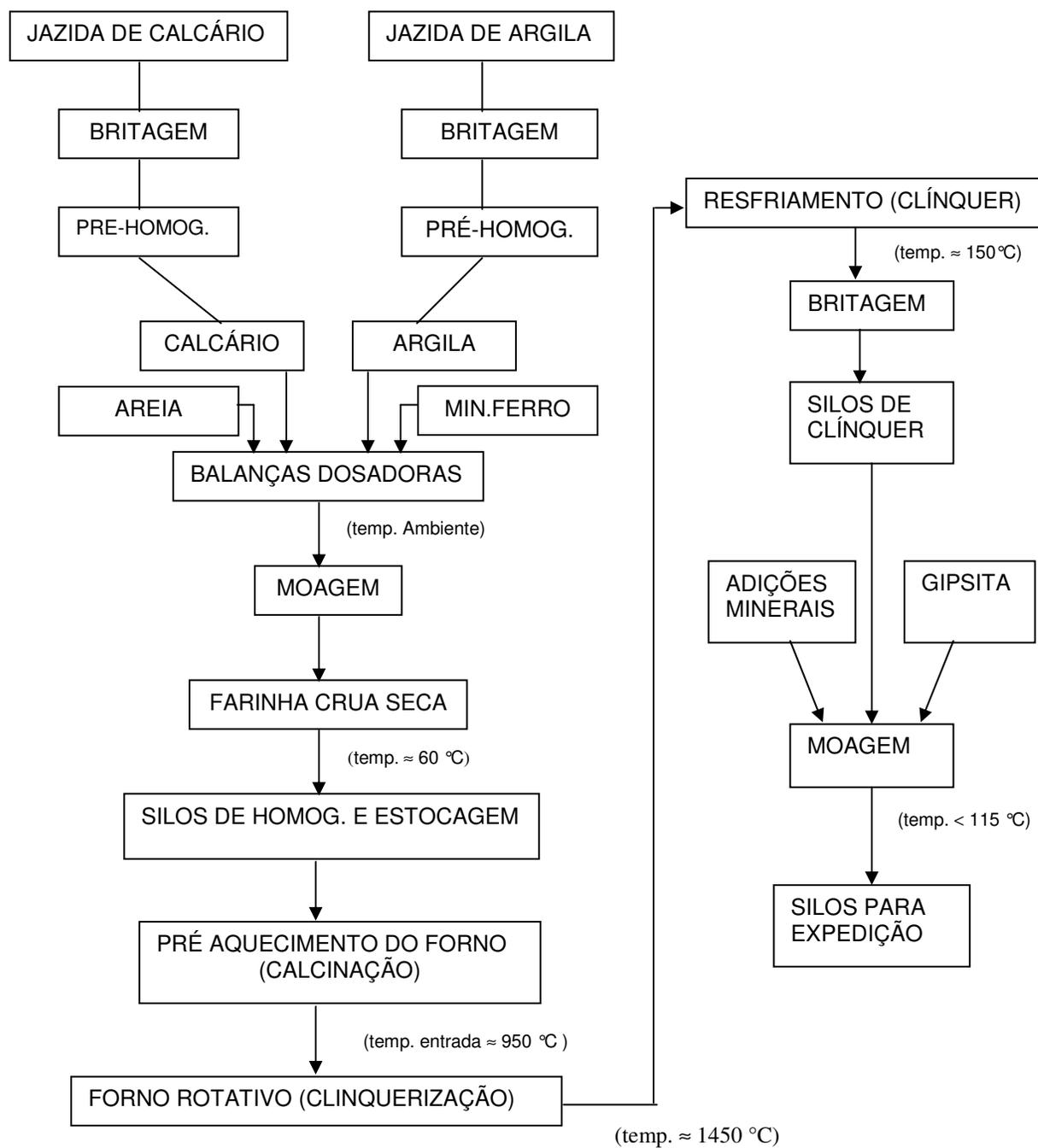
A farinha obtida da moagem das matérias primas é homogeneizada e lançada continuamente na alimentação do pré-aquecedor do forno rotativo. É nesta parte do processo que se inicia a transformação mineral da matéria prima, com a evaporação da água livre, água combinada, desprendimento do CO<sub>2</sub> do calcário, liberando o CaO para reagir com os óxidos de ferro e alumínio, provenientes principalmente da argila. As reações 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 clínquerização e resfriamento pode ser vista na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 – Seqüência de reações no processo até a clínquerização e resfriamento (KATTAR et al., 1999)**

Faixa de Temperatura (°C)	Tipo de reação (local)
<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. Intermediário., 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 calcinação)
<u>Resfriamento</u>	
1300 - 1240	Cristalização da fase líquida, especialmente os aluminatos e ferrita (após zona de calcinação, 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, fíller calcário, escórias de alto-forno e pozolanas. Após a moagem

obtém-se o cimento propriamente dito que é armazenado em silos para expedição. Os cimentos produzidos podem ser distribuídos em sacos, transportados a granel ou em big-bag, (Figura 3.12) (KATTAR et al, 1999).



**Figura 3.12 – Fluxograma do Processo de Fabricação do cimento Portland (KATTAR et al, 1999)**

O mercado nacional dispõe de oito opções de cimento que atendem aos mais variados tipos de obras. O cimento Portland comum (CPI) é tomado como referência, por suas características e propriedades, em relação aos demais tipos que apresentam algum tipo de adição ou pequenas modificações (Tabela 3.5).

**Tabela 3.5 – Cimentos disponíveis no mercado brasileiro (ABCP, 2003)**

Tipos	Aplicações
<b>1-Cimento Portland Comum (CP I) (NBR 5732)</b> a) CPI – Cimento Portland Comum b) CPI-S-Cimento Portland Comum com adição	a) CPI-Cimento Portland sem adição além da gipsita. É muito adequado para o uso em construções de concreto em geral quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas. b) CPI-S, com 5% de material pozolânico em massa, recomendado para construção em geral, com as mesmas características.
<b>2-Cimento Portland (CP II) (NBR 11578)</b> a) CPII-E-composto com escória b) CPII-Z-composto com pozolana c) CPII-F-composto com fíler	O cimento Portland composto é modificado. Gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo cimento Portland comum. Seu uso, portanto, é mais indicado em lançamentos de concreto, onde o volume é grande. Apresenta menor resistência ao ataque de sulfatos contidos no solo. a) CPII-E-Com adição de escória granulada de alto forno. Este cimento combina com bons o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do cimento Portland comum. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacados por sulfatos. b) CPII-Z-Com adição de material pozolânico. Empregado em obras civis em geral, subterrâneas, marítimas e industriais. O concreto feito com esse produto é mais impermeável e por isso mais durável. c) CPII-F-Com adição de fíler. Para aplicações gerais
<b>3-Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) (NBR 5735)</b>	Adicionado com escória, apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. Empregado em geral, mas é particularmente vantajoso em obras de concreto-massa, obras em ambientes agressivos, obras submersas, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais.
<b>4-Cimento Portland Pozolânico (CP IV) (NBR 5736)</b>	Para uso geral. É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos. O concreto feito com esse produto se torna mais impermeável, mais durável, apresenta resistência mecânica superior. Favorece a sua aplicação em grandes volumes devido ao baixo calor de hidratação.
<b>5-Cimento Portland de Alta resistência inicial (CP V-ARI) ( NBR 5733)</b>	É recomendada em todas as aplicações que necessitem de resistência inicial elevada e desforma rápida
<b>6-Cimento Portland Resistente a Sulfatos CP (RS) (NBR 5737)</b>	Oferece resistência aos meios agressivos sulfatados como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solo
<b>7-Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação. CP (BC) (NBR13116)</b>	O cimento Portland de baixo calor de hidratação, é designado por siglas e classes de seu tipo acrescidas de BC. Esse cimento tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica.
<b>8-Cimento Portland Branco CPB (NBR 12989)</b>	O cimento Portland branco se difere por coloração, e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. O estrutural com classes de resistência de 25, 32 e 40, similares aos demais tipos de cimento.

### 3.3.2 Composição do Cimento Portland

A composição química 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, o  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  e o  $C_4AF$ , que estão relacionados na Tabela 3.6, com seus símbolos abreviados. A anotação abreviada, usada na química do cimento, representa cada óxido por uma letra, facilitando o estudo das reações químicas do cimento Portland.

**Tabela 3.6 – Compostos do cimento Portland, suas abreviações e composições (METHA, 1994)**

Óxido	Fórmula	Abreviação	Compostos Potenciais	Abreviação	Composição (%)
Óxido de cálcio	CaO	C	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	59 – 67
Sílica	$SiO_2$	S	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	16 – 26
Alumínio	$Al_2O_3$	A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	4 – 8
Ferro	$Fe_2O_3$	F	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$	2 – 5
Magnésio	MgO	M			
$SO_3$	$SO_3$	S			
$H_2O$	$H_2O$	H			

A seguir serão apresentadas as características principais de cada composto do cimento Portland.

#### a) Características do Silicato Tricálcico – $C_3S$

O  $C_3S$ , abreviação de  $Ca_3SiO_5$ , é um mineral do clínquer de cimento Portland que apresenta polimorfismo. Pode se apresentar com três tipos de estruturas, a

monoclínica, triclínica 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  $C_3S$  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) Características do Silicato Dicálcico – $C_2S$*

O  $C_2S$ , abreviação de  $Ca_2SiO_4$ , apresenta cinco formas polimórficas bem definidas, desde a temperatura ambiente até 1500-1550 °C denominadas  $\alpha$ ,  $\alpha'_H$ ,  $\alpha'_L$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Ao contrário do  $C_3S$  apresenta estruturas mais regulares reagindo lentamente com a água. Pode se apresentar na forma monoclínica e romboédrica (TAYLOR, 1992).

As formas  $\alpha$  e  $\alpha'$  são pouco conhecidas, mas é certo que apresentam hidráulidade maior que as outras formas de  $C_2S$ . As diferentes formas de  $C_2S$  não são identificáveis ao microscópio.

O  $C_2S$  tem, também, contribuição importante na resistência aos esforços mecânicos do cimento, agindo em idades avançadas. Em comparação ao  $C_3S$ , desprende menor calor de hidratação e libera menor quantidade de hidróxido de cálcio durante a hidratação (TAYLOR, 1992).

#### *c) Características da fase intersticial ( $C_3A$ e $C_4AF$ )*

A fase intersticial do clínquer é originada da cristalização da fase líquida durante o resfriamento. Esta fase tem um papel importante no processo de clinquerização, 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, a fase intersticial 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 do segundo resfriamento. O  $C_3A$  apresenta os contornos retilíneos e bem diferenciados dos cristais de  $C_4AF$  (TAYLOR, 1992).

O  $C_3A$ , abreviação de  $Ca_3 Al_2O_6$ , 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.

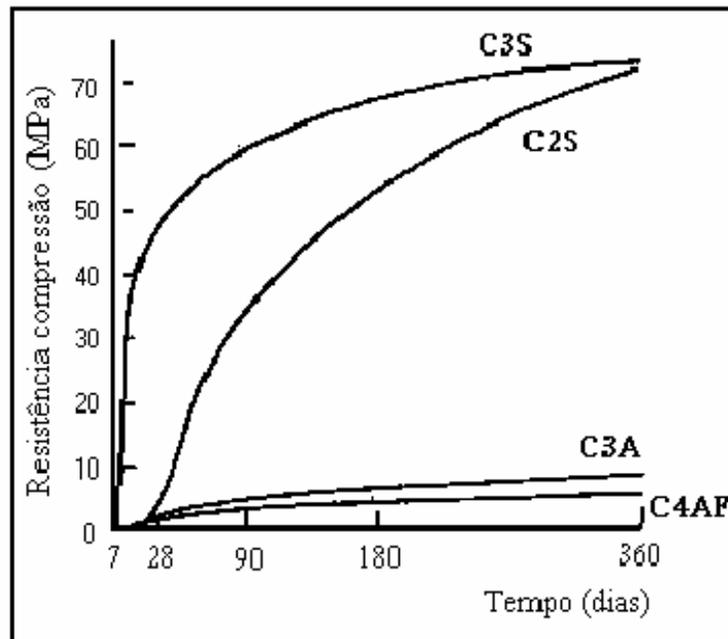
Quanto da hidratação, reage rapidamente com a água, conferindo ao cimento, juntamente com o  $C_3S$ , a resistência inicial às solicitações mecânicas.

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).

O  $C_4AF$ , abreviação de  $Ca_4 Al_2 Fe_2O_{10}$ , constitui, juntamente com o  $C_3A$ , a fase intersticial do clínquer. Cristaliza-se no sistema ortorrômbico.

O  $C_4AF$  apresenta baixa hidráulicidade 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).

A Figura 3.13 apresenta um comparativo da resistência à compressão dos compostos potenciais.



**Figura 3.13 – Resistência à compressão dos principais compostos do cimento (COLLEPARDI, 1999)**

*d) Características dos compostos secundários*

Entende-se por compostos secundários os 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 sendo  $\text{Na}_2\text{O eq.} = (\text{Na}_2\text{O} + 0,64\text{K}_2\text{O})$  podendo variar de 0,3 a 1,5%. 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 ( $\text{CaSO}_4$ ). O hemi-hidrato às vezes pode estar presente nos cimentos devido à decomposição da gipsita durante a operação final de moagem (MEHTA et al, 1994).

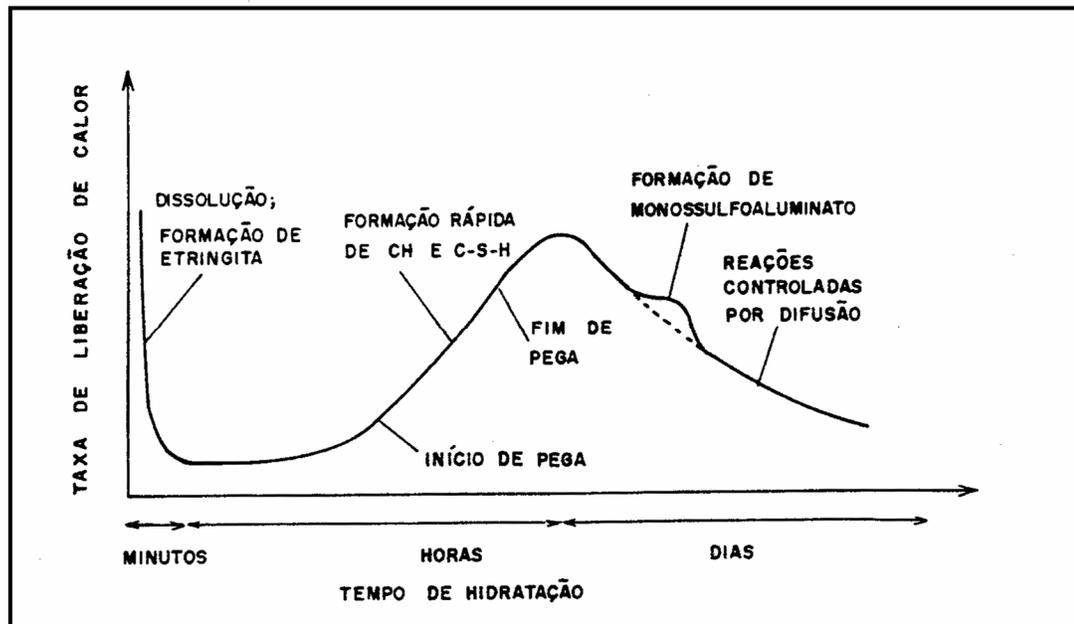
A composição mineralógica do clínquer varia de acordo com as matérias-primas disponíveis e o processo de calcinação aplicado. Para cada tipo de clínquer (minerais) formado, a composição apresenta diferentes comportamentos de endurecimento que proporcionalmente influenciam as propriedades do cimento nas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

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

### **3.3.3 Hidratação do Cimento Portland**

Podemos considerar 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. O mecanismo 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 podem ser observados através das curvas calorimétricas que apresentam a taxa de desenvolvimento de calor em função do tempo (Figura 3.14).



**Figura 3.14 – Esquema da hidratação do cimento Portland comum (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, hidróxido de cálcio (CH) e silicato de cálcio hidratado (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 monossulfoaluminato (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).

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 necessária 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).

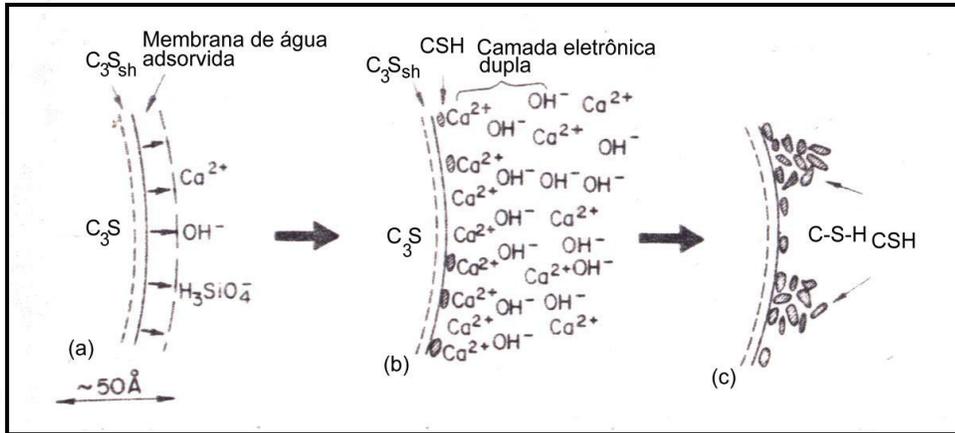
Para entender melhor as mudanças físicas e químicas durante a hidratação do cimento Portland, é necessário isolar cada composto potencial e observar o seu comportamento quando em contato com a água.

a) *Hidratação da Fase Silicato:*

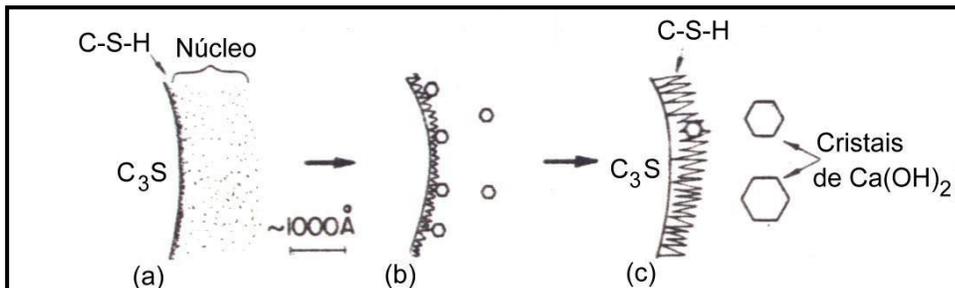
Cerca de 70 a 90% do cimento Portland é constituído por silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e o silicato dicálcico ( $C_2S$ ), os quais, quando são hidratados produzem o mesmo composto hidratado, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), diferindo apenas na quantidade de hidróxido de cálcio (CH) liberado pela reação de hidratação (JAWED et al, 1983).



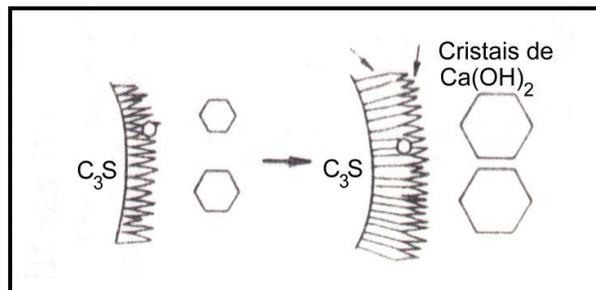
Apresenta-se a seguir, uma seqüência esquemática da hidratação do  $C_3S$ .  
 Figuras 3.15; a 3.17.



**Figura 3.15 – Representação da dissolução-precipitação do  $C_3S$  (a) depois de 1s (b) depois de 1 min. (c) depois de 1 hora (JAWED et al,1983)**



**Figura 3.16 – Representação da nucleação e crescimento dos cristais no final do período de indução (JAWED et al,1983)**



**Figura 3.17 – Crescimento dos produtos hidratado durante os períodos intermediário e final, fase silicato (JAWED et al, 1983)**

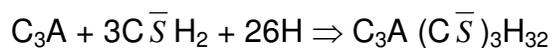
Nas Figuras 3.15 a 3.17 observa-se que quando o  $C_3S$  entra em contato com uma solução saturada de  $Ca(OH)_2$  acontece imediatamente uma precipitação de cristais de C-S-H. Esta precipitação não aumenta com o tempo devido a alta concentração de sílica. Isso pode ser considerado uma etapa crítica porque nesta situação o C-S-H parece ser altamente amorfo e são sementes de cristalização de  $Ca(OH)_2$ . Tanto os precipitados de C-S-H como os cristais de  $Ca(OH)_2$  são núcleos para mais cristalização e acontecem rapidamente e simultaneamente. O C-S-H precipitado vai se juntando em torno dos grãos de  $C_3S$ .

O mecanismo de hidratação do  $C_2S$  é similar ao do  $C_3S$  apesar dos processos ocorrerem em tempos diferentes e com grau de hidratação similares. Aparentemente a nucleação e crescimento dos cristais do  $Ca(OH)_2$  não são tão críticos para o  $C_2S$ , mas apesar disso a existência de uma fonte de cálcio é importante para a hidratação.

#### b) *Hidratação da Fase Intersticial*

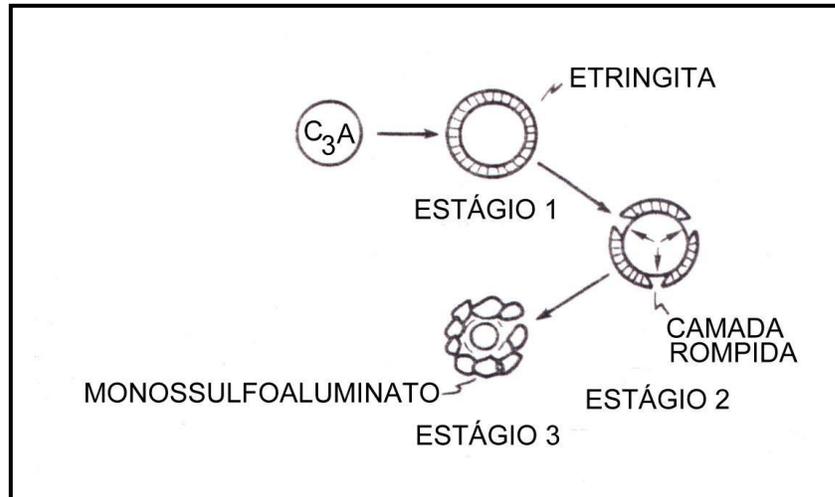
Esta fase é constituída pelos aluminatos ( $C_3A$ ) e ferroaluminatos de cálcio ( $C_4AF$ ), sendo o  $C_3A$  o mais reativo com a água, exercendo uma influência nas reações de hidratação. É importante a hidratação do  $C_3A$  para o cimento Portland, pois na presença de sulfato de cálcio, adicionado para controlar a pega, forma-se uma camada de etringita (AFt), e, durante a sua formação, a velocidade de reação diminui, gradualmente, indicando que os produtos formados na sua hidratação são mais permeáveis do que os do  $C_3S$  (CAMARINI, 1995).

De acordo com Jawed et al., 1983, 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. 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 (Figura 3.18), conforme a reação seguinte (JAWED et al,1983):



**Figura 3.18 - Crescimento dos produtos hidratados durante os períodos intermediário e final. (JAWED et al, 1983)**

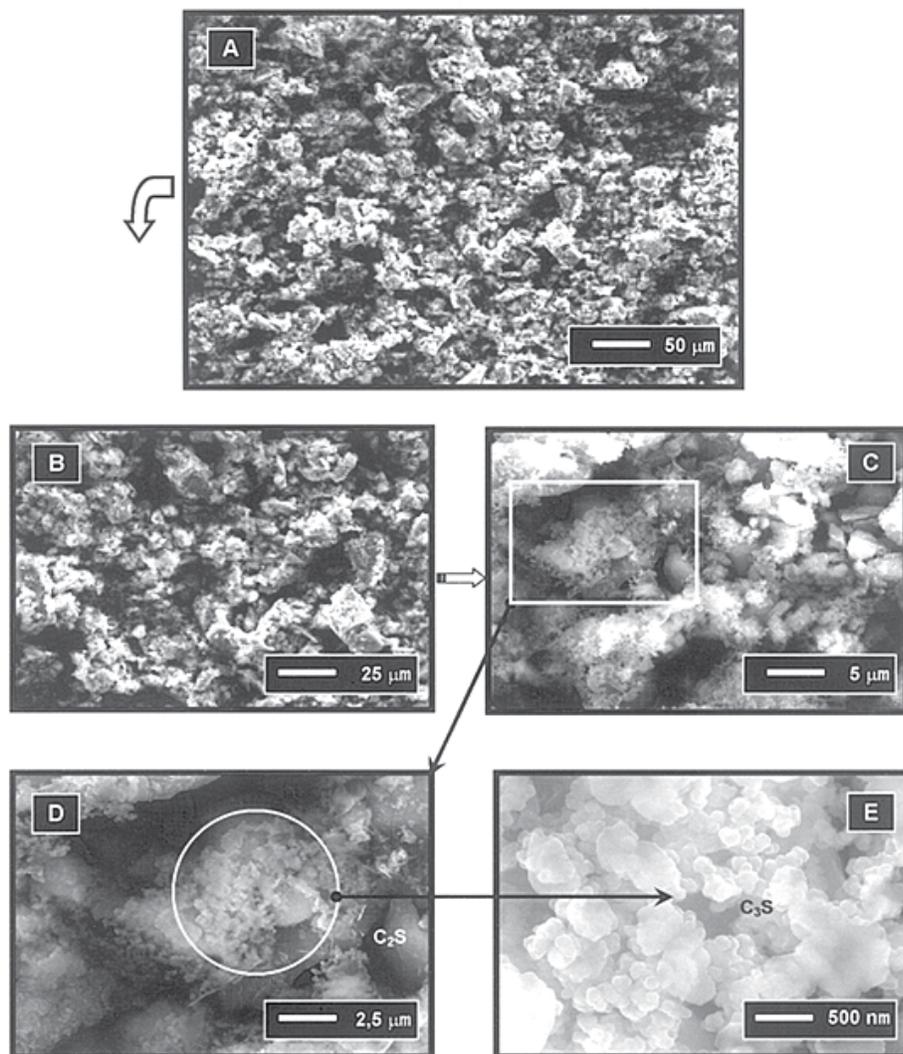
A hidratação do ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) ocorre juntamente à do C<sub>3</sub>A, com formação de produto semelhante à etringita. As reações são mais lentas do que as do C<sub>3</sub>A desenvolvendo menos calor. O C<sub>4</sub>AF não reage rapidamente e a gipsita retarda ainda mais sua hidratação.

### 3.3.4 Pasta endurecida do Cimento Portland

Utilizando técnicas de análise como a microscopia eletrônica de varredura, análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria (TG), difração de raios-X, do cimento Portland é possível avaliar a sua composição.

### 3.3.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

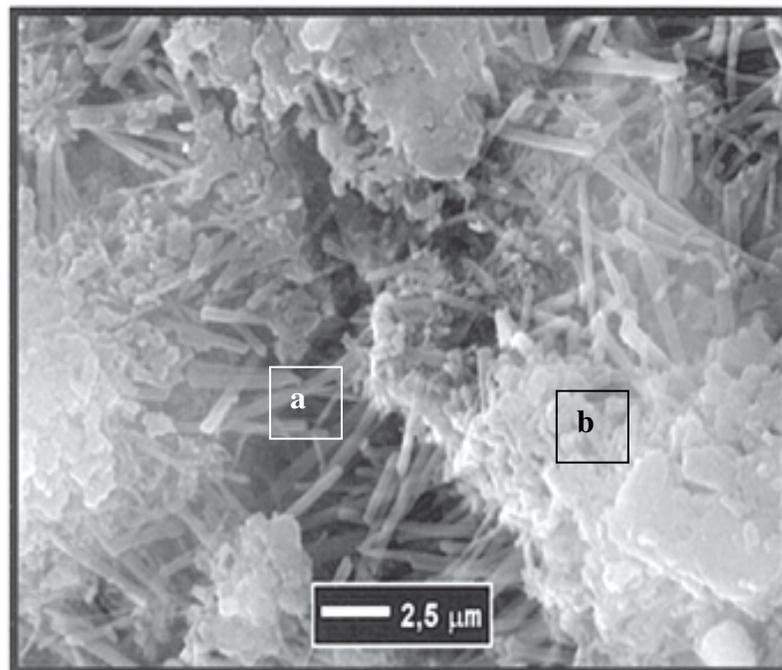
A análise de imagens através do microscópio eletrônico de varredura vem colaborar para melhorar o conhecimento dos materiais, sendo uma ferramenta importante para avaliar as mudanças que ocorrem durante o seu processo e a sua utilização.



**Figura 3.19 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do cimento Portland Tipo II (COIMBRA et al, 2004)**

Na Figura 3.19 são apresentadas micrografias e resultados da caracterização do cimento CII. Na micrografia “A” tem-se as suas principais fases  $C_3S$  e  $C_2S$  com aumento de 500 vezes, no detalhe “B” com aumento de 1000 vezes e no detalhe “C” com aumento de 5000 vezes onde se observa a formação do  $C_2S$  e no detalhe “D” com aumento de 10000 vezes a formação do  $C_3S$  e no detalhe “E”.

Na figura 3.20 observa-se a heterogeneidade quanto à forma e o tamanho das partículas. Enquanto algumas áreas são porosas (Figura 3.20-a), outras são altamente densas (Figura 3.20-b).



**Figura 3.20 –Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura do cimento Portland Tipo II – aumento 20.000 vezes.(COIMBRA et al, 2004)**

Em áreas porosas, observam-se fases hidratadas individuais como, por exemplo, cristais grandes de hidróxido de cálcio, agulhas longas e finas de etringita e agregações de cristais fibrosos e pequenos de silicato de cálcio hidratado. Na Figura

3.20 os cristais maciços são de hidróxido de cálcio, enquanto os cristais de C-S-H são pobremente cristalinos e mostram uma morfologia fibrosa (COIMBRA et al, 2004).

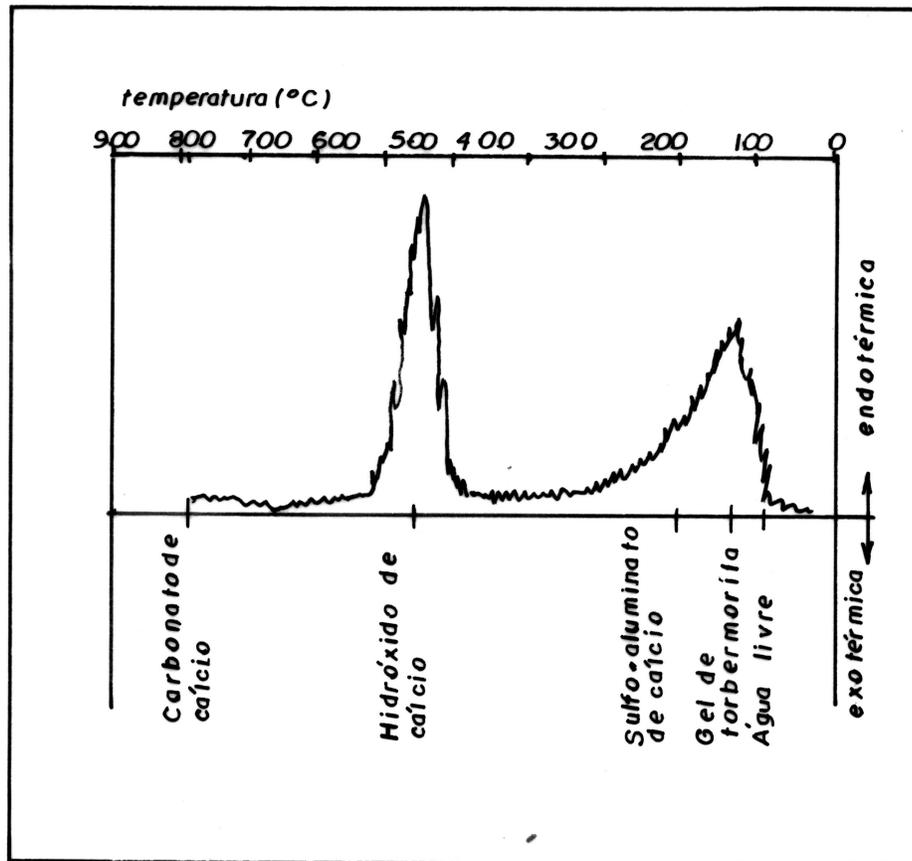
#### **3.3.4.2 Análise Térmica Diferencial**

A análise térmica diferencial (DTA) é a técnica termoanalítica na qual é registrada a temperatura de uma amostra em estudo, comparativamente à temperatura de um material termicamente inerte. As mudanças de temperatura são devidas a variações de entalpia do sistema ou a reações endotérmicas ou exotérmicas.

Modificações na pasta de cimento Portland ocorrem quando há um aumento de temperatura. A água na pasta de cimento endurecida pode estar presente como água evaporável em poros de gel e poros capilares, tão bem quanto nos hidratos de cimento, como água quimicamente combinada. Elevadas temperaturas tendem a eliminar água de poro e também a acelerar a difusão da água na pasta de cimento endurecida. Para temperaturas entre 40 e 105 °C as águas de gel e capilar são removidas do concreto e acima de 105 °C, a quantidade de água quimicamente combinada nos produtos de hidratação do cimento é reduzida (VELASCO, 2002).

Conclui-se que até 105 °C, toda a água evaporável é removida do concreto. Nesta temperatura, inicia-se o processo de desidratação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), estendendo-se para temperaturas acima de 800 °C. A 500 °C, ocorre 70% da reação de desidratação do C-S-H e em temperaturas próximas de 850 °C o gel de C-S-H se desidrata completamente. Segundo Schneider, citado em Velasco (2002), a decomposição do gel de silicato de cálcio hidratado ocorre entre 600 e 700 °C. Para o hidróxido de cálcio, a reação de desidratação começa por volta de 390 °C e está completa a 550 °C (Figura 3.21).

O gel de tobermorita, o (CSH) e o sulfoaluminato de cálcio hidratado são os primeiros compostos da fase sólida da pasta de cimento a serem afetados (VELASCO, 2002).



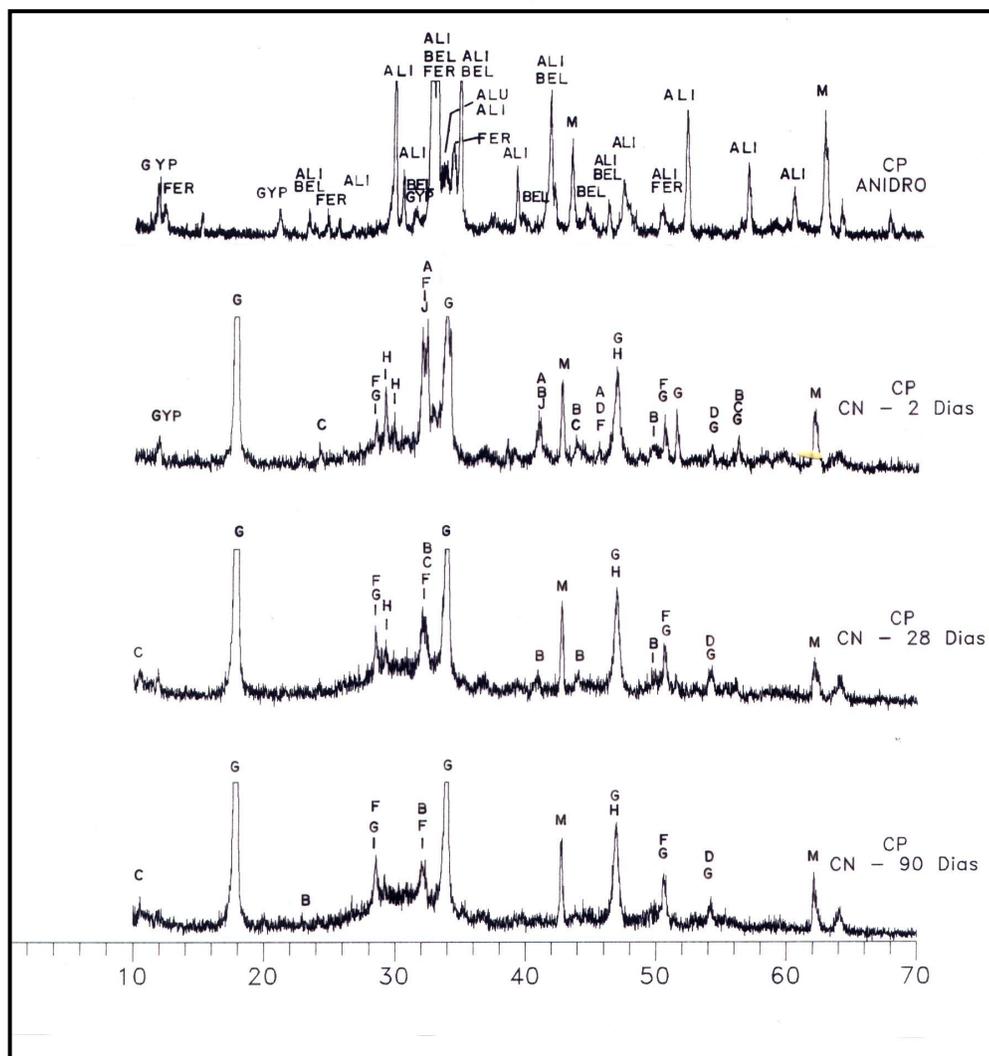
**Figura 3.21 – Análise térmica diferencial da pasta de cimento Portland (VELASCO, 2002)**

### 3.3.4.3 Difração de Raios-X

A difração de raios-X é uma técnica importante porque permite identificar qualitativamente os principais compostos de um material, e cada material cristalino da origem a um único difratograma de raios-X.

A Figura 3.22 apresenta os difratogramas do cimento comum anidro (CP-anidro) e os difratogramas de pastas de cimento Portland, submetidas à cura normal (CP- CN), nas idades de 02, 28 e 90 dias. Nas idades iniciais, dois dias, esse cimento apresenta ainda material anidro, que vai se hidratando no decorrer do tempo. Observa-se que as raia de difração correspondentes aos compostos anidros do clínquer diminuem com a

idade. Aos 28 e 90 dias, observa-se o desaparecimento das raiais referentes aos compostos anidros do clínquer e também a conversão dos aluminatos hidratados. Nos cimentos hidratados, nota-se que os picos referentes ao MgO estão sempre presentes, tanto nas idades iniciais como nas finais (CAMARINI, 1995).



**Figura 3.22 – Difratoograma do cimento Portland comum anidro e em pasta submetido à cura normal em 2, 28 e 90 dias (CAMARINI, 1995)**

Na Tabela 3.7 estão relacionados os prováveis compostos formados nas fases anidras e nas fases hidratadas do difratoograma da Figura 3.22 e 3.24 da página 77.

**Tabela 3.7 – Prováveis compostos formados do cimento Portland, nas fases anidras e hidratadas (CAMARINI, 1995)**

Fases Anidras		Fases hidratados	
ALI	alita	A	etringita
BEL	belita	B	monossulfoaluminato de cálcio
ALU	aluminato	C	aluminato de cálcio
FER	ferrita	D	mnocarboaluminato de cálcio
GYP	gipsita	E	ferrita anidra
M	periclásio	F	hidrogranada
		G	hidróxido de cálcio
		H	calcita
		I	C-S-H
		J	silicato anidro

### 3.4 Cimento Portland de Alto-Forno

O Cimento Portland de Alto-Forno é constituído de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, com adição de gipsita para controlar a pega. 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. A escória utilizada em cimento de alto-forno deve ser resfriada bruscamente para que se solidifique como material vítreo, com estrutura desordenada, e tenha grande reatividade. Esse resfriamento rápido pela água resulta na fragmentação do material na forma granulada ou pelletizada que, quando finamente moída, desenvolverá propriedades cimentantes (NEVILLE, 1997).

O uso da escória é vantajoso porque a cal está presente como CaO, de modo que não é necessária a energia para realizar a decarbonatação. A escória de alto-forno pode ela mesma ser usada como material cimentício, mas na presença de um 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 Ca(OH)<sub>2</sub> quando em contato com a água, e a liberação de calor devido à reação de hidratação são os principais ativadores (NEVILLE, 1997).

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 3.8, pode-se observar os diversos teores de escória em cimentos nacionais.

**Tabela 3.8 – Teores de escória no cimento Portland de acordo com a ABNT**

	<b>Cimento Portland Comum</b>	<b>Cimento Portland Composto CP II E</b>	<b>Cimento Portland De alto-forno</b>
<b>Sigla</b>	CP I-S	CP II E	CP III
<b>Classes de resistência</b>	25, 32 e 40	25, 32, 40	25, 32 e 40
<b>Clínquer + CaSO<sub>4</sub> (%)</b>	99 - 95	94 - 56	65 – 25
<b>Escória granulada (%)</b>	1 – 5*	6 - 34	35 – 70
<b>Material pozolânico (%)</b>	1 – 5*	-	-
<b>Material carbonático (%)</b>	1 – 5*	0 - 10	0 – 5
<b>Norma regulamentadora</b>	NBR 5732	NBR 11578	NBR 5735

- Apenas um tipo de adição no mesmo cimento

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 2.900 kg/m<sup>3</sup>, um pouco menor do que a do cimento Portland (3.150 kg/m<sup>3</sup>). Quando o cimento Portland de alto-forno é misturado com a água, os componentes do cimento começam a se hidratar antes dos da escória, 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 o C-S-H, (NEVILLE, 1997).

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. 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.

#### **3.4.1 Hidratação do Cimento Portland de Alto-Forno**

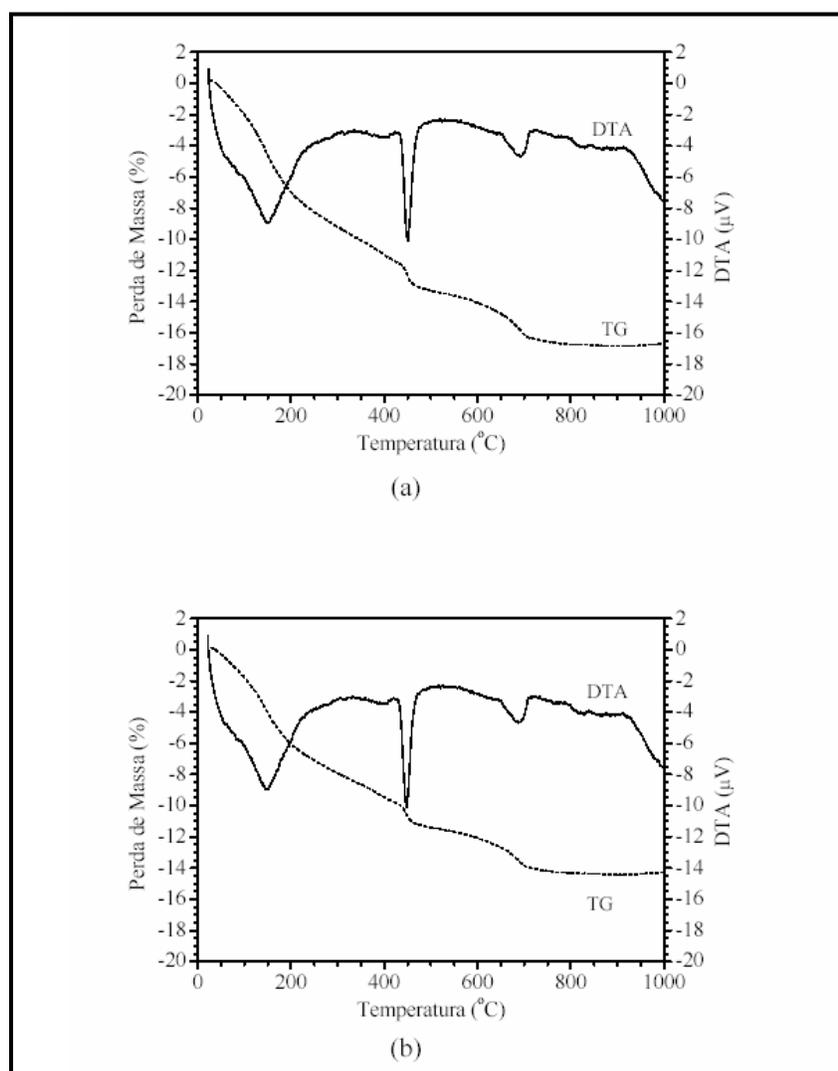
As propriedades do cimento Portland de alto-forno são semelhantes às do cimento Portland comum. A velocidade de endurecimento é mais lenta, nas primeiras idades, porém, nas idades avançadas, há contribuição dos compostos formados pela hidratação da escória.

#### **3.4.2 Pasta endurecida do Cimento Portland de Alto-Forno**

Com o uso das técnicas de análise modernas como as análises térmicas, a difração de raios-X e a microscopia, pode-se analisar as diversas propriedades físicas dos materiais e a sua formação. As análises térmicas se referem ao grupo de métodos pelos quais algumas propriedades físicas de uma amostra são continuamente medidas. Mudanças na massa formam a base da Termogravimetria; enquanto as medidas das alterações de energia formam a base da análise Térmica Diferencial. Na difração de raios-X as substâncias cristalinas difratam e, dependendo do ângulo de inclinação dos raios difratados à substância cristalina é caracterizada. Na microscopia onde se analisa a microestrutura dos materiais avaliando as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e o seu uso.

### 3.4.2.1 Análise Térmica Diferencial e Termogravimetria

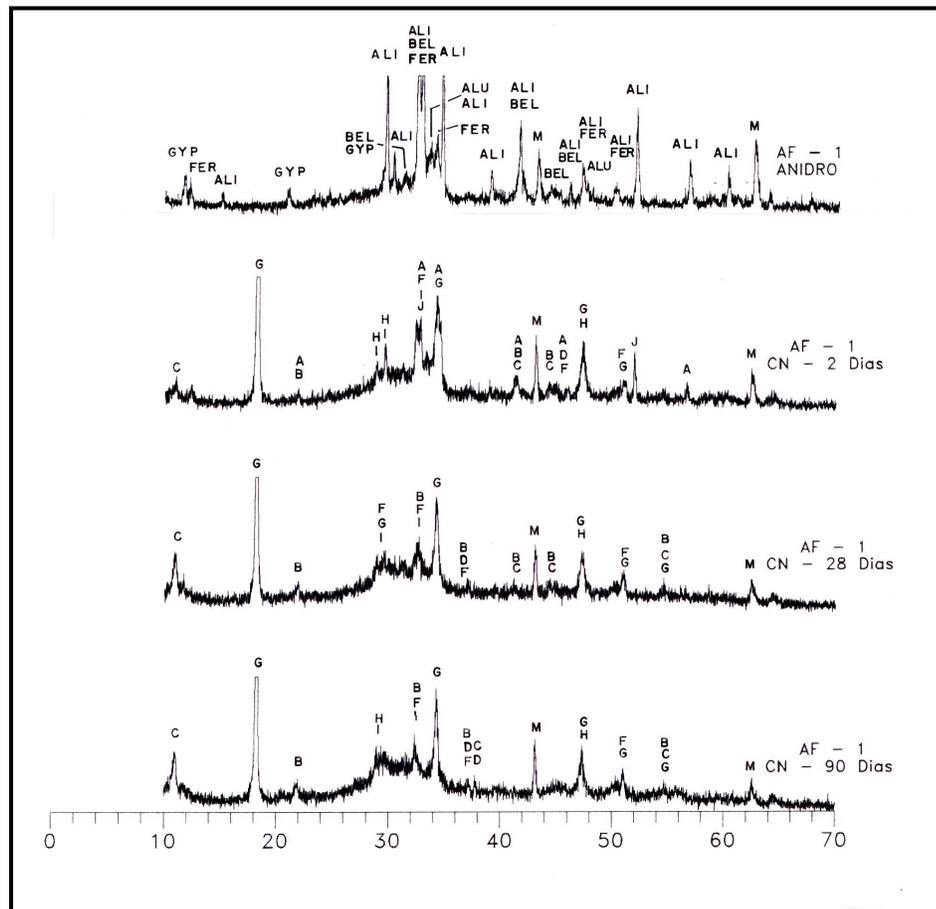
Utilizando a análise térmica determinou-se a curva TG e DTA do cimento Portland de alto forno (Figura 3.23). Os resultados indicam três reações endotérmicas ocorridas durante o aquecimento: liberação de água evaporável e parte combinada das fases hidratadas em 90 e 250 °C, decomposição do  $C_a(OH)_2$  entre 425 e 475°C e decomposição do  $CaCO_3$  entre 640 e 720°C (BALTHAR, 2004).



**Figura 3.23 – Análise térmica e termogravimétrica da pasta de cimento CP III (a) aos 28 dias e (b) aos 280 dias (BALTHAR, 2004)**

### 3.4.2.2 Difração de Raios-X

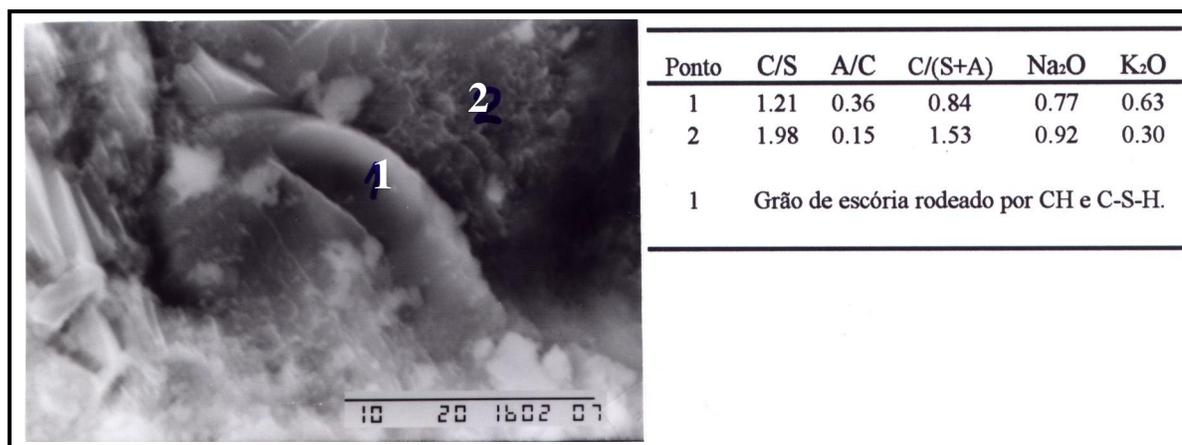
Utilizando a difração de raios-X observa-se na Figura 3.24 o difratograma do cimento de alto-forno anidro e os difratogramas das pastas submetidas à cura normal por 2, 28 e 90 dias. Nas idades iniciais, esse cimento ainda apresenta material anidro, que vai hidratando no decorrer do tempo. Observa-se nessa figura que as raiais de difração correspondentes aos compostos anidros do clínquer diminuem com a idade. As raiais de difração são mais abundantes nos difratogramas do cimento Portland comum (Figura 3.22, página 72) do que no cimento de alto-forno. Os cimentos com teor de escória mais elevado (>40%) apresentam poucas raiais de difração, o que corresponde à formação de compostos hidratados mal cristalizados ou amorfos (CAMARINI, 1995).



**Figura 3.24 – Difratograma do cimento de alto-forno anidro e submetido à cura normal por 2, 28 e 90 dias (CAMARINI, 1995)**

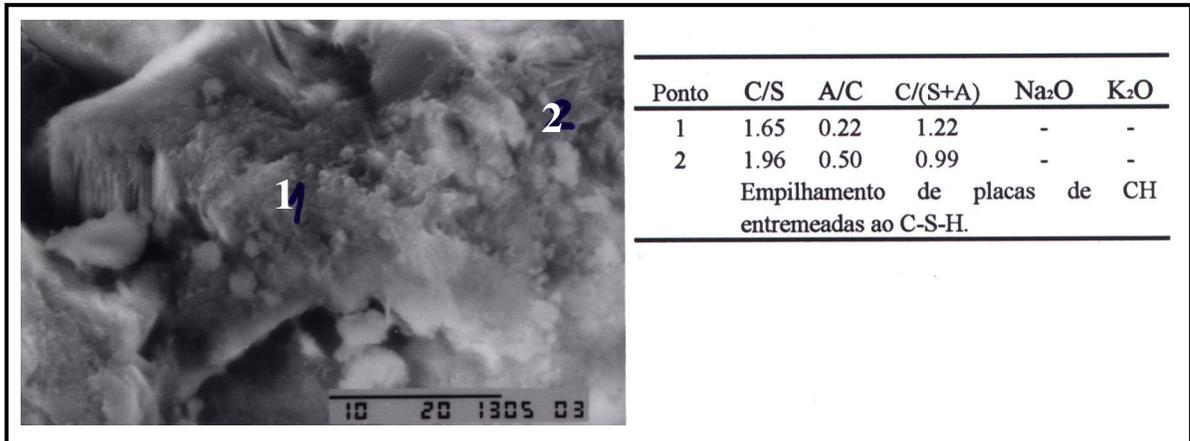
### 3.4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Utilizando o microscópio eletrônico observa-se que embora a escória tenha capacidade hidráulica, por necessitar ativação, suas reações desenvolvem-se lentamente, fazendo com que a escória exerça pouca influência na etapa inicial da formação da microestrutura. No entanto, tem um efeito na distribuição da fase CH. Em imagens no microscópio eletrônico de varredura de pastas de cimento com escória, são visíveis o desenvolvimento de grandes massas da fase CH e C-S-H ao redor dos grãos de escória no *ponto 1* da Figura, 3.25. Observa-se ainda nos *pontos 1 e 2* os compostos como: óxido de cálcio (C), sílica (S), alumínio (A), sódio (Na<sub>2</sub>O) e potássio (K<sub>2</sub>O) nas proporções indicadas na tabela ao lado da Figura 3.25 (CAMARINI, 1995).



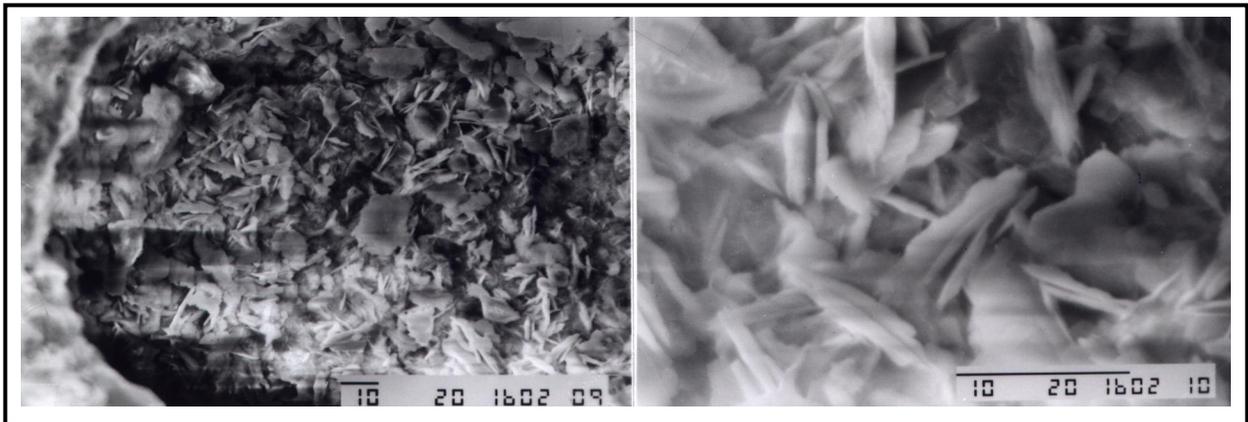
**Figura 3.25 – Micrografia de grão de escória rodeado por CH e C-S-H – AF<sub>4</sub> (CAMARINI, 1995)**

Com o aumento do teor de escória, torna-se mais difícil encontrar a fase CH na estrutura, uma vez que o teor de clínquer é baixo e o CH é consumido pela escória durante a hidratação. Observa-se um empilhamento de placas de CH entremeadas ao C-S-H (Figura, 3.26), e os compostos como: óxido de cálcio (C), sílica (S), alumínio (A) nos *pontos 1 e 2* da Figura 3.26 (CAMARINI, 1995).



**Figura 3.26 – Micrografia do empilhamento de placas de CH entremeadada com o C-S-H e AF2 (CAMARINI, 1995)**

Os cimentos com escória apresentam maior freqüência de fases monosulfoaluminatos de cálcio e de C-A-H do que o cimento Portland comum, como observado na micrografia da Figura 3.27 (CAMARINI, 1995).



**Figura 3.27 – Micrografia de fase AFm em poros, com detalhe - AF4 (CAMARINI, 1995).**

A morfologia das agulhas de etringita depende do teor e escória. Nas amostras ricas em escória, as agulhas são mais curtas e mais finas do que as formadas pelo clínquer. Nas micrografias das Figuras 3.25 a 3.27, esse composto não foi encontrado (CAMARINI, 1995).

Comparando os aglomerantes tradicionais como a cal, o gesso e o cimento Portland vistos neste capítulo, o cimento Portland e suas várias modificações são os principais aglomerantes usados na construção civil. Isto porque o cimento Portland é um aglomerante hidráulico, não necessitando de adições de materiais pozolânicos para desenvolver as propriedades de resistência à água. Por este motivo, no capítulo seguinte iremos abordar a adição de cimento ao gesso com o intuito de melhorar a resistência das pastas de gesso à água e melhorar o seu desempenho em revestimentos sujeitos à umidade, objeto deste trabalho.

## **4 COMPÓSITOS A BASE DE GESSO**

A crescente utilização de revestimento de gesso e de outras aplicações do gesso na construção civil como sancas, molduras, blocos, tem sido uma alternativa prática e econômica. O gesso tem a vantagem de endurecer rapidamente, ser moldado com facilidade e proporcionar um acabamento liso. Mas o gesso é limitado ao uso interno devido à sua sensibilidade à umidade. A umidade atmosférica, mesmo em níveis baixos é suficiente para produzir uma forte redução da resistência na mistura de gesso, mais grave ainda, são os revestimentos de gesso aplicado nos locais próximo de respingos de água, ou lavagem de piso. O gesso também é levemente ácido; isso contribui para o aparecimento de fungos emboloradores, que encontram nos aglomerantes à base de cálcio um meio propício para o seu desenvolvimento.

Compósitos a base de gesso estão sendo estudados e vários trabalhos têm sido conduzidos para tentar melhorar a resistência das pastas de gesso à água bem como diminuir o aparecimento de fungos emboloradores que são as patologias mais comuns observadas na utilização do gesso como revestimento e em outras aplicações.

### **4.1 Estudos no Mundo**

Neste item serão descritos os estudos realizados com a mistura de gesso, cimento, epóxi, bem como de outros materiais com a intenção de melhorar a resistência das pastas de gesso à água e ao aparecimento de fungos.

Bentur et al (1994) melhorou a resistência à umidade pelo uso de misturas com 75% de gesso, 20% de cimento Portland e 5% de sílica ativa.

Singh & Garg (1995) utilizou uma mistura de cimento Portland e cinza volante (40%), cal hidratada (20%) e fosfogesso (40%), estudando a hidratação e o desenvolvimento da resistência em temperatura ambiente e a 50°C, em umidade relativa de 90%. A resistência à compressão foi melhor a uma temperatura de 50°C do que em temperatura ambiente.

Singh & Garg (1995) concluiu que a resistência da mistura nas idades iniciais de um dia e três dias era devido ao endurecimento do gesso e à hidratação do cimento Portland, e a resistência em idade mais avançadas era devido à formação de etringita e do C-S-H.

Em 1996 Singh & Garg estudou a relação entre as propriedades mecânicas e a porosidade de uma pasta de gesso resistente à água. Essa pasta era produzida com a mínima quantidade de água para a sua hidratação e compactada para diminuição da porosidade. Concluiu que existe uma forte correlação entre a porosidade e as propriedades mecânicas, conseguidas pela diminuição da dimensão dos poros.

Çolak (1997) estudou a adição de epóxi nas pastas de gesso possibilitando a produção de produtos de gesso com melhor resistência à água. Amostras com epóxi mostraram valores de absorção de água igual a zero após sete dias de imersão em água a 20°C. Portanto, esses compósitos podem ser considerados bem melhores em se comparando as pastas de gesso, com relação às características hidrofóbicas. Contudo, o uso da adição é limitado pelo alto custo e difícil manuseio em obra.

Yan & You (1998) pesquisaram uma mistura de alta resistência boa estabilidade volumétrica e excelente resistência à água, conseguida com a mistura de cinza volante e fluorgesso como compostos principais e uma dosagem baixa de cimento. A reação pozolânica proporcionada pela cinza volante, a transformação da anidrita em gesso em quantidade apropriada, a boa distribuição do gel do C-S-H, e os microcristais de gesso e a anidrita remanescente resultaram na formação de uma pasta estrutural densa e conseqüentemente com boas propriedades.

Klover (1998b), estudando uma mistura de gesso (75%), cimento Portland (20%) e sílica ativa (5%), 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 íons

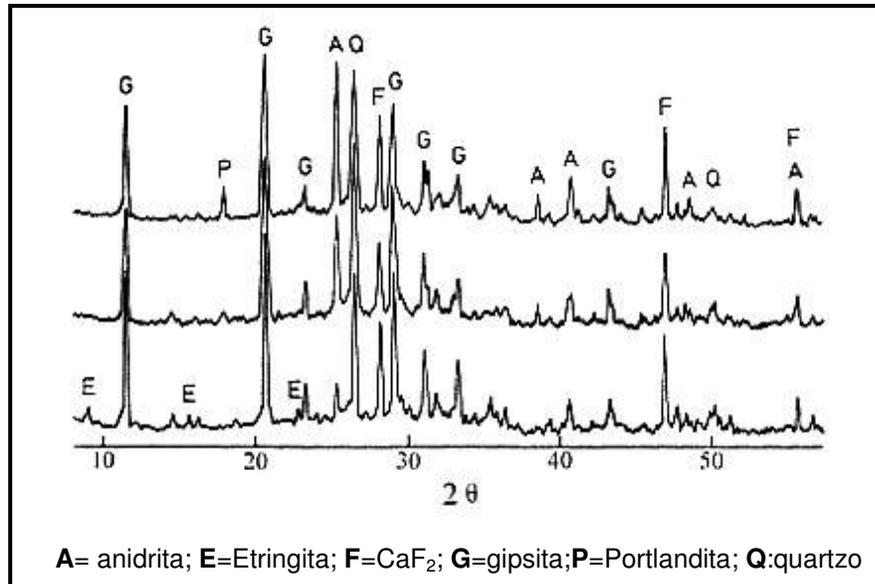
sulfato foram envolvidos pelo C-S-H e pela adição de sílica ativa, impedindo a formação dos compostos expansivos tradicionais (etringita e thaumasita). Este estudo conclui um sucesso nas misturas de gesso com o cimento.

Outra pesquisa realizada por Yan & You (1999) utilizou uma mistura de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland na proporção (em %) de 53:31:16, respectivamente. e Por meio de investigações com difração e raios-X (Figura 4.1), análise térmica diferencial (Figura 4.2) e microscopia eletrônica de varredura (Figura 4.3 e 4.4) concluiu que os cristais principais são soluções sólidas de gesso hidratado, gel de C-S-H e etringita. A adição de um ativador melhorou a formação de etringita e a transformação de anidrita em gesso. Eles se misturam uniformemente para formar uma densa estrutura, com baixa porosidade e pequena proporção de poros grandes. A mistura apresentou alta resistência, boa estabilidade volumétrica e excelente resistência à água.

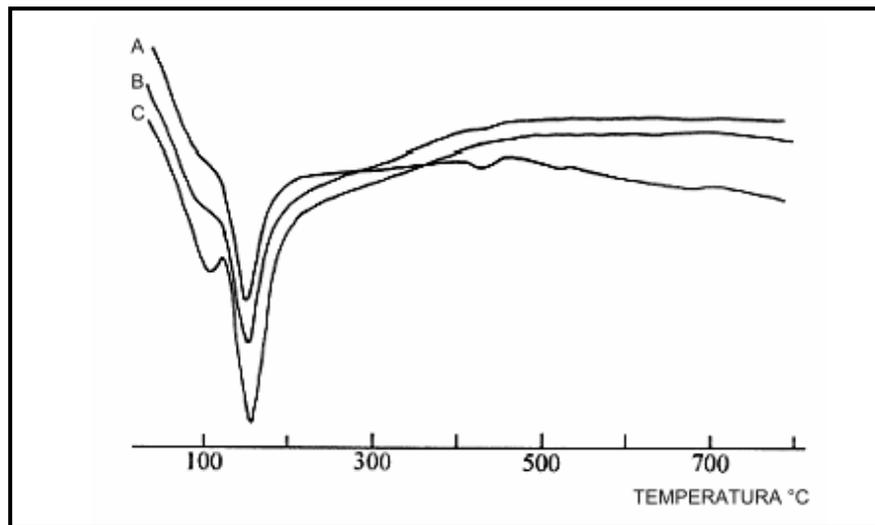
No difratograma da mistura de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland na proporção de 53:31:16 (Figura 4.1) observa-se a presença de etringita nos ângulos aproximados de  $9^{\circ} 2\theta$ ,  $16^{\circ} 2\theta$ ,  $23^{\circ} 2\theta$ ; anidrita em  $25^{\circ} 2\theta$ ,  $38^{\circ} 2\theta$ ,  $40^{\circ} 2\theta$  e  $56^{\circ} 2\theta$ ; Gipsita em  $12^{\circ} 2\theta$ ,  $21^{\circ} 2\theta$ ,  $23^{\circ} 2\theta$ , Portlandita em  $18^{\circ} 2\theta$ ; Quartzo em  $26^{\circ} 2\theta$  e  $C_aF_2$  em  $27^{\circ} 2\theta$ ,  $47^{\circ} 2\theta$  e  $56^{\circ} 2\theta$ . O cimento Portland hidrata-se rapidamente. Os picos de hidróxido de cálcio aparecem depois de três dias de hidratação. Existem picos intensos de gesso e de anidrita, mas os picos correspondentes aos compostos do clínquer são poucos. Com o desenvolvimento da hidratação, mais anidrita se transforma em gesso e parte de hidróxido de cálcio e gesso vão sendo consumidos para ativar a reação pozolânica da cinza volante (YAN & YOU, 1999).

Pela análise térmica diferencial nas curvas de DTA apresentadas (Figura 4.2) observou-se, que à temperatura de  $110^{\circ} C$ , o aparecimento do hemi-hidrato; aos  $180^{\circ} C$ , da anidrita solúvel, aos  $450^{\circ} C$ , aproximadamente, a transformação da anidrita solúvel em insolúvel; e próximo de  $700^{\circ} C$  o  $\gamma C_2S$ . Pelas curvas DTA da pasta observa-se que pode ser detectada durante o período inicial de hidratação uma quantidade de gesso cujo efeito endotérmico está localizado perto de  $150^{\circ} C$ , e de  $Ca(OH)_2$  cujo efeito endotérmico localizado perto de  $430^{\circ} C$ . A sobreposição do efeito endotérmico do gel de C-S-H e de etringita na região entre  $100$  e  $110^{\circ} C$  é muito fraco. Aos 28 dias de

hidratação o efeito endotérmico do gesso, gel de C-S-H e etringita aumenta ligeiramente, e do  $\text{Ca(OH)}_2$  diminui. No entanto, na pasta curada em água durante 28 dias o efeito endotérmico de gel de C-S-H e etringita aumenta significativamente, do  $\text{Ca(OH)}_2$  desaparece, e o do gesso não se altera (YAN & YOU, 1999)

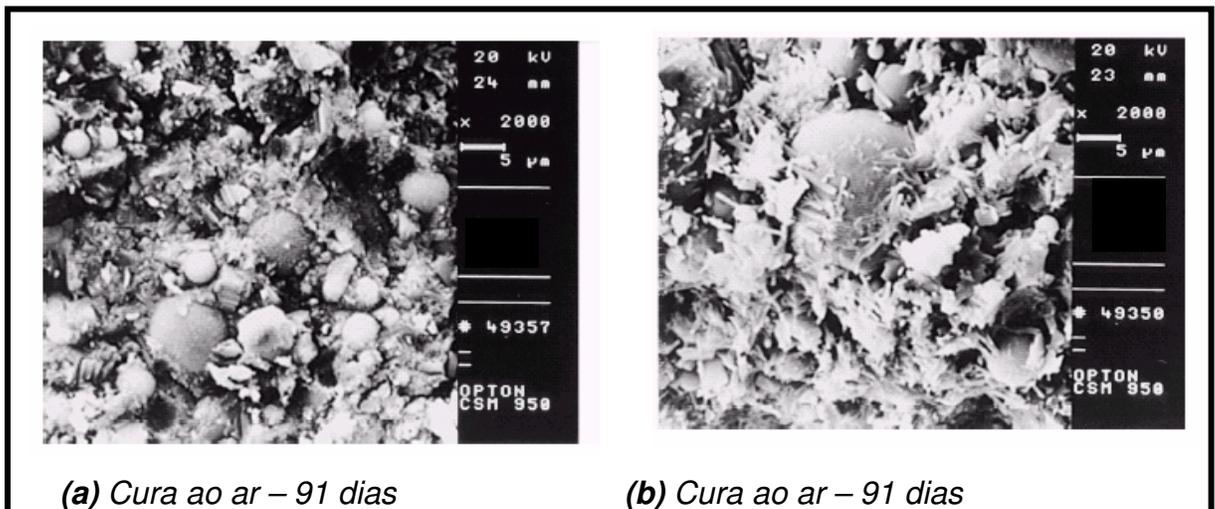


**Figura 4.1 – Difração de raios -X da pasta de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland, cura em água por 28 dias (YAN & YOU, 1999)**

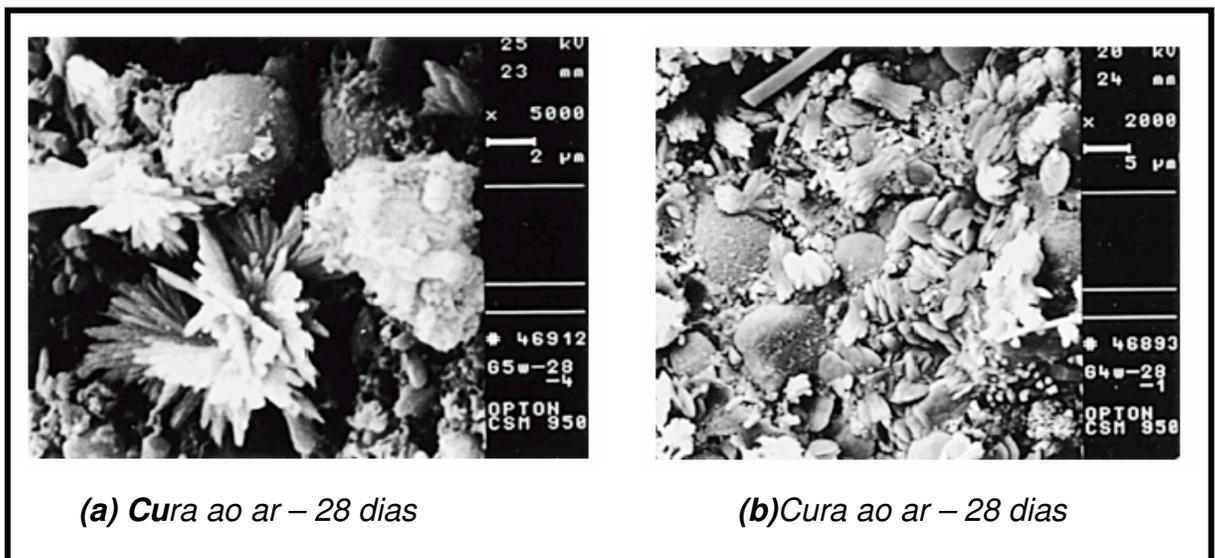


**Figura 4.2 – Curva DTA da pasta de cinza volante, fluorgesso e cimento Portland, cura ao ar por 3 dias(A); por 28 dias (B) e em água por 28 dias (C) (YAN & YOU, 1999)**

Na microscopia da Figura 4.3, tanto na micrografia “a” como na “b” observa-se uma pasta densa gel de C-S-H, microcristais de gesso, anidrita remanescente e aglomerado de cristais de etringita. Na Figura 4.4a núcleos de etringita na pasta curada aos 28 dias e na Figura 4.4b vê-se sistemas como discos que são soluções sólidas de Si e Al (10%) em gesso e com baixa solubilidade na pasta curada em água por 28 dias (YAN, 1999).



**Figura 4.3 – Micrografia da pasta de cinza volante, fluogesso e cimento Portland, endurecida curada ao ar por 91 dias (YAN & YOU, 1998)**



**Figura 4.4 – Micrografia da pasta de cinza volante, fluogesso e cimento Portland, cura em água por 28 dias (YAN & YOU, 1998)**

Çolak em 2001 estudou as propriedades físicas e mecânicas e a durabilidade de misturas de gesso, cimento Portland e pozolana natural na porcentagem de 41: 41: 18, respectivamente. Neste estudo concluiu que as misturas apresentaram melhorias nas propriedades físicas e mecânicas depois de curadas em água a 20°C por 95 dias. Concluiu, ainda, que as misturas com uma dosagem maior de gesso a pega era acelerada e utilizou superplastificante para aumentar o tempo de pega. Essas misturas mostraram boa absorção capilar de água, semelhante as das pastas de cimento. A mistura de gesso com cimento Portland possui boa resistência à água, e essa mistura, ainda é melhorada pela adição de pozolanas naturais e superplastificante.

Pode-se observar neste item, que pesquisadores de vários países, estão trabalhando para melhorar o desempenho dos compósitos a base de gesso. O gesso é um material largamente utilizado no mundo todo, e é de grande interesse poder aplicá-lo em outros locais que não sejam somente os internos.

## **4.2 Estudos no Brasil**

Revestimento com gesso e construções em alvenaria de blocos de gesso iniciou no Brasil na década de 1970. Desde então estes produtos foram largamente utilizados.

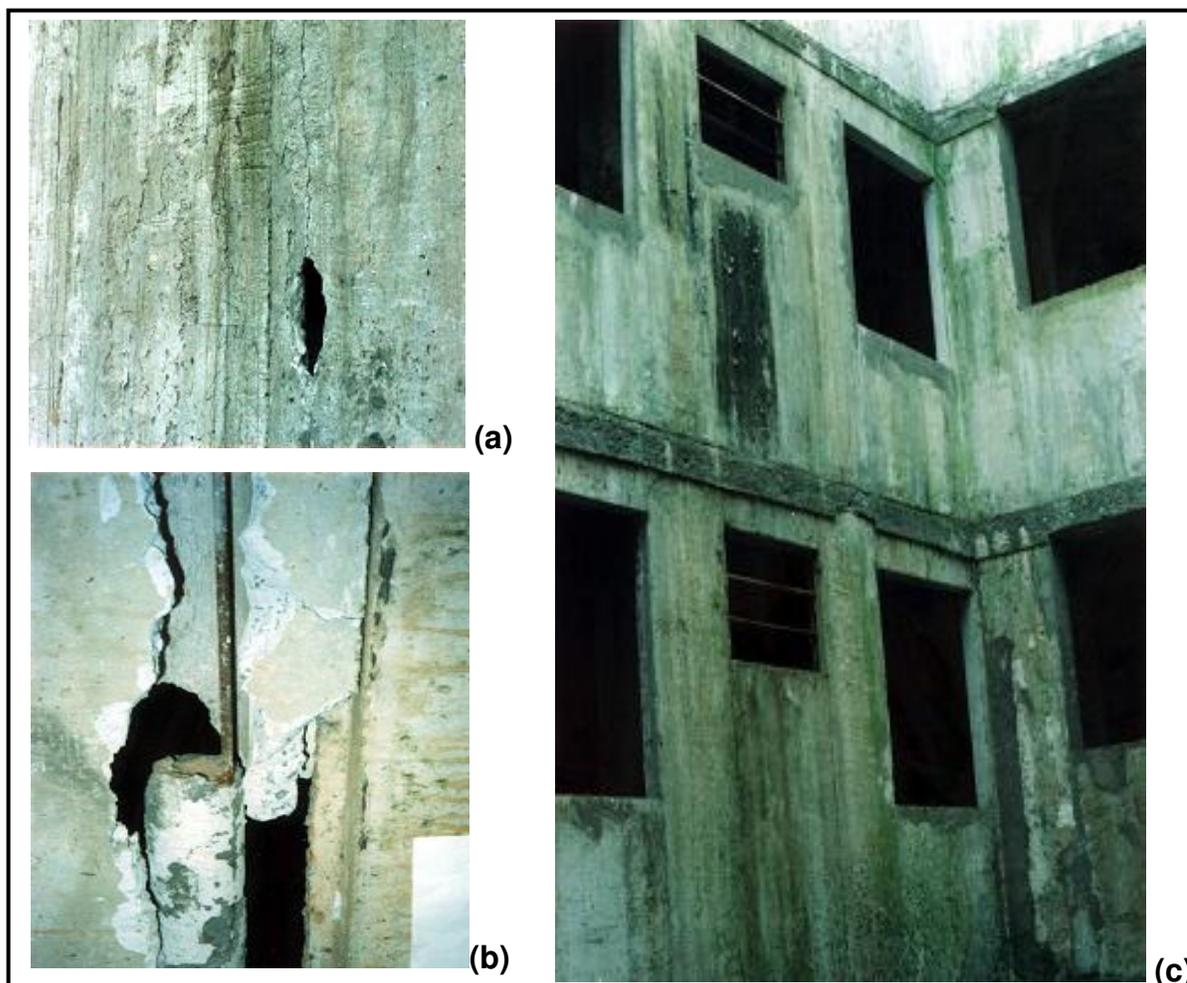
Nos meados da década de 1990, novas tecnologias de aplicação foram desenvolvidas e no final dessa mesma década foram aprovadas as normas sobre blocos de gesso e projeto de norma sobre execução de alvenaria em blocos de gesso, (ABRAGESSO, 2001).

Os blocos de gesso podem ser utilizados para substituir os materiais convencionais, como blocos de cimento ou blocos cerâmicos, na construção e paredes internas não portantes. Os blocos de gesso podem ser aditivados com fibras de vidro, aditivos hidrofugantes ou ambos, fixados com cola de gesso. A cola de gesso é fabricada a partir de gessos especiais e aditivos. O processo de construção de alvenaria em blocos de gesso, embora possa apresentar poucas dificuldades, necessita

de um conhecimento tecnológico específico, e a não observação de detalhes construtivos provoca o surgimento de patologias e a diminuição do desempenho das alvenarias (ABRAGESSO, 2001).

No Brasil, mistura de gesso com cimento Portland foi realizada no início dos anos 1980 pela COHAB-SP. A COHAB-SP realizou um empreendimento utilizando 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, se hidratava 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 uma resistência maior. A deterioração dos painéis culminou com a demolição de todo o conjunto habitacional (Figuras 4.5).

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 (Figura 4.5 a). 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 (Figura 4.5 c). Outro fato que agravou o sistema chegando à demolição, foi o ataque do gesso às armaduras dos pilaretes (Figura 4.5 b) (IPT, 1989).



**Figura 4.5 – (a) gretamento e perda de massa; (b) oxidação da armadura; (c) fungos (IPT, 1989)**

Após esta experiência nacional nada foi feito utilizando a mistura de gesso com cimento Portland.

Outro caso registrado em 1999 foi à deterioração de revestimentos externos em edifícios de quatro pavimentos. O fato ocorreu quanto foi utilizada argamassa mista de cimento, cal e areia, pré-misturados. Ensaios de caracterização e de resistência à compressão da argamassa 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 (DE MILITO, 2001).

Após estas experiências mal sucedidas, decidiu-se por retomar o tema tendo em vista os resultados obtidos por pesquisadores em outras partes do mundo. Neste sentido a retomada desta pesquisa se deu em 2001 quando De Milito (2001) avaliou o comportamento de misturas de gesso, cimento Portland e sílica ativa em diferentes proporções e relação água aglomerante de 0,70, submetidas à cura em ambiente interno e em ambiente externo por um período de 180 dias. As misturas também foram aplicadas sobre painéis de alvenaria de bloco de concreto para avaliar o desempenho do revestimento ao longo do tempo. Os materiais utilizados foram o gesso lento para revestimento, o cimento CIII-32 RS e a sílica ativa.

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 na 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 aparecimento de fissuras ou gretamentos visíveis na superfície dos revestimentos e nem tampouco o aparecimento de fungos emboloradores.

Em 2004 pesquisadores do Instituto de Física da Universidade de São Paulo, em São Carlos, desenvolveram um novo processo capaz de produzir estruturas de gesso com elevada resistência mecânica. A intenção é substituir, em alguns casos, o uso do cimento. Os resultados obtidos foram placas de gesso resistentes a partir de uma adição mínima de água para satisfazer a reação de hidratação do gesso. Com pouca água, o gesso passa a ter outro tipo de consistência. O material não vira uma pasta e sim um pó umedecido que, ao ser comprimido, gera peças mais fortes (SOUZA, 2004). Ressalta-se que neste estudo não houve o uso do cimento nas misturas.

Como descrito neste capítulo, várias pesquisas estão sendo realizadas no exterior e no Brasil utilizando diversos tipos de adições sempre com o intuito de melhorar as propriedades do gesso bem como a resistência dos revestimentos de gesso à água. Mas devido ao elevado custo de algumas adições, como a adição do epóxi, as dificuldades de trabalhar com outros tipos de aditivos na obra, e de alguns processos que não permitirem o uso do gesso em pasta, a adição de cimento Portland e pozolanas ao gesso, permitem uma melhoria de resistência a baixo custo e de fácil manuseio (ÇOLAK, 2001).

### **4.3 Efeito da Quantidade de Adição de Gipsita em pastas de Cimento Portland**

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

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 & WESSELS, 1945).

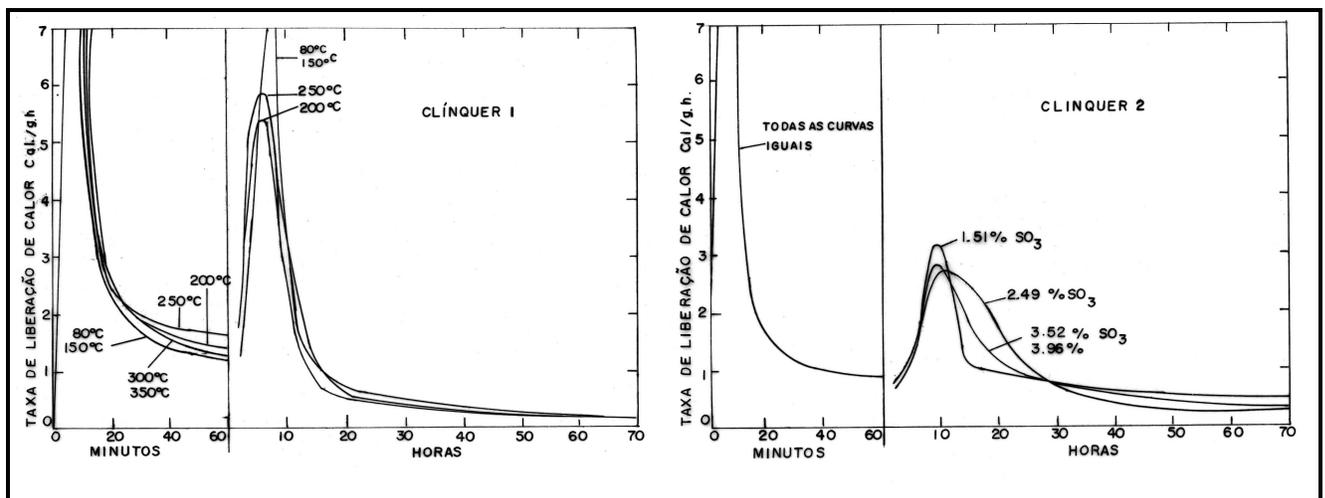
Quando o clínquer de cimento Portland é moído sem a adição de um retardador, a hidratação é rápida e o seu enrijecimento também. A gipsita vem sendo empregada como retardador e geralmente sabe-se que ela reage com as fases aluminato para formar sulfoaluminato de cálcio, impedindo a formação de aluminatos 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 & Wessels (1945) divulgaram suas primeiras experiências no assunto, ainda que com baixos teores de sulfatos. Os autores utilizaram para este estudo cimentos provavelmente produzidos com cinco tipos de clínqueres comerciais, moídos em temperatura ambiente e o conteúdo de  $SO_3$  variou de 0,19% a 3,76% em relação ao clínquer.

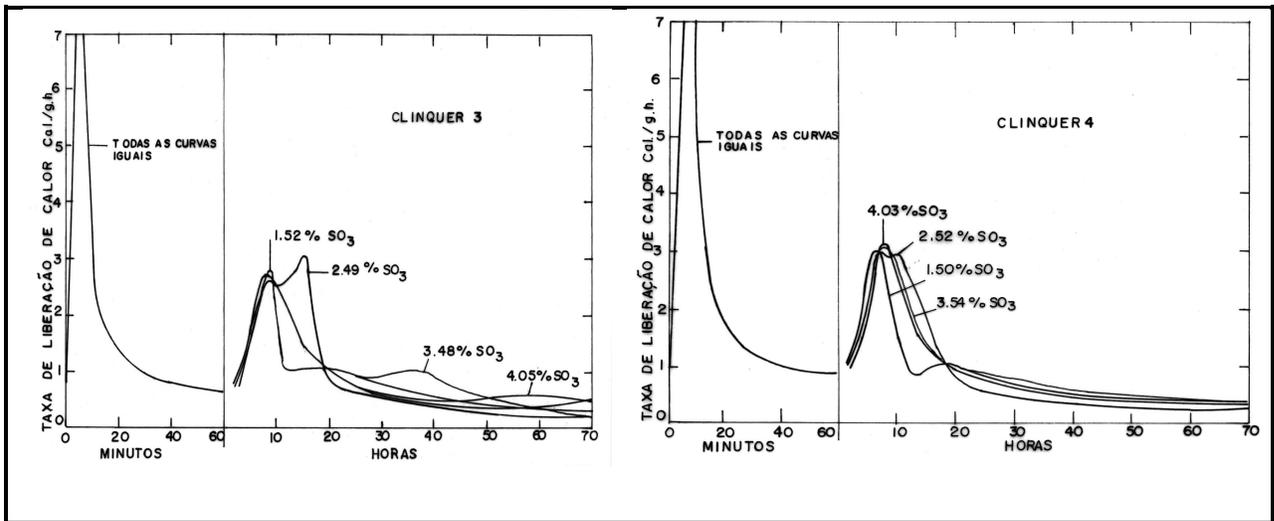
No geral, as reações de hidratação dos cimentos sofreram dois ciclos de acréscimo e decréscimo no desenvolvimento de calor. A taxa de liberação máxima de calor para cada ciclo e o tempo em que ocorreu dependeu do conteúdo de gipsita do cimento.

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.

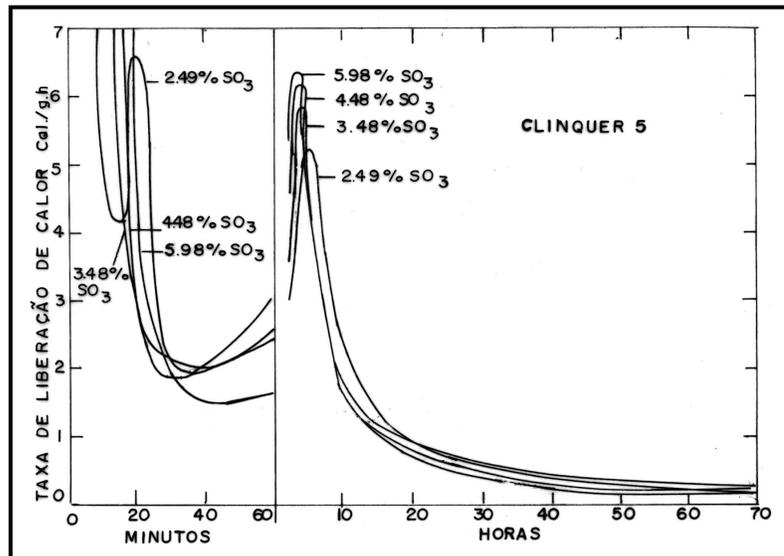
As Figuras 4.6, 4.7, 4.8 apresentam a taxa de desenvolvimento de calor ao longo do tempo em função da quantidade de  $\text{SO}_3$  presente na pasta. Destas Figuras observa-se que o primeiro ciclo começa logo após o cimento entrar em contato com água e alcança seu valor máximo nos primeiros cinco minutos. 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 (WHITTAKER & WESSELS, 1945).



**Figura 4.6 – Taxa de liberação de calor clínquer 1 e clínquer 2 (WHITTAKER & WESSELS, 1945)**



**Figura 4.7 – Taxa de liberação de calor clínquer 3 e clínquer 4 (WHITTAKER & WESSELS, 1945)**



**Figura 4.8 – Taxa de liberação de calor clínquer 5 (WHITTAKER & WESSELS, 1945)**

Das curvas da taxa de liberação de calor (Figuras 4.6, 4.7 e 4.8), observou-se que aumentando a quantidade de gipsita, a taxa de liberação do calor foi normalmente atenuada e a uma certa percentagem uma curva com apenas dois máximos foi obtida. Esta percentagem 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 gipsita que proporcionou ao cimento ter dois ciclos de taxa de hidratação crescentes. Os seguintes comentários gerais podem ser feitos a respeito destes resultados (WHITTAKER & WESSELS, 1945).

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

- a- Os tempos de endurecimento foram apenas levemente afetados, exceto quando foi encontrada a desidratação da gipsita por falsa pega.
- b- A expansão em autoclave foi reduzida.
- c- Ambas as resistências à tração 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.

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  $C_3A$ , mas 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 da hidratação. 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 nos teores de  $C_3A$  e de 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 4.1).

A adição da gipsita 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).

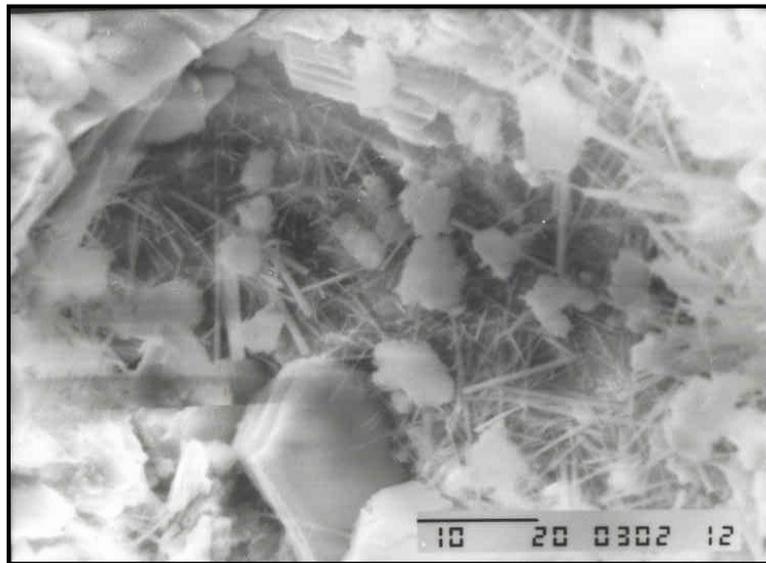
**Tabela 4.1 – Quantidades de  $SO_3$  em cimentos normalizados pela ABNT**

Cimento	CPI - CPI-S	CPII-E – CPII-Z CPII-F	CPIII	CPIV	CPV-ARI	CP - RS
$SO_3\%$	$\leq 4,0$	$\leq 4,0$	$\leq 4,0$	$\leq 4,0$	$\leq 3,5$ ( $C_3A \leq 8\%$ ) $\leq 4,5$ ( $C_3A \geq 8\%$ )	Conforme tipo básico
Norma	EB-1	EB-2138	EB208	EB758	EB-2	EB-903
Especificação	NBR5732	NBR11578	NBR57	NBR57	NBR5733	NBR5737
o			35	36		

#### 4.4 Deterioração dos Produtos de Cimento devido à Etringita

Sabe-se que a expansão dos cimentos está associada à formação da etringita. 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 (DENG et al, 1994).

A Figura 4.9 apresenta a micrografia dos cristais de etringita formados na pasta de cimento Portland comum.



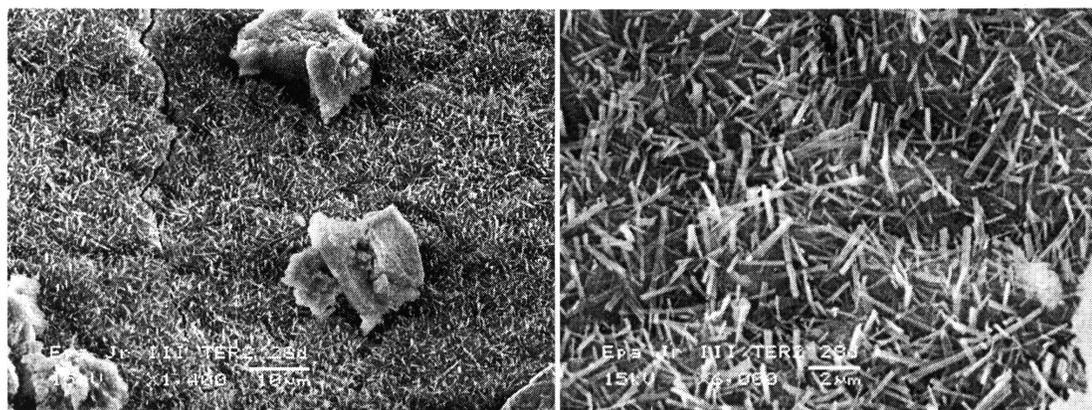
**Figura 4.9 – Micrografia dos cristais de etringita (CAMARINI,1995)**

Batic, e colaboradores (2000), 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.,2000).

Ferreira e Camarini (2003) estudaram a formação de etringita retardada em concretos submetidos à cura térmica concluindo que a formação de etringita retardada pode ser encontrada em concretos curados a temperaturas da ordem de 70 °C. O

regime de cura térmica pode destruir os cristais iniciais de etringita, e a formação posterior de grande quantidade deste produto induz à expansão e fissuração dos concretos, em consequência da pressão exercida pelos cristais de etringita após o endurecimento da pasta, comprometendo a durabilidade e, em alguns casos, a perda de resistência. Concluíram também que este processo pode ocorrer em concretos que não tenham sido curados termicamente, dependendo da quantidade de sulfatos e a disponibilidade de  $C_3A$  no cimento Portland. Na Figura 4.10 observa-se a formação de etringita retardada em um concreto curado a 80 °C.



(a)

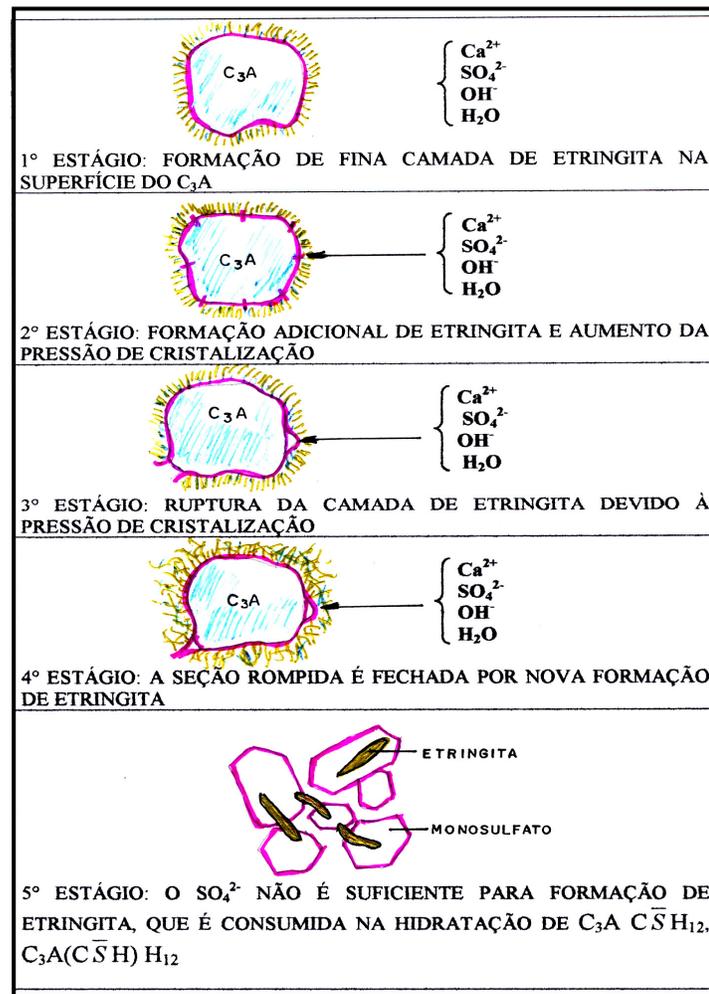
(b)

**Figura 4.10 – Micrografia da formação de etringita retardada em um concreto curado a 80 °C (FERREIRA & CAMARINI ,2003). (a) imagem do concreto; (b) Ampliação da imagem (a)**

#### **4.4.1 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, 4.11) (DJANIKIAN, 1987).

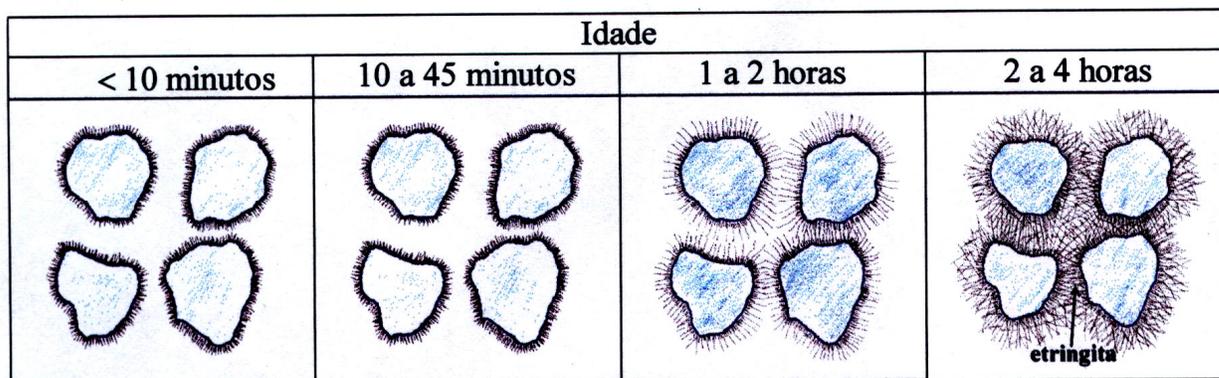


**Figura 4.11 – Esquema do retardamento da pega devido à interação do  $C_3A$  (DJANIKIAN, 1987)**

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 et al, 1994).

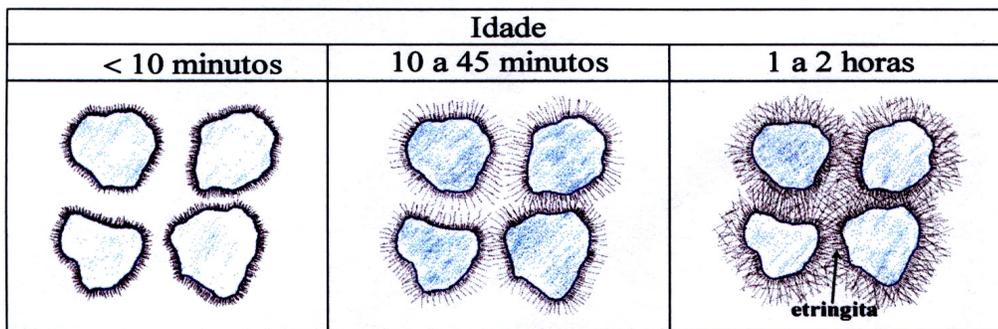
As Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, reproduzem cinco situações sobre a influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa nas características de pega de pastas de cimento Portland ao longo do tempo (MEHTA et al, 1994).

Situação 1 – Reação em até 3 horas. Neste caso as pastas de cimentos vão permanecer trabalháveis por cerca de 45 minutos, tempo em que começará a se enrijecer na 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 4.12).



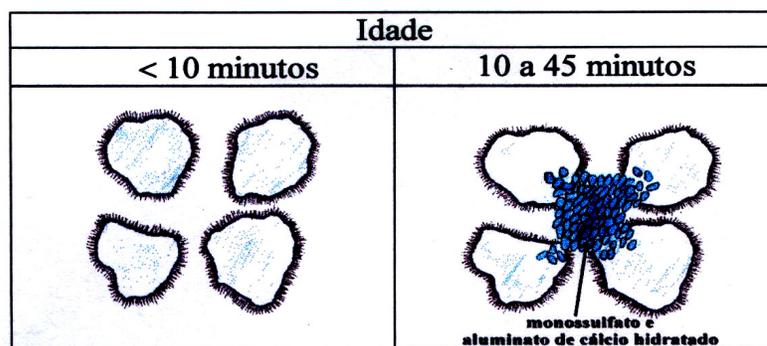
**Figura 4.12** Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 2 e 3 horas (MEHTA et al, 1994)

Situação 2 – Reação entre 10 e 45 minutos. 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 4.13).



**Figura 4.13** Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa entre 10 e 45 minutos (MEHTA et al, 1994)

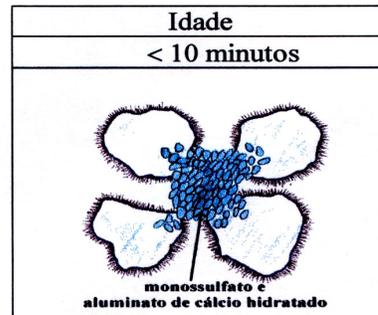
Situação 3 – Reação em menos de 45 minutos. Neste caso formam-se rapidamente grandes quantidades de cristais em forma de placas hexagonais de monossulfato e de aluminato de cálcio hidratados, provocando a pega da pasta de cimento num intervalo de tempo inferior a 45 minutos após a adição de água, fenômeno que é conhecido como pega rápida (Figura 4.14).



**Figura 4.14** Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 45 minutos (MEHTA et al, 1994)

Situação 4 – Reação em menos de 10 minutos. 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 4.15).



**Figura 4.15** Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa em menos de 10 minutos (MEHTA et al, 1994)

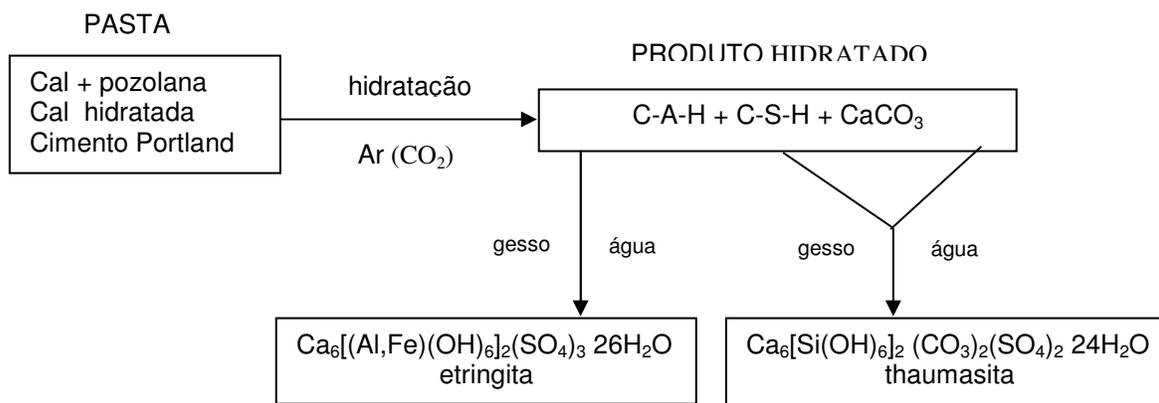
Situação 5 – Reação com falsa pega. Quando o  $C_3A$  é de baixa reatividade, como nos casos em que os cimentos se apresentam parcialmente hidratados ou carbonatados, devido a um armazenamento inadequado, ao mesmo tempo em que uma grande quantidade de hemi-hidrato está presente no cimento. Neste caso, a fase aquosa conterà uma baixa concentração de íons aluminato e ficará supersaturada com ions 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 enérgica da pasta, com ou sem adição de mais água (Figura 4.16).



**Figura 4.16** Influência da reação aluminato/sulfato da fase aquosa –falsa pega (Mehta et al, 1994)

#### 4.5 Deterioração dos Produtos de Cimento Devido a 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. 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 4.17). 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 4.18). 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  $[\text{Si}(\text{OH})_6]^{2-}$  (BENSTED, 1997).



**Figura 4.17 – Esquema do processo químico para produzir thaumasita e etringita (COLLEPARDI, 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 da semelhança dos resultados obtidos na análise térmica diferencial, na espectroscopia de infravermelho e na microscopia óptica (BENSTED, 1997).

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.

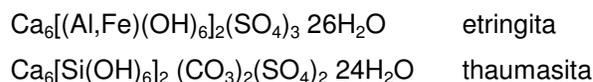


**Figura 4.18 – Micrografia da Thaumasita (REJL et al, 1994)**

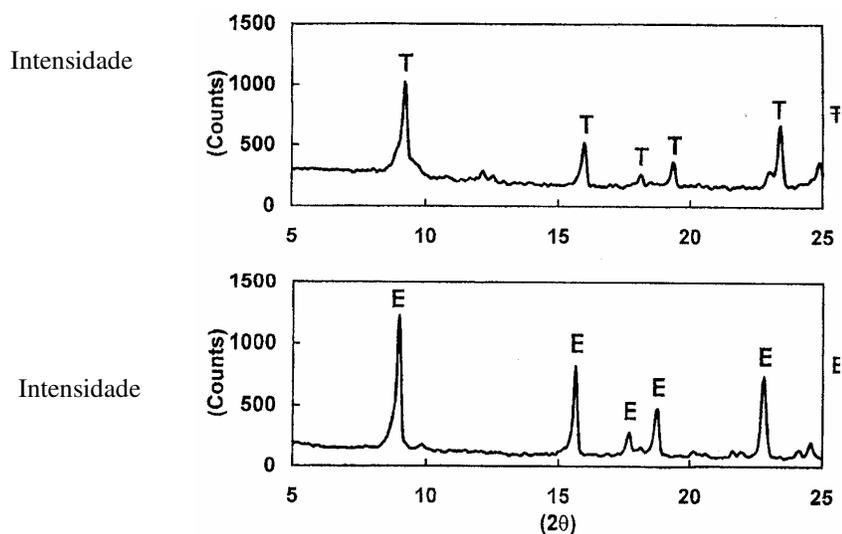
Bensted, 1997, observou que o processo de destruição que acontecem nas pastas de cimento em meios sulfáticos a uma temperatura acima de 20 °C, ocorre a tendência à formação de etringita; em contrapartida, em temperaturas abaixo de 10 °C o problema ocorre pela formação da thaumasita. Observaram também 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<sub>3</sub>S (acima de 60%) são mais sujeitos ao ataque sulfático do que aqueles com teor elevado de C<sub>3</sub>A.

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



O Al<sup>+3</sup> cátion na etringita é trocado por Si<sup>+4</sup> 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 4.19) (COLLEPARDI, 1999).



Thaumasita		Etringita	
2θ Cukα	Intensidade	2θ Cukα	Intensidad
			e
9,15	100	9,08	100
16,00	45	15,75	80
32,98	35	32,25	40

**Figura 4.19 – Difratoograma da thaumasita e etringita( COLLEPARDI, 1999)**

Quando a thaumasita está presente em baixa quantidade e alto ângulo, baixas intensidades de linhas são sobrepostas pelas linhas de outros produtos do cimento. Quando a thaumasita está presente em baixo ângulo, alta intensidade de linhas pode ser usada (COLLEPARDI, 1999).

#### **4.6 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 (1998b) 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 (1998a) 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 (1998a) 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 Singh (1990), Bentur(1994), Yan (1998 e 1999), Klover (1998),Çolak (2001), De Milito (2001) promovem conclusões sobre uma possível coexistência de sucesso entre o gesso e o cimento.

## **5 REVESTIMENTO DE ARGAMASSA CONVENCIONAL E DE GESSO LISO**

Os revestimentos cumprem um papel importante nas construções, já que estes proporcionam à parede estanqueidade aos gases e à água, contribui na estética, no isolamento termo-acústico das paredes e tetos (FRANCO & CANDIA, 1998a).

Os revestimentos internos e externos devem ser constituídos por uma ou mais camadas sobrepostas, contínuas e uniformes. As superfícies das camadas devem estar perfeitamente aplicadas, prumadas ou niveladas e com textura uniforme, bem como apresentar boa aderência entre as camadas e com a base. Os revestimentos externos devem, além disso, resistir à ação de variação de temperatura e umidade.

Quando se pretende revestir uma superfície, ela deve estar isenta de poeira, substâncias gordurosas, eflorecências ou outros materiais soltos, todos os dutos, redes de água, esgoto e de gás deverão ser ensaiados sob pressão recomendada para cada caso antes do início dos serviços de revestimento.

Pode-se revestir as paredes e os tetos com argamassa convencional, com gesso, cerâmicas, pedras decorativas, entre outros.

Os revestimentos argamassados ainda são os mais empregados, portanto este capítulo tem como objetivo comparar os revestimentos de gesso com os revestimentos argamassados convencionais. A comparação será quanto à aplicação, as patologias mais freqüentes e os custos podendo assim verificar as vantagens e as desvantagens entre eles já que o revestimento de gesso a cada dia ganha mais utilização principalmente nos revestimentos internos.

## **5.1 Revestimento com argamassa convencional**

Os revestimentos argamassados são tecnologias construtivas que remontam seu uso desde a Idade Média. Nesta época as alvenarias eram utilizadas como vedação e como estrutura, e eram construídas, na sua grande maioria, por tijolos cerâmicos assentados e revestidos com argamassa de cal e areia. A partir da invenção do cimento Portland as argamassas sofreram uma evolução. Com a adição do cimento, conseguiram ter sua resistência aumentada e a aderência às bases melhoradas, já nas primeiras idades.

Com a invenção do cimento Portland e conseqüentemente do concreto armado, o sistema de construção mudou e as alvenarias passaram a exercer mais a função de vedação. Os problemas de fissuração e destacamento das argamassas tiveram início nesta época. Quando as alvenarias eram estruturais, as tensões eram uniformemente distribuídas em todo o conjunto alvenaria/revestimento. Dessa maneira, as eventuais concentrações de tensões ocorriam em áreas muito reduzidas e de intensidade muito pequena.

O uso de estruturas reticuladas de concreto armado introduziu novos problemas e suas respectivas conseqüências. Antes as cargas eram uniformes e comprimidas, passaram a sofrer outros tipos de tensões provocadas pelas vigas. As vigas transferem deslocamentos verticais que chamamos de flechas e as paredes antes comprimidas, passam agora a sofrer tração e cisalhamento. Como as alvenarias têm boa capacidade de resistência à compressão e pouca capacidade à tração e ao cisalhamento, instalou-se potencial para patologias (CEOTTO et al, 2005).

### **5.1.1 Preparo dos substratos**

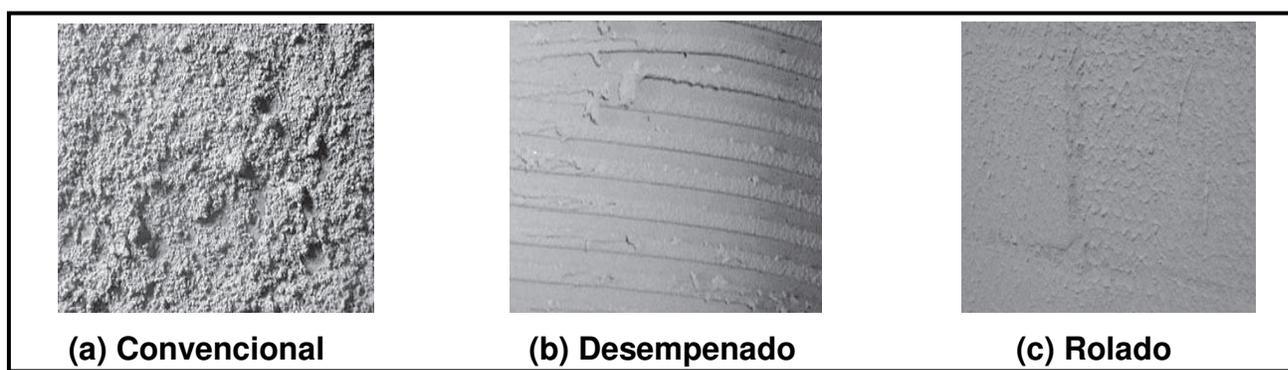
A preparação da base consiste em adequar a alvenaria para o recebimento da argamassa. Essa adequação esta relacionada com a limpeza da estrutura e da

alvenaria, eliminação das irregularidades superiores, remoção das incrustações, pontas metálicas e preenchimento de furos. O chapisco da base deve ser realizado nesta etapa. O chapisco, argamassa de cimento e areia no traço 1:3, é um revestimento rústico empregado nos paramentos lisos, a fim de facilitar o revestimento posterior, dando maior aderência, devido à sua superfície porosa.

A limpeza da base deve ser feita com uma escova de aço, lavagem ou jateamento de areia, essa limpeza visa eliminar elementos que podem prejudicar a aderência da argamassa, como: pó, barro, fuligem, graxas, óleos desmoldantes de estruturas e fungos.

A eliminação das irregularidades superiores como rebarba de concretagem e excesso de argamassa nas juntas, além da remoção de incrustações metálicas e de arames devem ser realizadas. Deve-se também corrigir imperfeições da base preenchendo furos e elementos de alvenaria quebrados.

O chapisco deve ser sempre aplicado na alvenaria e na estrutura de concreto. A Figura 5.1 ilustra as diversas maneiras de se aplicar o chapisco. Na alvenaria aplica-se o chapisco bem distribuído e fechado (convencional) aplicado com colher de pedreiro, no mínimo 03 dias antes da aplicação do emboço (Figura 5.1a). Na estrutura de concreto armado aplica-se o chapisco para concreto com desempenadeira dentada devendo o mesmo ser acrescido de adesivo para argamassa (Figura 5.1b). O chapisco rolado pode ser aplicado tanto na estrutura como na alvenaria utilizando, um rolo de espuma (Figura 5.1c) (CEOTTO et al, 2005).



**Figura 5.1 – Diversas formas de aplicação do chapisco(CEOTTO, 2005)**

O chapisco deve ser executado usando materiais e técnicas apropriadas para melhorar as condições de aderência da camada do revestimento à base ou substrato, criando uma superfície de rugosidade adequada e regularizando a capacidade de absorção inicial da base (FRANCO & CANDIA, 1998b).

### 5.1.2 Preparo da argamassa.

A argamassa utilizada para a regularização dos diversos substratos é chamada de emboço ou massa única ou ainda emboço paulista. Podem ser preparadas manualmente de acordo com a NBR 7200/98. De preferência devem ser preparadas por processo mecanizado, principalmente para as argamassas industrializadas.

O emboço é uma argamassa mista de cimento, cal e areia nas proporções indicadas na Tabela 5.1, conforme a superfície a ser aplicada (DE MILITO, 2003).

**Tabela 5.1 – Traços em volume do emboço para as diversas bases (DE MILITO, 2003)**

Bases	Localização	Cimento	Cal hidratada	Pasta de cal(1)	Areia (2)	OBS
Paredes	Superfícies externas acima do nível do terreno	1,0	2,0	-	8,0 a 10,0	-
		1,0	3,0	-	11,0 a 12,0	-
	Superfícies externas em contato com o solo	1,0	-	1,5	8,0 a 10,0	-
		1,0	-	2,5	11,0 a 12,0	-
		1,0	-	-	3,0 a 4,0	Recomenda-se a incorporação de aditivo impermeabilizante
Tetos	Superfícies internas	1,0	2,0	-	8,0 a 10,0	-
		1,0	3,0	-	11,0 a 12,0	-
		1,0	2,0	1,5	8,0 a 10,0	-
		1,0	-	2,5	11,0 a 12,0	-
	Superfícies externas E internas	-	1,0	-	2,0 a 3,5	- no caso de execução de acabamento tipo barra lisa
		-	-	1,0	1,5 a 3,0	-
		1,0	-	-	3,0 a 4,0	-
		1,0	2,0	-	9,0 a 10,0	-
E internas	1,0	3,0	-	11,0 a 12,0	-	
	1,0	-	1,5	8,0 a 10,0	-	
	1,0	-	2,5	11,0 a 12,0	-	

(1) Pasta obtida a partir da extinção da cal virgem com água.

(2) Areia com teor de umidade de 2 a 5%.

Portanto, o emboço de superfície externa, acima do nível do terreno, deve ser executado com argamassa de cimento e cal. Nas paredes externas, em contato com o solo, o emboço é executado com argamassa de cimento incorporando aditivo impermeabilizante. A areia empregada é a média ou grossa, dependendo do acabamento desejado. Sobre o emboço pode-se aplicar uma outra argamassa chamada reboco. O emboço para receber o reboco deve estar adequadamente áspero, absorvente, limpo e umedecido. O reboco é constituído, mais comumente, de argamassa de cal e areia fina com traço conforme Tabela 5.2.

Antes de aplicar o reboco deve-se certificar se o mesmo foi preparado com antecedência dando tempo para a massa “descansar”. Esse procedimento é importante e tem a finalidade de garantir que a cal, utilizada no reboco, fique totalmente hidratada, não oferecendo assim danos ao revestimento (DE MILITO, 2003).

**Tabela 5.2 – Traços em volume do reboco (DE MILITO, 2003)**

Bases	Localização	Cimento	Cal hidratada	Pasta de cal(3)	Areia(4)	OBS
Paredes	Superfícies externas acima do nível do terreno	-	1,0	-	2,0 a 3,5	-
	Superfícies externas em contato com o solo	-	-	1,0	1,5 a 3,0	-
	Superfícies externas em contato com o solo	1,0	-	-	3,0 a 4,0	Recomenda-se a incorporação de aditivo impermeabilizante
	Superfícies internas inclusive paredes de banheiros, cozinhas, lavanderias acima de 1,60m de altura.	-	1,0	-	2,0 a 3,5	-
Tetos	Superfícies internas inclusive paredes de banheiros, cozinhas, lavanderias até 1,60m de altura.	-	-	1,0	1,5 a 3,0	-
	Superfícies internas inclusive paredes de banheiros, cozinhas, lavanderias até 1,60m de altura.	1,0	-	-	3,0 a 4,0	No caso de pintura da superfície revestida com tinta à base de resina epóxi, borracha clorada etc.
Tetos	Superfícies internas e externas	-	1,0	-	2,0 a 3,5	-
	Superfícies internas e externas	-	-	1,0	1,5 a 3,0	-

(3) Pasta obtida a partir da extinção da cal virgem com água.

(4) Areia com teor de umidade de 2 a 5%.

Pode-se utilizar argamassas pré-fabricadas, para o reboco, que necessitam ser fornecidas perfeitamente homogeneizadas, a granel ou em sacos. Cada embalagem

deve trazer, bem visíveis, as indicações de peso líquido, traço, natureza do produto e a marca do seu fabricante.

### **5.1.3 Aderência das argamassas convencionais em diversos substratos**

A aderência depende das características da base de aplicação, como porosidade, rugosidade, limpeza da superfície de contato entre a argamassa e a base.

Para se obter boa aderência inicial, a argamassa deve ter trabalhabilidade e retenção de água adequada à sucção da base e as condições de exposição. Na sua aplicação deve ser comprimida com a colher de pedreiro para promover um maior contato com a base.

Franco & Candia (1998b) em seu trabalho experimental sobre aderência das argamassas apresentou as seguintes conclusões:

- Os tipos de materiais empregados na fabricação das argamassas de chapisco influem nas características superficiais dos substratos, principalmente no índice de absorção inicial e rugosidade superficial.
- Os materiais que constituem o substrato apresentam características superficiais do índice de absorção inicial e rugosidade superficial diferentes em função da matéria prima empregada para a sua fabricação. Essas características manifestam-se nas resistências de aderência. Por exemplo, as maiores médias foram sobre a base de alvenaria de blocos de concreto, seguida pela base de alvenaria de blocos cerâmicos e estrutura de concreto, respectivamente.
- Os diversos tipos de preparo da base aplicados sobre os substratos proporcionam características superficiais bastante diferentes. Essas características acabam influenciando nos valores obtidos através dos ensaios de perda de água da argamassa, tempos de sarrafeamento e resistências de aderência.
- O chapisco rolado proporciona os maiores índices de produtividade em relação aos outros tipos de chapisco avaliados, porém quando se usa chapisco rolado, precisa-se de um maior controle tanto durante a produção da argamassa como na sua aplicação.

- Comparando-se a média das resistências de aderência, conclui-se que as resistências de aderência ao cisalhamento foram aproximadamente 1,40 vez superiores à média das resistências de aderência à tração.
- A cura dos revestimentos nas primeiras idades tem uma influência significativa nos valores de resistência de aderência, portanto a localização da fachada em relação ao sol e sombra durante a execução do revestimento influi nas resistências de aderência.

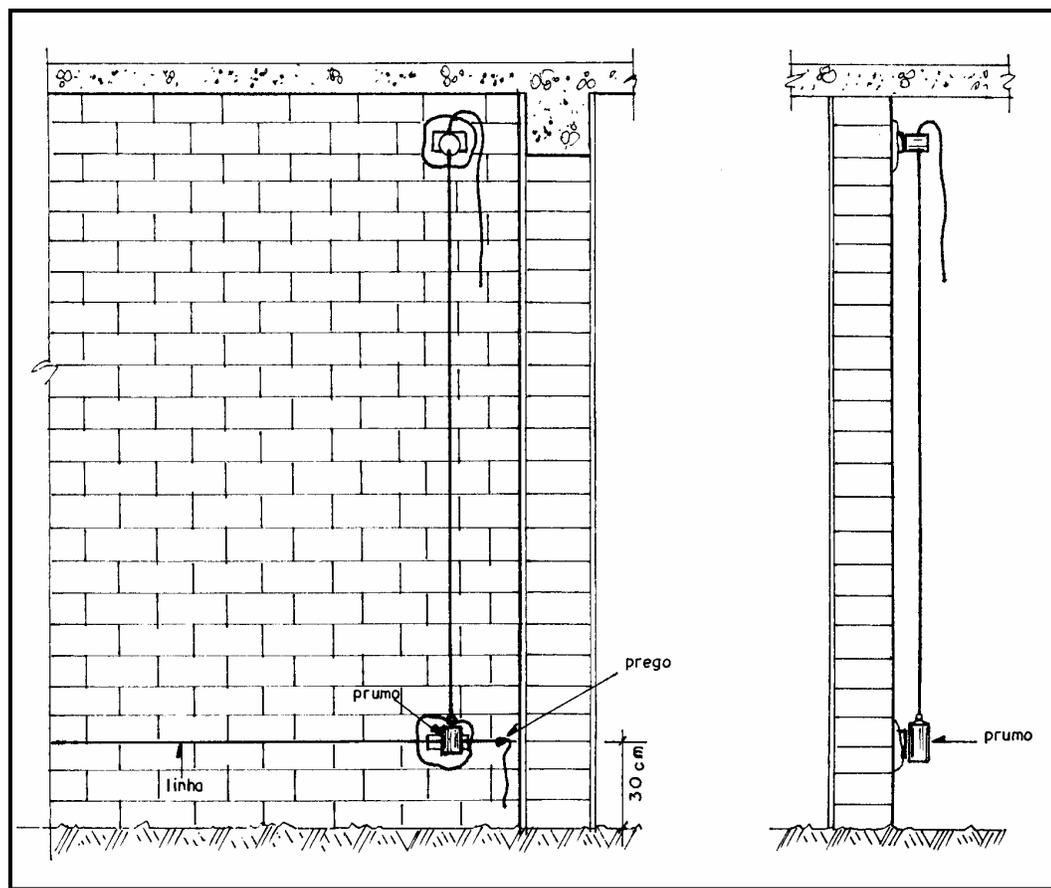
#### **5.1.4 Aplicação manual das argamassas**

A aplicação do emboço é iniciada nos tetos em seguida da parte superior das paredes para a inferior e a superfície deve estar previamente molhada. A umidade não pode ser excessiva, pois a massa escorre pela parede. Por outro lado, se lançar à argamassa sobre o tijolo, completamente seco, este absorverá a água existente na argamassa e da mesma forma se desprenderá. O emboço deve ter uma espessura média entre 1,5 cm a 2,0 cm, pois o seu excesso, além do consumo inútil, corre o risco de desprender, depois de seco. Infelizmente esta espessura não é uniforme porque os tijolos têm diferenças de medidas, resultando um painel de alvenaria, principalmente o interno, com saliências e reentrâncias que aumentam essa espessura. Para conseguir uma uniformidade do emboço e tirar todos os defeitos da parede, deve-se seguir com bastante rigor ao prumo e ao alinhamento (DE MILITO, 2003). Para isso deve-se fazer:

##### *a) Assentamento das Taliscas (tacos ou calços)*

No caso de paredes, quando forem colocadas as taliscas, é preciso fixar uma linha na sua parte superior e ao longo de seu comprimento. A distância entre a linha e a superfície da parede deve ser menor ou igual a 1,5cm. As taliscas (calços de madeira de aproximadamente 1x5x12cm ou caco cerâmicos) devem ser assentadas com argamassa mista de cimento, cal e areia para emboço, com a superfície superior faceando a linha. Sob esta linha, recomenda-se a colocação das taliscas em distâncias de 1,5 m a 2m entre si (devido ao tamanho das régua). A partir da sua disposição na

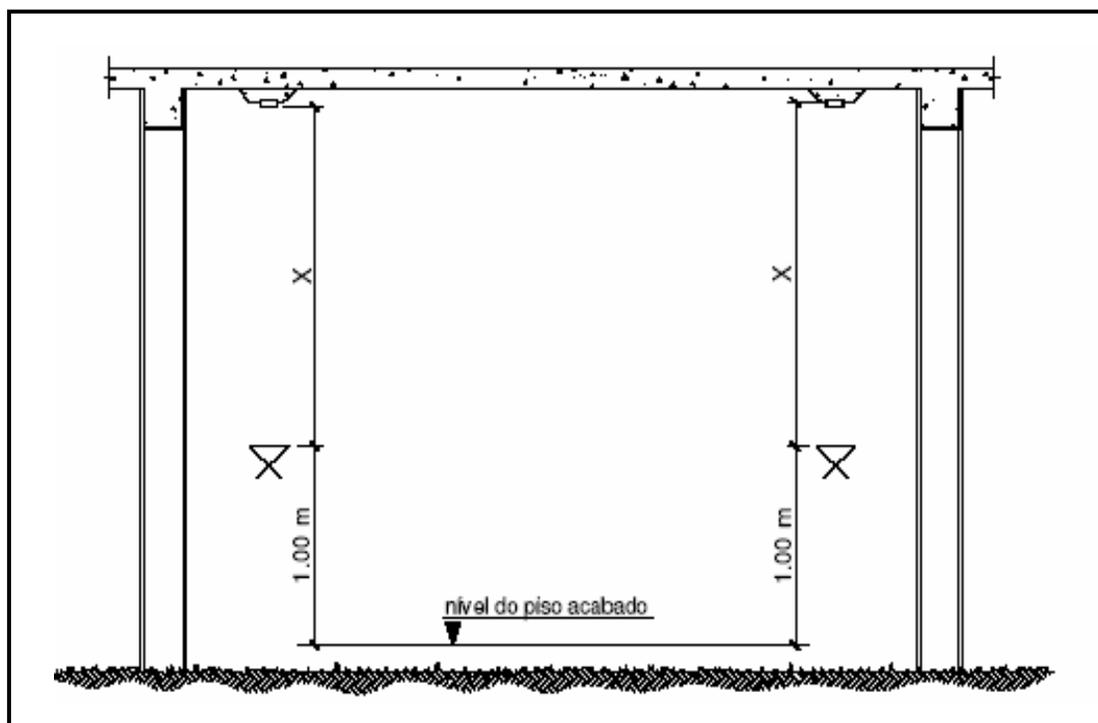
parte superior da parede, com o auxílio de fio de prumo, devem ser assentadas outras taliscas na parte inferior (a 30cm de piso) e as intermediárias (Figura, 5.2).



**Figura 5.2 – Assentamento das taliscas superiores e inferiores (DE MILITO 2003)**

No caso de tetos, é necessário que sejam assentadas empregando-se régua e nível de bolha ao invés de fio de prumo. Ou através do nível referência de piso acabado, acrescentando uma medida que complete o pé direito do ambiente (X) (Figura 5.3).

Após um dia de cura das taliscas se inicia a execução das guias ou mestras.

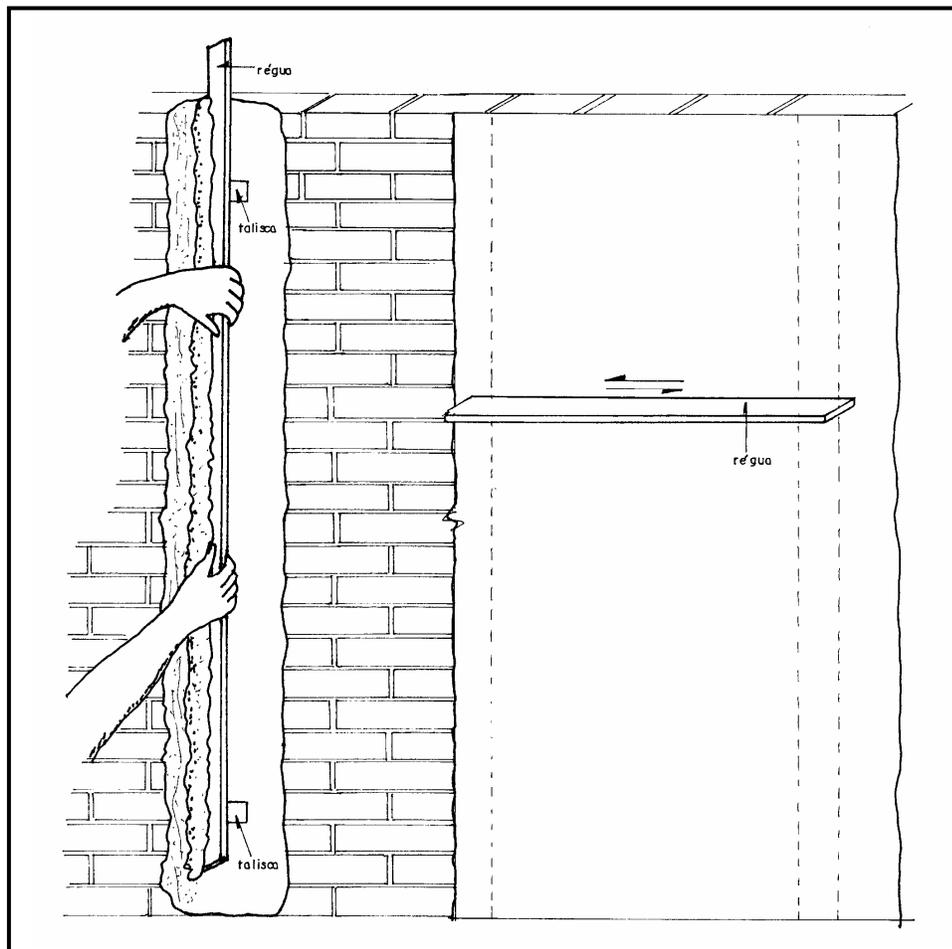


**Figura 5.3 – Detalhe da colocação das taliscas nos tetos utilizando o nível de referência (DE MILITO, 2003)**

*b) Guias ou Mestras*

São constituídas por faixas de argamassa, em toda a altura da parede (ou largura do teto) e são executadas na superfície ao longo de cada fila de taliscas já umedecidas. A argamassa mista, depois de lançada, deve ser comprimida com a colher de pedreiro e, em seguida, sarrafeada, apoiando-se a régua nas taliscas superiores e inferiores ou intermediárias. Em seguida, as taliscas devem ser removidas e os vazios preenchidos com a mesma argamassa e a superfície regularizada. O acabamento do emboço pode ser efetuado com régua apoiada sobre as guias. A régua deve sempre ser movimentada da direita para a esquerda e vice-versa (Figura 5.4).

Nos dias muito quentes, recomenda-se que os revestimentos, principalmente aqueles diretamente expostos a radiação solar, sejam mantidos úmidos durante pelo menos 48 horas após a aplicação. Pode ser efetuado, por aspersão de água três vezes ao dia (DE MILITO, 2003).

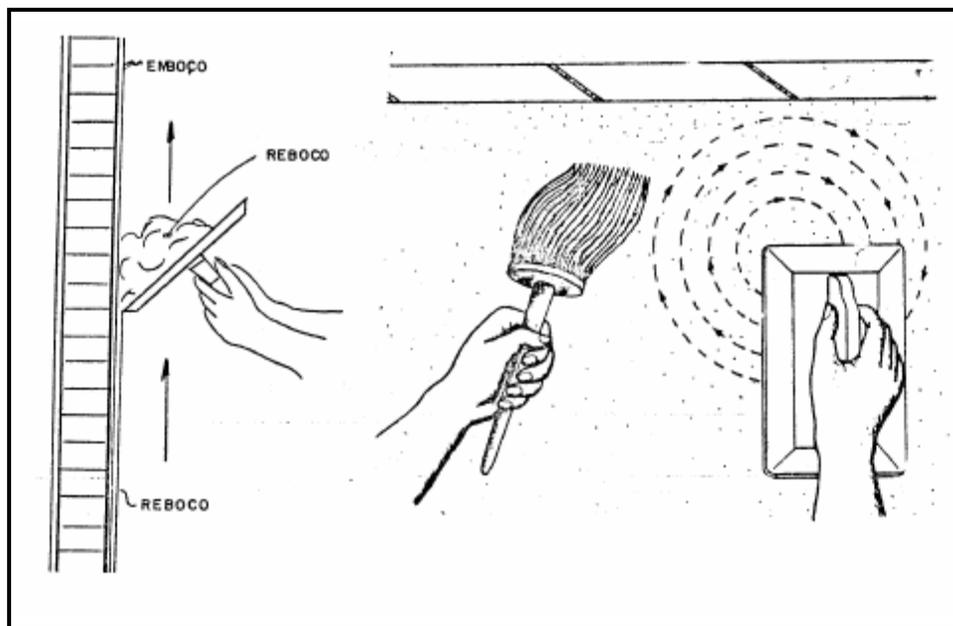


**Figura 5.4 – Detalhe da execução das guias e do emboço (DE MILITO, 2003)**

O acabamento do emboço pode ser: *sarrafeado*, ideal para receber o revestimento fino (reboco), azulejo, pastilha, etc. *Sarrafeado e desempenado*, ideal para receber gesso, massa corrida. *Sarrafeado, desempenado e feltrado* (uma mão de massa ou massa única) para receber a pintura. O período de cura do emboço, antes da aplicação de qualquer revestimento, deve ser igual ou superior a sete dias.

A aplicação do reboco é iniciada somente após a colocação de peitoris e batentes e antes da colocação das guarnições e rodapés. A superfície a ser revestida com reboco deve estar adequadamente áspera, absorvente, limpa e também umedecida. O reboco é aplicado sobre a base, com desempenadeira e deverá ter uma

espessura de 2mm até 5mm. Em paredes, a aplicação deve ser efetuada de baixo para cima, a superfície deve ser regularizada e o desempenamento feito com a superfície ligeiramente umedecida através de aspensão de água com brocha e com movimentos circulares. A cura do emboço se dá com no mínimo 30 dias (Figura 5.5)



*Figura 5.5 – Detalhe da aplicação do reboco (DE MILITO, 2003)*

### **5.1.5 Principais patologias dos revestimentos argamassados**

Observa-se nas edificações os seguintes fenômenos, prejudiciais ao aspecto das paredes e tetos:

- a - a pintura acha-se parcial ou totalmente fissurada, deslocando da argamassa de revestimento;
- b - há formação de manchas de umidade, com desenvolvimento de bolor;
- c - há formação de eflorescência na superfície da tinta ou entre a tinta e o reboco;
- d - a argamassa do revestimento descola inteiramente da alvenaria, em placas compactas ou por desagregação completa;

- e - a superfície do revestimento apresenta fissuras de conformações variadas;
- f - a superfície do revestimento apresenta vesículas com deslocamento da pintura;
- g - o reboco endurecido empola progressivamente, deslocando do emboço.

Estes fenômenos podem se apresentar como resultados de uma ou mais causas, atuando sobre a argamassa de revestimento, tais como (CINCOTTO, 1983):

*a- tipo e qualidade dos materiais utilizados no preparo da argamassa de revestimento.*

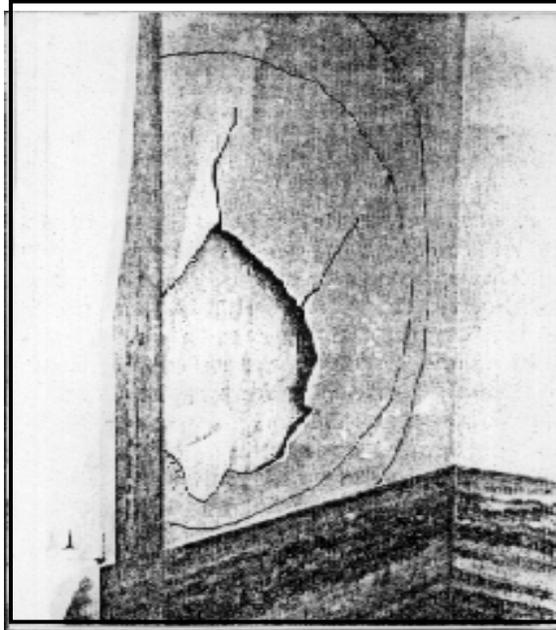
Geralmente se utiliza como agregado a areia natural essencialmente quartzosa. São particularmente prejudiciais impurezas tais como: aglomerados argilosos, pirita, mica, concreções ferruginosas e matéria orgânica. Dos efeitos observáveis, a expansão pode ser resultante da formação de produtos de oxidação da pirita e das concreções ferruginosas - sulfatos e óxidos de ferro hidratados, respectivamente - de hidratação de argilo-minerais montmoriloníticos ou de matéria orgânica. A matéria orgânica pode ser a causa de formação de vesículas esporádicas; no interior de cada vesícula observa-se um ponto escuro (Figura 5.6).



***Figura 5.6 – Vesícula formada no reboco. No centro da vesícula, material pulverulento escuro (CINCOTTO, 1983)***

A desagregação do revestimento, por sua vez, tem como causa a presença de torrões argilosos, com excesso de finos na areia ou de mica em quantidade apreciável. A mica pode também reduzir a aderência do revestimento à base ou de duas camadas entre si. Em relação ao cimento, não existe inconveniente quanto ao seu tipo, mas sim, quanto à finura que regulará os níveis de retração por secagem. A retração nas primeiras 24 horas é controlada pela retenção de água que, por sua vez, é proporcional ao teor de finos. Mas, em idades, maiores, a retração aumenta com o teor de finos. De modo a contornar o problema, costuma-se adicionar aditivo incorporador de ar a argamassas de cimento, exceção feita à de chapisco. Outra alternativa é a de adicionar-se cal hidratada que aumenta o teor de finos, melhorando a retenção de água e trabalhabilidade do conjunto.

Como visto no Capítulo 3, a produção de cal virgem, de cal hidratada e o endurecimento da argamassa pertencem a um ciclo de reações que se inicia pela decomposição do constituinte principal da matéria-prima, o carbonato, terminando pela sua regeneração no endurecimento da argamassa, como resultado da ação do anidrido carbônico do ar. A etapa intermediária, de hidratação da cal virgem, dá-se por uma reação contínua, cuja velocidade depende das condições de calcinação da matéria-prima. Comparativamente, a cal virgem dolomítica tem velocidade de hidratação mais lenta. Quando esta reação não é completa durante a extinção em fábrica, pode continuar após o ensacamento, durante o amassamento e após a aplicação da argamassa. O inconveniente é o aumento de volume que acompanha a reação de hidratação. A hidratação retardada é a responsável pelo rasgamento do saco quando a cal é armazenada por tempo prolongado. Se utilizada logo após a fabricação, o aumento de volume causa danos ao revestimento, mais propriamente na camada de reboco, com efeitos diferentes, quer se trate do óxido de cálcio ou de magnésio presentes na cal. Existindo óxido de cálcio livre, na forma de grãos grossos, a expansão não pode ser absorvida pelos vazios de argamassa e o efeito é o de formação de vesículas, observáveis nos primeiros meses de aplicação do reboco. Ao ser a hidratação do óxido de magnésio muito mais lenta, ela se dá simultaneamente à carbonação. O revestimento endurecido empola gradativamente deslocando-se do emboço (Figura 5.7) (CINCOTTO, 1983).



**Figura 5.7 – Aspecto típico do deslocamento do reboco devido ao óxido de magnésio (CINCOTTO, 1983)**

*b- má dosagem das argamassas.*

A primeira camada do revestimento é constituída pelo emboço, cuja função é regularizar a superfície da base; como já visto, para que essa camada seja suficientemente elástica deve conter cal e cimento em proporções adequadas. Observam-se fissuras e deslocamento quando esta camada é excessivamente rica em cimento (proporção 1:2 em massa, por exemplo), condição agravada quando aplicada em espessura maior de 2 cm.

No reboco o endurecimento é resultante da carbonação da cal. Assim sendo, a resistência da argamassa é função de uma proporção adequada, areia, cal e de condições favoráveis à penetração do anidrido carbônico do ar atmosférico através de toda a espessura da camada. Em camadas pouco espessas como as de reboco, a carbonatação é favorecida pela pequena espessura da camada, mas desfavorecida por uma porosidade baixa resultante de uma argamassa rica em finos, procedente tanto do agregado como do aglomerante. Podemos considerar como argamassa rica a que contém proporção cal-areia, em massa superior a 1:3. Uma argamassa magra tem porosidade favorável à carbonatação mas não tem a resistência suficiente para manter-

se aderente ao emboço ou à alvenaria, quando aplicada como revestimento em uma única camada. Consta-se casos de deslocamento acompanhado de desagregação, para argamassa de 1:16 (traço em volume) ou ainda para proporções maiores (CINCOTTO, 1983).

*c - má aplicação do revestimento;*

Independentemente do número de camadas de argamassa aplicadas, ou da qualidade dos materiais empregados, é essencial que existam condições de aderência do revestimento à base. A aderência se dá pela penetração da nata do aglomerante nos poros da base e endurecimento subsequente. Conseqüentemente, vai depender da textura e da capacidade de absorção da base, bem como da homogeneidade dessas propriedades. Assim, pode apresentar problema de aderência, uma camada do revestimento aplicada sobre outra impregnada de um produto orgânico, o qual impede a penetração da nata do aglomerante. Cita-se, como exemplo, uma superfície de concreto impregnada de desmoldante ou uma camada de chapisco contendo um produto hidrofugante. Outra causa a ser citada é a ausência de rugosidade da camada da base. O revestimento mantém-se aderente nas regiões correspondentes às juntas do assentamento. Sendo a área dessas juntas relativamente pequena, o revestimento acaba por descolar sob efeito do seu próprio peso.

Quanto à espessura do revestimento, em paredes e tetos com argamassas, a espessura do emboço não deve ultrapassar 2cm e a do reboco 2mm. Observa-se que em alguns casos deslocamento de revestimento de laje de teto o emboço chega a apresentar espessura igual ou superior a 5cm. Este fato é agravado por um traço rico em cimento, não permitindo que o revestimento acompanhe a movimentação da estrutura, deslocando-se. No reboco, o efeito observado é de desagregação por falta de carbonatação.

Para argamassa contendo cimento, se o tempo de endurecimento e secagem da camada inferior não é observado antes da aplicação da camada superior, a retração que acompanha a secagem da camada inferior gera fissuras, com configuração de mapa, na camada superior (Figura 5.8).



**Figura 5.8 –Fissuras mapeadas devido a retração da argamassa de base (CINCOTTO, 1983)**

O alisamento intenso da camada de reboco propicia uma concentração de nata de cal na superfície. Por carbonatação, forma-se uma película de carbonato uniforme que age como uma barreira à penetração do anidrido carbônico, impedindo o endurecimento do interior da camada de revestimento (CINCOTTO, 1983).

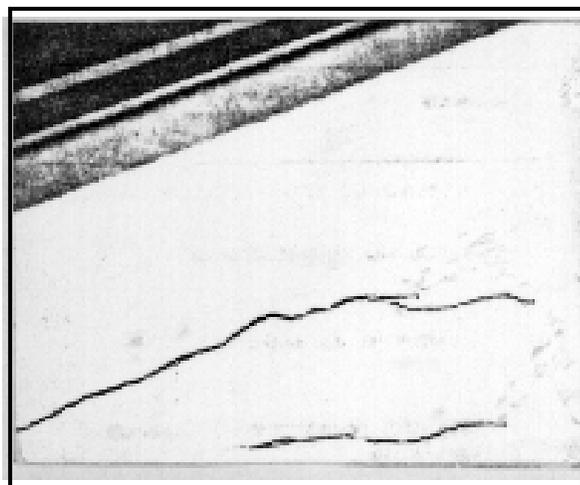
*d - fatores externos ao revestimento;*

Fatores como a pintura, a umidade e a expansão da argamassa de assentamento podem danificar os revestimentos.

As tintas a óleo ou à base de borracha clorada e epóxi promovem uma camada impermeável que dificulta a difusão do ar atmosférico através da argamassa de revestimento. Se a pintura for aplicada prematuramente, o grau de carbonatação atingido não é suficiente para conferir à camada de reboco a resistência suficiente e este acaba por deslocar-se do emboço com desagregação. No caso de tintas impermeáveis, a eflorescência deposita-se entre a camada de tinta e a do reboco, comprometendo a aderência entre ambas. Estas tintas são também responsáveis pela formação de vesículas ou bolhas que resultam da percolação da água através da alvenaria e que se acumula entre o revestimento e a tinta.

A infiltração de água através de alicerces, lajes, cobertura mal impermeabilizadas ou argamassas de assentamento magras, manifesta-se por manchas de umidade, acompanhada ou não pela formação de eflorescência ou vesículas. A infiltração constante provoca a desagregação do revestimento, com pulverulência, ou formação de bolor em pontos onde não há incidência de sol.

A expansão da argamassa de assentamento ocorre predominantemente no sentido vertical e pode ser identificada por fissuras horizontais no revestimento. A expansão da argamassa de assentamento pode ser provocada por reações químicas entre os constituintes desta argamassa ou mesmo entre compostos do cimento e dos tijolos ou blocos que compõem a alvenaria (Figura 5.9). As causas podem ser as seguintes: reação de sulfato do meio ambiente ou do componente da alvenaria com o cimento da argamassa; hidratação retardada da cal dolomítica usada na argamassa de assentamento (CINCOTTO, 1983).



***Figura 5.9 –Fissuras do revestimento por expansão da argamassa de assentamento (CINCOTTO, 1983)***

A Tabela 5.3 apresenta um resumo das principais patologias observadas nos revestimentos de argamassa a base de cimento, cal e areia.

**Tabela 5.3 – Resumo das patologias dos revestimentos em argamassa (CINCOTTO, 1983).**

Manifestações	Aspecto observado	Causas prováveis atuando com ou sem simultaneidade
	Manchas de umidade	Umidade constante
Eflorescência	Pó branco acumulado sobre a superfície <input type="checkbox"/>	Sais solúveis presentes no elemento da alvenaria Sais solúveis presentes na água de amassamento ou unidade infiltrada Cal não carbonatada
	Manchas esverdeadas ou escuras	Umidade constante <input type="checkbox"/> Área não exposta ao sol
Bolor <input type="checkbox"/>	Revestimento em desagregação	
	Empolamento da pintura, apresentando-se as partes internas das empolas na cor:	
	- branca.....	- Hidratação retardada de óxido de cálcio da cal.
Vesículas	- preta.....	- Presença de pirita ou de matéria orgânica na areia
	- vermelho acastanhado.....	- Presença de concreções ferruginosas na areia
	- bolhas contendo umidade interior.....	- Aplicação prematura de tinta impermeável
Deslocamento com Empolamentos	A superfície do reboco formando bolhas cujos diâmetros aumentam progressivamente	Infiltração de umidade
	<input type="checkbox"/> O reboco apresenta som cavo sob percussão <input type="checkbox"/>	Hidratação retardada do óxido de magnésio da cal
Fissuras <input type="checkbox"/> Mapeadas <input type="checkbox"/>	As fissuras têm forma variada e distribuem-se por toda a superfície <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Retração da argamassa de base <input type="checkbox"/>
	A placa apresenta-se endurecida, quebrando com dificuldade	A superfície de contato com a camada inferior apresenta placas freqüentes de mica
Deslocamento em Placa	Sob percussão o revestimento apresenta som cavo	Argamassa muito rica Argamassa aplicada em camada muito espessa A superfície da base é muito lisa A superfície da base está impregnada com substância hidrófuga
	A placa apresenta-se endurecida mas quebradiça, desagregando-se com facilidade	Ausência da camada de chapisco Argamassa magra
	Sob percussão o revestimento apresenta som cavo	Ausência da camada de chapisco
	Apresenta-se ao longo de toda a parede	Expansão da argamassa de assentamento por hidratação retardada, do óxido de magnésio da cal.
Fissuras Horizontais	Deslocamento do revestimento em placas, com som cavo sob percussão	Expansão da argamassa de assentamento por reação cimento-sulfatos ou devido à presença de argilo-minerais expansivos no agregado
Deslocamento com Pulverulência	A película de tinta desloca arrastando o reboco que se desagrega com facilidade	Excesso de finos no agregado
	O reboco apresenta som cavo sob percussão	Traço rico em aglomerantes Traço excessivamente rico em cal Ausência de carbonatação da cal O reboco foi aplicado em camada muito espessa

## **5.2 Revestimento de gesso liso**

O gesso é um dos materiais mais consumidos no mundo. Extraído de minas subterrâneas e de minas ao céu aberto, como é o caso brasileiro, o gesso já serviu como massa de assentamento nas pirâmides egípcias bem como os gregos e os romanos o utilizaram para decoração. Hoje, os processos industriais nos permitem ter acesso a uma grande gama de produtos de gesso. Suas propriedades de isolamento térmico e acústico além das riquezas das formas que pode se criar com o pó de gesso o tornaram essencial para arquitetos e engenheiros. O gesso em pó é empregado em grande quantidade na construção, misturando com água proporciona um revestimento eficaz, estético e bom acabamento para paredes interna e tetos (SINDUSGESSO, 2006).

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, 1996a).

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 14 dias para as pinturas permeáveis e de 30 dias para as pinturas menos permeáveis e papel de parede (HINCAPIE et al, 1996b).

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.

### **5.2.1 Preparo dos substratos**

A superfície para a aplicação do revestimento de gesso liso também 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 devem ser verificadas a falta de prumo, nível e planeza dos substratos conforme limites constantes da Norma NBR13207/94 (Tabela 5.4).

**Tabela 5.4 – Desvios máximos de prumo, nível e planeza para os substratos que vão receber revestimento de gesso (NBR 13207/94)**

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 a 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 pode ser removido 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. 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 o revestimento de argamassa deve ser umedecido pelas suas características de absorção ou de secagem da pasta.

### 5.2.2 Preparo da pasta

Geralmente um gesseiro experiente prepara um saco comercial de 40 kg de gesso por mistura 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* (HINCAPIE et al, 1996a).

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 3.8, página 45). 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 3.8, página 45) (ANTUNES et al, 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 di-hidrato já está formado (Figura 3.7, da página 45).

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.

### **5.2.3 Aderência das pastas de gesso em diversos substratos**

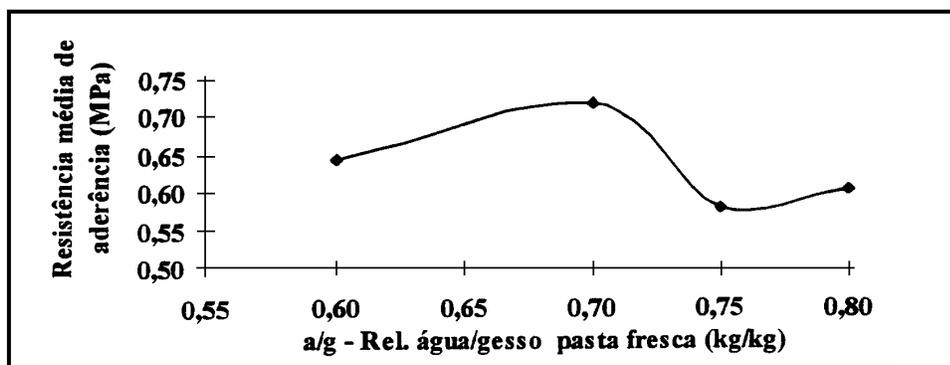
As propriedades da pasta no estado endurecido têm papel significativo no desempenho do revestimento, e depende das condições do substrato, como porosidade e absorção de água, resistência mecânica, textura superficial e pelas próprias condições de execução do assentamento de componentes do substrato. 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 (HINCAPIE et al, 1996b).

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.

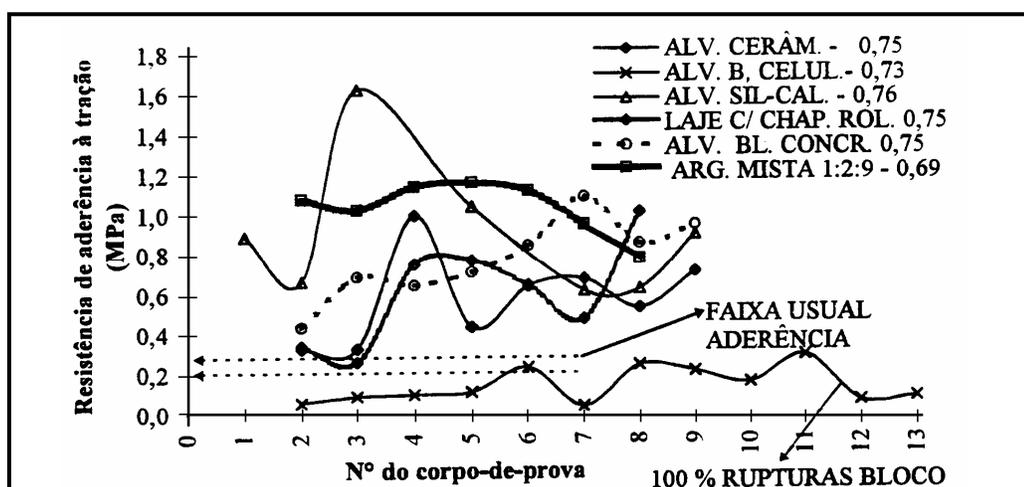
Geralmente a aderência no substrato horizontal é conseguida com a aplicação de um chapisco rolado de cimento Portland e areia, misturada com uma solução aquosa à base de acetato de polivinila (PVA) ou de estireno-butadieno (SBR). No substrato vertical emprega-se somente uma mistura de cimento Portland 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., 1997). 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 5.10).



**Figura 5.10 – 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 aumentada 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 5.11), 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 5.11 – 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 De Milito & Camarini (2005), em substrato de EPS, bloco cerâmico e bloco de concreto com chapisco e sem chapisco mostram a importância do preparo adequado da base.

No substrato de EPS observou-se que o substrato era muito frágil e o ensaio realizado por meio do aparelho mecânico não conseguiu indicar a tensão de arrancamento por esta ser muito baixa, ocorrendo à ruptura típica na interface pasta-substrato devido à falta de aderência entre os dois componentes. Nem mesmo empregando o chapisco sobre o substrato conseguiu-se uma melhora significativa nos

resultados de resistência de aderência. Na aplicação das diversas misturas sobre as placas de EPS, há uma melhora em relação aos resultados obtidos em superfície com chapisco rolado. As adições (cimento Portland e sílica ativa) não melhoraram o desempenho quanto à aderência das pastas com este tipo de substrato.

Para os substratos de bloco cerâmico, o chapisco contribuiu para melhorar a aderência tanto das pastas de gesso como nas pastas de gesso-cimento Portland-sílica ativa. Neste caso a resistência de aderência melhora em idades mais avançadas e o melhor resultado foi obtido com a pasta de gesso puro.

Para os substratos de bloco de concreto observou-se que o preparo da base com o chapisco não proporcionou uma contribuição significativa para melhorar a aderência das pastas. A aderência para cada mistura, em ambos os casos, melhoram também em idades mais avançadas. Da mesma forma, o emprego de cimento Portland e sílica ativa nas misturas em geral pioraram as condições de aderência com a base, comparativamente à mistura de gesso puro. O melhor resultado realmente foi para a mistura de gesso puro. Na aplicação das diversas misturas sobre os blocos de concreto, observou-se que a ruptura típica foi na interface pasta/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.

#### **5.2.4 Aplicação manual da pasta**

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, 1996a).

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 (denominadas 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.

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 podendo chegar no máximo a 7 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 gesso 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 gesso 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.

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 5.5 resume as diversas etapas e o tempo aproximado de execução da aplicação manual da pasta.

**Tabela 5.5 – 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)**

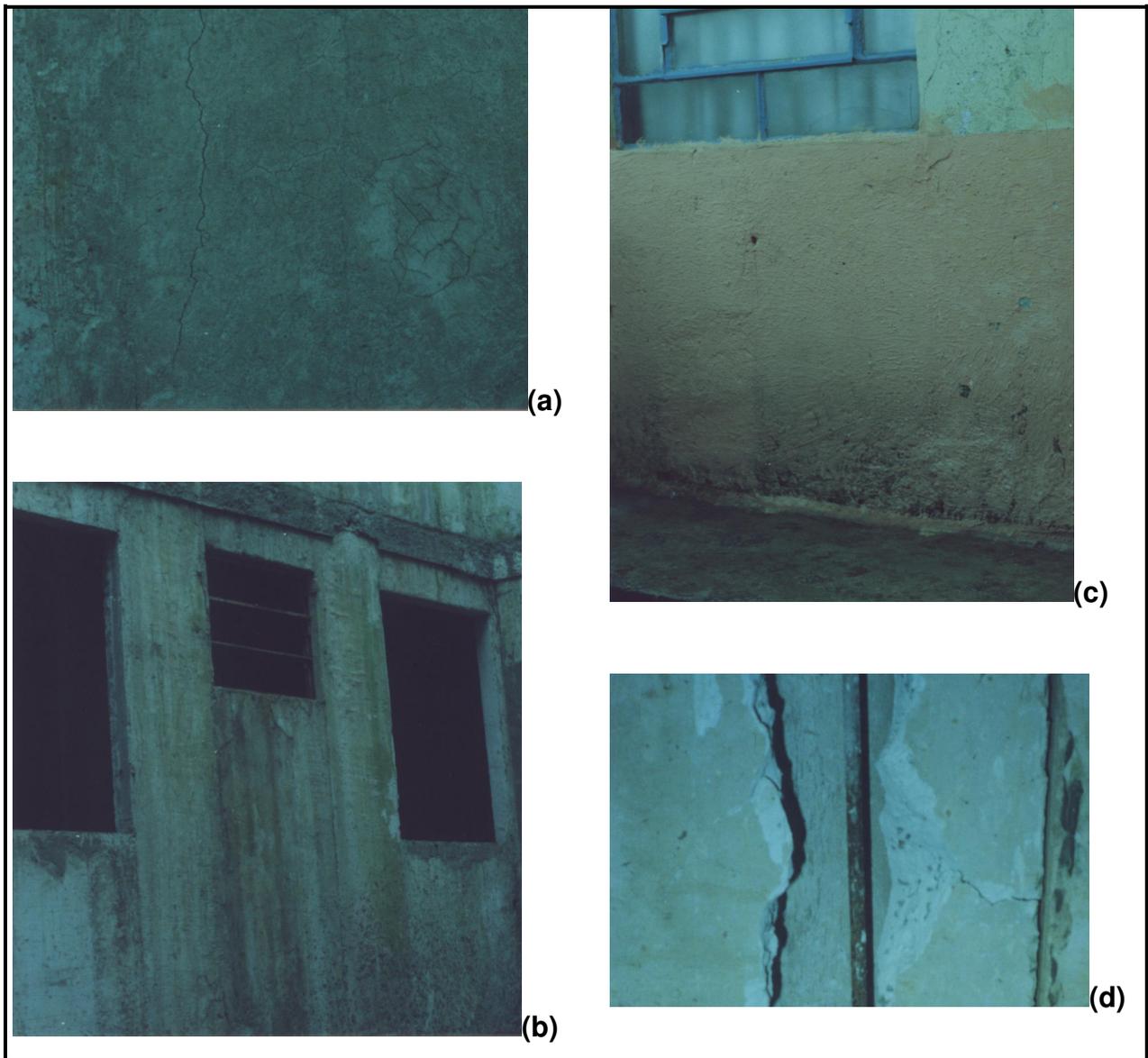
<b>Serviços</b>	Preparo da pasta	Espera	Espalhamento	Sarrafeamento, retoques e raspagens	Acabamento	Total
<b>Tempo (min)</b>	2 a 5	10 a 15	20 a 30	30 a 35	35 a 45	97 a 130

### 5.2.5 Principais patologias

Diversas patologias podem surgir nos revestimentos de gesso dependendo 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.

As patologias mais comuns nos revestimentos de gesso são (IPT, 1989):

- a) Alteração das características físicas (massa específica, estabilidade geométrica) e mecânicas (resistência à compressão, tração e módulo de deformação). Estes problemas estão relacionados com a elevada porosidade e higroscopicidade dos aglomerantes de sulfato de cálcio. Esse fato intensifica a interação dos revestimentos com o meio ambiente podendo acarretar a alteração das características físicas e mecânicas do revestimento (Figura 5.12 a).



**Figura 5.12 – (a) gretamento do revestimento, (b) fungos emboloradores, (c) lixiviação do revestimento, (d) oxidação de barras de aço (IPT, 1989)**

- b) Outra patologia é de natureza físico-química. O sulfato de cálcio di-hidratado é solúvel em água, ou seja, é capaz de ser lavado e carreado (lixiviado) por água de chuva, água de chuveiros, água de torneiras, água de lavagem de pisos, etc. (Figura 5.12b).
- c) Patologia referente à natureza química do gesso que são neutros ou levemente ácido. Esse fato pode contribuir para o aparecimento de fungos emboloradores

que encontram nos revestimentos de gesso um meio propício ao seu desenvolvimento. A própria natureza higroscópica do sulfato de cálcio também favorece o aparecimento desses microorganismos (Figura 5.12 c).

- d) Os revestimentos de gesso não podem entrar em contato com superfícies ou peças metálicas. O sulfato de cálcio não protege e nem apassiva o aço oxidando-o (Figura 5.12d).

### **5.3 Comparativo entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso**

Como visto neste capítulo, os revestimentos são executados para dar as paredes e tetos maior resistências ao choque ou abrasão, impermeabilizá-las, tornar as paredes mais higiênicas ou ainda aumentar as qualidades de isolamento térmico e acústico. Nem sempre os tipos de revestimentos utilizados satisfazem todas essas exigências.

#### **5.3.1 Comparativo entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso quanto a aplicação e as suas patologias**

Os revestimentos convencionais utilizando argamassa de cal e areia ou cimento Portland, cal e areia dependem da qualidade dos materiais utilizados (cimento, cal e areia), da dosagem ideal da argamassa, da aplicação do revestimento (mão-de-obra, tempo) e de um preparo adequado da superfície a ser revestida.

O revestimento liso de gesso também depende da qualidade do material, mas somente do próprio gesso. A dosagem está restrita somente a uma boa mistura do gesso com uma quantidade correta de água (entre 60 a 70% de água em relação a massa de gesso). A sua aplicação dispensa a execução de taliscas, mestras, pois as

camadas são de pequenas espessuras. Mas a aderência e um bom preparo da base são indispensáveis para qualquer tipo de revestimento.

A utilização do revestimento de gesso liso pode substituir com vantagens de rapidez, custo e acabamento aos revestimentos convencionais. O gesso pode substituir o chapisco, o emboço e o reboco de um revestimento interno, o que significa economia de mão-de-obra e de material. Somente não substitui os revestimentos externos, pois o revestimento de gesso liso é sensível à umidade.

Algumas vantagens do revestimento de gesso liso sobre os revestimentos convencionais estão descritos na Tabela 5.6 (SINDUSGESSO, 2006).

**Tabela 5.6 – Vantagens comparativas de utilização do revestimento de gesso liso para revestimento convencional (Sindusgesso, 2006)**

	Revestimento em gesso	Revestimento em argamassa de cimento e cal
Etapas de aplicação	1 (gesso)	3 (chapisco, emboço e reboco)
Produtividade	maior	menor
Custo	1/3	1
Aderência	maior	menor
Pintura	Após 14 dias	Após 30 dias
Retração	menor	maior
Resistência à compressão	maior	menor
Massa específica	menor	maior
Acabamento superficial	maior	menor

Essas vantagens se explicam porque:

- A pasta de gesso pode ser aplicada numa só camada, de espessura máxima ideal de 7mm, diretamente sobre as paredes e tetos de superfície regular.
- A pasta de gesso possui uma trabalhabilidade tal que possibilita uma fácil aplicação.

- A pasta de gesso necessita somente de duas semanas para que a superfície esteja pronta para lixamento e pintura enquanto que o revestimento convencional necessita de no mínimo 30 dias.
- A aderência do gesso nos diferentes tipos de substratos é maior, chegando a ter valores de resistência e arrancamento na ordem de 1,5 MPa, superiores aos obtidos pelas argamassas convencionais, para os quais a ABNT exige que seja mais que 0,3 MPa.
- O acabamento quanto à lisura da superfície é muito superior ao de argamassa de cimento e cal, proporcionando uma base adequada para pintura.
- O revestimento de gesso apresenta uma retração pequena em relação às argamassas de cimento e cal mal dosadas, o que gera fissuras mapeadas, causando deslocamento do revestimento.
- O gesso endurecido possui densidade aparente baixa, da ordem de 1000 Kg/m<sup>3</sup>, produzindo um peso de 8 Kg por m<sup>2</sup> quando a espessura é de 10 mm, reduzindo assim o peso das edificações. As argamassas convencionais produzem revestimentos na ordem de 30 Kg/m<sup>2</sup> quando aplicadas com 20mm de espessura (que é a espessura mínima para regularizar uma superfície).

### **5.3.2 Comparativo entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso quanto ao custo de aplicação**

Nader & Bracarense (2001) em trabalho experimental realizaram um comparativo de custos entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso. Atualizando os valores dos insumos utilizando a tabela de preço composto da PINI Sistemas de 28 de abril de 2006, resumida na Tabela 5.7, e considerando somente os custos diretos (material e mão-de-obra mais as leis sociais de 126,68%) nas aplicações dos revestimentos em paredes e tetos tem-se os seguintes custos:

**Tabela 5.7 – Preço unitário composto resumido dos revestimentos de paredes e tetos-abril de 2006. (Pini Sistemas, 2006)**

<b>Serviços</b>	<b>R\$Materiais (p/m<sup>2</sup>)</b>	<b>R\$Mão-de-obra (p/m<sup>2</sup>)</b>	<b>R\$Final (p/m<sup>2</sup>)</b>
Chapisco para parede interna ou externa com argamassa de cimento e areia no traço 1:3 e=5mm	1,11	1,50	<b>2,61</b>
Chapisco em teto com argamassa de cimento e areia no traço 1:3 com adesivo a base de resina sintética, e=5mm	2,81	3,39	<b>6,20</b>
Emboço para parede interna com argamassa mista de cimento, cal e areia no traço 1:2:9, e=20mm	2,92	8,44	<b>11,36</b>
Emboço em teto com argamassa mista de cimento,cal e areia no traço 1:2:9, e=20mm	2,92	9,66	<b>12,58</b>
Reboco para parede interna e externa com argamassa pré - fabricada, e=5mm	1,54	6,12	<b>7,66</b>
Reboco em teto com argamassa pré - fabricada, e=5mm	2,10	7,07	<b>9,17</b>
Gesso aplicado em parede ou teto interno desempenado	2,29	3,14	<b>5,43</b>
Gesso aplicado em parede ou teto através de projeção mecânica sarrafeado	5,38	5,00	<b>10,38</b>

Realizando diversas combinações de revestimento com base nos preços da Tabela 5.7, obtemos os custos por metro quadrado de aplicação relacionados na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 – Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em diversas combinações convencionais**

Descrição do tipo de revestimento	Chapisco	Chapisco c/adensivo	Emboço parede	Emboço teto	Reboco parede	Reboco teto	Gesso s/chap	Gesso c/chap	Gesso c/chap adesivo	R\$Final (p/m <sup>2</sup> )
Emboço sobre parede sem chapisco			11,36							11,36
Emboço sobre parede com chapisco sem aditivo	2,61		11,36							13,97
Emboço sobre parede com chapisco aditivado		6,20	11,36							17,56
Emboço sobre teto com chapisco aditivado		6,20		12,58						18,78
Reboco sobre parede com chapisco sem aditivo e emboço	2,61		11,36		7,66					21,63
Reboco sobre teto com chapisco aditivado e emboço		6,20		12,58		9,17				27,95
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto sem chapisco							5,43			5,43
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco sem aditivo	2,61							5,43		8,04
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco aditivado		6,20							5,43	11,63

Concluí-se que o gesso aplicado sobre a parede sem chapisco é 47,80% do valor do emboço, 57,55% do valor do emboço aplicado com chapisco sem aditivo e 66,23% do emboço aplicado com chapisco aditivado. Em todos os casos a aplicação do gesso liso foi mais econômica 52,20%, 42,45% e 33,77% respectivamente.

No revestimento de tetos o gesso aplicado sobre chapisco aditivado é 61,93% do valor do emboço, mais econômico, portanto 38,07%. Comparando com o revestimento convencional de chapisco sem aditivo, emboço e reboco a diferença ainda é maior em torno de 170% (duas vezes e meia).

Portanto, o revestimento de gesso liso possui um custo baixo quando aplicado internamente do que as argamassas convencionais, como se observou neste capítulo. Estudos estão sendo realizados para melhorar as propriedades desse material para possibilitar, em médio prazo, sua utilização em exteriores.

## **6 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL**

Neste capítulo foram detalhadas as etapas que envolveram as determinações experimentais das misturas de gesso, cimento Portland de alto forno, e sílica ativa, submetida a diferentes condições de exposição e a caracterização dos materiais empregados na pesquisa.

### **6.1 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.

#### **6.1.1 – 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).

As características químicas e físicas do gesso utilizado neste trabalho experimental estão descritas na Tabela 6.1 e Tabela 6.2, respectivamente.

**Tabela 6.1 - Análise química do gesso.**

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>.

**Tabela 6.2 - Análise física do pó da pasta e propriedades mecânicas do gesso.**

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

### 6.1.2 Cimento

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%

As características químicas e físicas do cimento estão descritas na Tabela 6.3 e Tabela 6.4, respectivamente. Cumpre ressaltar que a composição química foi fornecida pelo fabricante.

**Tabela 6.3 - Análise química do cimento**

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. 6.4 - Análise física e mecânica do cimento**

Ensaio	Resultados	Ensaio	Resultados
Peneira n° 200	0,0	Expansão a Quente	0,0
Peneira n° 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

### 6.1.3 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 6.5 estão relacionados os ensaios químicos e físicos da sílica ativa fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 6.5 - Análise química e física da sílica ativa**

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							
pH	=8,5							
Densidade Aparente	=410g/m <sup>3</sup>							
% resíduo na peneira 45 µm	=3,20							

### 6.1.4 – Superplastificante

O superplastificante empregado tem as seguintes características: Massa específica = 1.160 kg/m<sup>3</sup> e Teor de sólidos = 27 %

Para manter uma boa trabalhabilidade da pasta, sem alterar a relação água/aglomerante, fez-se necessário o seu emprego, onde se adicionou 2% de superplastificante, em relação à quantidade de cimento, em massa.

## 6.2 Misturas Experimentais

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

*Ensaio da pasta no estado fresco*, para determinação da consistência e os tempos de início e fim de pega (ABNT, 1991), pois para a aplicação da pasta em revestimento esses dados são importantes.

*Ensaio da pasta no estado endurecido*, logo após o ciclo de cura, aos 28, e 180 dias e aos 03 (três) anos, para as seguintes análises:

- a) resistência mecânica das pastas submetidas à cura ao ar em ambiente interno e em ambiente externo. Para a *resistência à compressão* adaptou-se a NBR7215 (ABNT,1996), e para *resistência à tração por compressão diametral* adaptou-se a NBR7222 (ABNT,1994).
- b) *Absorção capilar*, para observar a penetração de água nas diversas misturas verificando a sua porosidade capilar.
- c) *permeabilidade ao ar*, para verificar a porosidade interna da mistura e poder comparar com os dados obtidos na absorção.
- d) *Expansibilidade longitudinal*, para observar a variação dimensional, quando da produção de compostos expansivos nas misturas estudadas.
- e) *Difração de raios-X*, para observação dos compostos formados durante a hidratação dos aglomerantes em diferentes idades.
- f) *Análise Térmica Diferencial - DTA*, 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.
- g) *Análise Termogravimétrica – TG*, para observar a perda de massa quando a amostra é submetida a uma variação térmica.

*Aderência das misturas em pasta sobre o painel de bloco de concreto*, para avaliar a aderência das diversas misturas em diferentes idades nos revestimentos aplicados internamente e externamente após um período de cura de 28 dias e 05 (cinco) anos.

*Microscopia eletrônica de varredura*, para verificar os compostos formados, em especial os elementos expansivos após um período de cura de 03 (três) anos.

*Aplicação em painéis*, para avaliar o comportamento das misturas em revestimentos internos e externos após um período de cura de 28, e 180 dias aos 03 (três) e 05 (cinco) anos.

### 6.2.1 Preparo das Misturas

Neste trabalho foram avaliadas as misturas apresentadas na Tabela 6.6 com os seus respectivos proporcionamentos.

As misturas foram submetidas à cura ao ar em ambiente interno e em ambiente externo, durante 28, 180 dias, 03 (três) e 05 (cinco) anos.

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.

**Tabela 6.6 – Misturas ensaiadas**

Ambientes	Misturas	%gesso	% cim.	% sílica	%superplastificante
EXTERNO	A1	100	0	0	0
	A2	75	25	0	2
	A3	75	20	5	2
INTERNO	A4	100	0	0	0
	A5	75	25	0	2
	A6	75	20	5	2

Relação água/aglomerante = 0,70

Os materiais foram pesados em balança digital, com sensibilidade de 0,1 g, e misturados em bandejas de alumínio com o auxílio de espátulas, por 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 2,75cm de diâmetro por 5,50 cm de altura para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e absorção capilar (Tabela 6.7). Para o ensaio de permeabilidade ao ar, a mistura foi colocada em moldes de 5,0cm de diâmetro por 10cm de altura, também cilíndricos (Tabela 6.8), e, para o ensaio de expansibilidade, em moldes prismáticos de 4 x 4 x 16 cm (Tabela 6.9).

Após o preenchimento dos corpos-de-prova no laboratório, parte da mistura foi preparada no local da aplicação dos painéis conforme será descrito no item 6.4.10, página 164.

**Tabela 6.7 - 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
1080	3	3	3	3	3	3	18
<b>TOTAL</b>	12	12	18	18	18	18	<b>96</b>

**Tabela 6.8 – Quantidades de corpos-de-prova 5 x 10 cm por mistura –Para o ensaio de Permeabilidade ao Ar**

Idades (dias)	28	90	180	1080	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 6.9 – Quantidade de corpos-de-prova 4 x 4 x 16 cm por mistura – Para o ensaio de Expansibilidade**

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

Os corpos-de-prova foram retirados das formas 24 horas após a moldagem. Metade dos corpos-de-prova foram submetidos à cura ao ar em ambiente interno (protegido), e a outra parte à cura externa, junto aos painéis de revestimento, durante períodos de até 03 (três) anos.

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 6.4.10 (Figuras 6.17 e 6.18), página 165.

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

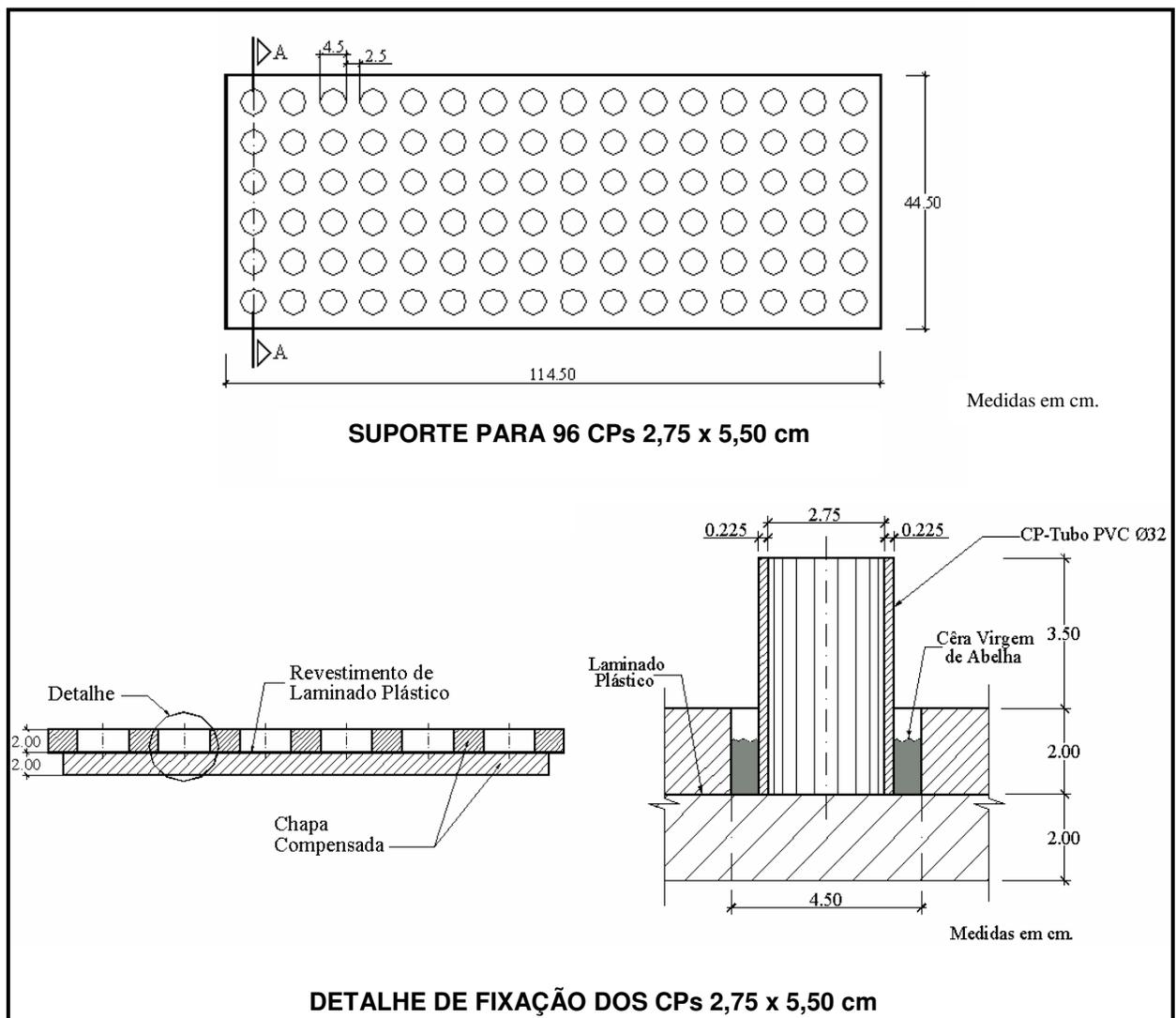
Para os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e absorção foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 2,75 cm de diâmetro x 5,50 cm de altura mantendo-se a relação altura/diâmetro igual a dois (RODRIGUES, 1993).

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.

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 6.1).

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.



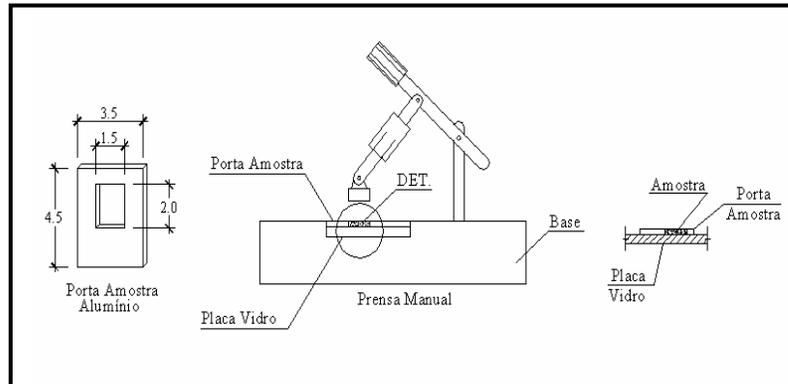
**Figura 6.1 - Detalhe do suporte e fixação dos moldes em PVC dos corpos-de-provas**

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.

### **6.2.3 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, 180 dias e 03 (três) anos, 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 Ágata 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 (DTA) e de Análise Termogravimétrica (TG). 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 compactada em prensa manual sobre placa de vidro para o ensaio de Difração de raios-X (Figura 6.2).



**Figura 6.2 – Porta-amostra e prensa**

#### **6.2.4 Preparo das Amostras para o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Após a ruptura dos corpos-de-prova no ensaio à compressão, os corpos-de-prova foram fraturados nas idades de 28, 180 dias e 03 (três) anos.

A amostra fraturada foi colocada em porta amostra de alumínio e, com o auxílio de uma pinça, no centro da câmara do equipamento denominado *sputter coater* (Figura 6.3) com a finalidade de aplicar uma película fina de ouro para condução dos elétrons no MEV .



**Figura 6.3 – Sputter Coater BAL-TEC SCD 050 (LNLS – Campinas)**

A câmara é fechada e se aguarda a estabilização do vácuo por, aproximadamente 15 a 20 minutos até a pressão atingir valores próximos à  $2 \times 10^{-2}$ . Abrindo vagarosamente o regulador no sentido anti-horário, o gás de Argônio é injetado na câmara para ocorrer à ionização. Para definir a espessura do filme (em nm) foi utilizados um gráfico de tempo (s) e a corrente (mA) existente no próprio sputter coater. Como o material utilizado é predominantemente de gesso houve a necessidade de se produzir uma película condutora de 32nm de espessura. Concluída a execução da película, e com o vácuo estabilizado, o aparelho é desligado automaticamente, e depois de arejada a câmara a amostra é retirada.

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

#### **6.3.1 Consistência**

Através da NBR 12128 (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, 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 a mistura, a qual 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.

### **6.3.2 Pega**

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

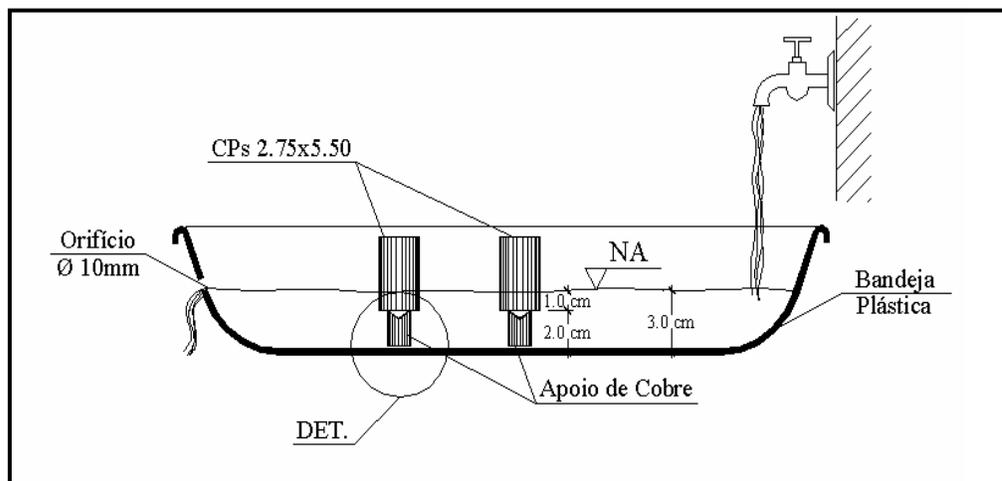
O ensaio foi realizado com a preparação das pastas conforme descrito no ensaio de consistência. Foi registrado o tempo a partir do instante em que a amostra entrou em contato com a água.

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

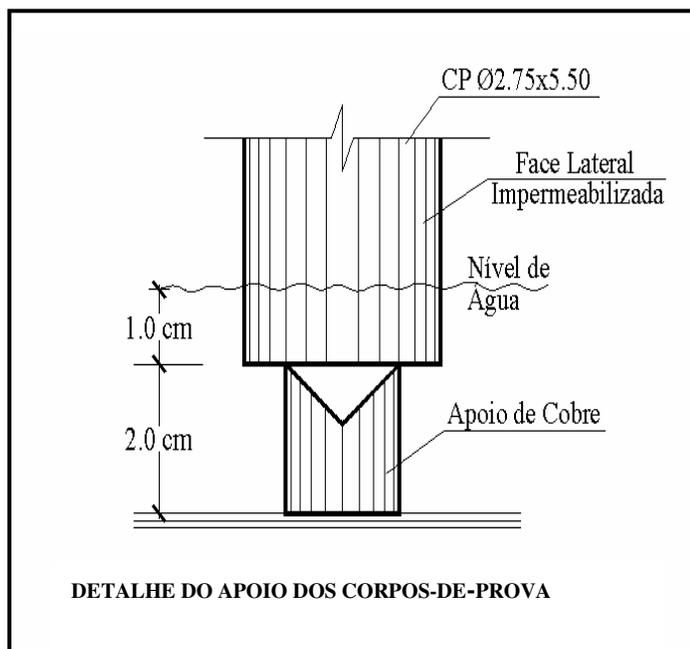
### **6.4.1 Absorção Capilar e Perda de Massa**

O ensaio de absorção foi realizado utilizando-se os seguintes materiais e equipamentos (Figuras 6.4 e 6.5):

- 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 (produto comercial) constituído de: resina acrílica, monômero de estireno, acrilato de butila, AB-9 veículo qsp.



**Figura 6.4 – Bandeja perfurada para imersão dos corpos-de-prova**



**Figura 6.5 – 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, 180 e 1080 dias. Os corpos-de-prova foram impermeabilizados nas laterais para evitar a absorção e a evaporação de água por estas faces e assim garantir a área de absorção e o fluxo de água em uma só direção do corpo-de-prova. Em seguida, foram colocados sobre os apoios em chapa de cobre com 2,0 cm de altura em relação ao fundo da bandeja (Figura 6.4 e Figura 6.5),

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 0,01 mca. O fluxo de água na bandeja foi constante para garantir que os corpos-de-prova permanecessem sempre com 1,0 cm de imersão.

Parte dos corpos-de-prova ensaiados foi curada em ambiente interno (protegido) e parte dos corpos-de-prova foi curado externamente durante 27, 89, 179 e 1079 dias e mais 24 horas em estufa à 50 °C completando, assim, os 28, 90, 180 dias e 03(três) anos. 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.

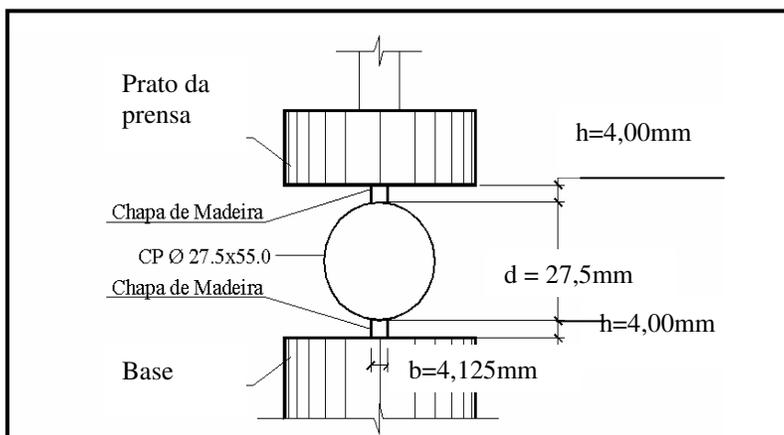
#### **6.4.2. Resistência à Compressão**

Adaptou-se a NBR 7215 (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 e 03 (três) anos. Após a desforma, que ocorreu após 24h da moldagem, parte dos corpos-de-prova permaneceu ao ar em ambiente interno (protegido) e parte em ambiente externo junto aos painéis de revestimento.

#### **6.4.3 Resistência à tração**

Adaptou-se a NBR 7222 (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

e 03 (três) anos. Os corpos-de-prova foram colocados em suportes metálicos, de modo que ficassem em repouso sobre o prato da máquina de compressão (Figura 6.6).



**Figura 6.6 – Disposição do corpo-de-prova**

Entre os suportes e o corpo-de-prova, foram colocadas duas tiras de madeira com dimensão de 4,125 (b) x 4,0 (h) x 55 mm, sendo o comprimento igual ao da geratriz do corpo-de-prova e seção transversal conforme estabelece a norma. A carga foi aplicada continuamente até a ruptura. Sendo  $b = (0,15 \pm 0,01)d$  e  $h = (3,5 \pm 0,5)mm$ .

#### **6.4.4 Análise Térmica Diferencial (DTA) e Análise Termogravimétrica (TG).**

Utilizou-se uma amostra de cada mistura do material reservado e acondicionado conforme procedimento do item 6.2.3, página 149. O ensaio foi realizado nas idades de 28, 180 dias e 03 (três) anos 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 mg ± 1. O cadinho foi colocado na balança termogravimétrica 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 °C por minuto. Após 60 minutos procedeu-se ao resfriamento por um período de 30 minutos.

#### **6.4.5 Difração de raios - X**

Utilizou-se uma amostra de cada mistura do material reservado e acondicionado conforme procedimento do item 6.2.3. Nas idades de 28, 180 dias e 3 (três) anos, a amostra foi colocada dentro do equipamento de raios-X por um período de 30 minutos. O ensaio foi efetuado em ângulos de  $2^\circ 2\theta$  a  $60^\circ 2\theta$ , e os resultados apresentados em gráficos de variação de intensidade em função do ângulo de difração  $2\theta$ .

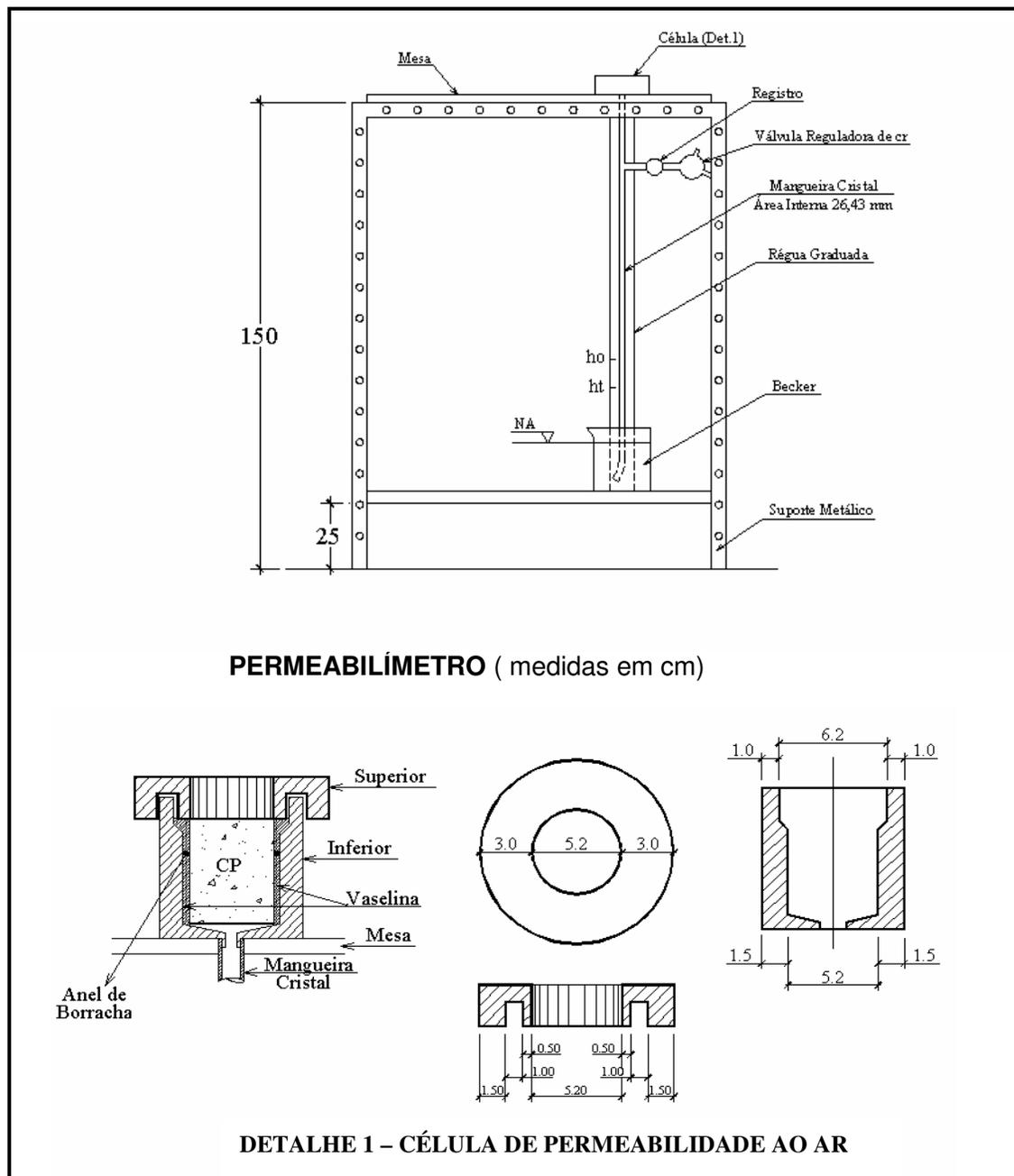
#### **6.4.6. Permeabilidade ao Ar**

Para medir a permeabilidade ao ar foi utilizado um equipamento (Figura 6.7), composto por: suporte metálico; mesa de madeira para fixação das células de permeabilidade; válvula reguladora de pressão; mangueira de área interna  $26,43\text{mm}^2$ ; régua graduada e becker.

Para cada mistura, foram ensaiados dois corpos-de-prova cilíndricos de 5,0 x 10,0 cm nas idades de 28, 90, 180 dias e 03(três) anos, serrados ao meio (5,cm diâmetro x 5,0 cm de altura), efetuando-se duas medidas para a metade superior e duas medidas para a metade 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 (5,0 cm 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. No centro da amostra foi colocado fita teflon e um anel de borracha. Para melhorar a vedação entre o corpo-de-prova e o aparelho utilizou-se vaselina industrial. A amostra foi colocada no aparelho de permeabilidade (Figura 6.7).



**Figura 6.7 – Aparelho de Permeabilidade ao ar (Massat, 1995).**

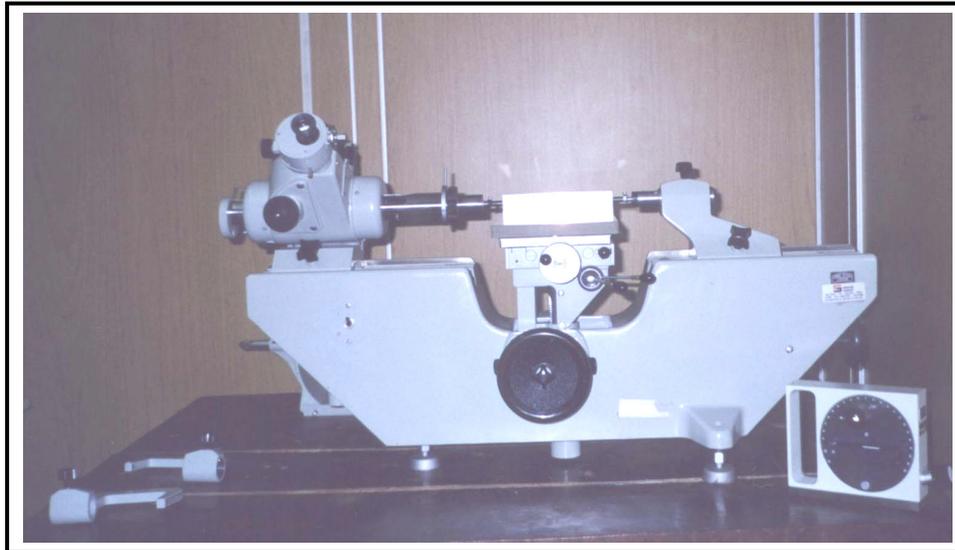
Com o corpo-de-prova devidamente instalado, a água do becker foi sugada até a altura  $h_0$ , a válvula reguladora foi fechada e o tempo que a água levou para descer do nível  $h_0$  até o nível  $h_t$  foi medido.

Optou-se por dividir os corpos-de-prova ao meio para avaliar 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 a parte superior da amostra mais porosa.

#### **6.4.7. Expansibilidade Longitudinal**

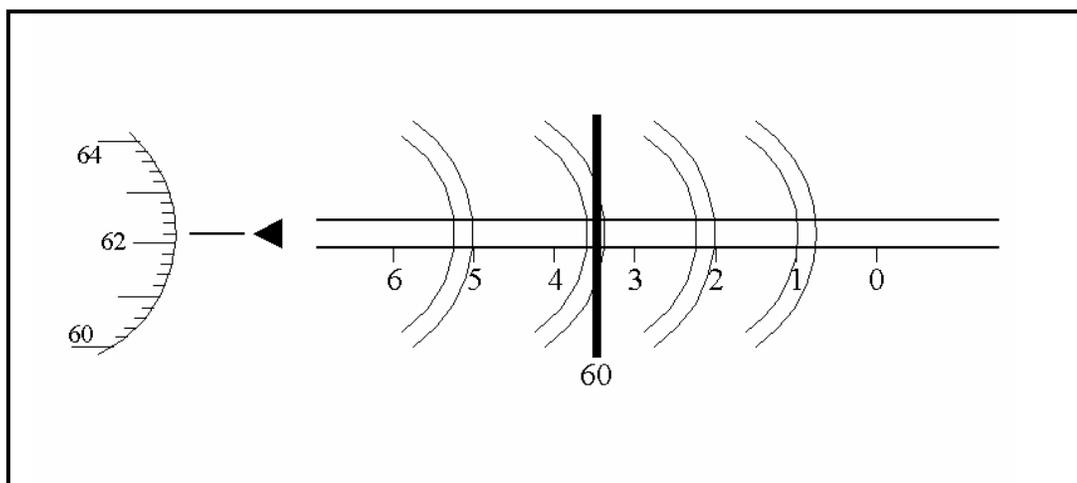
O ensaio de expansibilidade longitudinal foi efetuado adaptando-se a NBR 8490 (ABNT, 1984) e NBR 11.582 (ABNT, 1991), com a finalidade de observar-se a variação dimensional quando da possível produção de compostos expansivos nas misturas estudadas.

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 6.8).



**Figura 6.8– Metroscópio Horizontal (Fatec – Sorocaba)**

O metroscópio foi calibrado por meio de um padrão de 160 mm, a mesa de medição nivelada e os corpos-de-prova colocados centrados nas ponteiros 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 6.9).



**Figura 6.9 – Exemplo de medição no Metroscópio Horizontal**

Para ilustrar a medição da Figura 6.9 a leitura obtida foi:

- mm = 160,000
- Décimos = 0,3
- Centésimos e milésimos = 0,062
- Décimos de milésimos = 0,0002

#### 6.4.8 Aderência

O ensaio de aderência foi realizado em laboratório para as misturas de cura interna e externa aos 28 dias, e no painel de alvenaria para a cura externa e interna aos 05 (cinco) anos.

No ensaio de aderência para as misturas de cura interna e externa, a pasta foi aplicada sobre o bloco de concreto com uma desempenadeira de aço entre duas ripas de madeira de 4,3 mm de espessura, servindo de mestra, garantindo assim uma espessura constante (Figura 6.10). Com a pasta ainda no estado fresco, foi introduzido um tubo de PVC com diâmetro interno de 70mm para delimitar o corpo-de-prova (Figura 6.11).



**Figura 6.10 – Aplicação e nivelamento da mistura**



**Figura 6.11 – Moldagem dos corpos-de-prova**

Após a cura dos corpos-de-prova, os mesmos foram preparados para receber as pastilhas de aço que foram fixadas com adesivo de secagem ultra-rápida (Figura 6.12). O aparelho para teste de aderência de argamassa foi fixado na pastilha através de parafuso já existente, a uma altura ideal de  $\pm 1$ cm da base superior do aparelho (Figura 6.13). Foi aplicada lentamente uma força, girando a manivela no sentido horário efetuando a leitura no manômetro do aparelho.



**Figura 6.12 – Fixação das placas de aço sobre os corpos-de-prova**



**Figura 6.13 – Instalação do aparelho sobre o corpo-de-prova**



**(a)**



**(b)**

**Figura 6.14 – (a) Instalação do aparelho sobre o revestimento dos painéis  
(b) Ensaio sendo realizado**

Para o cálculo do resultado do ensaio, foi multiplicado a leitura manométrica pela área do pistão do aparelho ( $22,73\text{cm}^2$ ) e o resultado dividido pela área da placa de aço ( $34,48\text{ cm}^2$ ), obtendo a resistência de aderência em  $\text{Kgf/cm}^2$ , e transformada em Mpa.

Para o ensaio de aderência das misturas com cura externa e interna por 05 (cinco) anos foi utilizado o painel de alvenaria conforme descrito no item 6.4.10 e a

metodologia de fixação do aparelho nas pastas foi o mesmo descrito acima (Figura, 6.14).

#### 6.4.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

O ensaio de microscopia foi realizado no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron utilizando o microscópio eletrônico de varredura JSM5900LV com capacidade de ampliação de até 300.000 vezes (Figura 6.15).



**Figura 6.15 – Microscópio Eletrônico de Varredura JSM5900LV do LNLS**

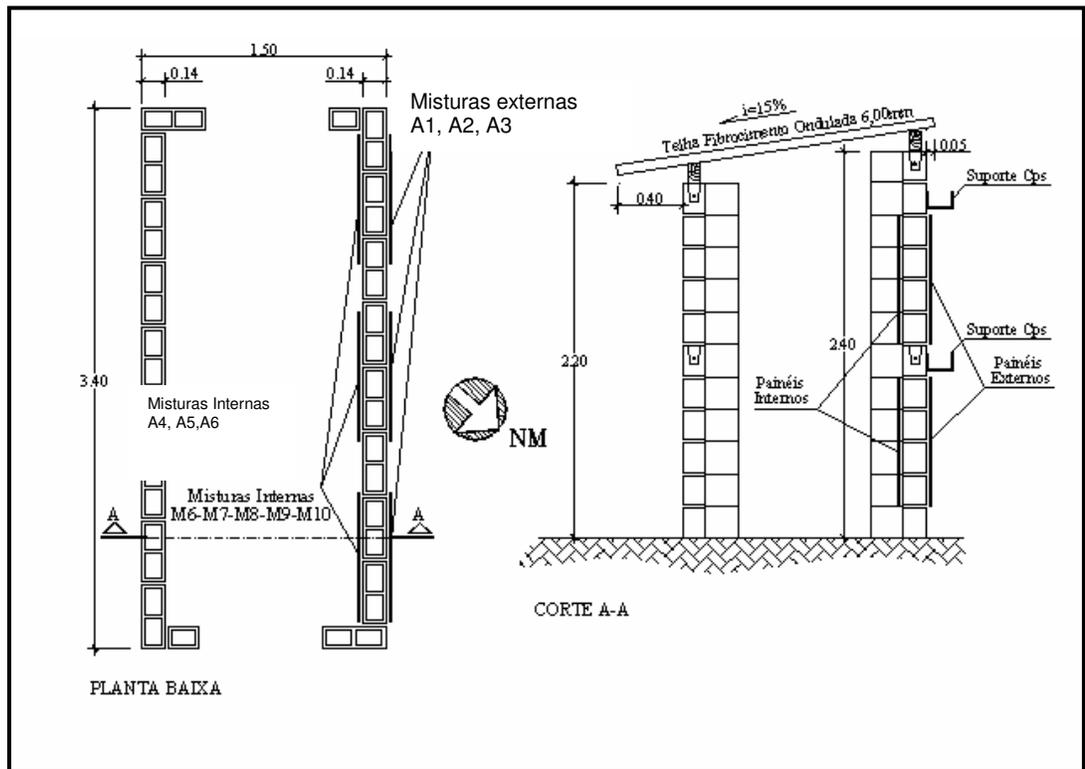
A amostra é colocada na antecâmara do MEV e travada virando a alavanca, e a antecâmara é fechada. A amostra é posicionada e o microscópio é alinhado e corrigido o astigmatismo da imagem. A imagem é analisada em diversas magnitudes até se obter a imagem desejada, quando ela é congelada e salva em um arquivo de computador

Acoplado ao MEV existe um analisador de raios-X para determinar os compostos observados em regiões previamente demarcadas.

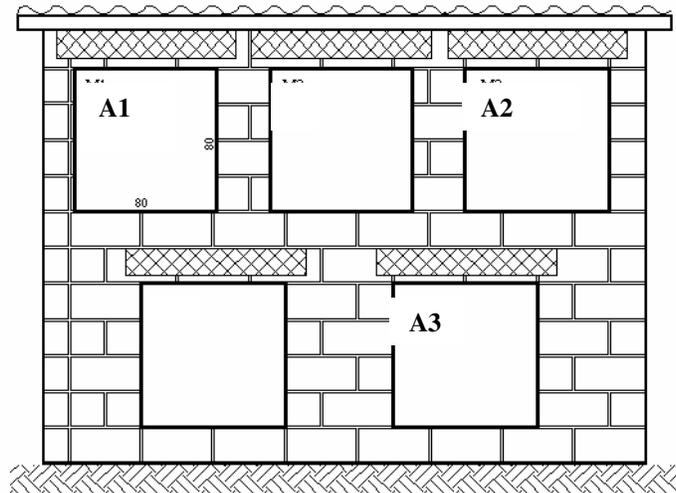
#### 6.4.10 Aplicação das pastas em painéis de alvenaria

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 em agosto de 2000 para os ensaios da dissertação do mestrado. A construção foi 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 6.16 e 6.17)



**Figura 6.16 – Localização dos painéis**

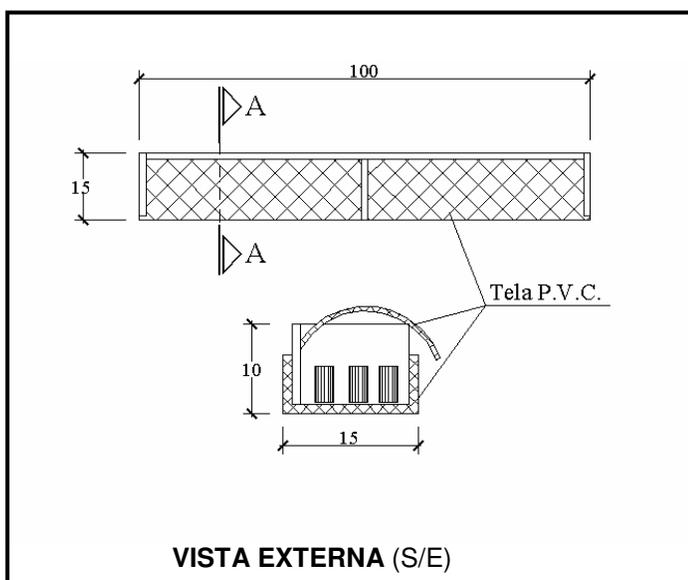


**Figura 6.17 – Vista dos painéis externos**

Os revestimentos dos painéis com as misturas foram realizados conforme descrito a seguir após 21 dias da sua execução.

As misturas preparadas conforme descrito no item 6.2.1, página 145, 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. No mestrado foi realizado cinco misturas denominadas M1, M2, M3, M4, e M5 aplicadas na face externa e M6, M7, M8, M9 e M10 aplicadas na face interna. Dessas misturas, para este trabalho de acordo com o desempenho obtido, foi escolhida três misturas. Sendo as misturas A1=M1, A2=M3, A3=M5, aplicadas na face externa, e as misturas A4=M6, A5=M8, A6=M10, aplicadas nas faces internas, sendo que as misturas de mesmo traço na mesma posição, Figura 6.16. 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 conforme descrito no item 6.2.2, página 147. 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 6.18).



**Figura 6.18– Detalhe do suporte dos corpos-de-prova**

Somente as misturas A1, A2 e A3, aplicadas sobre o painel externo de alvenaria de bloco de concreto e as misturas A4, A5 e A6 aplicadas internamente foram analisadas por um período de 5 anos. As demais misturas aplicadas no painel não foram utilizadas neste estudo.

## 7 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, em ambiente interno e em ambiente exposto ao tempo. Os ensaios foram realizados para a pasta no estado fresco (consistência e tempos de início e fim de pega) e para a pasta no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração, absorção capilar, permeabilidade ao ar, expansibilidade longitudinal, difração de raios-X, análise térmica diferencial e análise termogravimétrica) por um período de 28, 180 dias e 3 anos. A Microscopia eletrônica de varredura foi realizada após um período de 3 anos de exposição, e a aderência das misturas aplicadas em painéis de blocos de concreto foi realizada após um período de 28 dias e 5 anos de exposição dos painéis.

### 7.1 Consistência

Na Tabela 7.1 apresentam-se os valores de consistência obtidos nas misturas ensaiadas. Os resultados são as médias de duas determinações, em milímetros. Cumpre ressaltar que nas misturas submetidas ao ambiente interno (A5 e A6) e as submetidas ao ambiente externo (A2 e A3) foram acrescentados 2% de superplastificante, devido a adição de sílica ativa. A relação água/aglomerante de todas as misturas foi mantida constante e igual a 0,70.

A NBR 12128 (ABNT, 1991) determina que, quando for obtida uma penetração de  $30 \pm 2$  mm, a consistência é considerada normal, e os resultados devem ser expressos pela relação entre a massa de água e a 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 7.1 – Consistência das misturas (penetração)**

Misturas g/c/s	Penetração (mm)
A1 = A4	29,0
A2 = A5	27,5
A3 = A6	18,5

a/agl=0,70 g/c/s (g=gesso, c=cimento, s=sílica ativa)  
A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0); A3 = A6 (75/20/5)

Nas misturas com 100% de gesso (A1 e A4), a pasta de gesso com relação a/agl 0,70 obteve consistência normal com um índice de penetração de 29,0 mm, estando portanto, dentro da variação estabelecida por norma que é de 28 a 31 mm.

Para manter a manuseabilidade da pasta nas misturas A2 = A5 (75% gesso e 25% de cimento), com a presença de 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.

A mistura contendo gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5), obteve-se um índice de penetração de 18,5 mm. O valor foi menor do que as demais misturas devido à presença de sílica ativa. Mesmo acrescentando 2% de superplastificante a pega foi acelerada resultando em um índice de penetração menor.

## 7.2 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 7.2) foram expressos em minutos e segundos. Esses valores constituem a média de duas determinações que não diferiram em mais de 10%.

**Tabela 7.2 - Tempo de início e fim de pega (minutos e segundos)**

Misturas g/c/s	Início de Pega	Fim de pega	Diferença
A1 = A4	30 min e 33 s	45 min e 49 s	15 min e 16 s
A2 = A5	10 min e 05 s	16 min e 12s	6 min e 07 s
A3 = A6	9 min e 34 s	16 min e 48 s	7 min e 14 s

a/agl=0,70 - A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0); A3 = A6 (75/20/5)  
(g, c, s) g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa

Nas pastas com 100% de gesso (A1 = A4) 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 (ABNT, 1994), 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 (tempo útil) foi de 15 min e 16 s.

Nas misturas com 75% de gesso e 25% de cimento (A2 = A5) 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. Assim, observa-se o efeito acelerador do tempo de pega mesmo com o aditivo superplastificante, em relação às misturas de gesso e cimento sem o superplastificante.

Com relação à mistura contendo gesso (75%), cimento (20%) e sílica ativa (5%), e relação a/agl de 0,70, (A3 = A6) e adição de 2% de superplastificante, observou-se que 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 Observou-se que nas misturas contendo cimento, cimento e sílica ativa a pega é acelerada, sendo sempre inferior às pastas de gesso puro, mesmo com a adição de 2% de superplastificante.

O início de pega de 8 min e fim de pega de 18 min obtida na análise das propriedades física da pasta (Tabela 6.2, página 142) diferem dos resultados da Tabela

7.2 devido ter a pasta consistência normal (relação água/aglomerante de 0,517 g/g) e no ensaio realizado a relação água/aglomerante foi de 0,70 g/g.

Analisando o tempo útil da pasta de gesso pode-se verificar que o tempo de aplicação da pasta de gesso (15 min e 16 s) foi superior ao da pasta de consistência normal (10 min) devido também ao ensaio ser realizado com relação água/aglomerante de 0,70.

### 7.3 Absorção Capilar e Perda de Massa

Neste item são 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 nas idades de 28 dias, 180 dias e 3 anos.

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 observou-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 totalmente saturado.

O cálculo do coeficiente de absorção capilar foi efetuado segundo a equação 7.1 (BALLAYSSAC, 1992).

$$K_{abs} = \frac{(W_t - W_o) / A}{\sqrt{t}} \quad (7.1)$$

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 ( $\text{m}^2$ ).

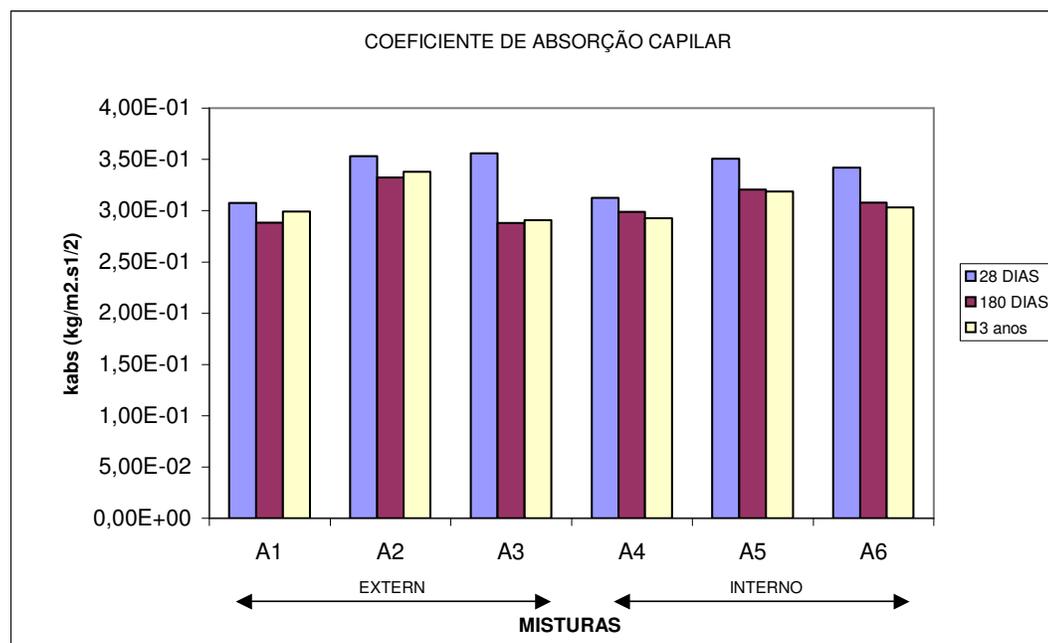
### 7.3.1 Absorção inicial – 1 hora

Na Tabela 7.3 estão os resultados dos coeficientes de absorção capilar em uma hora, e na Figuras 7.1 e nas Figuras B37 a B40 do apêndice “B”, estão os gráficos referentes ao coeficiente de absorção capilar em uma hora, nas idades de 28 dias, 180 dias e 3 anos.

**Tabela 7.3 - Resultados do coeficiente de absorção capilar em uma hora nas idades de 28 dias, 180 dias e 3 anos**

A1, A2, A3 (externo); A4, A5, A6 (interno) – (g, c, s) g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa

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)	(180 dias)	(3 anos)
A1	100/0/0	3,07.10 <sup>-01</sup>	2,88.10 <sup>-01</sup>	2,99.10 <sup>-01</sup>
A2	75/25/0	3,53.10 <sup>-01</sup>	3,32.10 <sup>-01</sup>	3,38.10 <sup>-01</sup>
A3	75/20/5	3,56.10 <sup>-01</sup>	2,88.10 <sup>-01</sup>	2,91.10 <sup>-01</sup>
A4	100/0/0	3,13.10 <sup>-01</sup>	2,99.10 <sup>-01</sup>	2,93.10 <sup>-01</sup>
A5	75/25/0	3,51.10 <sup>-01</sup>	3,21.10 <sup>-01</sup>	3,18.10 <sup>-01</sup>
A6	75/20/5	3,42.10 <sup>-01</sup>	3,08.10 <sup>-01</sup>	3,03.10 <sup>-01</sup>



**Figura 7.1 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora ( $k_{abs}$ ) nas idades de 28 dias, 180 dias e 3 anos**

Nas pastas submetidas à cura externa observa-se que a absorção de água é maior para as pastas contendo cimento e cimento e sílica principalmente aos 28 dias devido ao aumento de finos, diminuindo um pouco nas idades mais avançadas provavelmente devido a cristalização do gesso e a hidratação do cimento. O mesmo comportamento ocorre para as pastas submetidas à cura interna. Observa-se, no entanto, que em idades mais avançadas não houve uma diminuição da absorção para as pastas contendo cimento (A2 = A5), e cimento e sílica (A3 = A6), provavelmente devido a um retardamento da cristalização do gesso e a hidratação do cimento

Nas pastas de gesso submetido à cura interna (A4) e naquelas submetidas à cura externa (A1), observa-se que houve pouca variação na absorção de água nas idades de 28 e 180 dias. Notou-se, também, que houve um pequeno acréscimo na absorção aos 3 anos em relação aos 180 dias para as pastas de cura externa, provavelmente devido ao aumento da porosidade provocada pela perda de massa. Mesmo assim as pastas de gesso, nas idades mais avançadas, comparativamente aos 28 dias, obtiveram uma diminuição na absorção devido ao aumento da cristalização do gesso.

Nas misturas de gesso e cimento (A2=A5), tanto na cura interna como na externa, observou-se uma absorção maior em relação às pastas com 100% de gesso (A1), devido ao acréscimo de finos e conseqüentemente 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 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 considera-se que essa diferença não é significativa.

O que se observou aos 3 anos foi que as misturas externas contendo cimento, absorveram mais água, do que aquelas com cura interna, provavelmente devido aos poros formados pela perda de massa do gesso.

Nas misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa (A3=A6) 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 28 dias, devido à ação do cimento em datas maiores.

O que se observou aos 3 anos foi que a mistura externa contendo cimento e sílica ativa absorveram mais água, daquelas com cura interna, provavelmente devido aos poros formados pela perda de massa do gesso. Fato ocorrido em todas as amostras com cura externa.

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

### **7.3.2 Perda de massa após 24 horas**

A seguir estão apresentados os resultados obtidos da perda de massa após 24 horas de imersão em água (Tabela 7.4). Na Figura 7.2 e nas Figuras B41 a B43 do apêndice “B” estão os gráficos referentes à perda de massa após 24 horas de imersão em água nas idades de 28 dias, 180 dias e aos 3 anos.

Conforme descrito no capítulo 4, o gesso é aplicado na construção civil como revestimento interno pois é sensível a umidade. Compósitos à base de gesso estão sendo estudados para melhorar a resistência das pastas de gesso à água. A adição de cimento Portland e pozolanas ao gesso é uma alternativa de baixo custo e de fácil manuseio.

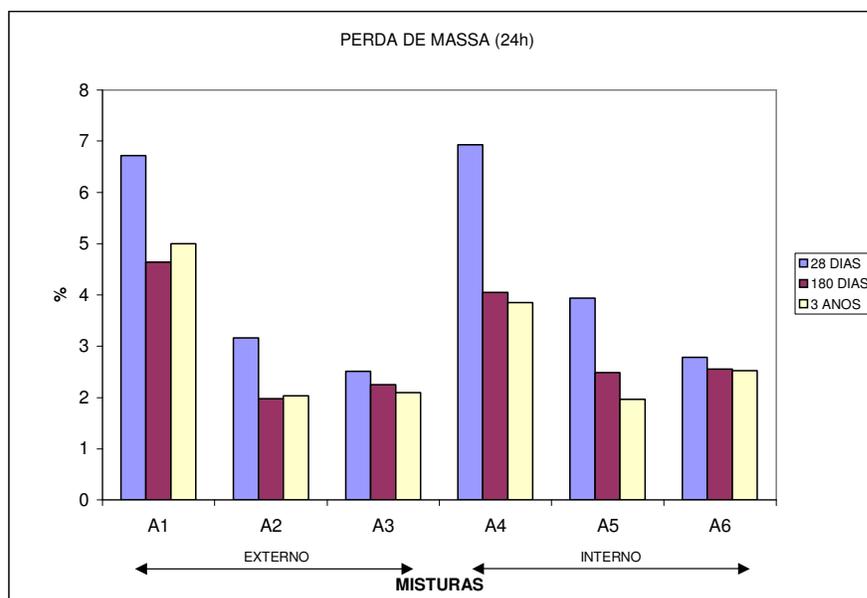
Como o trabalho se refere ao estudo do comportamento das diversas misturas de gesso com cimento e sílica ativa aplicadas como revestimento, a perda de massa é um item importante pois o revestimento dificilmente ficará imerso em água e sim sujeitos a chuvas, respingos, locais de lavagem (box de banheiros, 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 resultados descritos na da Tabela 7.4.

**Tabela 7.4 - Perda de massa após 24 horas em água (g)**

Idade		A1	A2	A3	A4	A5	A6
28 (dias)	<b>Massa Inicial</b>	38,39	37,65	36,33	38,25	37,52	36,64
	<b>Massa Após 24h</b>	35,81	36,46	35,42	35,60	36,04	35,62
	<b>%</b>	6,72	3,16	2,51	6,93	3,94	2,78
180 (dias)	<b>Massa Inicial</b>	36,60	36,70	35,50	37,50	38,20	37,60
	<b>Massa Após 24h</b>	34,90	35,97	34,70	35,98	37,25	36,64
	<b>%</b>	4,64	1,98	2,25	4,05	2,49	2,55
3 (anos)	<b>Massa Inicial</b>	36,00	36,90	35,60	37,60	38,10	38,10
	<b>Massa Após 24h</b>	34,20	36,15	34,85	36,15	37,35	37,14
	<b>%</b>	5,00	2,03	2,10	3,85	1,96	2,52

A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0); A3 = A6 (75/20/5) - (g/c/s) - g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa



**Figura 7.2 – Perda de massa (%) após 24 horas de imersão em água aos 28, 180 dias e aos 3 anos**

Observa-se que nas pastas submetidas à cura externa contendo cimento e cimento e sílica ativa a perda de massa foi menor em todas as idades em relação a pasta A1 (100% gesso) o mesmo ocorrendo para as pastas submetidas à cura interna. Observa-se também que as pastas com cimento, cimento e sílica ativa tiveram uma perda de massa inferior comparando com as de 100% de gesso (A1=A4)

Para as pastas com 100% de gesso aos 28 dias obteve-se uma perda de massa significativa comparando-se com as idades de 180 dias e com a idade de 3 anos, tanto para as misturas submetidas à cura interna (A4) como na externa (A1). Observou-se também que a mistura submetida à cura externa (A1) apresentou uma perda de massa menor, do que a mistura submetida à cura interna (A4) provavelmente porque houve uma cristalização mais acelerada do gesso.

Nas misturas de gesso e cimento A2=A5 (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 a mistura submetida à cura externa A2 obteve uma menor perda de massa do que a mistura submetida à cura interna A5 devido à presença de umidade na cura externa propiciando uma melhor hidratação do cimento.

Nas misturas de gesso, cimento e sílica ativa A3=A6 (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 A3 obtiveram uma perda de massa menor do que as misturas submetidas à cura interna A6, devido à presença de umidade na cura externa propiciando uma melhor hidratação do cimento.

Para as misturas de gesso e cimento A2=A5 e as misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6, 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.

## 7.4 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 idades de 28 dias, 180 dias e aos 3 anos, comparando-se com a pasta de gesso sem adições

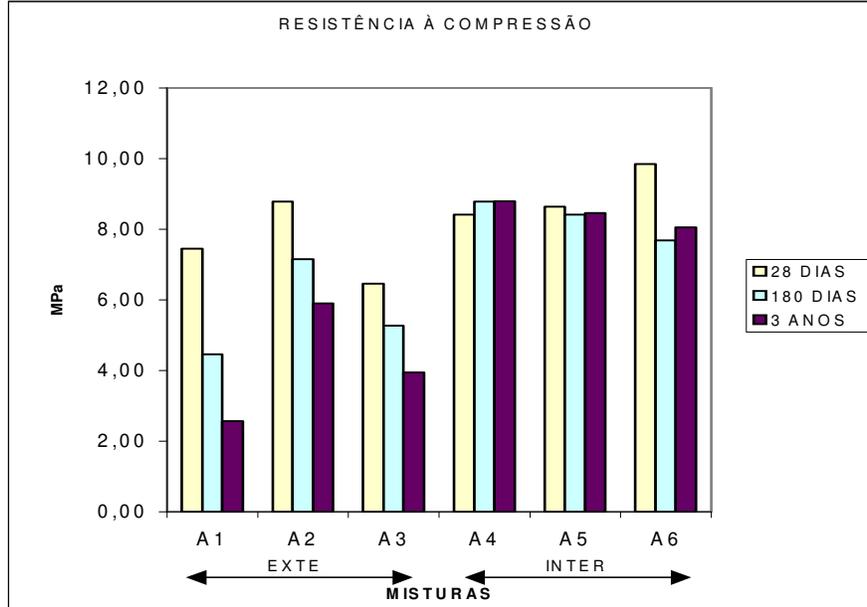
Para cada mistura, foram ensaiados três corpos-de-prova e os resultados apresentados na Tabela 7.5, na Figuras 7.3 e nas Figuras B44 a B47 do apêndice “B”. Esses valores representam a média das três determinações, sendo que o resultado individual não diferiu 15% da média calculada. O resultado que diferiu não foi considerado NBR 7215 (ABNT, 1996).

Observou-se, neste ensaio, um decréscimo da resistência para as pastas curadas externamente e um pequeno aumento 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 7.5 - Resistência à Compressão em MPa**

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – externa		
		28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A1	100/0/0	7,45	3,90	2,56
A2	75/25/0	8,78	7,04	5,89
A3	75/20/5	6,45	5,05	3,95
Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – interna		
		28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A4	100/0/0	8,42	8,81	8,79
A5	75/25/0	8,64	8,33	8,45
A6	75/20/5	9,85	7,74	8,05

a/agl. = 0,70 - A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0), A3 = A6 (75/20/5)  
g/c/s) - g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa



**Figura 7.3 – Resistências a compressão (MPa) aos 28, 180 dias e 3 anos das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna)**

A resistência à compressão determinada com a pasta de consistência normal (relação. a/agl 0,50) resultou em 17,5 Mpa (Tabela 6.2, página 142), no entanto, a pasta utilizada neste ensaio com relação água/aglomerante de 0,70 determinou uma resistência à compressão menor. Provavelmente este fato ocorreu devido o corpo-de-prova ser cilíndrico e de pequena dimensão não possibilitando uma precisão do contato do mesmo com o prato da mesa de compressão. Este fato é observado pela falta de capeamento do corpo-de-prova. Mas o que podemos observar é que os resultados mantiveram uma coerência em todas as misturas ensaiadas.

Observa-se que nas misturas submetidas à cura externa a resistência à compressão diminuiu em idades mais avançadas com relação aos 28 dias, fato ocorrido devido a perda de massa das misturas ao longo do tempo. E que a mistura com gesso e cimento (A2) obteve uma resistência maior do que a de 100% de gesso (A1) e também maior da mistura de gesso, cimento e sílica ativa (A3).

Nas pastas submetidas a cura interna a resistência da pasta com 100% de gesso (A4) aumentou ao longo do tempo em relação aos 28 dias mas, nas pastas A5 e A6 de gesso e cimento, gesso, cimento e sílica ativa respectivamente houve um

pequeno decréscimo em relação aos 28 dias para a pasta A5 e mais acentuado para a pasta A6, mas obtiveram resistências maiores do que a de 100% de gesso (A4).

Nas pastas com 100% de gesso submetidas à cura externa (A1) obteve-se um acréscimo da resistência até 28 dias. No entanto, observou-se que em idades de 180 dias e 3 anos houve um decréscimo considerável de resistência. Este fato não ocorreu para as misturas submetidas à cura interna (A4) onde a resistência à compressão aumentou gradativamente até a idade de 180 dias e 3 anos. O fato pode ser atribuído à perda de massa observada nas misturas submetidas à cura externa.

Nas misturas de gesso e cimento, A2 = A5 (75/25/0), observou-se uma melhora gradativa em todas as idades, especialmente nas misturas submetidas à cura externa A2 comparativamente às misturas com 100% de gesso. O aumento gradativo da resistência se deve 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. Nota-se nas misturas externas, que nas idades de 180 dias e 3 anos, as resistências diminuíram em relação aos 28 dias, provavelmente devido a perda de massa

Nas misturas de gesso mais cimento e sílica ativa A3 = A6 (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 A3. Quanto à cura interna A6 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 às 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.

## 7.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

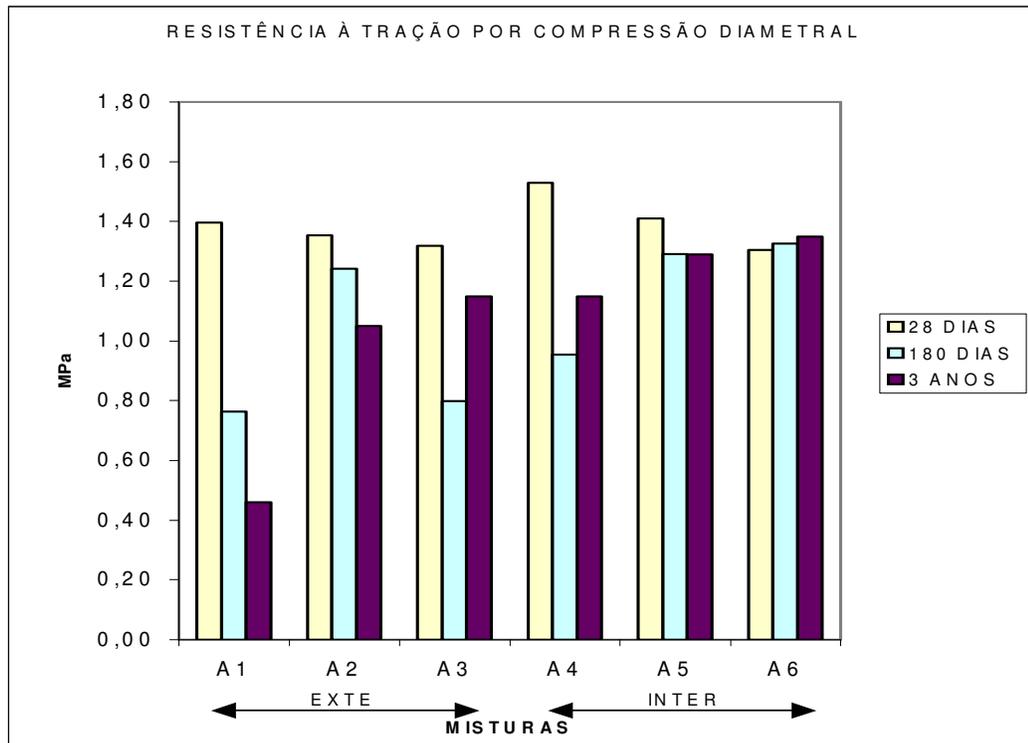
Neste item, são apresentados os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova das misturas estudadas, submetidas à cura ao ar em ambiente interno e em ambiente externo aos 28, 180 dias e aos 3 anos. Com esses resultados fez-se a análise de cada mistura nas diversas idades, comparando-as com a pasta de gesso sem adições.

Para cada mistura, foram ensaiados três corpos-de-prova. Os resultados apresentados na Tabela 7.6 na Figura 7.4 e nas Figuras B48 a B51 do apêndice “B” são as médias das três determinações, sendo que o resultado individual não diferiu 15% da média calculada. O resultado que diferiu não foi considerado NBR7222 (ABNT, 1994)

**Tabela 7.6 - Resistência à Tração por compressão diametral em MPa**

Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – externa		
		28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A1	100/0/0	1,40	0,74	0,46
A2	75/25/0	1,35	1,21	1,05
A3	75/20/5	1,32	0,80	1,15
Mist.	Traço g/c/s	Cura ao ar – interna		
		28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A4	100/0/0	1,53	1,12	1,15
A5	75/25/0	1,41	1,32	1,29
A6	75/20/5	1,30	1,35	1,35

a/agl. = 0,70 - A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0), A3 = A6 (75/20/5)  
(g/c/s) - g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa



**Figura 7.4 – Resistência à tração por compressão diametral (MPa) aos 28, 180 dias e 3 anos, das misturas (A1, A2, A3 externa e A4, A5, A6 interna)**

Nas pastas com 100% de gesso e submetidas à cura externa (A1) 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 obtendo inclusive um acréscimo da resistência aos 3 anos.

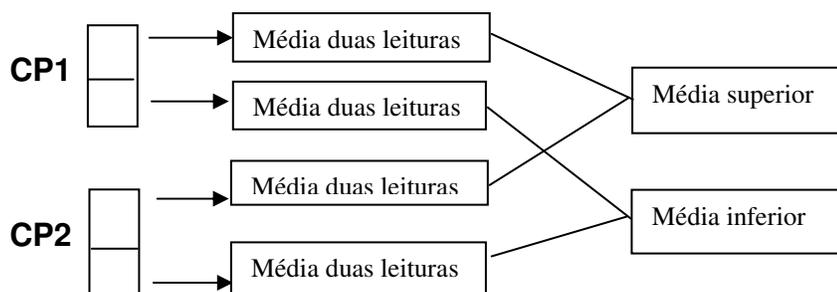
Nas misturas gesso – cimento submetidas à cura externa A2 (75/25/0), observou-se uma melhora significativa nas idades mais avançadas da resistência à tração comparativamente à mistura de gesso puro. O mesmo comportamento foi obtido para as misturas com gesso, cimento e sílica A3 (75/20/5).

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

## 7.6 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 6.4.6 do capítulo 6 aos 28, 180 dias e aos 3 anos.

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 7.7 e nas Figuras 7.5, 7.6 e nas Figuras B52 a B59 do apêndice “B”), foi da média de duas leituras para ambas as partes, inferiores e superiores; exemplificando:



O cálculo da permeabilidade ao ar foi feito pela Equação 7.2 (Balayssac, 1992)

$$K_{\text{per.}} = \frac{(\mu \cdot s \cdot l)}{(A \cdot \tau \cdot g \cdot l) \cdot \ln(h_o / h_t)} \quad (7.2)$$

Sendo:

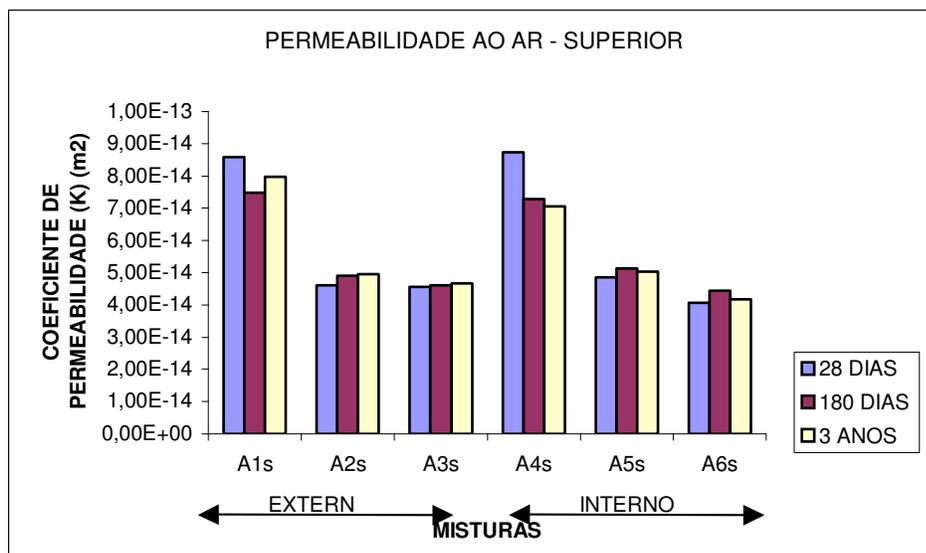
- K = permeabilidade ao ar ( $m^2$ );
- $h_0$  = altura inicial do nível da água (m);
- $h_t$  = altura final do nível da água, no tempo t (m);
- $\mu$  = viscosidade ao ar a 20°C;
- s = seção do tubo capilar ( $mm^2$ );
- A = seção do corpo-de-prova ( $mm^2$ );
- $\tau$  = massa específica da água ( $kg/m^3$ );
- g = gravidade ( $m/s^2$ );
- t = tempo de medida (s);
- l = altura do corpo-de-prova (m).

**Tabela 7.7 - Resultados médios obtidos de permeabilidade ao ar ( $m^2$ ), aos 28, 180 dias e 3 anos**

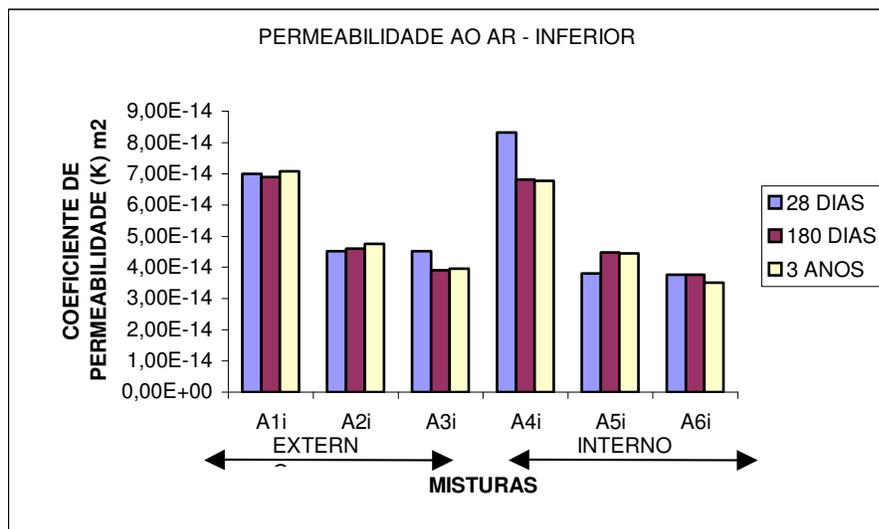
	Superior 28(dias)	Inferior 28(dias)	Superior 180(dias)	Inferior 180(dias)	Superior 3 (anos)	Inferior 3 (anos)
<b>A1</b>	$8,59 \cdot 10^{-14}$	$6,99 \cdot 10^{-14}$	$7,49 \cdot 10^{-14}$	$6,90 \cdot 10^{-14}$	$7,38 \cdot 10^{-14}$	$6,78 \cdot 10^{-14}$
<b>A2</b>	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$4,52 \cdot 10^{-14}$	$4,90 \cdot 10^{-14}$	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$4,90 \cdot 10^{-14}$	$4,75 \cdot 10^{-14}$
<b>A3</b>	$4,56 \cdot 10^{-14}$	$4,52 \cdot 10^{-14}$	$4,60 \cdot 10^{-14}$	$3,91 \cdot 10^{-14}$	$4,64 \cdot 10^{-14}$	$3,96 \cdot 10^{-14}$
<b>A4</b>	$8,74 \cdot 10^{-14}$	$8,32 \cdot 10^{-14}$	$7,28 \cdot 10^{-14}$	$6,81 \cdot 10^{-14}$	$7,05 \cdot 10^{-14}$	$6,77 \cdot 10^{-14}$
<b>A5</b>	$4,85 \cdot 10^{-14}$	$3,80 \cdot 10^{-14}$	$5,14 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$	$5,14 \cdot 10^{-14}$	$4,45 \cdot 10^{-14}$
<b>A6</b>	$4,06 \cdot 10^{-14}$	$3,77 \cdot 10^{-14}$	$4,44 \cdot 10^{-14}$	$3,77 \cdot 10^{-14}$	$4,48 \cdot 10^{-14}$	$3,81 \cdot 10^{-14}$

A1, A2, A3 (externo); A4, A5, A6 (interno) - g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa  
a/agl. = 0,70 - A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0), A3 = A6 (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 7.5 – Resultados da Permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 28, 180 dias e 3 anos. Amostra superior**



**Figura 7.6 – Resultados da Permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 28, 180 dias e 3 anos. Amostra inferior**

As misturas com 100% de gesso (A1 e A4) apresentaram uma permeabilidade ao ar maior do que as misturas contendo gesso e cimento A2 e A5 (75/25/0); e maior também para as misturas com gesso, cimento e sílica ativa A3 e A6 (75/20/5) para ambas exposições interna e externa. Observou-se também que a pasta A1 (cura

externa) foi menos permeável do que a pasta A4 (cura interna) tanto na seção superior como na inferior do corpo-de-prova, provavelmente devido a umidade.

Nas misturas com gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5) observou-se um comportamento melhor para as misturas submetidas à cura interna do que para as submetidas à cura externa.

Comparando-se as misturas de gesso e cimento e as de gesso, cimento e sílica ativa, observou-se que as misturas com a sílica ativa apresentaram melhores resultados em todos os casos.

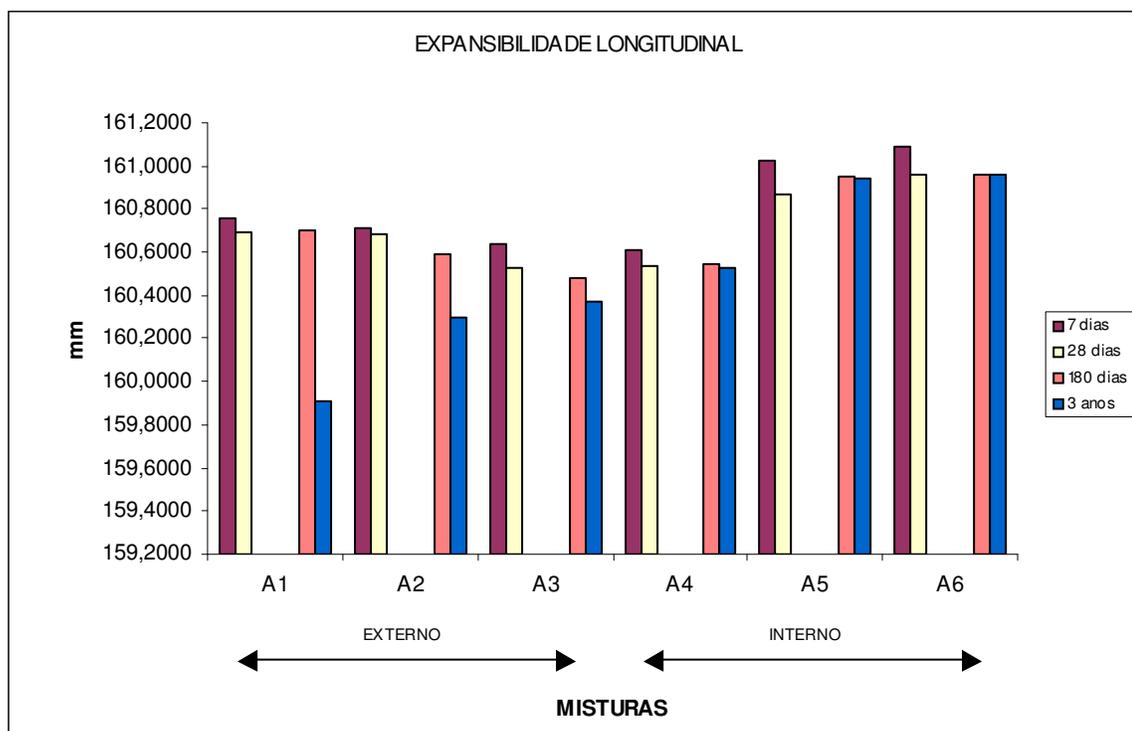
## 7.7 Expansibilidade Longitudinal

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 prejudiciais às misturas. Para cada mistura ensaiaram-se três corpos-de-prova de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm. Os resultados obtidos (Tabela 7.8, Figuras 7.7 e nas Figuras do apêndice “B”) 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 7.8 - Resultados obtidos de expansibilidade (mm) nas diferentes idades**

	07 dias	28 dias	180 dias	3 anos
A1	160,7546	160,6896	160,7014	159,9107
A2	160,7122	160,6818	160,5924	160,2991
A3	160,6379	160,5261	160,4854	160,3687
A4	160,6091	160,5352	160,5484	160,5260
A5	161,0217	160,8712	160,9474	160,9422
A6	161,0863	160,9595	160,9616	160,9612

A1, A2, A3 (externo); A4, A5, A6 (interno) - g = gesso, c = cimento, s = sílica ativa  
a/agl. = 0,70 - A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0), A3 = A6 (75/20/5)



**Figura 7.7 - Expansibilidade longitudinal (mm) nas diferentes idades**

Em relação às medidas efetuadas aos 7 dias as pastas com 100% de gesso, tanto submetido à cura interna A4 como as submetidas à cura externa A1, apresentaram uma retração até os 28 dias. Após esta data, observou-se uma expansão até a idade de 180 dias, e a partir desta data observaram-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 0,0339 % para A1 (cura externa) e de 0,0378 % para A4 (cura interna).

Nas misturas com cimento e gesso observou-se uma variação dimensional até a idade de 28 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: A2 (75/25/0) cura externa = 0,0189 %; e A5 (75/25/0) cura interna = 0,0934%.

Nas misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5) o processo se repetiu tanto para as misturas submetidas à cura interna como para as submetidas à cura externa. Mesmo assim, todas as misturas apresentaram uma retração em relação às medidas efetuadas aos 7 dias de: A3 (cura externa) = 0,0696%; e A6 (cura interna) = 0,0787% aos 28 dias.

Nota-se, no entanto, que para a idade de 3 anos as misturas com cura externa obtiveram uma diminuição considerável em sua dimensão longitudinal devido a perda de massa ocorrida durante este período.

## 7.8 Difração de Raios-X

Neste trabalho foram efetuadas 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, 180 dias e 3 anos (Figuras 7.8 a 7.10 e as Figuras B19 a B24 do apêndice B).

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  $60^\circ 2\theta$ .

Cumprе salientar que a análise dos difratogramas será qualitativa, com a indicação dos compostos mais prováveis presentes nas misturas (Tabela 7.9). 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 7.9 – 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

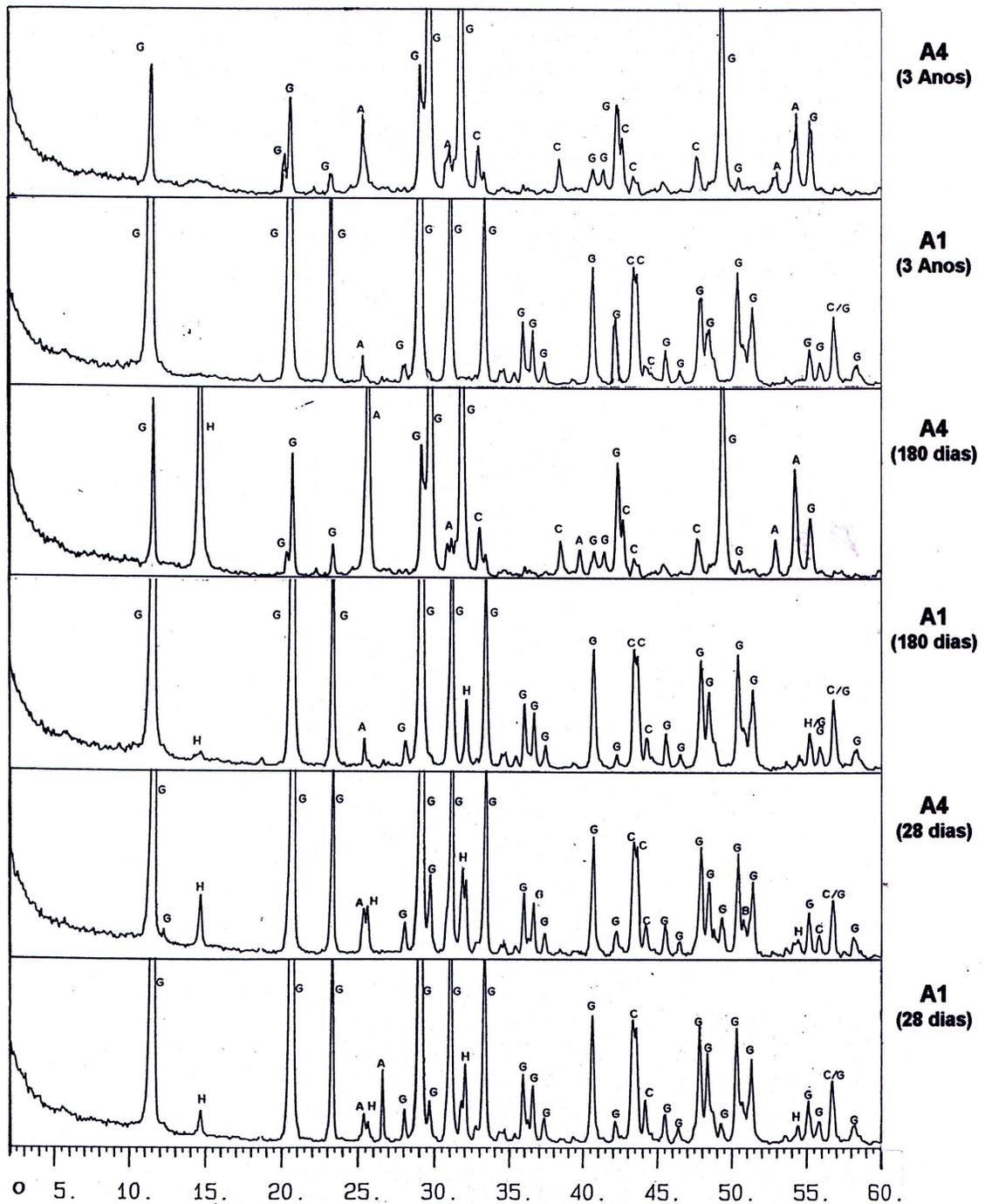
Comparando as misturas aplicadas externamente A1, A2 e A3 pode-se verificar que a mistura A1 formou os mesmos elementos aos 28 dias e 180 dias e aos 3 anos somente o hemi-hidrato não aparece. Na mistura A2 apareceu a etringita somente ao 28 dias no ângulo de  $9,02^\circ 2\theta$  e no ângulo de  $22,90^\circ 2\theta$ , o que não ocorreu nas idades de 180 dias e 3 anos. Na mistura A3 a etringita não aparece e os elementos encontrados foram os mesmos em todas as idades.

Nas misturas aplicadas internamente A4, A5 e A6 a mistura A4 apresentou o hemi-hidrato somente aos 28 dias devido provavelmente a falta de umidade. Na mistura A5 a etringita foi encontrada em todas as idades o que não acontece com a mistura A6 comprovando a ação da sílica ativa.

Para as amostras com 100% de gesso A1 e A4, aos 28 dias, observam-se os mesmos compostos formados, ressaltando o pico maior de hemi-hidrato ocorrido em  $14,50^\circ 2\theta$  para A4 (cura interna), Figura 7.8. Aos 180 dias, Figura 7.8, observa-se nos difratogramas os mesmos compostos que estão presentes tanto em A1 como em A4 observa-se novamente um pico maior de hemi-hidrato ocorrido em  $14,50^\circ 2\theta$  para a mistura A4 (cura interna). O mesmo não ocorrendo aos 3 anos onde não aparece mais a formação do hemi-hidrato.

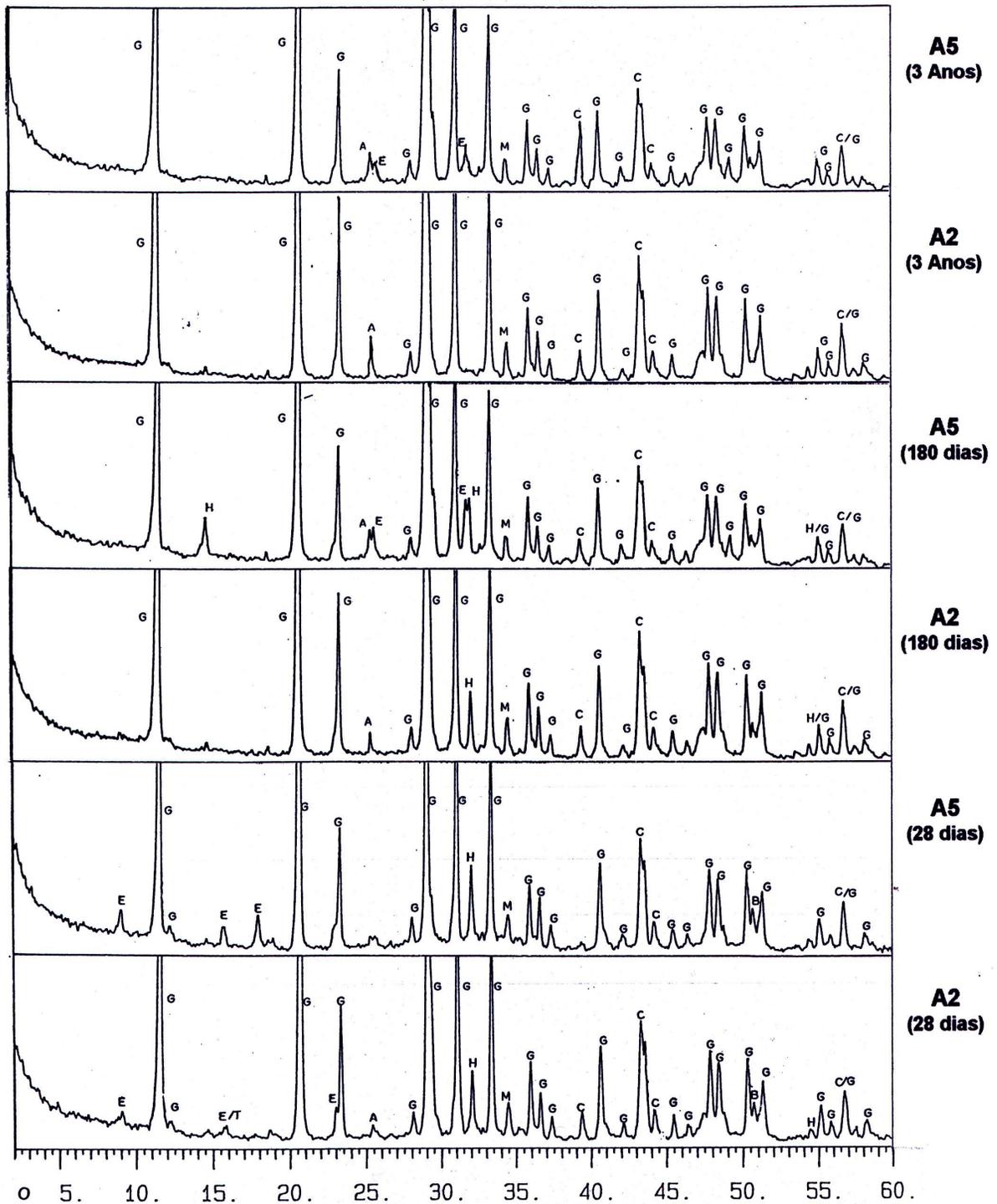
Nos difratogramas das pastas A2 e A5 Figura 7.9, aos 28 dias, ocorreu a presença de etringita na mistura A2 (cura externa) e na mistura A5 (cura interna) no ângulo de  $9,02^\circ 2\theta$  e no ângulo  $16^\circ 2\theta$ . Os picos de etringita apareceram também em A2 no ângulo  $22,90^\circ 2\theta$ . Na mistura A5 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 A5 no ângulo  $25,47^\circ 2\theta$  e  $31,86^\circ 2\theta$ , e com menor intensidade aos 3 anos nos mesmos ângulos.

A Figura 7.10 apresenta os difratogramas de 28, 180 dias e 3 anos das misturas contendo gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5). Aos 28 dias, a mistura A6 (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 A3 e A6 é a presença, na A6 (cura interna), do pico de hemi-hidrato no ângulo de  $14,5^\circ 2\theta$ . Não houve o aparecimento de etringita e hemi-hidratos aos 3 anos.



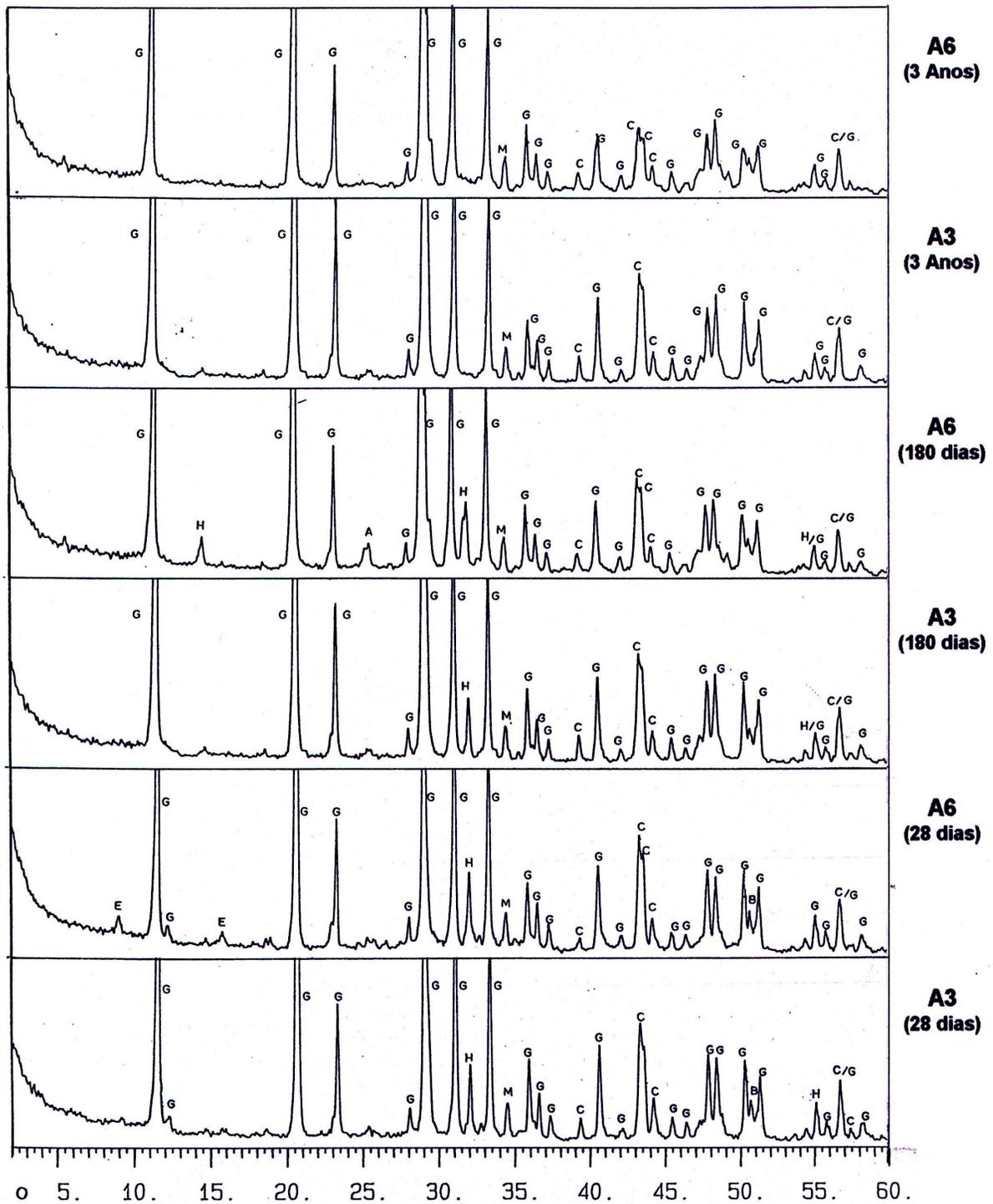
g = gesso    c = cimento    s = sílica ativa    A1 (externa) = A4 (interna) (g=100; c=0; s=0)  
 A = anidrita    B = C<sub>2</sub>S    C = calcita    E = etringita    G = gipsita    H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato    T = thaumasita

**Figura 7.8 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos. (A1=externo e A4=interno)**



g = gesso                      c = cimento s = sílica ativa                      A2 = A5 (g=75; c=25; s=0)  
 A = anidrita                    B = C<sub>2</sub>S                    C = calcita                      E = etringita                      G = gipsita                      H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato                    T = thaumasita

**Figura 7.9 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos - (A2=externo e A5=interno)**



g = gesso                      c = cimento s = sílica ativa                      A3 = A6 (g=75; c=20; s=5)  
 A = anidrita B = C<sub>2</sub>S        C = calcita    E = etringita                      G = gipsita    H = hemi-hidratado  
 M = monosulfoaluminato                      T = thaumasita

**Figura 7.10 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28,180 dias e 3 anos - (A3=externo e A6=interno)**

Nas misturas internas A6 aos 28 dias, mesmo com adição de sílica ativa apareceu a etringita, o mesmo não ocorrendo com as misturas de mesmo traço A3 curados externamente e na presença de umidade (Figura 7.10), o que comprova a teoria de Klover (1998a) 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.

Analisando os diagramas obtidos na difração de raios-X das diversas misturas, pode-se observar que os elementos formados são os mesmos encontrados nas misturas de gesso com cimento e sílica ativa por De Milito (2001), nos difratogramas do cimento por Camarini (1995), na escória granulada por Bourguignon (2004) e na sílica ativa por Kormann (2002).

## **7.9 Análise Térmica**

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, mudanças na massa formam a base da Termogravimetria, enquanto as medidas das alterações de energia formam a base em análise Térmica-Diferencial.

### **7.9.1 Análise Térmica Diferencial (DTA)**

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 6.4.4 do capítulo 6 página 155. 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 aos, 28 dias, 180 dias e 3 anos, (Figuras 7.11 a 7.13 e as Figuras B25 a B30 do apêndice “B”). Cumpre salientar que a análise dos diagramas será qualitativa, com a indicação dos compostos mais prováveis presentes nas misturas (Tabela 7.10).

As misturas submetidas à cura externa A1, A2 e A3 tiveram o mesmo comportamento ao longo de 28 dias e 180 dias, somente aos 3 anos não aparece mais a formação do hemi-hidrato mas somente da anidrita solúvel.

As misturas submetidas a cura interna A4, A5 e A6 obtiveram uma variação de comportamento nas diversas idades. Na mistura A4 aos 3 anos não aparece o hemi-

hidrato, o mesmo acontecendo com a mistura A6. A mistura A5 aos 28 dias somente o hemi-hidrato, aos 180 dias o hemi-hidrato e a anidrita solúvel e aos 3 anos somente a anidrita solúvel.

**Tabela 7.10 – Compostos presentes nas misturas**

Compostos	Temperatura
1 – hemi-hidrato $\cong$ 150 °C	$\cong$ 150 °C
2 – anidrita solúvel	$\cong$ 180 °C
3 - transformação da anidrita solúvel em insolúvel	$\cong$ 350 a 450 °C
4 - $\gamma$ C <sub>2</sub> S	$\cong$ 700 °C

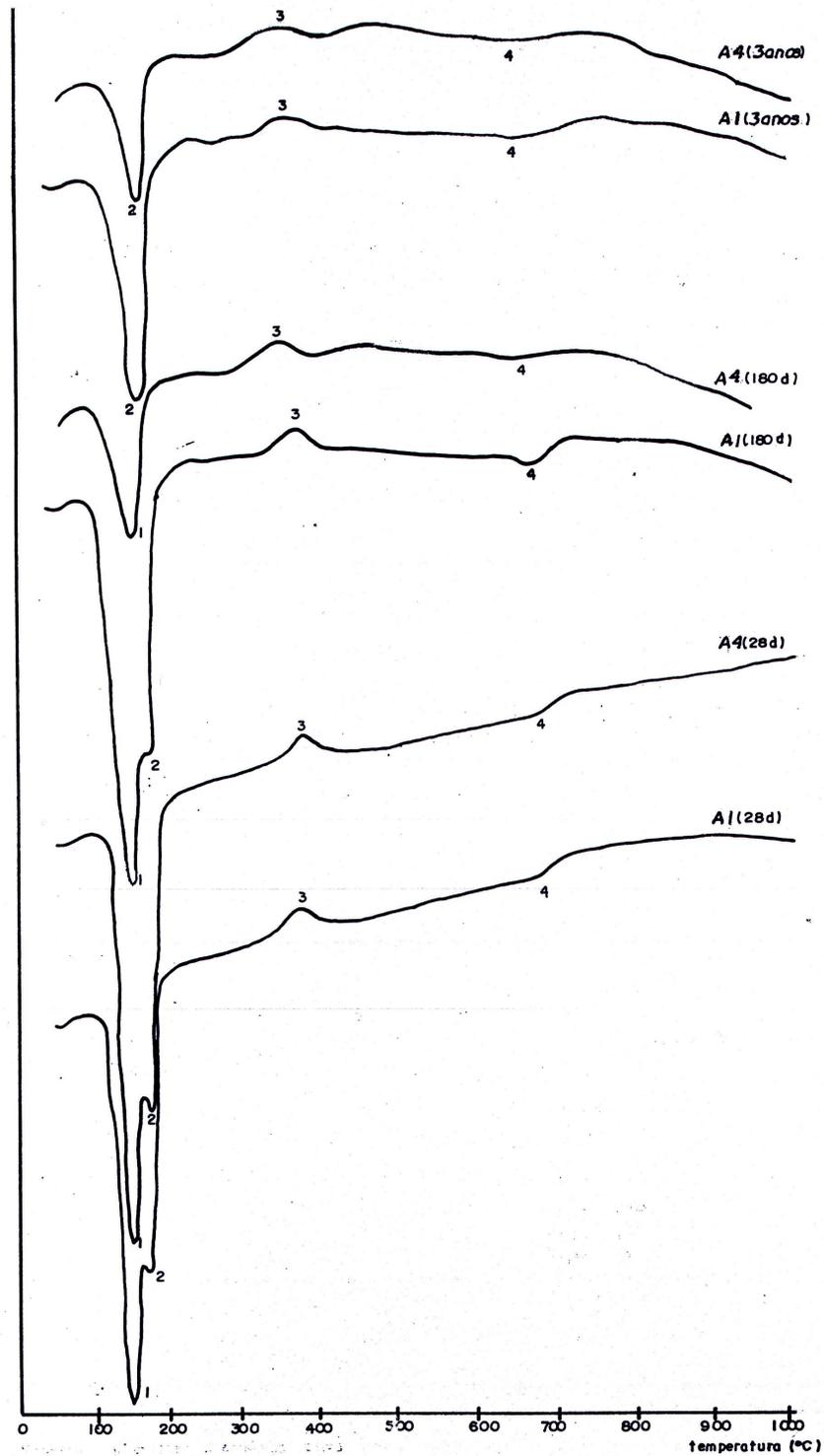
Os picos 1, 2 e 4 correspondem à reação endotérmica e o pico 3 à reação exotérmica.

Nas pastas com 100% de gesso A1 e A4 (Figura 7.11), tanto aos 28 dias como aos 180 dias não houve variação nas perdas de energias. Na mistura A4 (cura interna) aos 180 dias ocorreu somente a transformação do hemi-hidrato em anidrita solúvel à temperatura de 180 °C. Pode-se observar que aos 3 anos desaparece a formação do hemi-hidrato.

Nas misturas de gesso e cimento A2 e A5 (75/25/0) (Figura 7.12), observa-se que a mistura A5, aos 28 dias, apresentou uma variação referente à perda de energia atípica da anidrita solúvel em aproximadamente 180 °C. Pode-se observar que aos 3 anos desaparece a formação do hemi-hidrato.

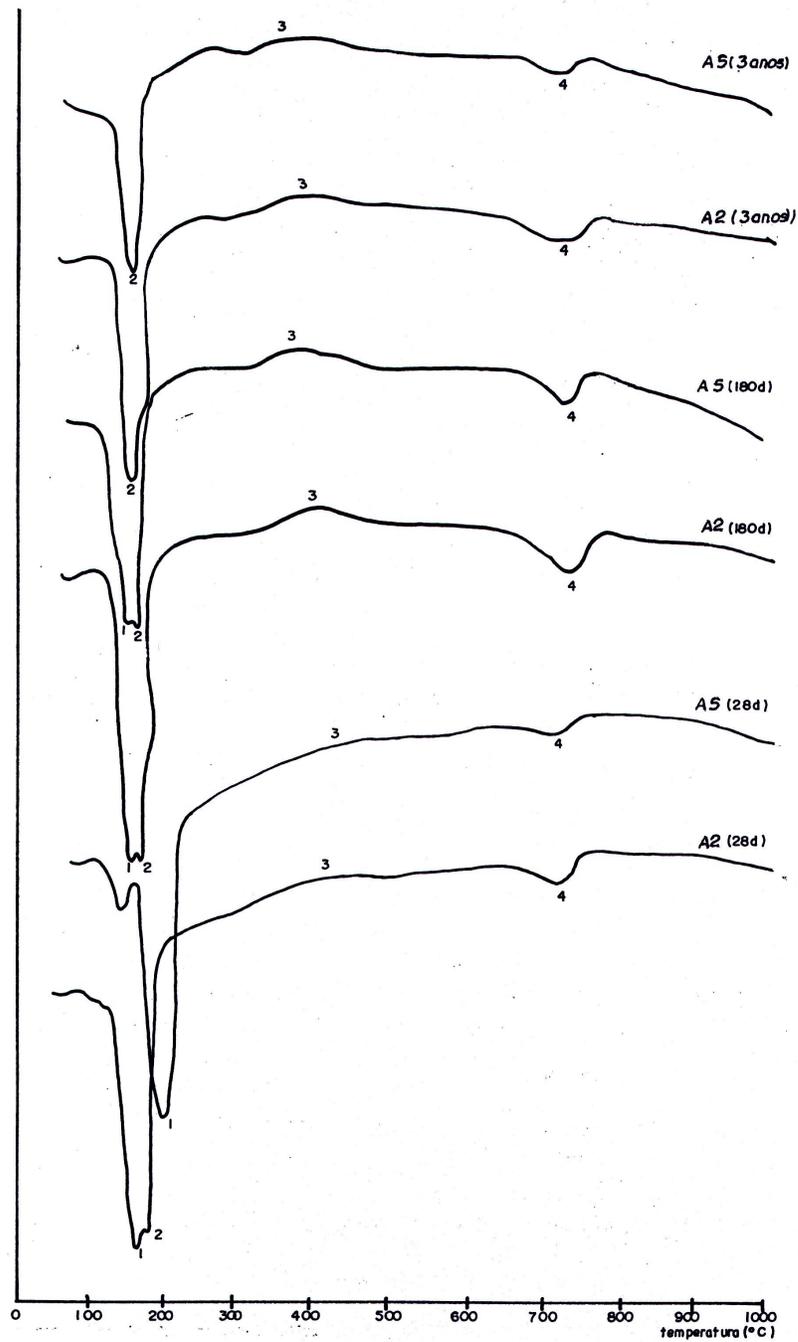
Nas misturas de gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5) (Figura 7.13) não foram observadas alterações na variação de perda de energia para as idades de 28 e 180 dias, tanto nas misturas internas como nas externas. Pode-se observar que aos 3 anos desaparece a formação do hemi-hidrato.

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.



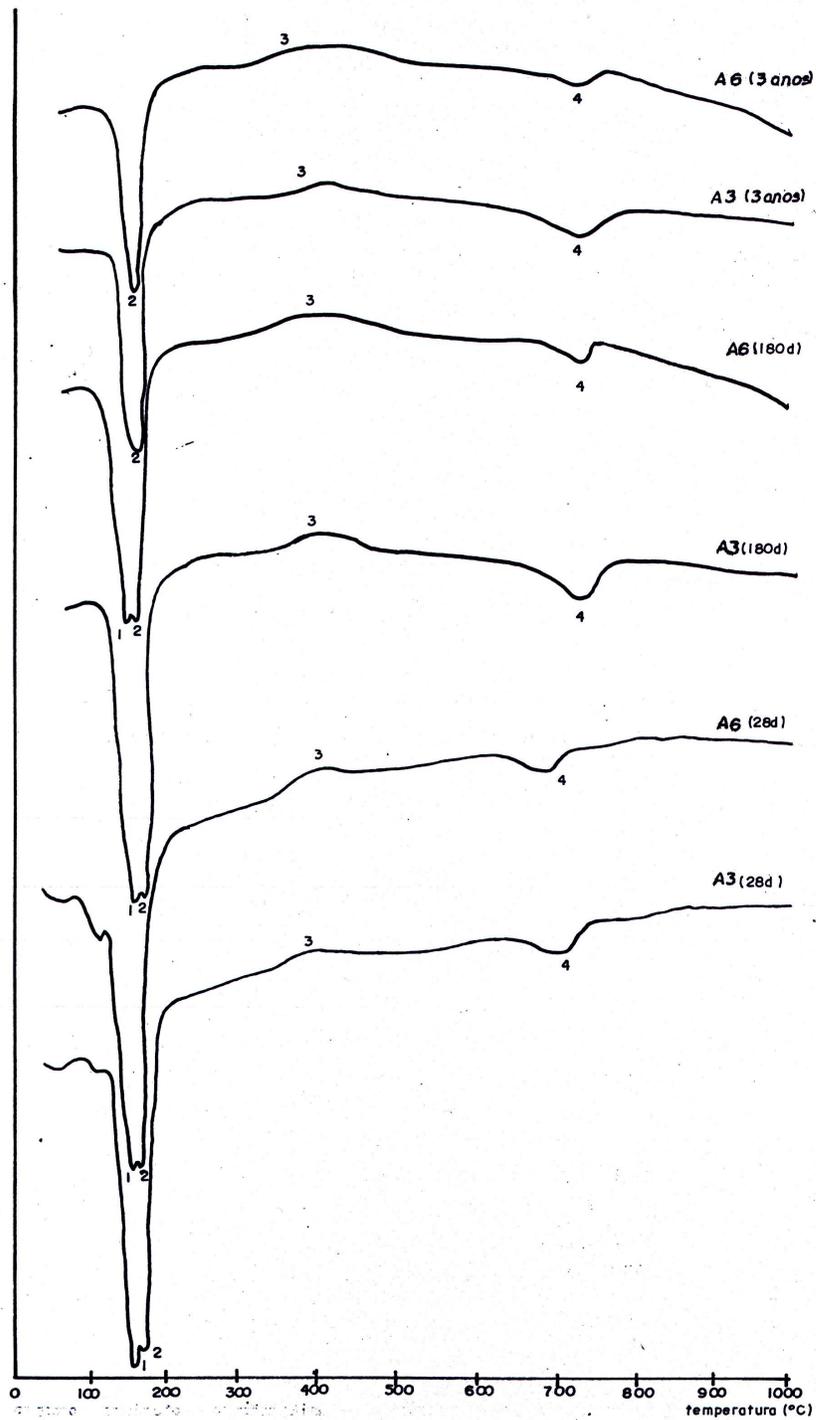
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
 A1 = A4 (100/0/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A1 (Externo) e A4 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.11 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A1=externa e A4=interna)**



1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
 A2 = A5 (75/25/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A2 (Externo) e A5 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.12 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A2=externa e A5=interna)**



1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
 A3 = A6 (75/20/5) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A3 (Externo) e A6 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.13 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A3=externa e A6=interna)**

Pode-se observar que na temperatura entre 80 °C e 150 °C ocorreram as formações do hemi-hidrato e a anidrita solúvel. Observam-se os compostos presentes na mistura como o hemi-hidrato aproximadamente a 120 °C, anidrita solúvel à 160 °C, a transformação da anidrita solúvel em insolúvel à 400 °C os mesmos elementos encontrados por Merwe, (1999).

### 7.9.2 Análise Termogravimétrica (TG)

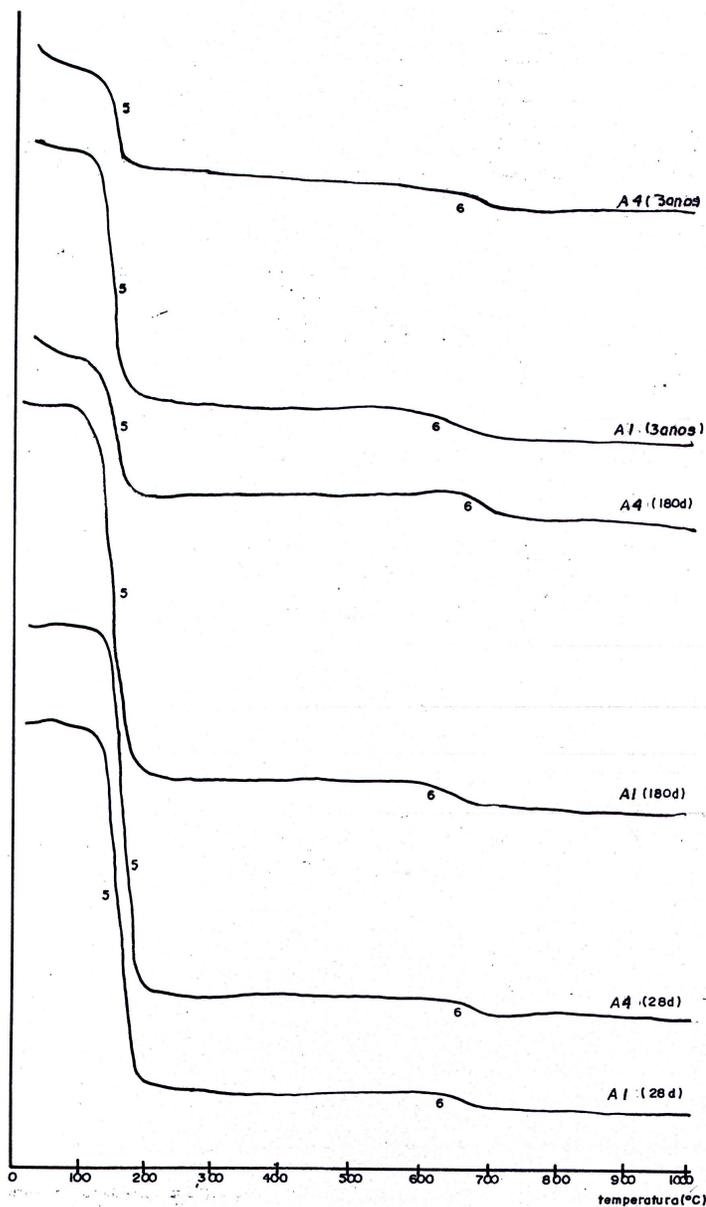
É uma técnica termo-analítica que se baseia no estudo da variação de massa de uma amostra quando submetida a um programa de aquecimento. Os resultados das análises são dados por curvas termogravimétricas, onde o eixo das abscissas estão as temperaturas variando de 23° C a 1000 °C e, no eixo das ordenadas, as perdas de massa (Figuras 7.14 a 7.16 e Figuras B31 a B36 do apêndice “B”). A Tabela 7.11 apresenta as temperaturas nas quais os compostos presentes nas misturas perdem massa.

**Tabela 7.11 – 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

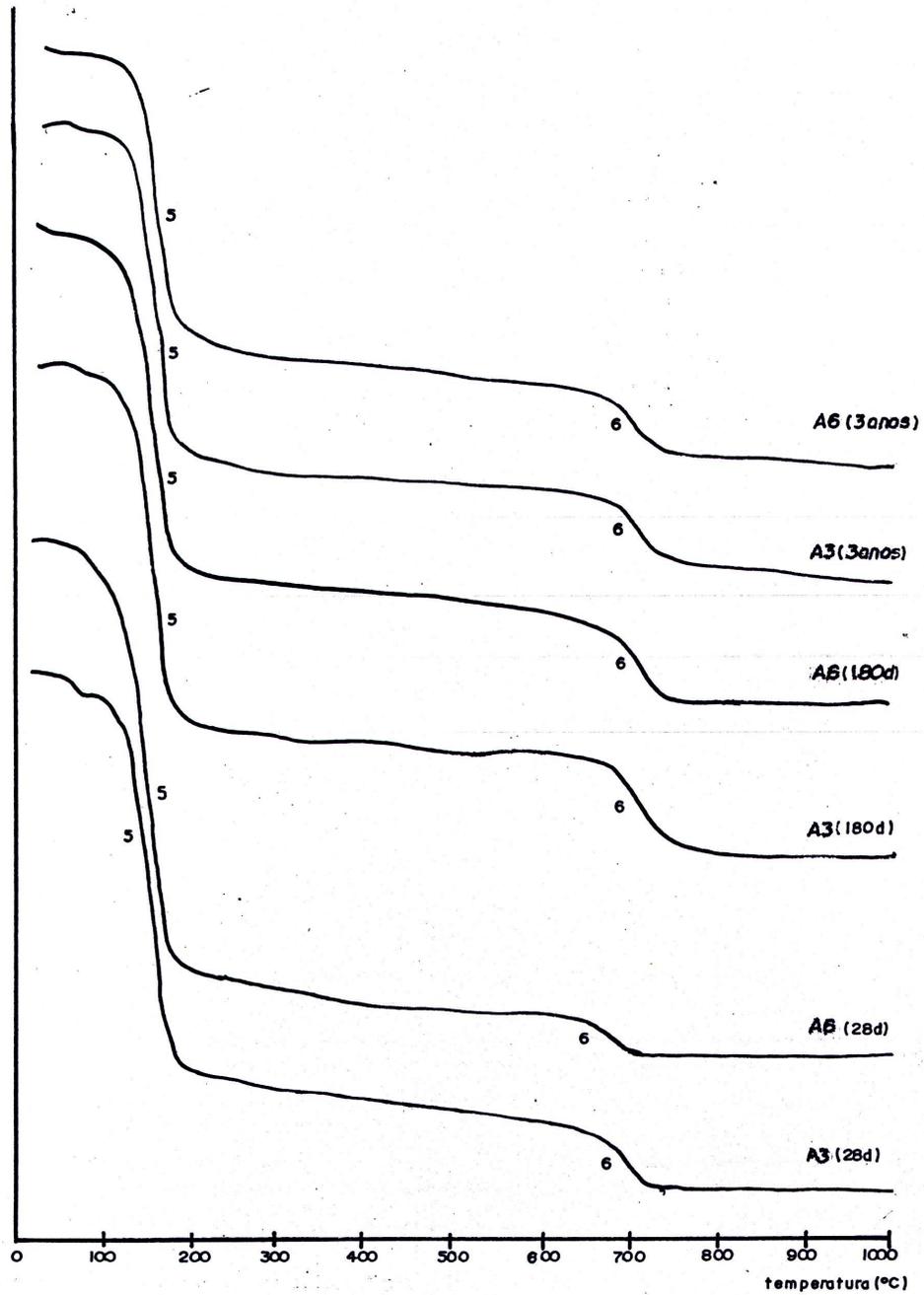
Nas pastas com 100% de gesso (A1 = A4; Figura 7.14) , somente a pasta A4 (cura interna), aos 180 dias, apresentou uma diminuição considerável da perda de água de cristalização do gesso devido à presença de grande quantidade de hemi-hidrato, como observado anteriormente. Nos demais diagramas houve uma semelhança no comportamento das misturas.

Nas misturas contendo gesso e cimento A2 = A5 (75/25) (Figura 7.15), 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 A3 =A6 (75/20/5) (Figura 7.16)..



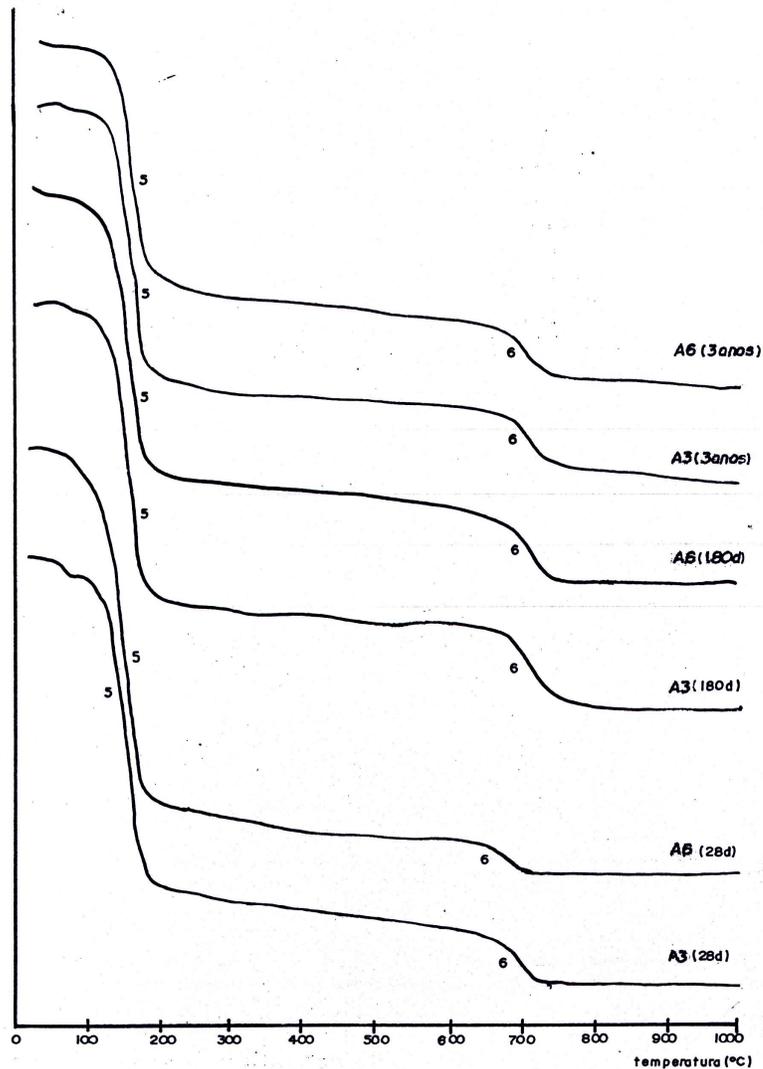
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
 A1 = A4 (100/0/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A1 (Externo) e A4 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.14 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A1=externa e A4=interna)**



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
 A2 = A5 (75/25/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A2 (Externo) e A5 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.15 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos. - (A2=externa e A5=interna)**



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
 A3 = A6 (75/20/5) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A3 (Externo) e A6 (interno) a/agl=0,70

**Figura – 7.16 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos. - (A3=externa e A6=interna)**

Segundo Merwe et al (1999) uma pequena massa é perdida entre 650 °C e 900 °C devido à oxidação de uma parte do carbono. O mesmo ocorreu nas misturas ensaiadas.

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

## 7.10 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. O tempo de observação foi de 28, 180 dias e até aos 5 anos. A aplicação foi realizada em três camadas e os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 7.12.

**Tabela 7.12 - Resultados da aplicação da pasta, em cada camada, nos painéis**

Variáveis	A1=A4	A2=A5	A3=A6
<b>Tempo de aplicação</b>	Foi possível aplicar a pasta até 16 min	Foi possível aplicar a pasta até 13 min	Foi possível aplicar a pasta até 14 min
<b>Acabamento</b>	Foi possível conseguir um acabamento liso	Foi possível conseguir um acabamento liso	Foi possível conseguir um acabamento liso
<b>Aplicação</b>	Normal	Mais fácil de aplicar	Melhora na aplicação

A1; A2 e A3 (externo); A4; A5 e A6 (interno) – (gesso/cimento/sílica ativa)

A1 = A4 (100/0/0); A2 = A5 (75/25/0); A3 = A6 (75/20/5)

Pode-se verificar nesses resultados o conceito de tempo útil quando da aplicação das misturas pois a utilização da pasta de gesso teoricamente começaria antes do início de pega determinado pela agulha de Vicat. Estes resultados foram no entanto foram alterados quando da substituição de parte do gesso por cimento Portland e sílica ativa.

A aplicação foi realizada 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 7.13

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

**Tabela 7.13 – 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 máx °C	T min. °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 Metereológica de Sorocaba, FATEC)  
**LOCAL DO ENSAIO: SOROCABA (CAMPUS DA FACULDADE DE ENGENHARIA DE SOROCABA)**  
**LATITUDE = - 23,50167 e LONGITUDE = - 47,45806**

Nos painéis revestidos com pasta de gesso (100%) (A1 = A4), observou-se que no painel externo A1 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 A2 = A5 (75/25/0), observou-se que as misturas A2 (cura externa) a superfície ficou mais porosa e menos resistente ao risco do que as misturas A5 (cura interna).

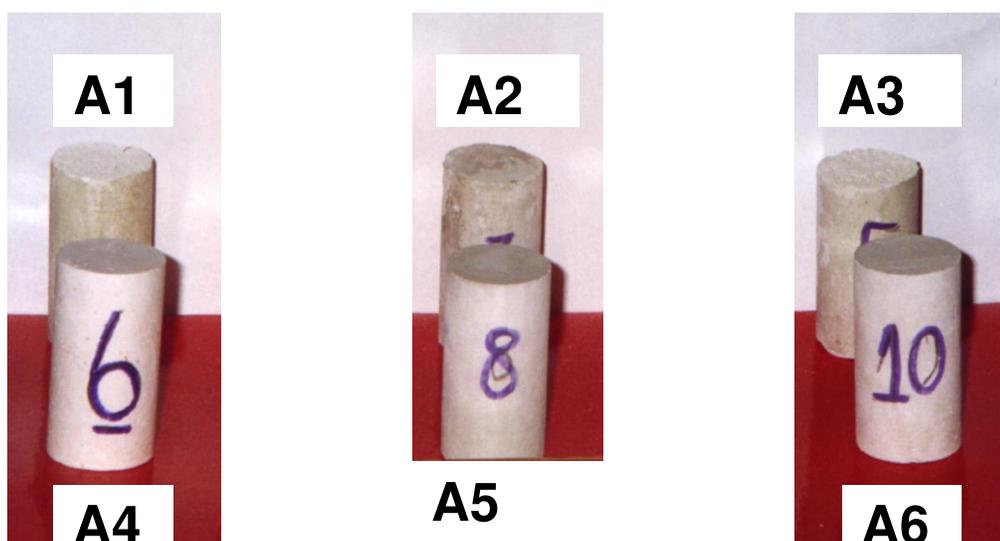
Nos painéis revestidos com a mistura de gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5) observou-se que nas misturas A3 (cura externa) a superfície ficou mais porosa e menos resistente ao risco do que as misturas A6 (cura interna).

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 ocorreu 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 7.17).



**Figura 7.17 – Comparação visual dos corpos-de-prova submetidos à cura externa (A1 a A3) e à cura interna ao ar em laboratório (A4 a A6) por um período de 180 dias.**

Após 180 dias os painéis internos e externos foram observados por 5 anos (Figura 7.18; 7.19; 7.20).

Pode-se observar que no painel da Figura 7.18, com 100% de gesso, o revestimento uma deterioração maior, principalmente na parte inferior onde o acúmulo de água é mais concentrado, provocando uma infiltração pela base do painel. Na Figura

7.19 onde a pasta era composta por 75% de gesso, 25% de cimento Portland a deterioração foi menor devido provavelmente à adição de cimento. O mesmo não aconteceu na Figura 7.20 onde a pasta era composta por 75% de gesso, 20% de cimento Portland e 5% e sílica ativa o que se observa é que a deterioração ocorreu em sua grande maioria onde a mistura de sílica ativa com o restante da pasta não foi bem efetuada formado pequenos grumos de sílica ativa. Por ser a sílica ativa de granulometria muito pequena a absorção de água foi maior.



**Figura 7.18 – Pannel de pasta com 100%gesso (cinco anos)**



**Figura 7.19 – Pannel de pasta com 75%gesso, 25% de cimento Portland e 0% de sílica ativa (cinco anos)**



**Figura 7.20 – Painel de pasta com 75%gesso, 20% de cimento Portland e 5% de sílica ativa (cinco anos)**

Pode-se observar também o aumento de fungos emboloradores de cor esverdeada, nos locais onde ocorreu uma permanência maior de umidade (locais com sombra) principalmente no painel com 100% de gesso (A1).

### **7.11 Ensaio de aderência**

O ensaio de arrancamento foi realizado no laboratório para as misturas de cura interna aos 28 e 180 dias e diretamente sobre os painéis externos aos 5 anos. Após o arrancamento, a superfície de ruptura foi analisada somente no caso da ruptura ocorrer na interface pasta/substrato. O valor da resistência de aderência é igual ao valor obtido no ensaio. A Tabelas 7.14 e 7.15 mostram os resultados obtidos dos experimentos de arrancamento sobre de blocos de concreto sem chapisco com as misturas A4, A5 e A6 (cura interna) aos 28 e 180 dias, ensaio realizado em laboratório. Nos painéis externos em blocos de concreto sem chapisco com a mistura A1, A2 e A3 (cura externa) aos 5 anos, respectivamente.

**Tabela 7.14 - Tensão de arrancamento em blocos de blocos de concreto cura interna aos 28 e 180 dias**

Misturas	Corpos de prova	Tensão de Ruptura (MPa)		Tipo de ruptura	
		28 dias	180 dias	28 dias	180 dias
A4	CP1	0,66268	0,64219	Pasta/substrato	Pasta/substrato
	CP2	1,05427	0,72293	Pasta/substrato	Do substrato
	CP3	0,78317	0,84341	Pasta/substrato	Do substrato
A5	CP1	0,35224	0,36146	Pasta/substrato	Pasta/substrato
	CP2	0,51243	0,54219	Pasta/substrato	Pasta/substrato
	CP3	0,46543	0,48195	Pasta/substrato	Pasta/substrato
A6	CP1	0,47898	0,48195	Pasta/substrato	Interior da pasta
	CP2	0,47345	0,48196	Pasta/substrato	Pasta/substrato
	CP3	0,41887	0,42171	Pasta/substrato	Interior da pasta

**Tabela 7.15 - Tensão de arrancamento no painel de blocos de concreto cura externa aos 5 anos**

Misturas	Corpos de prova	Tensão de Ruptura (MPa)	Tipo de ruptura
		5 anos	5 anos
A1	CP1	0,64237	Pasta/substrato
	CP2	0,71293	Pasta/substrato
	CP3	0,82340	Pasta/substrato
A2	CP1	0,56140	Pasta/substrato
	CP2	0,54110	Pasta/substrato
	CP3	0,48298	Pasta/substrato
A3	CP1	0,48591	Pasta/substrato
	CP2	0,48099	Interior da pasta
	CP3	0,42370	Pasta/substrato

Na aplicação das diversas misturas sobre os blocos de concreto, tanto para a cura interna como externa, observou-se que a ruptura típica foi na interface pasta/substrato. Quanto às adições de (cimento e de sílica ativa), não melhoraram o desempenho quanto à aderência. Entre as misturas com adições observa-se que as misturas de gesso e cimento (A2 e A5) e gesso, cimento e sílica ativa (A3 e A6) as misturas de gesso e cimento obtiveram uma aderência um pouco maior. Observa-se que os melhores resultados foram para as misturas A1 e A4 com (100% gesso), e houve pouca variação de resistência à aderência com o passar do tempo.

## 7.12 Comparativo entre os revestimentos argamassados convencionais e o revestimento de gesso liso, gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa quanto ao custo de aplicação

Analisando os resultados obtidos por Narder & Bracarense (2001) no capítulo 5 item 5.3.2 da página 137 e atualizando os valores dos insumos pela tabela de preço composto da PINI Sistemas de 28 de abril de 2006, pode-se obter com o TCPO 2003 (que é a base de dados da PINI Sistemas) as composições dos custos das pastas de gesso, gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa conforme Tabelas 7.16 a 7.19.

**Tabela 7.16 – Preço unitário composto das pastas de gesso, gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa (TCPO, 2003)**

<b>Gesso desempenado aplicado sobre paredes ou tetos por m<sup>2</sup></b>					
<b>Componentes</b>	<b>Consumo</b>	<b>R\$unit.</b>	<b>R\$ Mão-de-obra</b>	<b>R\$ Material</b>	<b>R\$ Total</b>
Gesseiro	0,39 h	6,60	2,57		
Servente	0,10 h	5,70	0,57		3,14
gesso	6,20 kg	0,37		2,29	2,29
					<b>5,43</b>
<b>Composição substituindo parte do gesso por cimento Portland segundo a mistura: 75% gesso + 25% cimento Portland aplicado sobre parede ou teto por m<sup>2</sup></b>					
Gesseiro	0,39	6,60	2,57		
Servente	0,10	5,70	0,57		3,14
Gesso	4,65	0,37		1,72	
cimento	1,55	0,35		0,54	2,26
					<b>5,40</b>
<b>Composição substituindo parte do gesso por cimento Portland e sílica ativa segundo a mistura: 75% gesso + 20% de cimento Portland e 5% de sílica ativa aplicado sobre parede ou teto por m<sup>2</sup></b>					
Gesseiro	0,39	6,60	2,57		
Servente	0,10	5,70	0,57		3,14
Gesso	4,65	0,37		1,72	
Cimento	1,24	0,35		0,43	
Sílica ativa	0,31	0,90		0,28	2,43
					<b>5,57</b>

**Tabela 7.17 – Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em diversas combinações convencionais**

Descrição do tipo de revestimento	Chapisco	Chapisco c/adensivo	Emboço parede	Emboço teto	Reboco parede	Reboco teto	Gesso s/chap	Gesso c/chap	Gesso c/chap adesivo	R\$Final (p/m <sup>2</sup> )
Emboço sobre parede sem chapisco			11,36							11,36
Emboço sobre parede com chapisco sem aditivo	2,61		11,36							13,97
Emboço sobre parede com chapisco aditivado		6,20	11,36							17,56
Emboço sobre teto com chapisco aditivado		6,20		12,58						18,78
Reboco sobre parede com chapisco aditivo e emboço	2,61		11,36		7,66					21,63
Reboco sobre teto com chapisco aditivado e emboço		6,20		12,58		9,17				27,95

**Tabela 7.18 – Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em gesso**

Descrição do tipo de revestimento	Chapisco	Chapisco c/adensivo	Emboço parede	Emboço teto	Reboco parede	Reboco teto	Gesso s/chap	Gesso c/chap	Gesso c/chap adesivo	R\$Final (p/m <sup>2</sup> )
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto sem chapisco							5,43			5,43
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco sem aditivo	2,61							5,43		8,04
Gesso aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco aditivado		6,20							5,43	11,63

**Tabela 7.19 – Composição de custos para os revestimentos de paredes e tetos em gesso e cimento Portland, gesso, cimento Portland e sílica ativa**

Descrição do tipo de revestimento	Chapisco	Chapisco c/adensivo	Emboço parede	Emboço teto	Reboco parede	Reboco teto	Gesso s/chap	Gesso c/chap	Gesso c/chap adesivo	R\$Final (p/m <sup>2</sup> )
75% Gesso + 25% cimento aplicado manualmente sobre parede ou teto sem chapisco							5,40			<b>5,40</b>
75% Gesso + 25% cimento aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco sem aditivo	2,61							5,40		<b>8,01</b>
75% Gesso + 25% cimento aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco aditivado		6,20							5,40	<b>11,60</b>
75% Gesso + 20% cimento e 5% sílica aplicado manualmente sobre parede ou teto sem chapisco							5,57			<b>5,57</b>
75% Gesso + 20% cimento e 5% sílica aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco sem aditivo	2,61							5,57		<b>8,18</b>
75% Gesso + 20% cimento e 5% sílica aplicado manualmente sobre parede ou teto com chapisco aditivado		6,20							5,57	<b>11,77</b>

Pode-se observar pelas tabelas 7.16 a 7.19 que o revestimento de gesso, mesmo substituindo parte dele por cimento e sílica ativa, tem custo menor que os revestimentos convencionais argamassados.

### 7.13 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

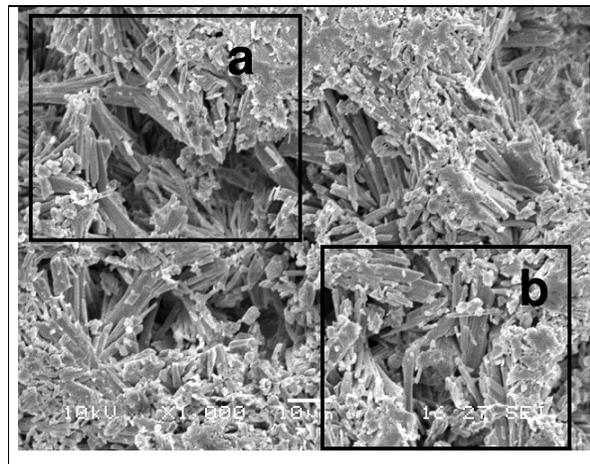
A análise das microscopias foi realizada para as misturas submetidas à cura externa A1, A2 e A3 e à cura interna A4, A5 e A6.

#### 7.13.1 Misturas em ambiente externo (A1, A2 e A3).

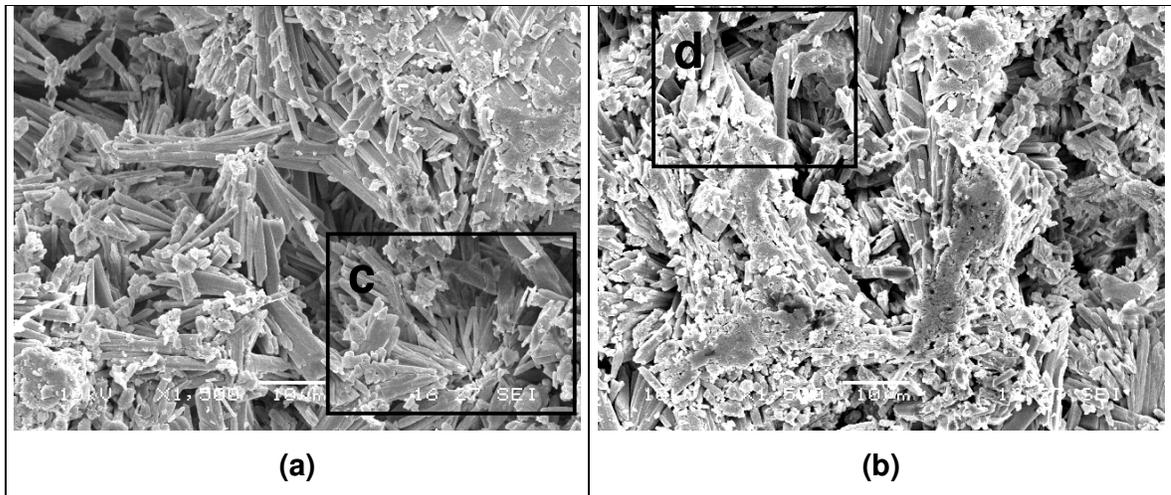
##### a) Mistura A1 (100% gesso)

As Figuras 7.21 a 7.23 apresentam a microestrutura da mistura A1 produzida somente com o gesso, que foi submetida à cura externa.

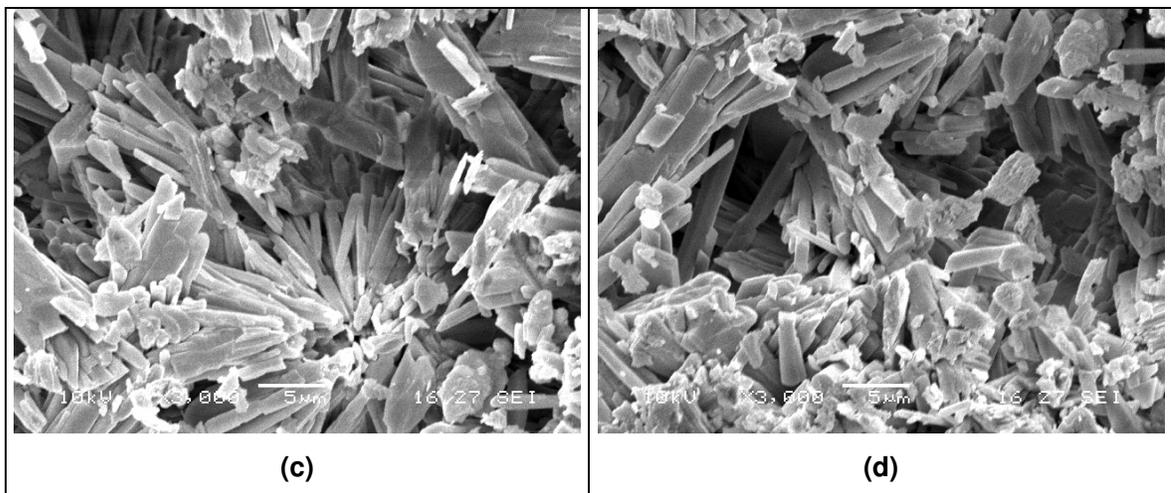
A Figura 7.21 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.22 e 7.23 representam ampliações da Figura 7.21 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.21 – Micrografia da mistura A1(100% gesso) ampliada 1000 vezes (cura externa)**



**Figura 7.22 –Detalhes (a) e (b) da Figura 7.21 (mistura A1) ampliados 1500 vezes**



**Figura 7.23 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.22 (mistura A1) ampliados 3000 vezes**

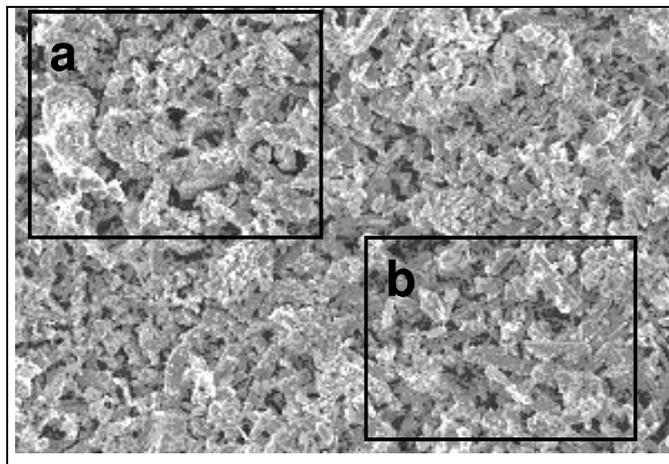
Nessas micrografias de pastas de gesso observa-se que os cristais de gipsita são aciculares, com dimensões com pouca variação, mas com tendência a cristais pequenos distribuídos por toda a pasta. Os cristais aciculares (ou agulhas) de gipsita apresentaram dimensões médias de 1 $\mu$ m de diâmetro e 12 $\mu$ m de comprimento. A estrutura formada é de agulhas entrelaçadas, apresentando, em alguns pontos poros esféricos, concentração de águas interligadas lateralmente formando uma estrutura mais compacta. Um

detalhe bastante interessante em que as agulhas de gipsita se agrupam radialmente em torno de um ponto (Figura 7.23a). Esse arranjo também foi encontrado por Gmough et al. (2003), indicando que o material anidro apresentava adições de material inerte que favoreceram a germinação dos cristais de gipsita durante a hidratação do hemi-hidrato.

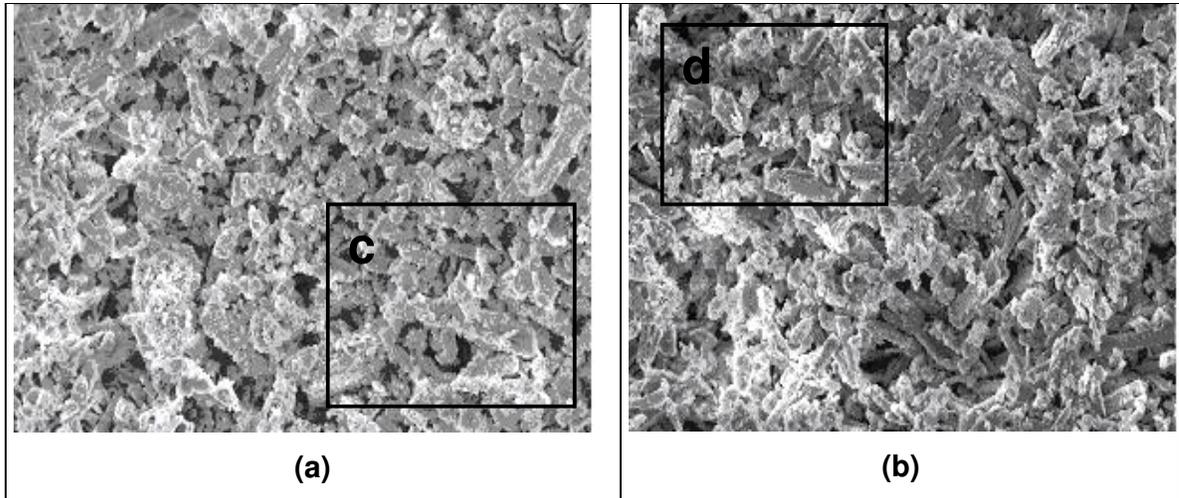
#### **b) Mistura A2 (75% gesso e 25% cimento Portland)**

As Figuras 7.24 a 7.26 apresentam a microestrutura da mistura A2 produzida com o gesso (75%) e com o cimento Portland de alto-forno (25%), que foi submetida à cura externa.

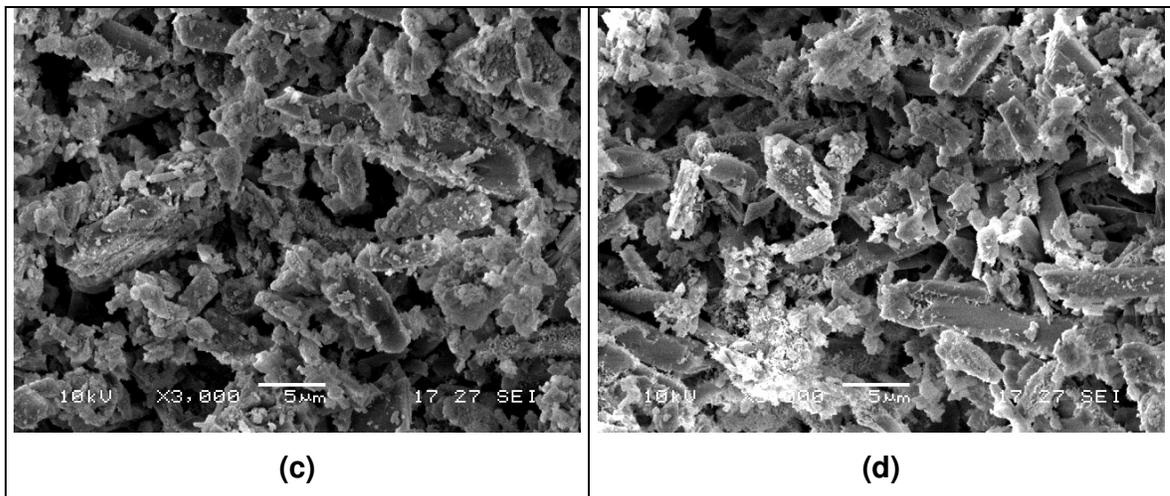
A Figura 7.24 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.25 e 7.26 representam ampliações da Figura 7.24 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.24 – Micrografia da mistura A2 (75% gesso e 25% cimento) ampliada 1000 vezes**



**Figura 7.25 – Detalhes (a) e (b) da Figura 7.24 (mistura A2) ampliados 1500 vezes**



**Figura 7.26 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.25 (mistura A2) ampliados 3000 vezes**

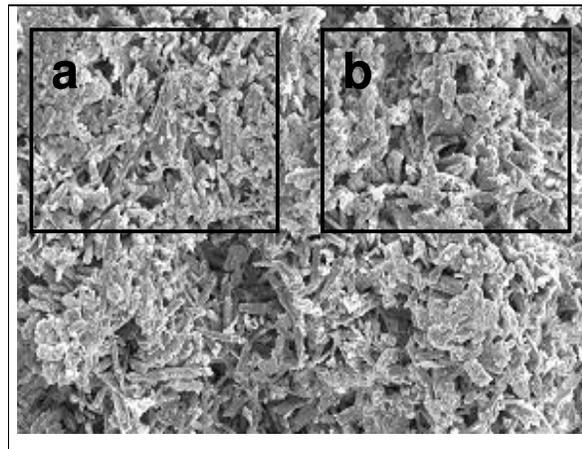
Nestas micrografias da pasta contendo 75% de gesso e 25% de cimento Portland as agulhas de gipsita não são nitidamente observadas. Nota-se uma diminuição dos poros e a formação de C-S-H resultante da hidratação do cimento cobrindo os cristais de dihidrato, que estão melhores distribuídos.

Esta formação é semelhante encontrada por Coimbra (2004), mesmo sendo a quantidade de cimento pequena em relação ao gesso.

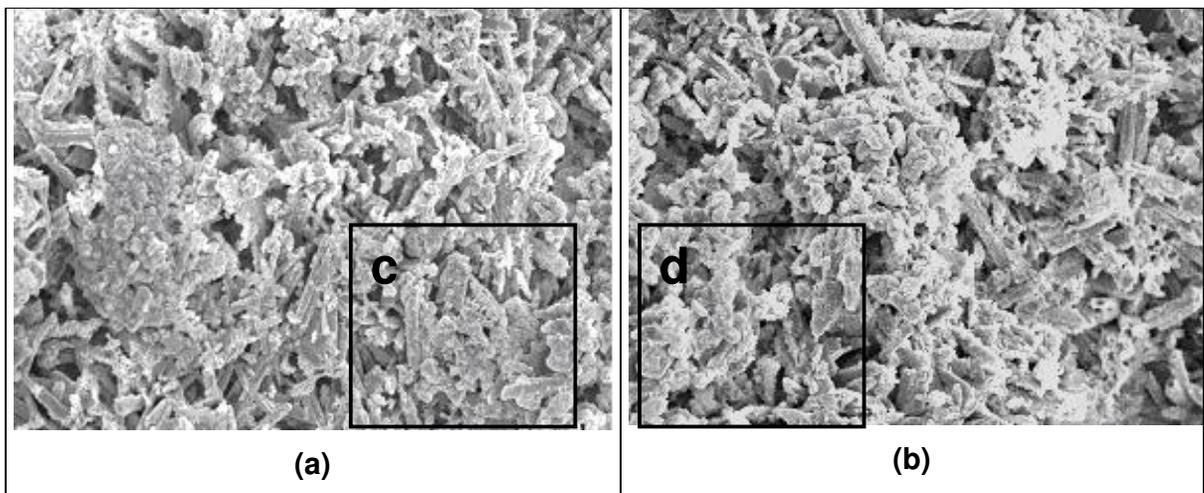
**c) Mistura A3 (75% gesso, 20% cimento Portland e 5% sílica ativa)**

As Figuras 7.27 a 7.29 apresentam a microestrutura da mistura A3 produzida com o gesso (75%), com o cimento Portland de alto-forno (20%) e com a sílica ativa (5%), que foi submetida à cura externa.

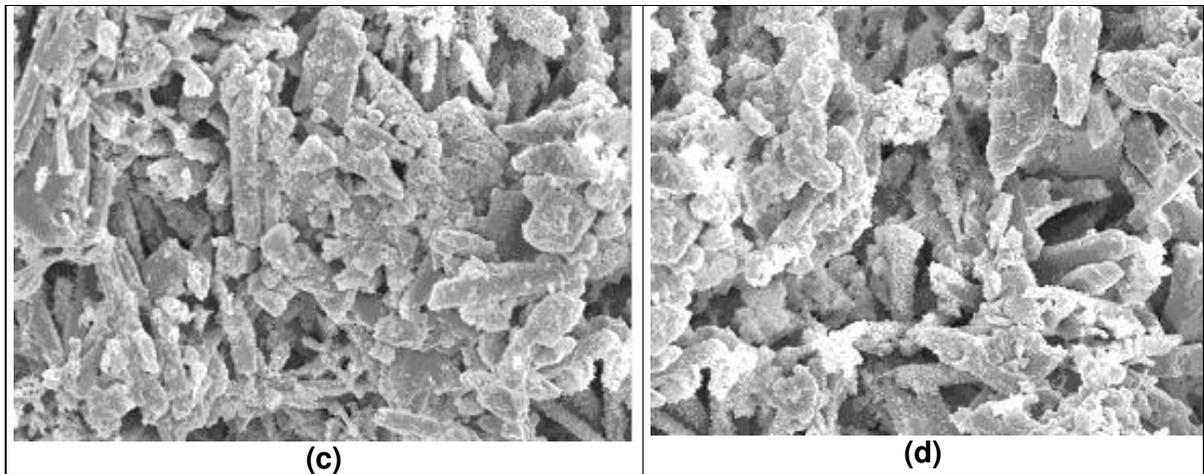
A Figura 7.27 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.28 e 7.29 representam ampliações da Figura 7.27 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.27 – Micrografia da mistura A3 (75% gesso, 20% cimento e 5% sílica ativa) ampliada 1000 vezes**



**Figura 7. 28 –Detalhes (a) e (b) da Figura 7.27 (mistura A3) ampliados 1500 vezes**



**Figura 7.29 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.28 (mistura A3) ampliados 3000 vezes**

Nas micrografias da pasta com 75% de gesso, 20% de cimento Portland e 5% de sílica ativa observam-se cristais de gipsita visíveis. A porosidade da mistura é menos intensa, no entanto ela é nítida.

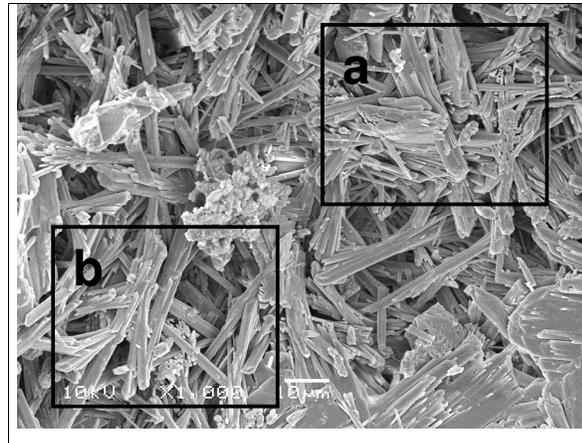
Os cristais de gipsita estão menos cobertos de C-S-H devido à menor quantidade de cimento presente nesta mistura. Embora se observam as mesmas formações ocorridas nas misturas de gesso com cimento. Não se nota o efeito da sílica ativa na pasta. Pode-se observar, na Figura 29, a mesma formação encontrada por Klover (1998) nas misturas contendo gesso, cimento Portland e sílica ativa.

### **7.13.2 Misturas em ambiente interno**

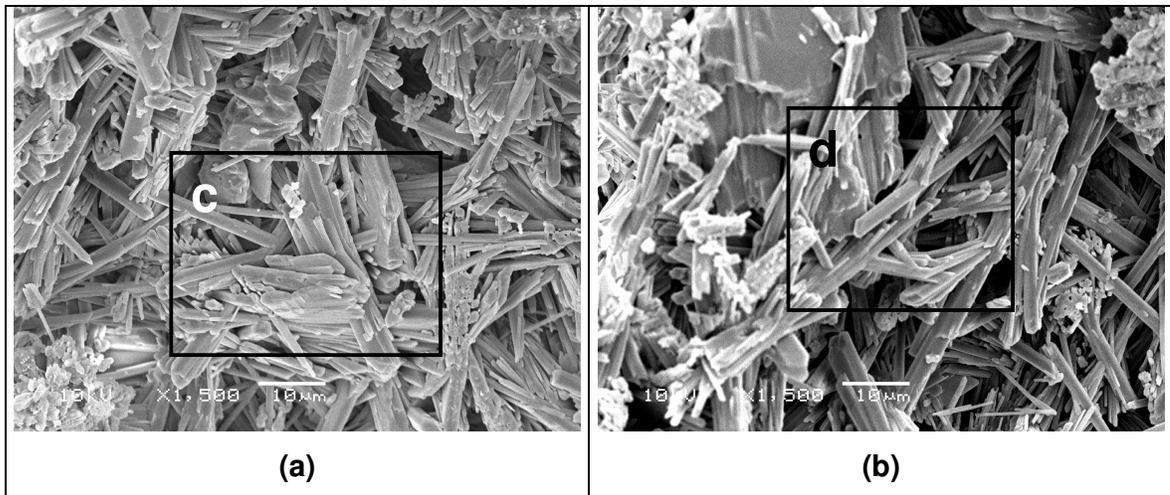
#### **a) Mistura A4 (100% gesso)**

As Figuras 7.30 a 7.32 apresentam a microestrutura da mistura A4 produzida com o gesso (100%), que foi submetida à cura interna.

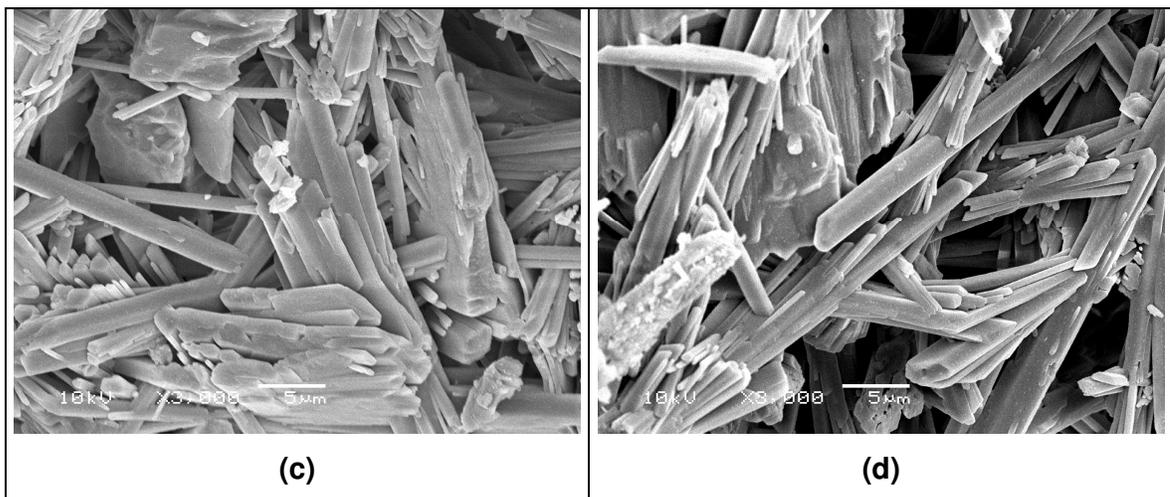
A Figura 7.30 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.31 e 7.32 representam ampliações da Figura 7.30 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.30 – Micrografia da mistura A4 (100% gesso) ampliada 1000 vezes**



**Figura 7.31 – Detalhes (a) e (b) da Figura 7.30 (mistura A4) ampliados 1500 vezes**



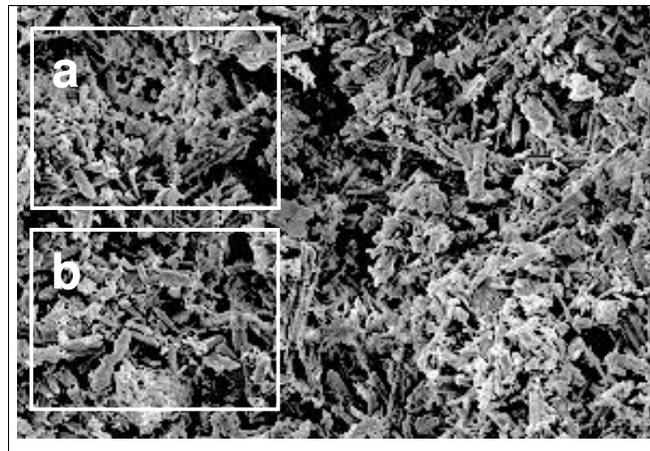
**Figura 7.32 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.31 (mistura A4) ampliados 3000 vezes**

Observa-se, nas misturas contendo 100% de gesso (A4), a mesma formação obtida nas misturas com cura externa (A1), mas com menor formação de cristais de gesso. Provavelmente este fato ocorreu pelo atraso da formação dos hemi-hidratos visto que as misturas externas obtiveram mais umidade propiciando a formação dos hemi-hidratos em idades iniciais.

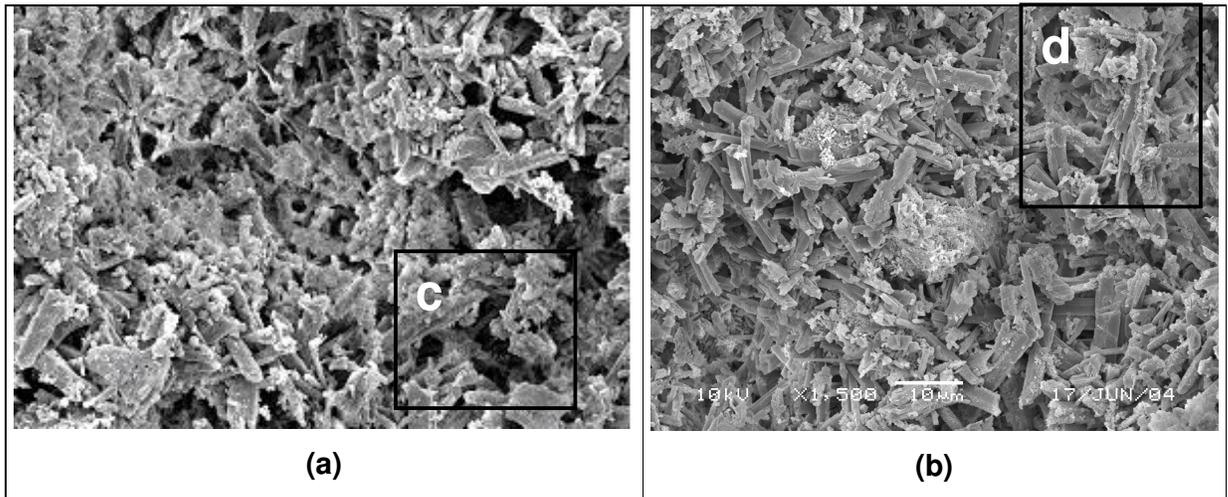
#### **b) Mistura A5 (75% gesso e 25% cimento Portland)**

As Figuras 7.33 a 7.35 apresentam a microestrutura da mistura A5 produzida com o gesso (75%) e com o cimento Portland de alto-forno (25%), que foi submetida à cura interna.

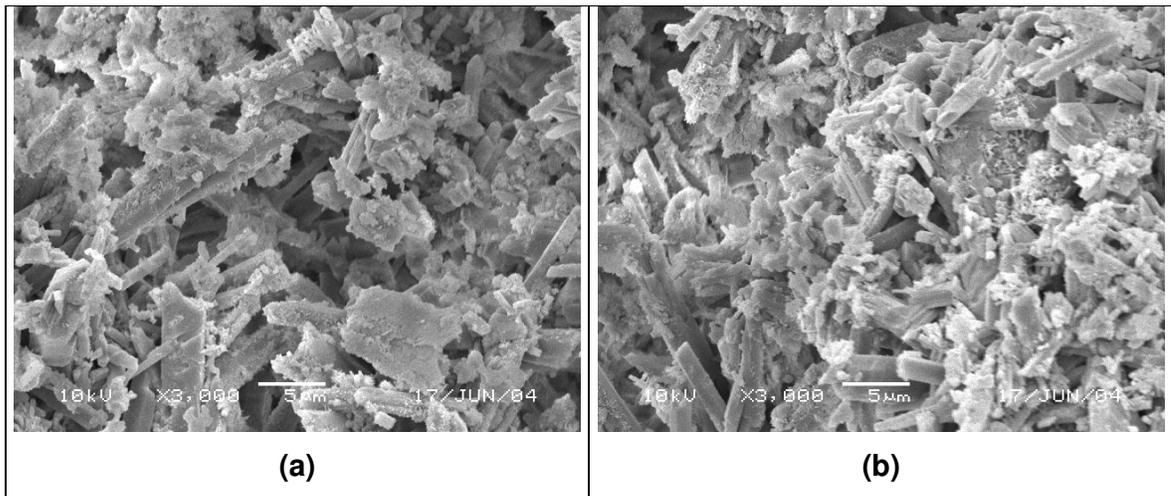
A Figura 7.33 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.34 e 7.35 representam ampliações da Figura 7.33 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.33 – Micrografia da mistura A5 (75% gesso e 25% cimento) ampliada 1000 vezes**



**Figura 7.34 – Detalhes (a) e (b) da Figura 7.33 (mistura A2) ampliados 1500 vezes**



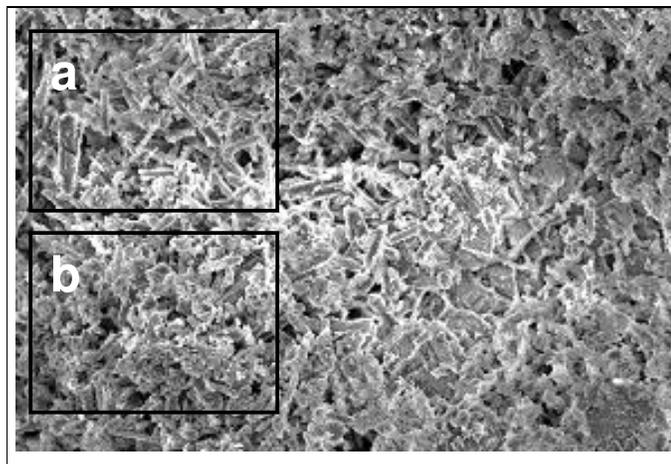
**Figura 7.35 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.34 (mistura A5) ampliados 3000 vezes**

Observa-se nas micrografias da pasta contendo 75% de gesso e 25% de cimento Portland uma diminuição dos poros e a formação de cristais de hidróxido de cálcio e de C-S-H cobrindo os cristais de gipsita. Observa-se a presença de poros e cristais de gipsita de diferentes dimensões.

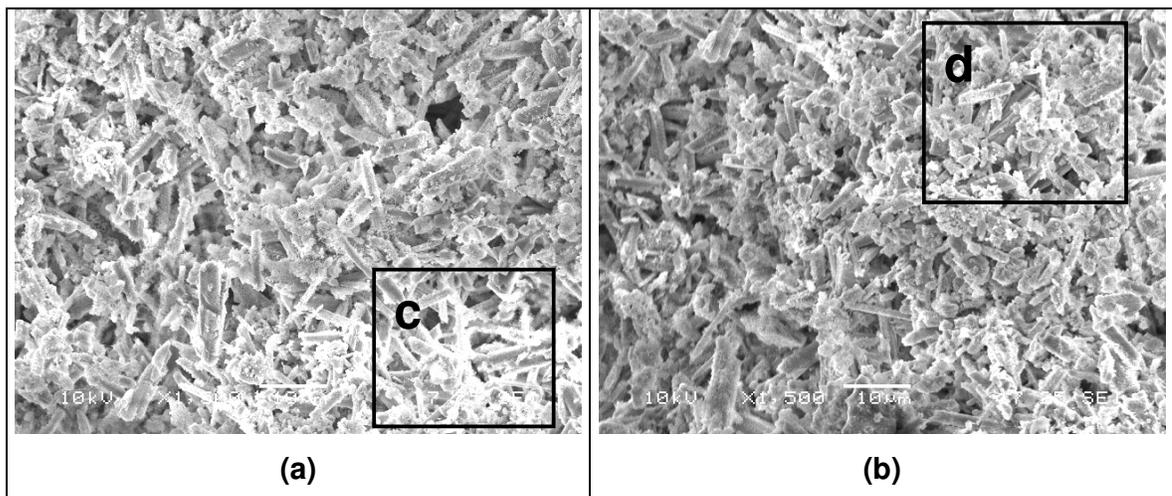
**c) Mistura A6 (75% gesso, 20% cimento Portland e 5% sílica ativa)**

As Figuras 7.36 a 7.38 apresentam a microestrutura da mistura A6 produzida com o gesso (75%), com o cimento Portland de alto-forno (20%) e com a sílica ativa (5%), que foi submetida à cura interna.

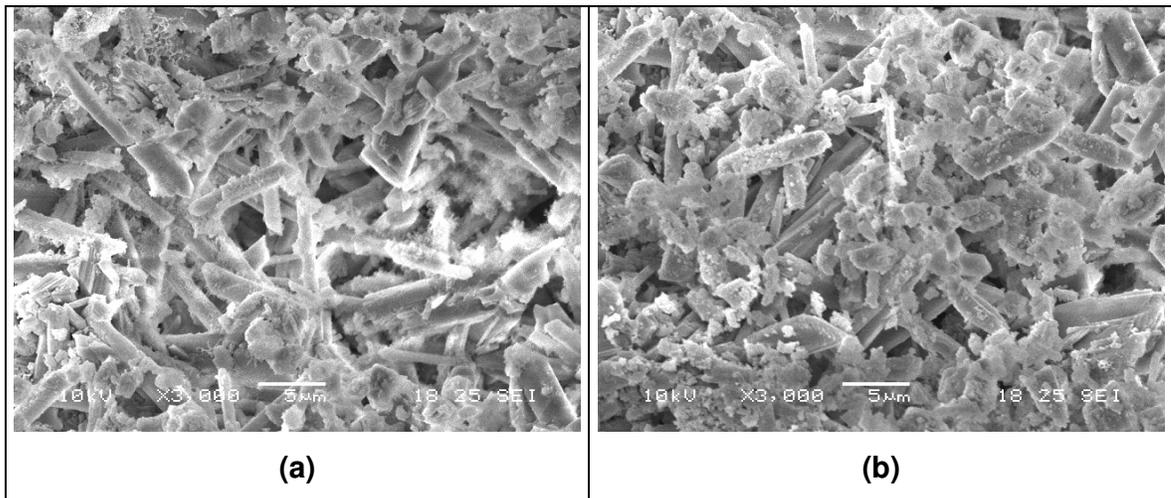
A Figura 7.36 é uma visão geral da pasta ampliada 1000 vezes. As Figuras 7.37 e 7.38 representam ampliações da Figura 7.36 em 1500 e 3000 vezes, respectivamente.



**Figura 7.36 – Micrografia da mistura A6 (75% gesso, 20% cimento e 5% sílica ativa) ampliada 1000 vezes**



**Figura 7.37 – Detalhes (a) e (b) da Figura 7.36 (mistura A6) ampliados 1500 vezes**

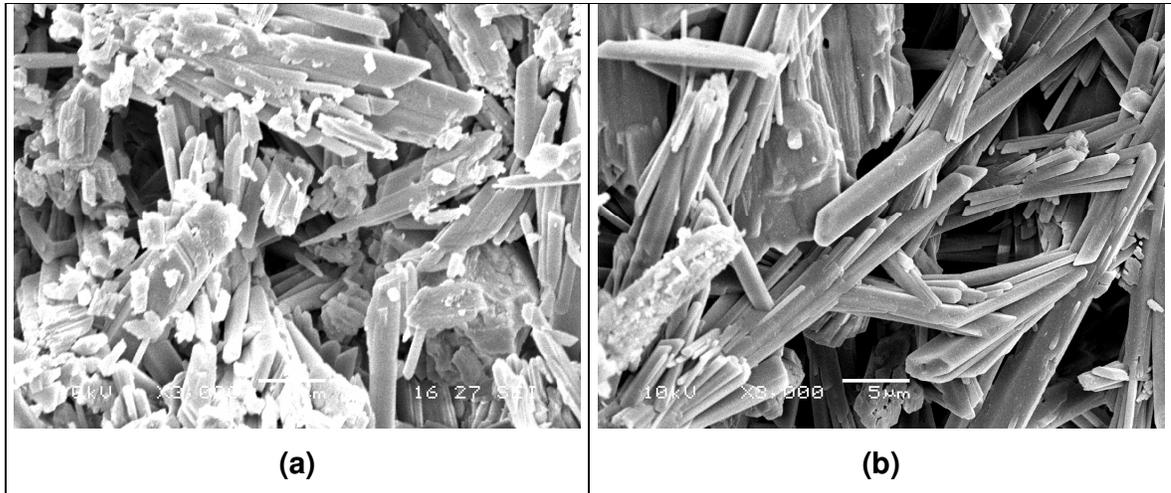


**Figura 7.38 – Detalhes (c) e (d) da Figura 7.37 (mistura A6) ampliados 3000 vezes**

Nas misturas com 75% de gesso, 20% de cimento Portland e 5% de sílica ativas observam-se as mesmas formações ocorridas nas misturas de gesso com cimento. Não se observa uma mudança significativa da microestrutura da pasta com a presença de sílica ativa.

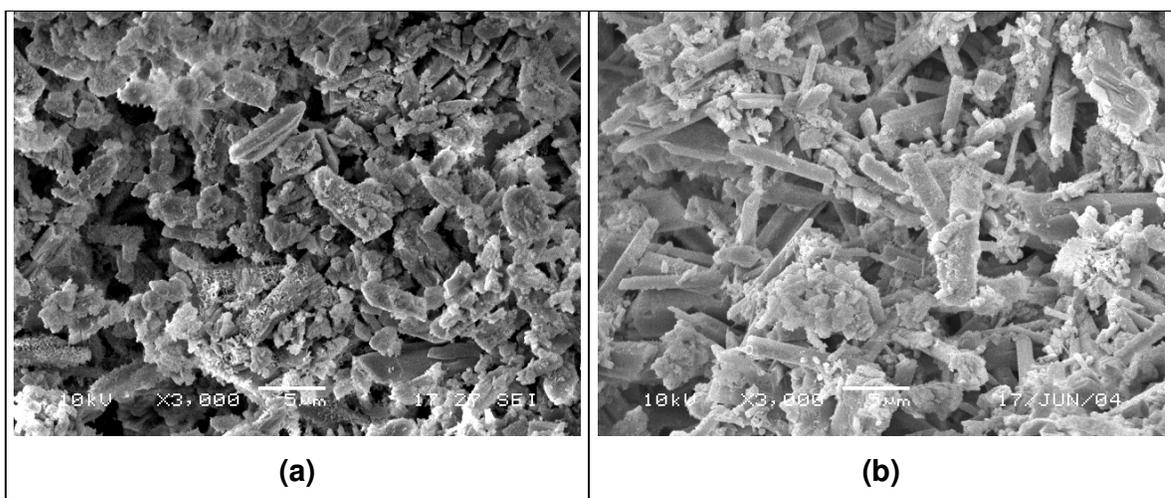
### **7.13.3 Análise comparativa entre as misturas externas e internas**

As Figuras 7.39 a 7.41 as micrografias das misturas A1 a A6, submetidas às curas interna e externa. Nessas Figuras observam-se misturas de mesma composição mas submetidas a diferentes curas, avaliando-se sua microestrutura.



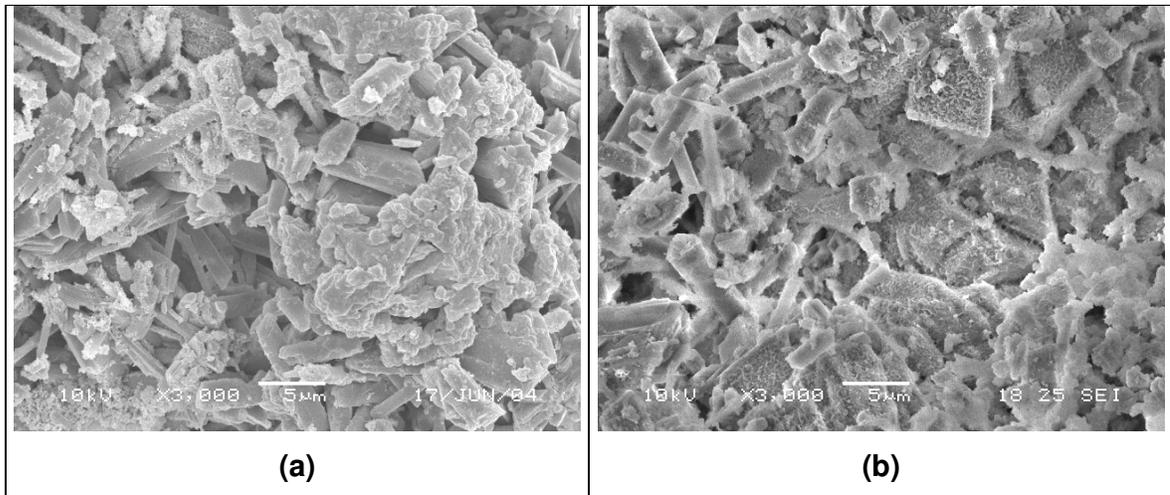
**Figura 7.39 – Micrografias da mistura A1 (a, cura externa) e da mistura A4 (b, cura interna) ampliadas 3.000 vezes**

Observa-se nas micrografias da Figura 7.39 (a) e (b) a formação de agulhas de gipsita. No entanto, as agulhas formadas na cura externa, Figura 7.39 (a), apresentam maior aglomeração e contém um número maior de agulhas de menor dimensão. Provavelmente isso tenha ocorrido devido a mistura externa receber mais umidade acelerando a hidratação da gipsita formando, portanto, mais cristais de gipsita. Observa-se, também, que as misturas com cura interna, inicialmente são mais porosas.



**Figura 7.40 – Micrografias da mistura A2 (a, cura externa) e da mistura A5 (b, cura interna) ampliadas 3.000 vezes**

Nas misturas contendo cimento Portland observa-se uma diminuição da porosidade e a formação do C-S-H preenchendo os vazios e cobrindo os cristais de dihidrato. Na mistura com cura externa observa-se uma diminuição maior da porosidade devido à presença de uma quantidade maior de água o que permite uma melhor hidratação do cimento nas primeiras idades. Na pasta submetida à cura interna, Figura 7.40 (b), os cristais de gipsita estão menos cobertos pelo C-S-H proveniente da hidratação do cimento Portland, indicando que a presença de água permite melhorar a microestrutura deste tipo de mistura.



**Figura 7.41 –Micrografias da mistura A3 (a, cura externa) e da mistura A6 (b, cura interna) ampliadas 3.000 vezes**

Observa-se na mistura contendo gesso, cimento Portland e sílica ativa, tanto para as misturas submetidas a cura externa como as de cura interna, a presença de C-S-H cobrindo os cristais de gipsita, poros e cristais de gipsita ainda sem a presença de C-S-H sobre eles. Na pasta submetida à cura interna, Figura 7.41 (a), observa-se que a presença de umidade favoreceu a hidratação do cimento Portland devido à maior presença de cimento hidratado. No entanto, em ambos os casos, não se notaram a influência da adição de sílica ativa microestrutura da pasta.

## 8 CONCLUSÕES

Esta tese analisou a microestrutura e 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 realizado, 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 incluindo a Difração de raios-X, Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Microscopia Eletrônica de Varredura.

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 e para a sua aplicação, não diferenciando da utilizada na prática pelos gesseiros que é 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 a cura interna (A4) observou-se uma grande quantidade de hemi-hidrato nos difratogramas, comportamento atípico da pasta. 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.

4 – As misturas contendo gesso e cimento A2 = A5 (75/25/0) e as misturas de gesso, cimento e sílica ativa A3 = A6 (75/20/5), mesmo absorvendo uma quantidade maior de água resultou em uma perda de massa menor em relação à pasta com 100% de gesso quando imerso em água.

5 – Os resultados obtidos mostraram que, a adição de sílica ativa na mistura contendo cimento, reduz a formação de etringita especialmente nos revestimentos sujeito à umidade. Observou-se também que a sílica ativa não alterou as propriedades mecânicas. 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 porosidades e perda de massa localizada (principalmente nos locais onde houve um acúmulo de água). Mas não apresentaram em datas acima de 3 anos, gretamentos, fissuras ou perda de aderência da base.

8 – Observou-se durante o período de 5 anos pouca formação de fungos emboloradores em todas as misturas externas sujeitas à umidade. No entanto fungos foram observados nas pastas de gesso puro (A1).

9 – O desempenho do revestimento externo observado no período de 5 anos, mesmo apresentando alguma perda de massa localizada e fungos emboloradores, foi muito bom. Não foi caracterizado dano no revestimento que pudessem compromete-lo. Diferente de um revestimento externo convencional (argamassas mistas) que neste período (5 anos) certamente apresentaria patologias e danos (fissuras, fungos, deslocamento, desagregação) patologias características de um revestimento exposto ao tempo e sem nenhuma proteção.

10 – Para os substratos de bloco de concreto observou-se que o preparo da base com o chapisco não contribuiu significativamente para melhorar a aderência das pastas. A aderência para cada mistura, melhora em idades mais avançadas, da mesma forma, o emprego do cimento Portland e sílica ativa nas misturas (A3 e A6) em geral não foi efetivo para as condições de aderência com a base, comparativamente às misturas de gesso puro (A1 e A4).

11 – Ainda com relação à aderência das misturas à base, mesmo sendo as pastas de gesso adequadas para a execução de revestimentos de tetos e paredes, o desempenho e a qualidade final estarão sempre condicionados a um bom preparo dos substratos.

12 – Conclui-se que o revestimento gesso aplicado sobre a parede sem chapisco é 47,80% do valor do emboço, 57,55% do valor do emboço aplicado com chapisco sem aditivo e 66,23% do emboço aplicado sobre chapisco aditivado.

13 – Conclui-se que o revestimento de gesso aplicado nos tetos sobre chapisco aditivado é 61,93% do valor do emboço. Comparando com o revestimento convencional de chapisco sem aditivo, emboço e reboco a diferença ainda é maior em torno de 170% (duas vezes e meia).

14 – Conclui-se que devido ao elevado custo de algumas adições (Epóxi, polímeros), e as dificuldades de trabalhar com outros tipos de adição na obra, a adição de cimento

Portland e sílica ativa ao gesso, permitem uma melhoria de resistência a baixo custo e de fácil manuseio.

15 – Como sugestão para o prosseguimento desta tese seria interessante avaliar:

- O uso de outros resíduos às misturas.
- Aumentar as quantidades de sílica ativa e de aditivo superplastificante;
- Utilizar retardadores de pega nas misturas contendo gesso e cimento Portland.

## 09 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução de Geraldo G. Serra. São Paulo/SP. Ed. Pini. 2000.

ANDRADE, N. P. H.; VEIGA, F. N. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Informativo, Furnas Centrais Elétricas AS. Furnas, 1998. 44p.

ÂNGULO, S. C. ; ZORDAN, S. E. ; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. PCC Departamento de Engenharia da Construção Civil da Escola Politécnica. EPUSP. São Paulo/SP. 2002. 13 p.

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.

ANTUNES, R. P. N.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V. M. **O conceito de tempo útil das pastas de gesso**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo/SP. 2000. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND.-ABCP Guia Básico de Utilização do Cimento Portland. **Boletim Técnico BT 106**. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5732** – Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5733** – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial. Rio de Janeiro 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5735** – Cimento Portland de Alto-forno. Rio de Janeiro 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5736** – Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7200** – Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Produto. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7215**. Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7217**. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7222**. Argamassa e Concreto – Determinação da Resistência à Tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7251**. Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 8490** – Argamassas endurecidas para alvenaria estrutural – Retração por secagem. Rio de Janeiro 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 11578** – Cimento Portland Composto. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 11582**. Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12127**. Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12128**. Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12129**. Gesso para construção – Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12989** – Cimento Portland Branco. Rio de Janeiro 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 13207**. Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – **Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 13596** – Sílica ativa para uso em cimento Portland, concretos, argamassas e pasta de cimento Portland - Especificações. Rio de Janeiro 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE ARTEFATOS DE GESSO. Requisitos e critérios mínimos para serem utilizados como referência da Caixa Econômica Federal na avaliação de proposta de financiamento de edificação que utilizam alvenarias de blocos de gesso. Recife/Ba. 2001.

BALAYSSAC, J. P. **Relations entre performances mecaniques, microstructure et durabilite dès betons**. Tese de doutorado, INSA-UPS. Toulouse, 1992

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas das pastas pozolânicas**. 2004. 128 p Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ.

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.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5ª edição, São Paulo/SP, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994, Vol 1, 435 p.

BENSTED, J. **Thaumasite-Un prodotto di deterioramento delle strutture di cemento indurito**. Exploration and Production Division. Grã Bretanha, 1997. p.5-9.

BENTUR, A. ; KOVLER, K.; GOLDMAN, A. Gypsum of improved performance using blends with Portland cement and silica fume. **Cement and concrete research**. 1994. p 109-116.

BLASEK, A. Thermal Analysis. **Van Nostrand Reinhold Compani**. London, 1972

BORJA, F. **Introdução à Microscopia**. Disciplina Citologia e Embriologia da UFCG. Campina Grande/PA. 2001, 04p.

BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da Resistência à Compressão na Carbonatação de Concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. 2004. 153p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória/ES.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. Editora LTC Rio de Janeiro/RJ. 2001. 589p.

CAMARINI, G. **Desempenho de misturas cimento Portland e escória de alto forno submetidas à cura térmica**. 1995. 252 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica de São Paulo - USP. São Paulo/SP.

CARVALHO, M. F. **Microscopia Eletrônica de Varredura e Difração de Raios-X**. Seminário da disciplina Aglomerantes Minerai I - Mestrado em Edificações Unicamp. Campinas, 2000. p 1-28.

CEOTTO, L. H.; BANDUK, R. C.; NAKAKURA, E. H. Revestimentos de argamassa. Boas práticas em projeto, Execução e avaliação. **Habitare**. Volume 01. Porto Alegre/RS. 2005. 96p.

CINCOTTO, M. A. **Estudo da Composição Química da Cal Hidratada produzida no Estado de São Paulo**. 1977, 57 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de São Paulo. São Paulo/SP.

CINCOTTO, M. A. Patologia das Argamassas de Revestimento. Análise e Recomendações. **Revista A Construção nº 1839**. Ed. PINI. São Paulo/SP. 1983. 04p.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção. Composição química 1ª parte. **Revista A Construção São Paulo - Tecnologia de Edificações**. Ed. Pini. São Paulo/SP, 1988, 4p.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção. Composição química 2ª parte. **Revista A Construção São Paulo Tecnologia de Edificações**. Ed. Pini. São Paulo/SP, 1988, 4p.

CINCOTTO, M. A.; DIAS, A. M. N. **Tempo de pega**. Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.

CINCOTTO, M. A.; MIYAKE, E. T.; SHIRAKAWA, M. A. **Hidratação do gesso de construção**. Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.

CINCOTTO, M. A.; JAWOROSKI, H. G. **Calcinação do gipso - Fornos**. Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.

CINCOTTO, M. A.; KAZMIERCZAK, C. S. **Composição química e mineralógica e estrutura cristalina da gipsita**. Disciplina aglomerantes para argamassa – EPUSP. São Paulo/SP, 1990.

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. **Utilização de rejeitos de pilha zinco-carvão em argamassa e concretos de cimento Portland**. Departamento de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP. 2004.

COLLEPARDI, M. Thumasite formation and deterioration in historic buildings. **Cement and Concrete Composites** 21. USA, 1999. p. 147-154.

ÇOLAK, A.; The long-term durability performance of gypsum-Portland cement-natural pozzolan blends. **Cement and Concrete Research**. 1997. 7p.

ÇOLAK, A. Physical, mechanical, and durability properties of gypsum – Portland cementnatural pozzolan blends. **32º Cement and Concrete Research**. 2001.5p.

DENG, M.; MINGSHU, T. Formation and expansion of ettringite crystals. **Cement and Concrete Research**. USA, 1994. Vol. 24. p. 119-126.

DE MILITO, J. A. **Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento Portland e sílica ativa para revestimento**. 2001. 228p Dissertação de Mestrado, UNICAMP. Campinas São Paulo/SP.

DE MILITO, J. A. **Técnicas de Construção Civil e Construção de Edifícios**. Anotações de aulas das disciplinas Técnicas“A”e Construção Civil. Revisão 2003. 298p.

DE MILITO, J. A.; CAMARINI, G. Avaliação da resistência de aderência de pastas de gesso, cimento Portland e sílica ativa, sobre diferentes substratos. **Revista Engenharia - FAAP**, São Paulo, v.18, n.47, p. 15 – 20, 2005.

DJANIKIAN, J. G. **Aspectos da hidratação do cimento Portland em misturas com teores elevados de sulfato de cálcio**. 1987. 128 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica de São Paulo-USP. São Paulo.

DODD, J. W.; TONGE, K. E.. **Termal Methods. Analytical Chemistry byOpen Learning**.. London, 1987.

DUARTE, J.; **Análise Térmica**, Disponível em: <<http://hiq.aga.com.br>>. Acesso em: 29/04/2005.

DWECK, J.; SOUZA, P. S. **Protótipo de Sistemas para Análise Termogravimétricas da Cerâmica**. São Paulo/SP. 1989. p. 16-175.

FERREIRA, E. L.; CAMARINI, G.. Análise de Imagens um avanço para a Tecnologia do Concreto. **44º Congresso Brasileiro do Concreto – IBC**. 2001. 15p.

FERREIRA, E. L.; CAMARINI, G.. Formação de Etringita Retardada em concretos submetidos à cura térmica. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**. São Paulo/SP. 2003. 10p.

(a) FRANCO, L. S.; CANDIA, M. C. Contribuição ao estudo de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo/SP. 1998. 17p.

(b) FRANCO, L. S.; CANDIA, M. C. Influência do tipo de preparo de base no desempenho dos revestimentos de argamassa. **VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Qualidade no processo Construtivo. Florianópolis/SC. 1998. 9p.

FREITAS, J. A. **Estudo comparativo de método de dosagem para concretos de alta resistência com o uso de materiais disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2005. 133p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR.

GMOUH, A.; Changern in plaster microstructure by pre-stressing or by adding gypsum grains: microstructural and mechanical investigations. **Materials Science and Engineering**. A352, 2003. P 325 – 332.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na engenharia Civil**. Editora PINI. São Paulo/SP. 1998. 285p.

GUIMARÃES, J. E. P. A Indústria da Cal no Brasil; Panorama do setor no início da década de 80. **Publicação Associação Brasileira dos Produtores de cal**. 2ª edição. São Paulo/SP. 1990. 43p.

HINCAPIE, 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.

(a) HINCAPIE, H.; ANGELA, M.; OLIVEIRA, C. T. A.; TAKEASHI, M. S.; CINCOTTO, M. A.; SELMO, S. M. S. Revestimento de Gesso I. **Revista Técnica nº21** São Paulo/SP, 1996

(b) HINCAPIE, H.; ANGELA, M.; OLIVEIRA, C. T. A.; TAKEASHI, M. S.; CINCOTTO, M. A.; SELMO, S. M. S. Revestimento de Gesso I. **Revista Técnica nº22**. São Paulo/SP, 1996

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, n° 19.110. p. 32.

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.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória aditivada com silicatos de sódio**. São Paulo, 1995. 200p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de construção Civil.

JOURLAN, M. ;ROUX, B.; FAURE, R. M . Recognition of clinker places by automatic image analysis. **Cement & Concret Composites**. Vol.23, pp. 207 – 214. 2001

KATTAR, J. E. ; ALMEIDA, N. J..Cimento Portland. **Publicação Holdercim do Brasil**, 3ª edição. Santo André/SP. Ed. Holdercim Brasil SA. 1999.

KELLY, K. ; WILIAMS, P. Spinning waste into gold in construction. **ENR. Engineering News – Record**. Vol. 234, n° 16, p. E32 – E37. 1995.

(a) KLOVER, K. Setting and hardening of gypsum-Portland cement-sílica fume blends, part 1: Temperature and setting expansion. **Cement and Concrete Reserch**. USA, 1998. Vol. 28n n°03. p. 423-437.

KLOVER, K. Setting and hardening of gypsum-Portland cement-sílica fume blends, part 2: Early strength, DTA, XRD, and observations. **Cement and Concrete Reserch**. USA, 1998. Vol. 28n n°04. p. 523-531.

(b) KLOVER, K. Strength and water absorption for gypsum-cement-sílica fume blend of improved performance. **Advances in Cement Reserch**. USA, 1998. Vol. 28n n°02. p. 81-92.

KORMANN, A . C. M. **Estudo do desenvolvimento de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragem**. Dissertação de Mestrado. 2002. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR.

LNLS – LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **A Guide to Scanning Microscope Observation**. Campinas/SP. 2002. 35p.

MARTINS, J.M. ; MACHADO, A M. Curso básico de Difração de Raios-X. **Serrana Quimbrasil**. São Paulo/SP. 1986. 80p.

MASSAT, M. OLLIVER, J. P. **Cement and Concrete Research 25**. Permeabilidade ao ar. 1995.

MERWE, E. M. ; STRYDOM. C. A. ; POTGIETER, J.H. **Thermogravimetric Analysis of the reaction between carbon and  $C_aSO_4.2H_2O$ , gypsum and phosphogypsum in an inert atmosphere**. Department of Chemistry, University of Pretoria. Pretória África do Sul. 1999. 4p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo/SP. Ed. Pini, 1994. 573p.

MEHTA, P.K. **Pozzolanic and cimentitious by – products in concrete** another look in: Third International Conference on Fly-ash. Silica Fume, Slag and natural pozzolans in concrete. Trondloim, Proceedings. U.M. Malhota (Ed.), Detroit, ACI SP 114, V1, p.1 – 43, 1989.

NADER, C. N.; BRACARENSE, E. S. **Determinação da resistência de aderência de pastas de gesso em diversos substratos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Sorocaba. Sorocaba/SP. 2001, 55p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição. São Paulo/SP. Ed. Pini, 1997. 828p.

PEREIRA, E. B. Perfil analítico da gipsita. **Departamento Nacional da Produção Mineral**, 1973, 19p. Rio de Janeiro.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O Gesso – Produção e Utilização na Construção Civil**. Editora Bagaço. Recife/Bh. Realização Sindusgesso. 2001. 94p.

PRUDÊNCIO, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Cinza da casca de arroz. **Coletânea Habitare**–vol. 04. Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. 2003. p 241–260.

REJL, L.; DUD'A, R. **A grande Enciclopédia dos Mineirais**. Ed. Neografia. Eslováquia, 1994.

RODRIGUES, H. C. F. **Equivalência entre resultados de resistência à compressão de cimento Portland segundo os métodos de ensaio Brasileiro, Europeu e Norte Americano**. 1993. Tese (Mestrado) Escola Politécnica de São Paulo-USP. São Paulo/SP.

SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimento de escória**. 1998. 232 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica de São Paulo-USP. São Paulo/SP.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, F. ; et al. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. Fundação de Ciências e Tecnologia – CIENTEC. **Revista Cerâmica**.; Vol 45. Nº 296 São Paulo/SP. 1999  
SINDUSGESSO – **O Gesso**. Disponível em: <[www.ingessel.com.br](http://www.ingessel.com.br)>. Acesso em: 21/06/2006.

SING, M.; GARG, M. Phosphogypsum – fly ash cementitious binder – its hydration and strength development. **Cement and Concrete Research**. Volume 25. Nº 4.1995. p. 752-758.

SING, M.; GARG, M. Relationship between mechanical properties and porosity of water-resistant gypsum binder. **Cement and Concrete Research**. Volume 26. Nº 3.1996. p. 449-456.

SOUZA, M. F. ; **Gesso de alta resistência**. Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 2004.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academic Press Ltda, London, 1992.

TOTANI, Y. The hydration of blast furnace slag cement. ICCS, 7<sup>th</sup>, Paris. Vol. 2. 1980.

VELASCO, R. V. ; **Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibra de Polipropileno e Sisal submetido a altas temperaturas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. Rio de Janeiro/RJ. 2002.

WHITTAKER, A. G; WELLS, V. E. Gypsum In Portland Cement Pastes. **Rock Products – Cement Section**, Missouri USA, 1945. p. 7.

YAJUN, J.; CAYARDI, J. H. Effects of desinified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. **Cement ad Concret Research**, 2003.

YAN, P. ; YOU, Y. ; Studies on the binder of fly ash – fluorgypsum – cement. **Cement end concret Research**. Vol. 28. N<sup>o</sup> 1. p. 135-140. 1998.

YAN, P.; YANG, W.; QIN, X.; YOU, Y. Microstructure and properties of the bider of fly ash – fluorogypsum – Portland cement. **29<sup>o</sup> Cement end Concret Research**. 1999. p. 349-354.

## 10 APÊNDICE

## **A - TÉCNICAS DE ANÁLISE**

Este capítulo apresenta o princípio básico de que a micro-estrutura é o fator determinante das propriedades dos materiais. E é por este motivo que se torna importante estudá-la. Faz inicialmente uma revisão dos conceitos e em seguida discutem-se de maneira sucinta as principais técnicas e métodos de análise microestrutural: difração de raios-X, microscopia ótica e eletrônica, e as principais técnicas indiretas como as análises térmicas.

### **A.1 Difração de raios X**

Com a descoberta do raios-X por Rontgen em 1895, três técnicas desenvolveram-se com o uso desta radiação.

A primeira e a mais antiga é a radiografia de raios-X, a qual se baseia no fato de que a absorção relativa dos raios-X por uma substância é função do número atômico médio e da densidade da substância, que se admite conhecida, desenvolvendo toda a faixa de diagnósticos para médicos e uso industrial.

A segunda técnica surgiu em 1913 quando Max Von Laue realizou um trabalho de difração em um mono cristal confirmando as propriedades ondulatórias, onde seu comprimento de onda poderia ser regulado em uma dimensão tão pequena quanto a distância entre os átomos nos cristais. Deste experimento desenvolveu-se o campo da cristalografia de raios-X do qual a difração do pó por raios-X é um importante segmento.

E a terceira técnica é a Espectrometria de raios-X, também fundamentada em experimentos efetuados no início do século vinte, sendo a aplicação da espectrometria por fluorescência de raios-X tem sobressaído nos últimos anos. (MARTINS & MACHADO,1986)

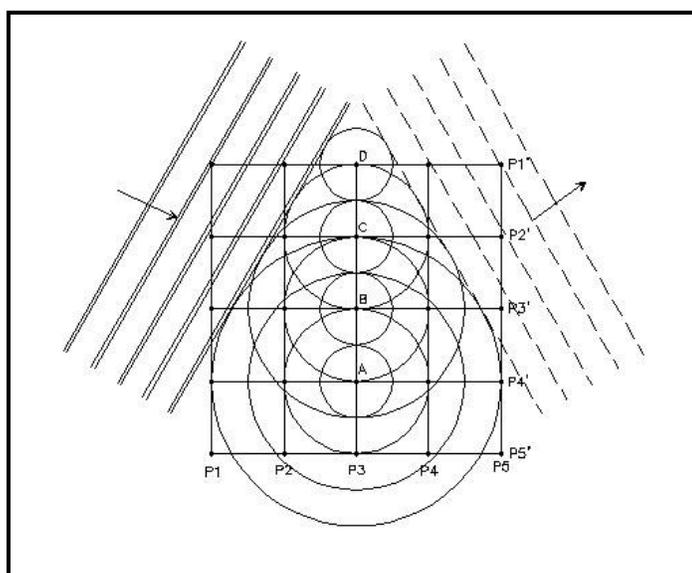
O termo espectrômetro de raios-X, referia-se a um sistema incorporando um cristal de difração como meio de medida. Modernamente espectrometria de raios-X refere-se a

um instrumento empregando um cristal ou grade para separação de um raio policromático de radiação em seu comprimento de ondas básicas.

Neste trabalho foi utilizada a Difratometria de raios-X pelo método do Pó. Difratometria em Pó é, utilizada principalmente para a identificação de compostos por seus espectros característicos.

### A.1.1 Origem do Fenômeno da Difração

Dentro de um campo eletromagnético alternado, um elétron oscila com a mesma freqüência. Um feixe de raios-X pode ser considerado como uma onda eletromagnética viajando através do espaço; isto irá causar, sobre todos os elétrons, um patamar oscilante. Cada elétron pode, então, ser considerado como um oscilador separado emitindo radiação eletromagnética na mesma freqüência da radiação primária, estas ondas separadas combinam para dar uma onda resultante do átomo. A amplitude desta onda depende do número de elétrons-onda e suas respectivas diferenças de fases. As diferenças de fases dependem da diferença no tamanho do patamar (MARTINS & MACHADO, 1986).



**Figura A.1 – Origem do fenômeno de Difração (Martins & Machado, 1986)**

Os pontos formados pela intersecção dos planos representam os centros de espalhamento a uma distância “d” entre um e outro (a distância “d” é distância formada entre os planos P1, P2, P3, P4, P5, P1’, P2’, P3’, P4’ e P5’); as ondas circulares emitidas de A, B, C e D quando irradiadas pela frente de onda estão indicadas na Figura A.1.

Neste caso, o comprimento de onda, isto é a distância entre duas linhas cheias, a distância “d” e o ângulo de incidência tem sido escolhida de tal forma que o elétron oscilante em fase com cada um outro terá uma diferença de uma fase.

A onda resultante formada na direção indicada (linha tracejada), composta de uma onda simples de todos os centros sucessivos com uma fase mútua diferente de dois, como a frente de onda é tangencial ao primeiro círculo de D, ao segundo de C, ao terceiro de B, e assim sucessivamente. Na direção BP3 uma onda similar resulta com a mesma amplitude e a diferença de fase um. A tangente para o primeiro círculo de C e o segundo círculo de B irá dar uma frente de onda com intensidade zero, como naquela direção a diferença de fase entre as ondas emitidas pelo centro D e o centro C é exatamente 1/12, o que parece que estas duas ondas se cancelam ; da mesma forma para ondas que se originam de A e B (MARTINS & MACHADO, 1986).

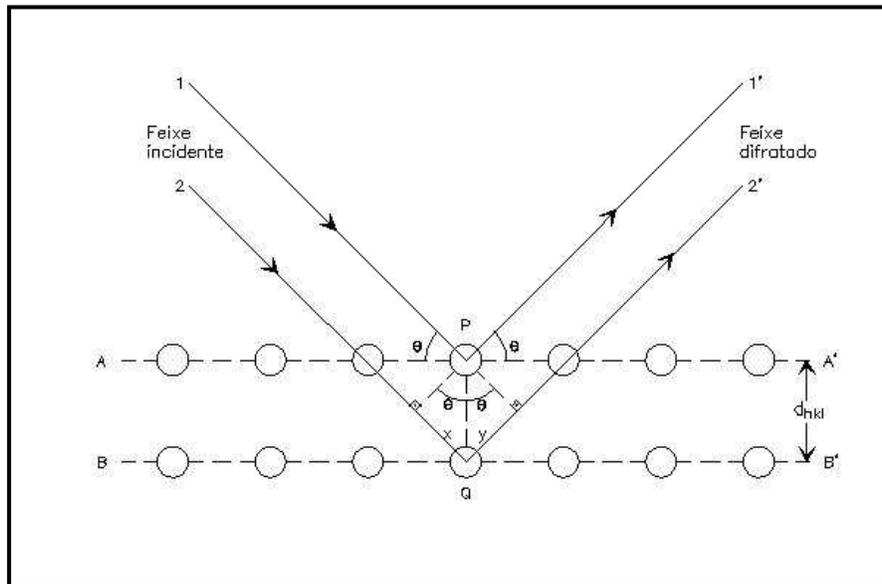
### **A.1.2. Condições para Difração**

Quando um feixe de raios-X monocromático cai sobre um retículo cristalino, um feixe difratado irá resultar somente em uma direção. É necessário que a onda emitida pelos átomos individuais estejam em fase umas com as outras na direção de observação. A Figura A.1 ilustra este caso para fileiras de átomos separados pela distância “d”. Geralmente fica mais fácil de visualizar um retículo cristalino como sendo um conjunto de planos paralelos separados pela distância “d”. Todos os átomos estão situados nestes planos. No caso da Figura A.1, as linhas P1 a P5 ou P1’ a P5’ podem ser consideradas como os planos em duas dimensões. A difração pode agora ser encontrada em duas etapas. Na primeira etapa, a onda emitida por todos os átomos

contidos em um plano simples devem estar em fase, e na segunda, o espalhamento de ondas por planos sucessivos também devem estar em fase.

A primeira condição é satisfeita se o raio incidente, o raio difratado e a normal da superfície refletante estiverem no mesmo plano e se o ângulo de incidência for igual ao ângulo de reflexão. Pode-se provar que todas as ondas espalhadas pelos átomos neste plano estão em fase.

A segunda condição dois raios paralelos atingem um conjunto de planos de um cristal num ângulo  $\theta$  e são espalhados (Figura A.2) (MARTINS & MACHADO, 1986).



**Figura A.2 – Condições para ocorrer difração de Raios-X (Callister, 2001)**

Considerando os dois planos paralelos de um átomo  $A-A'$  e  $B-B'$  e que estão separados por um espaçamento interplanar  $d$  (figura A.2). Incidindo nestes dois planos um feixe de Raios-X paralelo, monocromático e em fase com comprimento de onda  $\lambda$  de acordo com um ângulo  $\theta$ . Os raios 1 e 2 deste feixe, são dispersos pelos átomos  $P$  e  $Q$ . Caso a diferença entre os comprimentos das trajetórias entre  $1-P-1'$  e  $2-Q-2'$  ( $x + y$ ) seja igual a um número inteiro,  $n$ , de comprimento de onda,  $\lambda$ , uma

interferência construtiva dos raios dispersos 1' e 2' também irá ocorrer em um ângulo de  $\theta$  em relação aos planos (CALLISTER, 2001)

A condição para difração, portanto, é:

$$n\lambda = x + y \quad (\text{A.1})$$

ou 
$$n\lambda = d \sin \theta + d \sin \theta = 2d \sin \theta \quad (\text{A.2})$$

A equação A.2 é conhecida como Lei de Bragg (CALLISTER, 2001)

A magnitude da distância entre dois planos adjacentes e paralelos de átomos ( $d$ ) é uma função dos índices de Miller ( $h$ ,  $k$  e  $l$ ), bem como dos parâmetros de rede.

### A.1.3 Equipamentos de Difração de Raios-X

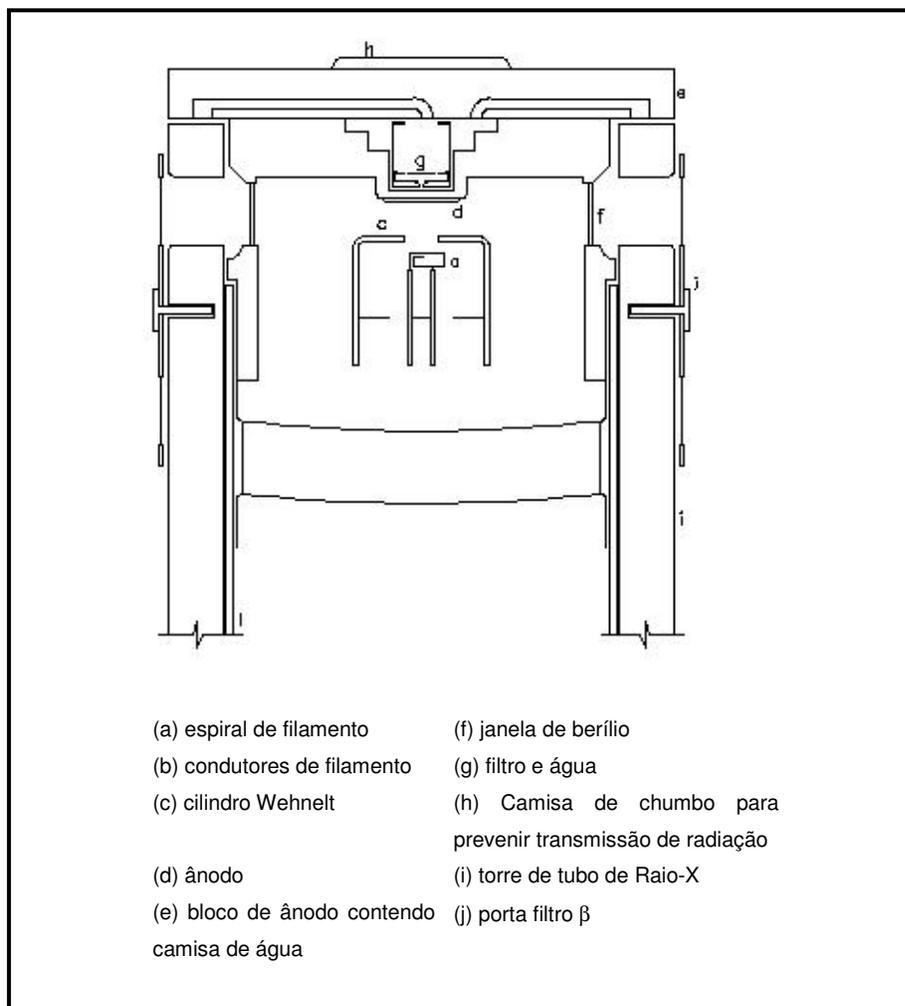
O equipamento necessário para a difração de Raios-X pelo método do pó é constituído pela *fonte de radiação*, pelo *difratômetro* e pelo *detetor e equipamento de contagem*.

A fonte de radiação (Figura A.3) é constituída de tubo de raio-X e gerador de alta voltagem. A função do gerador e do tubo de raio-X é produzir uma fonte de radiação estável. O tubo de raio-X consiste de um filamento de Tungstênio (a) e um Ânodo (d). A passagem de corrente através da espiral de Tungstênio leva-o ao rubro com emissão de elétrons. A conversão de elétrons em raios-X é ineficiente na ordem de 1%, a maioria da energia dos elétrons é convertida em calor que é resfriado com água filtrada (g) e direcionada em um jato na parte traseira do ânodo. O filamento é localizado em um cilindro de Wehnelt (c) para garantir o foco fino do raio de elétrons. Os raios-X produzidos são conduzidos para fora do tubo pelas janelas de Berílio (f) e um dispositivo de filtragem (j).

Os tubos de difração de raio-X são normalmente construídos com quatro janelas.

O filamento é de formato retangular e quando visto do lado das faces longas irá dar duas janelas denominadas “Line Foci” e quando visto do lado das faces curtas “Spot foci” (MARTINS & MACHADO,1986).

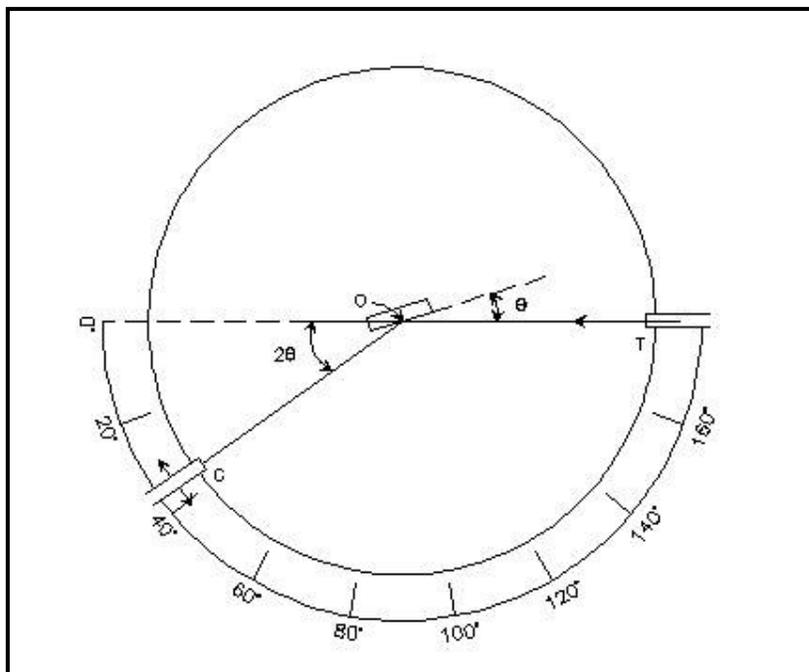
O gerador fornece a alta voltagem (kv) e a corrente de filamento (mA) para o tubo de raios-X .



**Figura A.3 – Configurações de um tubo de Raio-X (Martins & Machado,1986)**

O difratômetro é um aparelho utilizado para determinar os ângulos nos quais ocorre a difração em amostras pulverizadas (Figura A.4). A amostra (A) colocada em

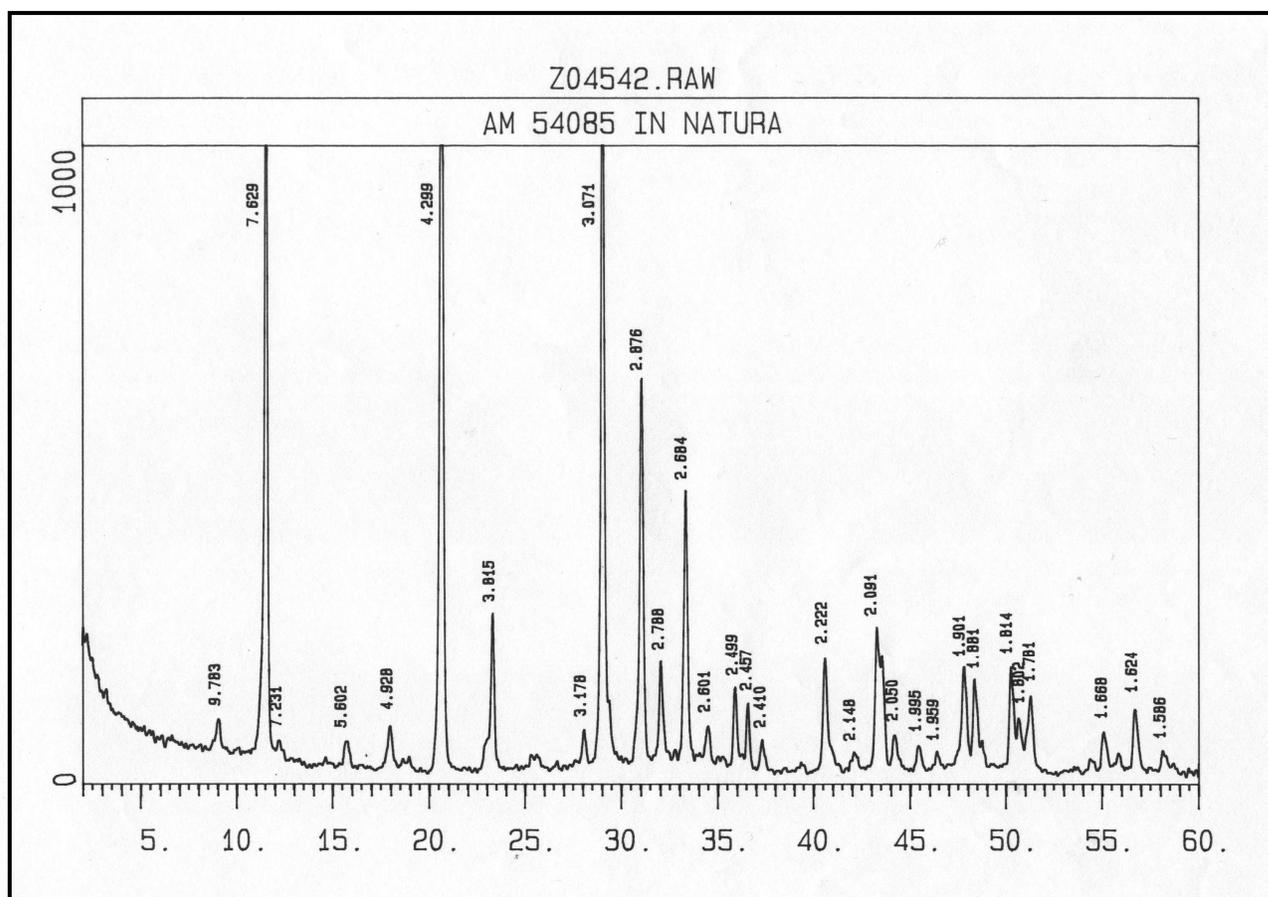
um porta amostra de forma plana é sustentada de tal maneira que são possíveis rotações em torno do eixo (O). O feixe de Raios-X monocromático é gerado no ponto (T), e as intensidades dos feixes difratados são detectadas mediante o uso de um contador (C). O contador está montado sobre uma plataforma móvel, que pode ser girada em torno do eixo (O); a sua posição angular em termos de  $2\theta$  está marcada sobre uma escala graduada. A plataforma e a amostra estão acopladas mecanicamente, de tal modo que uma rotação da amostra por um ângulo  $\theta$  é acompanhada de uma rotação do contador que equivale a  $2\theta$ ; isso garante que os ângulos de incidência e reflexão sejam mantidos iguais. (CALLISTER, 2001)



**Figura A.4 – Esquema de um difratômetro de Raios-X (Callister, 2001)**

O Detetor e Equipamento de Contagem tem a função de converter o fóton individual de raio-X em pulso elétrico que por sua vez são contados ou integrados por um equipamento de contagem.

O registro é feito em forma de difratograma com picos intensos e outros menos intensos, *contendo* o valor de  $d\text{\AA}$ , dependendo do ângulo de incidência dos raios-X, característicos para cada substância pura cristalina (Figura A.5).



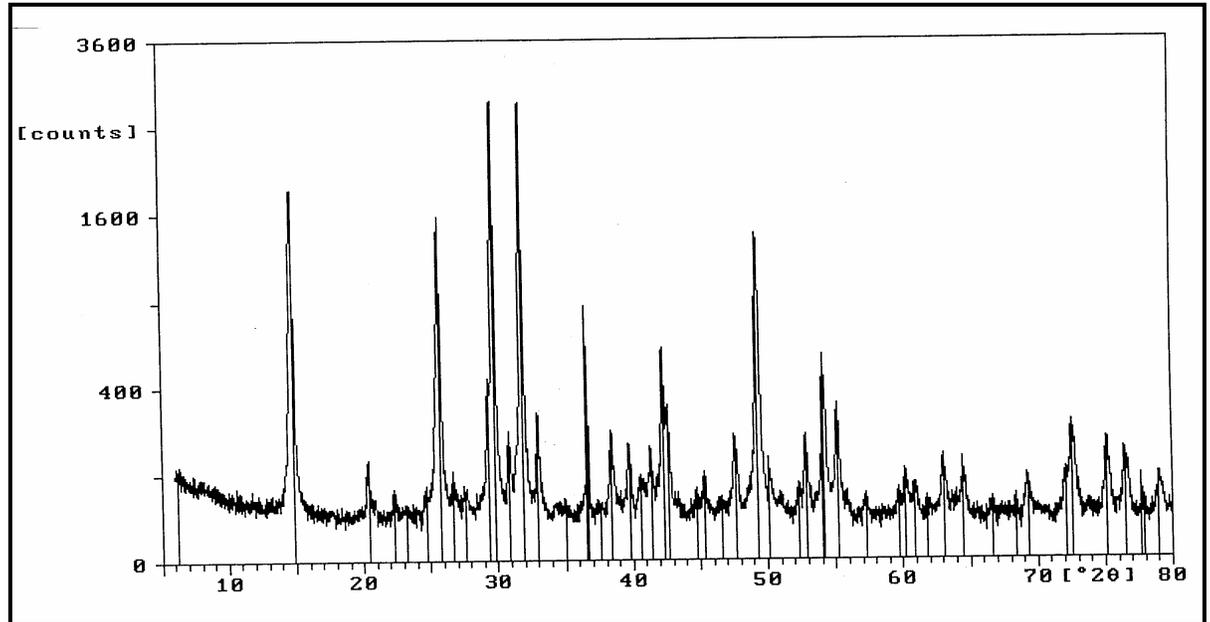
**Figura A.5 – Difratogramas de misturas de gesso e cimento Portland**

Ou através de uma listagem difratográfica e um difratograma *sem* o valor de  $d\text{\AA}$  em cada pico, sendo que a análise deverá ser feita em conjunto, listagem difratográfica x difratograma (Figura A.6).

No exemplo a seguir apresentamos os resultados obtidos por meio de uma listagem difratográfica e um difratograma de gesso calcinado a  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura A.6).

## Listagem Difratoográfica

Angle [°2θ]	d-value α1 [Å]	d-value α2 [Å]	Peak Width [°2θ]	Peak int [counts]	Back.int [counts]	Rel. Int [%]	Signif.
14.830	5.9686	5.9834	0.160	1764	3725	64.0	15.55
20.390	4.3519	4.3627	0.060	98	24	3.6	0.77
22.310	3.9815	3.9914	0.200	30	24	1.1	1.63
23.225	3.8267	3.8362	0.480	10	24	0.4	1.00
24.760	3.5928	3.6018	0.240	3	24	1.3	1.34
25.755	3.4562	3.4648	0.180	1529	24	55.5	19.47
26.685	3.3379	3.3461	0.060	83	24	3.0	1.02
27.625	3.2264	3.2344	0.320	34	24	1.2	1.37
29.310	3.0446	3.0522	0.080	317	24	11.5	0.76
29.775	2.9981	3.0056	0.180	2746	24	99.6	29.72
30.880	2.8933	2.9005	0.100	196	24	7.1	1.40
31.870	2.8056	2.8126	0.200	2756	24	100.0	35.93
33.015	2.7109	2.7176	0.080	266	24	9.6	1.36
35.010	2.5609	2.5672	0.400	16	24	0.6	1.09
36.605	2.4529	2.4590	0.080	480	24	17.4	3.68
36.690	2.4474	2.4535	0.040	222	24	8.1	1.07
37.550	2.3933	2.3992	0.400	14	23	0.5	1.00
38.435	2.3402	2.3460	0.180	199	23	7.2	4.96
39.735	2.2666	2.2722	0.120	156	23	5.7	1.72
41.370	2.1807	2.1861	0.120	125	23	4.6	1.42
42.290	2.1353	2.1406	0.140	576	23	20.9	5.64
42.640	2.1186	2.1239	0.100	299	23	10.9	1.23
44.720	2.0248	2.0298	0.160	30	23	1.1	0.86
45.365	1.9975	2.0025	0.200	56	23	2.0	2.09
46.590	1.9478	1.9526	0.320	20	23	0,7	0.76
47.645	1.9071	1.9118	0.120	172	23	6,2	1.27
49.340	1.8455	1.8501	0.180	1325	23	48,1	13.88
50.140	1.8179	1.8224	0.080	117	23	4,2	0.98
52.345	1.7464	1.7507	0.200	41	22	1,5	0.93
52.840	1.7312	1.7355	0.280	182	22	6,6	9.24
54.095	1.6939	1.6981	0.060	412	22	15,0	1.24
54.170	1.6918	1.6960	0.080	520	22	18,9	0.97
55.170	1.6634	1.6676	0.080	253	22	9,2	1.05
57.240	1.6081	1.6121	0.320	24	22	0,9	1.66
59.705	1.5475	1.5513	0.200	36	22	1,3	1.00
60.220	1.5355	1.5393	0.280	79	22	2,9	4.87
60.920	1.5195	1.5233	0.280	50	22	1,8	2.56
61.845	1.4990	1.5027	0.240	18	22	0,6	1.23
63,040	1.4734	1.4770	0.280	108	22	3,9	5.21
64.460	1.4443	1.4479	0.060	117	22	4,2	1.67
66.625	1.4025	1.4060	0.400	18	22	0,7	2.18
68.415	1.3701	1.3735	0.240	14	22	0,5	1.28
69.280	1.3551	1.3585	0.240	66	22	2,4	2.56
72.105	1.3088	1.3121	0.240	81	22	2,9	1.51
72.560	1.3017	1.3050	0.120	228	22	8,3	1.38
75.140	1.2633	1.2665	0.240	146	22	5,3	3.79
76.500	1.2442	1.2473	0.240	132	22	4,8	2.99
77.710	1.2278	1.2309	0.080	46	22	1,7	0.86
77.920	1.2250	1.2281	0.120	25	22	0,9	0.88
79.000	1.2110	1.2140	0.200	72	22	2,6	1.90



**Figura A.6 –Difratograma do gesso calcinado a 110°C**

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

#### **A.1.4 Interpretação de diagramas de difração do pó**

Cada material cristalino da origem a um único difratograma de Raios-X que nos fornece uma identificação qualitativa. Em 1938 Hanawalt, Rinn e Frevel da Dow Chemical Company publicaram um fichário com aproximadamente 1000 difratogramas. A American Society for Testing and Materials (ASTM) assumiu a continuidade deste sistema no ano de 1940.

No sistema de cartão padronizado de 3 x 5", os dados do difratograma são guardados. (Figura A.7).

<b>9-414</b>											
<b>d</b>	9,73	5,61	3,88	9,73	<b>6CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.3SO<sub>2</sub>.31H<sub>2</sub>O H</b>						
<b>I/I<sub>1</sub></b>	100	80	50	100	<b>Calcium Aluminium Sulfate Hidrate (Etringite)</b>						
Rad. CuKα <sub>1</sub> λ 1.5405 Filter N1 Dia					<b>dÅ</b>	<b>I/I<sub>1</sub></b>	<b>hkl</b>	<b>dÅ</b>	<b>I/I<sub>1</sub></b>	<b>hkl</b>	
Cuit off I/I <sub>1</sub> Diffractometer											
Ref. Nat. Bur. Standarts Circ. 539 8 (1958)											
Sys Hexagonal			S.G. D <sub>6h</sub> - P <sub>g57</sub> /MMC		9.73	100	100	2.616	20	312	
S <sub>0</sub> 11.23		b <sub>0</sub>		c <sub>0</sub> 21.44	8.86	13	101	2.564	45	216	
α		β		γ	5.61	80	110	2.524	5	313	
D <sub>x</sub> 1754					4.98	25	112	2.487	3	224	
					4.86	7	200	2.434	3	400	
8 <sub>a</sub> α		n ωβ		8 <sub>γ</sub>	4.69	35	104	2.422	3	118	
2V		D		mp	4.41	3	314	2.401	11	306	
Ref.				Color Colorless	4.02	11	203	2.347	5	208	
					3.88	50	114	2.230	21	320	
Simple Prepared at NBS. Spect. Anal. Showed 0.1-1.0%					3.67	7	210	2.209	45	226	
SI, SR; 0.01-0.0% Ag, Cr, Cu, Mg, Na, Pb. 0.001-01%					3.60	15	204	2.185	9	322	
B, Ba, Cs, Fe, Mn, Ni, Sn, Zn, Zr					3.48	30	212	2.154	25	316	
Patent Made AT 25°C					3.27	5	213	2.130	3	323	
					3.24	20	300	2.124	5	410	
					3.016	7	116	2.081	5	412	
					2.806	7	220	2.062	5	324	
					2.773	40	304	2.033	1	413	
REPLACES 2-0059					2.714	7	222	2.027	1	317	
					2.697	13	310	1.979	3	325	
					2.680	7	008	PUS 11	Lines to	1.76	
					8						

- (a) – Código de 6 dígitos. Os dois primeiros indicam o ano sobre a primeira entrada. Os quatro seguintes dão o número seqüencial da entrada para este ano;
- (b) – As três linhas “d” mais intensas e a linha “d” maior;
- (c) – As intensidades correspondentes a estas linhas;
- (d) – Condições experimentais utilizadas para obter o difratograma;
- (e) - Dados cristalográficos;
- (f) - Dados físicos;
- (g) - Análise química, preparação da amostra etc...
- (h) – Nome químico, fórmula e pseudônimo;
- (i) – Valores listados de “d”, intensidade relativas e índice de Miller.

*Estrela – dados de alta confiabilidade.*

*Esfera vazada – dados de baixa confiabilidade.*

*Canto superior direito.*

**Figura A.7 –Cartão ASTM de arquivo de difração de pó da Etringita**

Na Figura A.7 os dados apresentados referem-se ao composto etringita no seu estado puro. Para analisar o difratograma da mistura da Figura A.5, e Figura A.6 necessita-se de outros cartões que estão resumidos na Tabela A.1(a) a Tabela A 1(m), com os diversos elementos possivelmente contidos nas misturas em estudo.

**Tabela A.1(a) a A 1(m) – Tabelas para identificação dos compostos, resumo dos cartões da ASTM.**

**A 1(a) - Gipsita**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
7,56	100	11,70	1,990	4	45,58
4,27	51	20,80	1,955	2	46,46
3,79	21	23,45	1,898	16	47,85
3,16	3	28,20	1,880	8	48,40
3,06	57	29,18	1,843	1	49,40
2,867	5	31,18	1,812	10	50,30
2,786	5	32,10	1,796	4	50,79
2,679	28	33,42	1,778	10	51,34
2,530	1	35,45	1,711	1	53,48
2,495	6	35,96	1,684	1	54,45
2,450	4	35,65	1,662	4	55,22
2,400	4	37,44	1,645	2	55,84
2,216	6	40,68	1,621	6	56,74
2,139	1	42,22	1,599	1	57,58

**A 1(b) - Etringita**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
9,73	100	9,02	2,434	1	36,90
8,86	10	9,97	2,422	14	37,08
5,61	60	15,79	2,401	0,5	37,41
4,98	35	17,80	2,347	6	38,31
4,86	8	18,23	2,230	12	40,40
4,69	59	18,91	2,209	62	40,82
4,41	0,2	20,11	2,185	8	41,29
4,02	8	22,10	2,154	30	41,90
3,88	80	22,90	2,130	3	42,40
3,67	8	24,22	2,124	8	42,52
3,48	50	25,47	2,033	0,1	44,52
3,27	10	27,24	2,027	2	44,66
3,24	32	27,50	1,979	5	45,81
3,016	3	29,59	1,940	17	46,80
2,806	12	31,86	1,898	3	45,85
2,773	64	32,26	1,873	2	48,56
2,714	3	32,97	1,852	10	49,15
2,697	3	33,19	1,833	4	49,69
2,680	11	33,40	1,813	3	50,28
2,616	30	34,25	1,812	3	50,30
2,564	75	34,97	1,750	2	52,23
2,594	5	35,53	1,700	5	53,86
2,487	6	36,08	1,600	6	55,28
			1,620	2	56,78

**A 1(c) - monosulfoaluminato**

dÅ	l	2θ	dÅ	l	2θ
4,88	6	18,16	2,600	5	34,46
4,72	6	18,78	2,450	60	36,65
4,46	60	19,89	2,410	50	37,27
3,99	1	22,26	2,330	16	38,61
3,65	6	24,36	2,250	16	40,02
2,870	70	31,13	2,190	15	41,19
2,730	40	32,77	1,990	17	45,58

**A 1(d) - Óxido de cálcio**

dÅ	l	2θ	dÅ	l	2θ
2,778	34	32,20	1,701	45	53,85
2,405	100	37,35			

**A 1(e) – Carbonato de cálcio**

dÅ	l	2θ	dÅ	l	2θ
3,86	10	23,02	1,913	17	47,49
2,845	3	31,42	1,875	17	48,51
2,495	15	35,96	1,626	4	56,56
2,285	18	39,40	1,604	8	57,40
1,927	5	47,12	1,587	2	58,06

**A 1(f) – Ferroaluminato**

dÅ	l	2θ	dÅ	l	2θ
7,24	60	12,21	3,63	20	24,50

**A 1(g) - Belita - C<sub>2</sub>S**

dÅ	l	2θ	dÅ	l	2θ
4,65	20	19,06	2,196	12	41,18
3,83	4	23,20	2,189	46	41,20
3,79	4	23,45	2,166	12	41,66
3,38	12	26,35	2,132	10	42,36
3,24	15	27,50	2,094	25	43,16
3,18	4	28,03	2,042	25	44,32
3,05	22	29,24	2,026	25	44,69
2,878	12	31,04	2,020	20	44,83
2,813	12	31,78	1,984	12	45,69
2,794	100	32,00	1,913	12	47,49
2,748	78	32,56	1,897	11	47,92
2,732	12	32,75	1,893	11	48,02
2,718	12	32,92	1,847	3	49,29
2,609	48	34,34	1,820	1	50,07
2,546	10	35,22	1,809	2	50,39
2,452	11	36,62	1,803	3	50,58
2,434	11	36,90	1,791	1	50,95
2,409	11	37,30	1,768	1	51,65
2,322	2	38,74	1,762	1	51,84
2,305	2	39,04	1,718	1	53,27
2,282	12	39,45	1,707	1	53,65

**A 1(h) - Anidrita**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
3,49	100	25,44			

**A 1(i) - Carboaluminato**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
7,600	100	11,63	2,450	30	36,65
4,930	1	17,97	2,420	7	37,11
4,410	1	20,11	2,340	16	38,43
3,970	1	22,37	2,290	8	39,31
3,800	45	23,39	2,240	6	40,20
3,650	1	24,36	2,170	8	41,58
3,460	1	25,72	2,110	8	42,82
3,300	1	26,99	2,010	9	45,06
3,170	1	28,12	1,940	7	46,80
3,040	1	29,35	1,880	8	48,36
2,8600	25	31,25	1,860	8	48,90
2,780	8	32,19	1,830	10	49,80
2,730	8	32,77	1,690	6	54,23
2,530	10	35,45	1,666	2	55,10
2,490	8	36,06	1,640	8	56,02

**A 1(j) – Aluminato tricálcico**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
8,820	1	10,02	2,204	14	40,92
6,830	6	12,95	2,181	2	41,36
6,230	1	14,20	2,138	2	42,23
5,400	1	16,40	2,097	3	43,10
5,090	5	17,41	2,021	0,5	44,80
4,240	12	20,95	1,955	4	46,46
3,820	2	23,33	1,940	0,5	46,80
3,700	1	24,00	1,908	47	47,62
3,330	4	26,74	1,893	6	48,02
3,250	1	27,40	1,838	2	49,55
3,120	1	28,58	1,824	4	49,96
3,050	3	29,24	1,799	1	50,70
2,993	100	29,83	1,785	0,5	51,13
2,834	8	31,54	1,763	0,5	51,81
2,787	13	32,09	1,740	0,5	52,25
2,700	100	33,14	1,706	0,5	53,68
2,581	3	34,73	1,695	0,5	54,05
2,512	1	35,71	1,675	0,5	54,75
2,477	1	36,23	1,646	0,5	55,81
2,413	8	37,23	1,627	1	56,52
2,384	5	37,70	1,618	2	56,85
2,355	2	38,18	1,610	0,5	57,16
2,277	4	39,54			

**A 1(k) – Hidróxido de Cálcio**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
4,900	74	18,09	1,934	10	46,94
3,110	23	28,66	1,796	40	50,79
2,628	100	34,09	1,687	21	54,34
2,447	3	36,69	1,634	1	56,25

**A 1(l) – Ferro Aluminato tetracálcico**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
7,240	60	12,21	2,430	2	37,00
3,63	20	24,50	2,200	15	40,98
3,39	2	26,26	2,150	15	41,98
2,770	25	32,29	2,040	42	44,36
2,670	35	33,54	1,920	54	47,30
2,630	100	34,06	1,860	22	48,90
2,570	15	34,88	1,810	22	50,36
			1,730	9	52,87

**A 1(m) - Aluminato tetracálcico hidratado**

dÅ	I	2θ	dÅ	I	2θ
8,200	100	10,78	2,450	90	36,65
4,620	1	19,19	2,440	70	36,80
4,090	28	21,71	2,340	6	38,43
3,880	70	22,90	2,307	2	39,02
3,800	70	23,39	2,270	2	39,67
3,630	10	24,50	2,210	7	40,79
3,035	100	29,40	2,169	1	41,60
2,873	7	31,10	2,047	4	44,20
2,830	20	31,58	1,983	5	45,71
2,720	60	32,90	1,939	2	46,81
2,619	30	34,21	1,860	1	48,90
2,590	10	34,60	1,773	21	51,49
2,547	60	35,21	1,754	3	52,10
2,490	10	36,06	1,688	1	54,29
2,466	5	36,40	1,662	3	55,22
			1,628	20	56,49

Com base na Tabela A.1 pode-se analisar o difratograma da Figura A.5 e A.6. O difratograma da Figura A.5 é de uma mistura de gesso e cimento Portland na proporção de 75% de gesso e 25% de cimento e os prováveis elementos encontrados na mistura estão relacionados na Tabela A.2 com as suas respectivas distâncias interplanar, intensidades e o ângulo  $2\theta$  onde o elemento se encontra.

O primeiro pico ocorreu no ângulo de  $9,0^\circ$   $2\theta$  com uma distância interplanar de  $9,783\text{Å}$ , caracterizado pela tabela da ASTM o elemento etringita. O segundo pico, mais intenso, se deu no ângulo  $11,7^\circ$   $2\theta$  medindo  $7,629\text{Å}$ , que de acordo com a tabela da ASTM caracteriza como o elemento gipsita. E assim sucessivamente se procede a análise do difratograma.

Observamos que existe uma pequena diferença da distância interplanar (dÅ), dos resultados obtidos, para o mesmo ângulo  $2\theta$  da Tabela A.1. Por exemplo, a gipsita

foi encontrada no difratograma no ângulo  $11,7^{\circ}2\theta$  medindo  $7.629\text{\AA}$ , e pela Tabela da ASTM o resultado para o mesmo ângulo é de  $7.56\text{\AA}$ . Isso ocorre devido os valores encontrados na Tabela A.1 serem de elementos puros e no caso da Tabela A.2 encontram-se pequenas impurezas presentes nos materiais constituintes.

**Tabela A.2 – Resultado da análise do difratograma da mistura de 75% de gesso e 25% de Cimento Portland da Figura A.5**

dÅ	2θ	Compostos	dÅ	2θ	Compostos
9,783	9,02	Etringita	2,410	37,27	Monosulfoaluminato
7,629	11,70	Gipsita	2,222	40,68	Gipsita
7,231	12,21	Ferroaluminato	2,148	42,22	Gipsita
5,802	15,79	Etringita	2,091	43,16	Beleita
4,828	18,23	Etringita	2,050	44,32	Belita
4,299	20,80	Gipsita	1,995	45,58	Gipsita
3,815	23,45	Gipsita	1,959	46,46	Gipsita
3,178	28,20	Gipsita	1,901	47,85	Gipsita
3,071	29,18	Gipsita	1,881	48,40	Gipsita
2,876	31,18	Gipsita	1,814	50,30	Gipsita
2,788	32,20	Óxido de Cálcio	1,802	50,58	Belita
2,684	33,42	Gipsita	1,781	51,34	Gipsita
2,601	34,46	Monosulfoaluminato	1,668	55,22	Gipsita
2,499	35,96	Gipsita	1,624	56,56	Carbonato de Cálcio
2,457	36,65	Gipsita	1,586	57,58	Gipsita

O difratograma da Figura A.6 é do gesso calcinado a  $110^{\circ}\text{C}$ . Analisando a listagem difratográfica, o difratograma e utilizando a Tabela A.1, os prováveis elementos encontrados estão relacionados na Tabela A.3, com as suas respectivas distâncias interplanar, intensidades e o ângulo  $2\theta$  onde o elemento se encontra.

Para a análise do difratograma deve-se enumerar todos os picos do difratograma com as distâncias interplanares obtidas na listagem difratográfica. Podemos observar que o primeiro pico significativo ocorreu no ângulo  $14,83^{\circ} 2\theta$  com uma distância interplanar de  $5.96\text{\AA}$ , caracterizando pela tabela da ASTM o elemento Aluminato tricálcico. O segundo pico foi em  $20.39^{\circ} 2\theta$  e distância interplanar de  $4.35\text{\AA}$  que pela

tabela da ASTM caracteriza o elemento carboaluminato, e assim, sucessivamente, é analisado o difratograma e o resultado obtido está descrito na Tabela A.3.

Observa-se que existe uma pequena diferença da distância interplanar ( $d\text{\AA}$ ), dos resultados obtidos, para o mesmo ângulo  $2\theta$  da Tabela A.1. Isso ocorre devido os valores encontrados na Tabela A.1 serem de elementos puros e no caso da Tabela A.3 encontram-se pequenas impurezas devido ao processo industrial.

**Tabela A.3 - Resultado da análise do difratograma do gesso calcinado a 110°C da Figura A.6**

$d\text{\AA}$	$2\theta$	Compostos	$d\text{\AA}$	$2\theta$	Compostos
5.9686	14.830	Aluminato tricálcico	1.9478	46.590	Aluminato tricálcico
4.3519	20.390	Carboaluminato	1.9071	47.645	Aluminato tricálcico
3.9815	22.310	Carboaluminato	1.8455	49.340	Gipsita
3.8267	23.225	Carboaluminato	1.8179	50.140	Belita
3.5928	24.760	Anidrita	1.7464	52.345	Aluminato tricálcico
3.4562	25.755	Carboaluminato	1.7312	52.840	Ferro aluminato
3.3379	26.685	Aluminato tricálcico	1.6939	54.095	tetra.
3.2264	27.625	Belita	1.6918	54.170	Aluminato tricálcico
3.0446	29.310	Carboaluminato	1.6634	55.170	Carboaluminato
2.9981	29.775	Aluminato tricálcico	1.6081	57.240	Carboaluminato
2.8933	30.880	Belita	1.5475	59.705	Aluminato tricálcico
2.8056	31.870	Etringita	1.5355	60.220	
2.7109	33.015	Aluminato tricálcico	1.5195	60.920	
2.5609	35.010	Etringita	1.4990	61.845	
2.4529	36.605	Belita	1.4734	63,040	
2.4474	36.690	Hidróxido de cálcio	1.4443	64.460	
2.3933	37.550	Gipsita	1.4025	66.625	
2.3402	38.435	Carboaluminato	1.3701	68.415	
2.2666	39.735	Aluminato tetracálcico	1.3551	69.280	
2.1807	41.370	hid;	1.3088	72.105	
2.1353	42.290	Aluminato tricálcico	1.3017	72.560	
2.1186	42.640	Aluminato tricálcico	1.2633	75.140	
2.0248	44.720	Carboaluminato	1.2442	76.500	
1.9975	45.365	Aluminato tricálcico	1.2278	77.710	
		Gipsita	1.2250	77.920	
			1.2110	79.000	

A técnica de difração de Raios-X apresenta um alto potencial tecnológico e é uma técnica importante pois permite observar problemas antes que o mesmo aconteça. É importante salientar que neste trabalho a análise dos difratogramas será qualitativa, com a indicação dos compostos mais prováveis presentes nas misturas.

## A.2 Microscopia

No estudo dos materiais de construção, sabe-se que há uma relação de dependência entre o processo de fabricação, sua microestrutura e suas propriedades. Desta forma, a análise de imagens vem colaborar para melhorar o nível de conhecimento destes materiais, sendo uma ferramenta importante para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e o seu uso.

Alguns elementos estruturais são de dimensão macroscópica podendo ser observados a olho nu. No entanto, as maiorias dos produtos internos desses materiais, apresentam dimensões microscópicas e seus detalhes devem ser observados em microscópios ópticos ou eletrônicos. Estes microscópios auxiliam na investigação das microestruturas de todos os tipos de materiais (FERREIRA, 2001).

Inicialmente, o estudo estava limitado à capacidade de aumento e resolução do microscópio óptico, com a descoberta dos raios-X em 1895 e quando Von Laue (1912) fez passar um feixe de raios-X por uma amostra monocristalina, e pôs um filme fotográfico após a amostra, o resultado foi que após revelar o filme este apresentava pontos de sensibilizados pelos raios-X difratados estas experiências despertaram grands interesses na época. Conseqüentemente em 1927, Davisson e Germer, simultaneamente com Thompson e Reid, provaram a natureza ondulatória do elétron e, em 1936, Mitchel e Powers provaram o mesmo para o nêutron. A partir dessa comprovação surgiu a idéia de usar os elétrons para gerar imagens, pois estes possuem cargas elétricas, portanto poderiam ter sua trajetória alterada por lentes magnéticas. Desta forma, em 1932, Knoll e Ruska criaram o primeiro microscópio, que era do tipo transmissão.

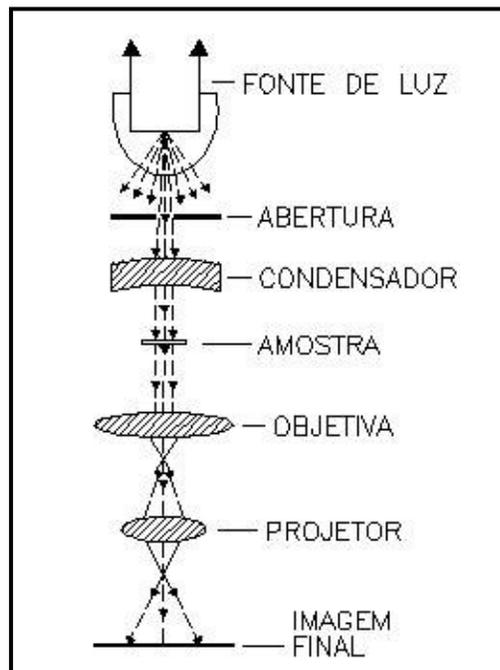
No microscópio eletrônico de transmissão o feixe de elétrons deve atravessar uma amostra muito fina, ou pelo menos que seja “transparente” a elétrons. As interações do feixe com os átomos da amostra gera uma imagem numa placa pintada com uma tinta fluorescente, com isso pode-se criar uma figura de difração de uma fase observada no material e, conseqüentemente, determinar a estrutura cristalina de cada fase constituinte do material. As imagens geradas são somente em duas direções, pois

o feixe atravessa a amostra, mostrando exclusivamente ao interior do material, não sendo possível observar a superfície das amostras (FERREIRA, 2001).

Em 1935, o próprio Knoll, gerou a primeira imagem por varredura de elétrons. Por esse método, o feixe não fica fixo, mas varre a seção da amostra que se quer observar através de uma seqüência de linhas. Os elétrons que são espalhados pela superfície são captados por sensores que geram a imagem.

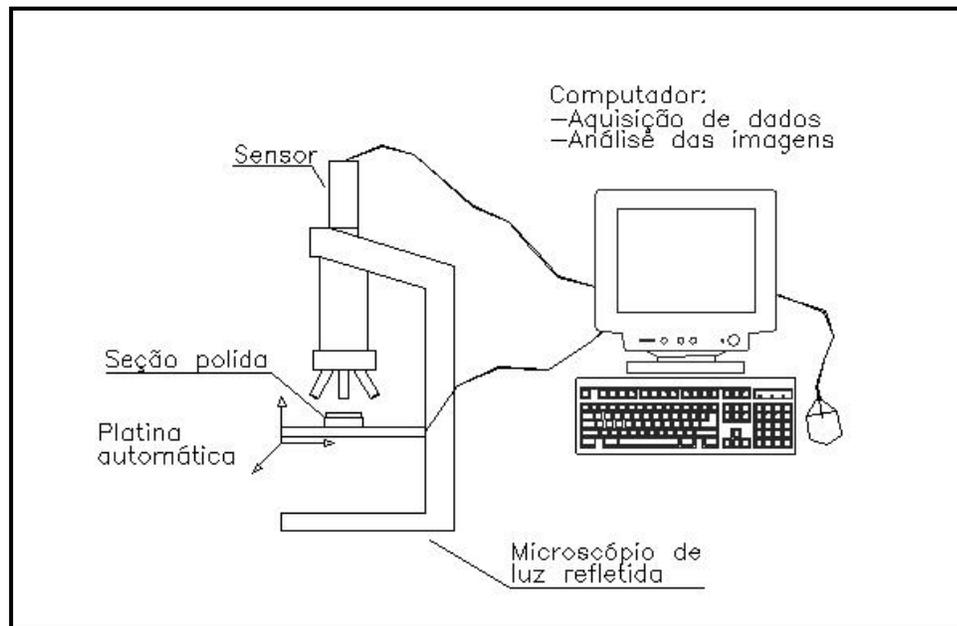
### A.2.1 Microscópio óptico

O microscópio óptico consta de duas lentes convergentes, onde a primeira está próxima ao objeto, denominada lente objetiva (grande distância focal), e a segunda lente é uma lupa denominada ocular (pequena distância focal) (Figura A.8).



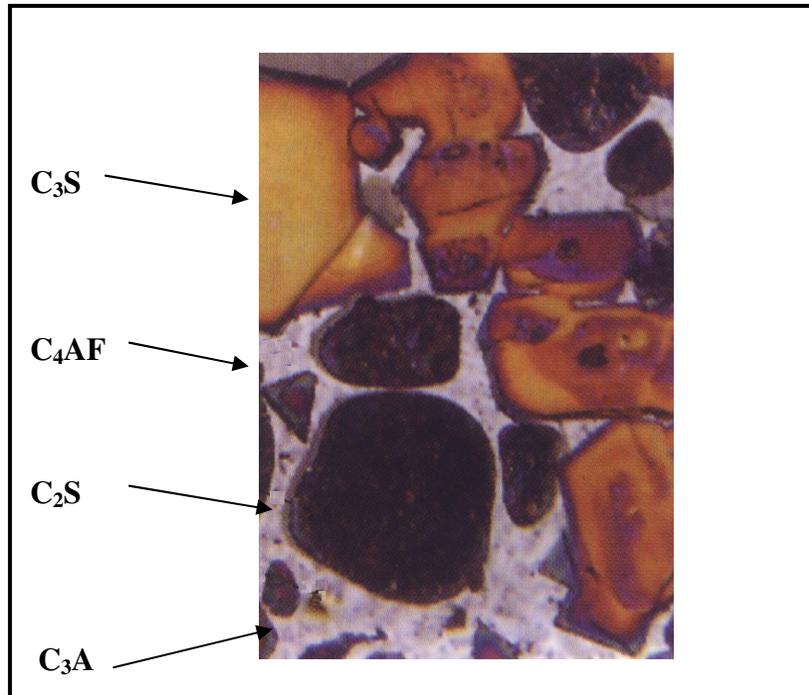
**Figura A.8 – Esquema de funcionamento do microscópio óptico**

No microscópio óptico a iluminação, o conjunto de lentes e o sistema de aquisição de dados são os elementos básicos. Na Figura A.9 está indicado um microscópio óptico conjugado com um computador onde serão efetuadas a aquisição dos dados e a análise das imagens (JOURLAN, 2001).



**Figura A9 – Sistema de aquisição de imagens por microscopia óptica (Jourlan et al, 2001)**

Para observar as imagens em materiais opacos à luz (pastas, argamassas, concretos) a observação é feita em uma superfície polida e utiliza-se a luz refletida na amostra. Essa superfície polida pode ou não sofrer ataques químicos para evidenciar a presença de alguns cristais (Figura A.10)



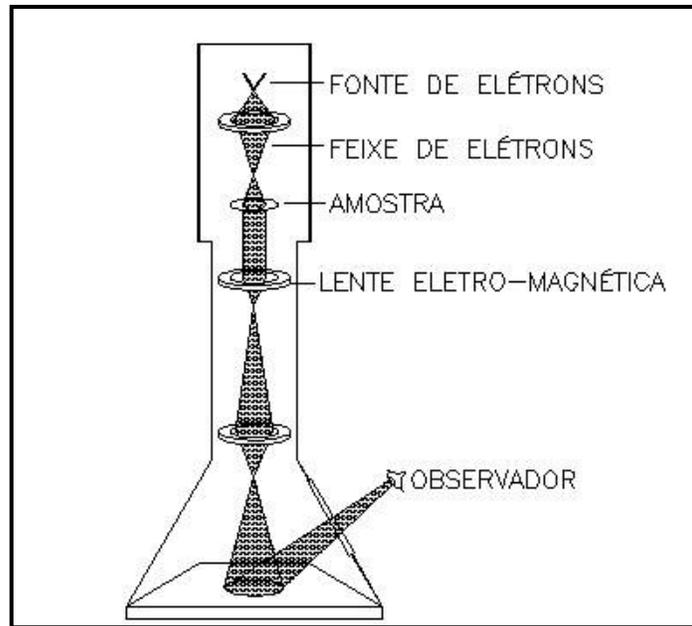
**Figura A.10 – Imagem polida do clínquer vista no microscópio óptico.(Kattar et al, 1999).**

O aumento de um microscópio óptico é da ordem de 2000 vezes, pois acima deste valor os detalhes menores que o comprimento de onda da luz empregada (4.000 – 7000 Å) são imperceptíveis. Deste modo, para aumentar a resolução, a fim de obter a imagem desejada, seria necessário trabalhar com comprimento de onda menor, o que acontece com os microscópios eletrônicos.

### **A.2.2 Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET)**

O microscópio Eletrônico de Transmissão (MET) difere do microscópio ótico pelo fato de usar feixe de elétrons em vez de um feixe de luz. No microscópio eletrônico, os elétrons são emitidos por um filamento aquecido de tungstênio chamado cátodo. Em virtude dos elétrons serem partículas carregadas que poderiam colidir com moléculas de ar e assim ser absorvidas e defletidas, todo o sistema óptico do microscópio eletrônico deve operar no vácuo. O ânodo é uma peça metálica com um pequeno furo no centro. Uma diferença de potencial entre 40 e 100KV entre o cátodo e o ânodo

acelera os elétrons a medida que eles passam do cátodo para o ânodo. Atingindo o ânodo, muitos elétrons passam através do furo do seu centro para formar o feixe. O feixe de elétrons passa através de uma série de lentes eletromagnéticas iguais às lentes de vidro do microscópio óptico (Figura A.11) (BORJA, 2001).



**Figura A.11 – Esquema de funcionamento de um Microscópio Eletrônico de Transmissão**

As lentes eletromagnéticas têm a função de focalizar o feixe de elétrons e a força do campo magnético produzido pelas lentes pode ser mudada alterando a quantidade de corrente que passa através dos espirais de fio das lentes. Desta forma, o condensador focaliza o feixe sobre a amostra. À medida que os elétrons abandonam a amostra, eles são focalizados na lente objetiva e se obtém uma imagem aumentada. Esta imagem é ainda ampliada por uma ou duas lentes que a projetam numa tela fluorescente ou filme fotográfico.

No microscópio eletrônico de transmissão o feixe de elétrons deve atravessar uma amostra muito fina, da ordem de 20 a 100nm. Assim elas precisam ser impregnadas com metais pesados que absorvem elétrons (urânio, chumbo) para aumentar o contraste (BORJA, 2001).

### **A.2.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)**

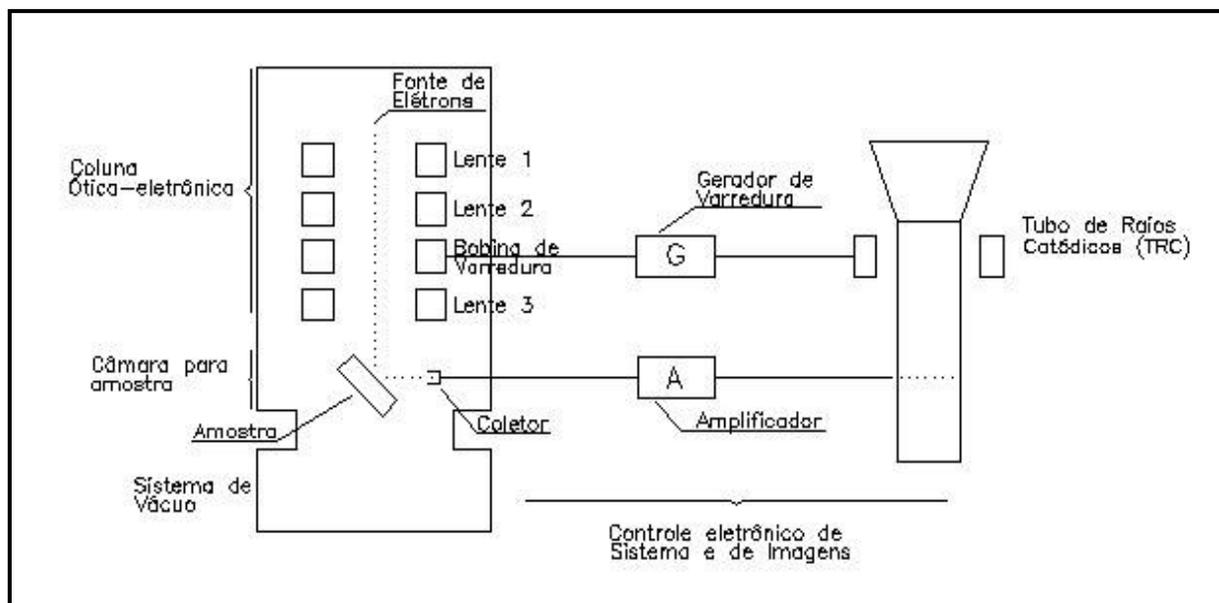
No microscópio eletrônico de varredura, o feixe de elétrons produzido por um filamento de tungstênio aquecido é acelerado por um cátodo, e posteriormente atravessa lentes eletromagnéticas que o focalizam sobre a superfície em observação. As lentes agem de modo a tornar o diâmetro do feixe muito estreito, da ordem de  $0,01\mu\text{m}$  ou menos.

No microscópio eletrônico de transmissão (MET), o feixe de elétrons atravessa a amostra, que impressionando uma chapa fotográfica fornece a imagem, já no microscópio eletrônico de varredura (MEV), o feixe de elétrons é defletido de modo a varrer a superfície segundo uma linha. Ao atingir a extremidade oposta da superfície, na segunda lente defletora faz com que o feixe de elétrons efetue nova varredura, segundo nova linha. O número de linhas observado determina a qualidade da imagem obtida.

No microscópio eletrônico de varredura, a amostra não se deixa atravessar pelo feixe devido a sua espessura e a uma película feita por um jato de material refletor, como o ouro, paládium ou carbono. Desse modo, o feixe de elétrons que incide sobre a amostra sofre reflexões originando elétrons secundários. Os elétrons secundários são detectados por um sistema cintilador/fotomultiplicador e os sinais elétricos amplificados modulam a intensidade do brilho da tela de um tubo de raios catódicos que é varrida em sincronia com a amostra. Assim, em cada instante, há uma correspondência objeto-imagem ponto por ponto.

A intensidade dos elétrons secundários detectados, durante a varredura pela sonda eletrônica, é determinada por três fatores principais: topografia da superfície, variação de voltagem e composição elementar da amostra (CINCOTTO,1977).

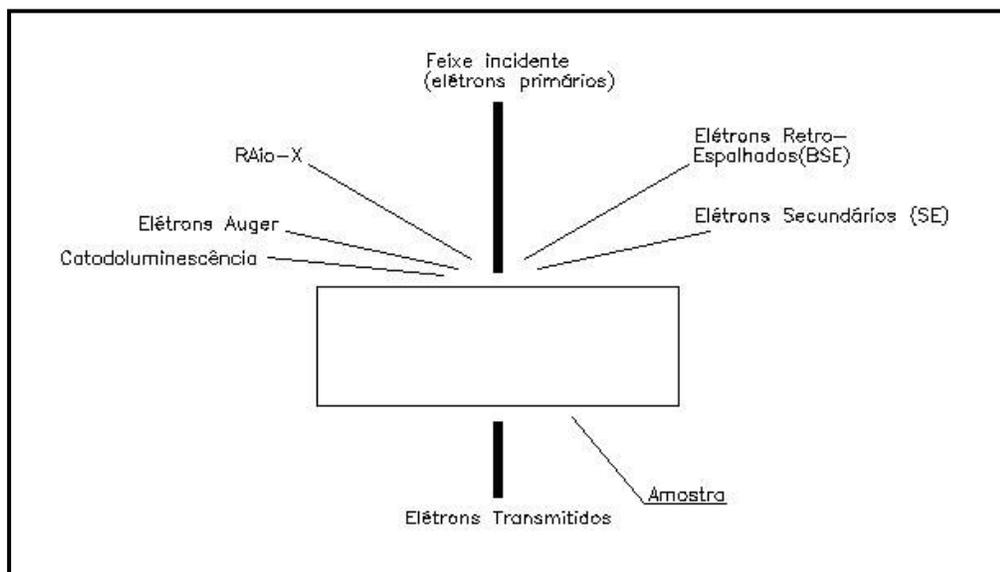
O MEV consiste basicamente de uma coluna óptico-eletrônica, de uma câmara para a amostra, sistema de vácuo, controle eletrônico e sistema de obtenção de imagem (Figura A.12).



**Figura A.12 – Componentes básicos de um microscópio eletrônico de varredura (Carvalho, 2000)**

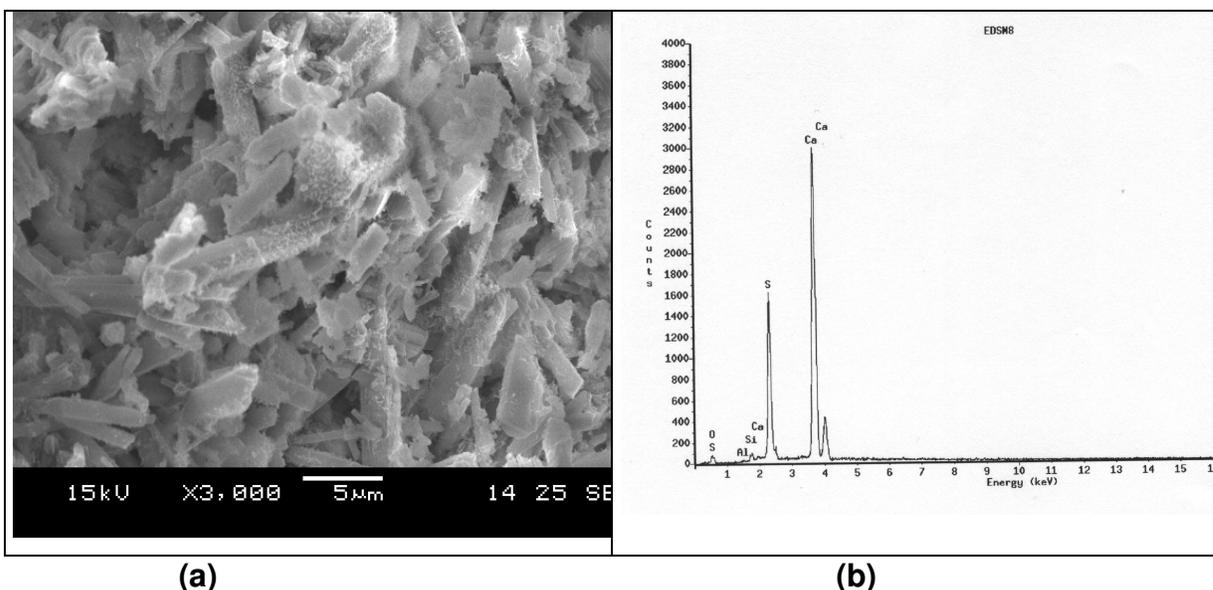
No instante que um ponto da superfície da amostra é alcançado por um feixe de elétrons, diferentes sinais são originados, que podem ser detectados independentemente. Um destes sinais é a emissão de elétrons secundários, SE (Secondary Electron Image), e o outro é a emissão de elétrons retroespalhados, BSE (Backscattered Electron Image) e de Raios-X entre outros (Figura A.13).

Cada um destes sinais fornece informações sobre a amostra. Os elétrons secundários (SE) são os mais importantes na formação da imagem no microscópio eletrônico de varredura, SEM (Scanning Electron Microscope) e fornecem informações topológicas da amostra, estes são emitidos por interação de elétrons incidentes com a superfície do material, até 500 Å de profundidade e são resultantes do choque anelástico dos elétrons primários com os átomos das substâncias constituintes da amostra. Já os elétrons retroespalhados fornecem informações sobre o número atômico (CARVALHO, 2000).



**Figura A.13 – Interação feixe-amostra e tipos de sinais (Carvalho, 2000).**

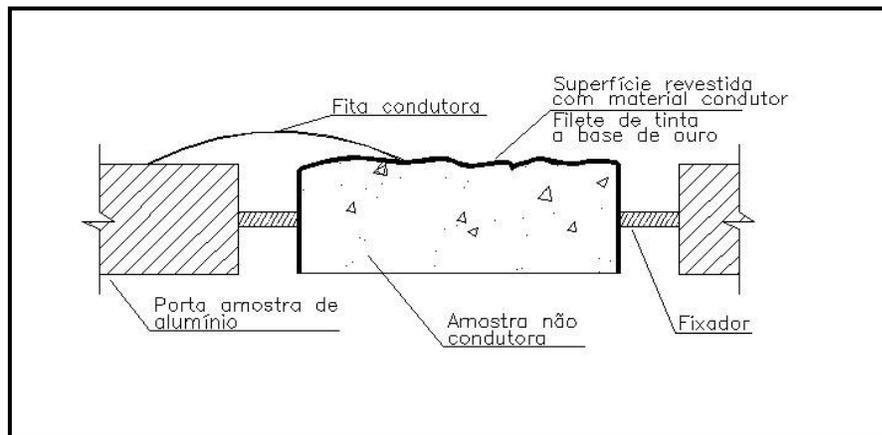
Em conjunto com a análise de imagens é possível realizar a espectrometria de dispersão de energia – EDS, determinando a composição química aproximada de partículas, de regiões ou pontos de interesse. A função do EDS é detectar, contar e distribuir, em classes de energia, os raios-X produzidos por uma pequena região da amostra selecionada para a análise. O aparelho de raios-X é conectado a um medidor automático dos ângulos de refração ( $\theta$ ) e suas correspondentes intensidades. Usando-se raios-X de comprimento de onda ( $\lambda$ ) conhecido, e medindo-se  $\theta$ , pode-se perfeitamente calcular o espaço interplanar “d” (Lei de Bragg). Como a distância interplanar é uma característica própria de cada cristal, consegue-se identificá-lo quando se comparam os valores com registros pré-obtidos de substâncias conhecidas. Os equipamentos modernos permitem gravar os dados em microprocessadores numa listagem dos elementos presentes no ponto ou na região analisada (Figura A.14) (FERREIRA, 2001).



**Figura A.14 – Imagens por elétrons secundários da mistura de gesso e cimento Portland (a) e a análise por EDS da região (b) (Síncrotron, 2002).**

As amostras a serem analisadas ao microscópio eletrônico de varredura necessitam de preparação prévia (Figura A.15). No caso de amostras não condutoras de elétrons como as pastas, argamassas e concretos, é preciso que a superfície a ser observada seja recoberta por um fino revestimento de material condutor de elétrons (metais ou ligas metálicas), cujo processo é denominado metalização de amostras. Isso é necessário para evitar um efeito chamado *carregamento*, que impede a obtenção de imagens satisfatórias durante a análise (ANDRADE & VEIGA, 1998).

A técnica mais utilizada para o revestimento é a Deposição de íons – Sputter Coater. O processo consiste em utilizar uma atmosfera de argônio, o qual irá acelerar os íons contra um alvo de ouro (cátodo) arrancando átomos, que serão acelerados na direção da amostra a ser revestida, o qual irá garantir imagens de boa resolução. Para esse tipo de revestimento é utilizada pressão de 0,2 a 0,05mbar.



**Figura A.15 – Esquema de preparação da amostra a ser analisada no MEV (Carvalho, 2000)**

A Microscopia Eletrônica de Varredura tem sido muito utilizada na análise da microestrutura do concreto, argamassas e pastas entre outros materiais. O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um aparelho que permite a observação e a análise da superfície de amostras através de imagens tridimensionais. A razão de sua utilização está associada à alta resolução que pode ser atingida, atualmente na ordem de  $30\text{\AA}$  e a grande profundidade de foco. (ANDRADE & VEIGA, 1998)

Portanto, a grande importância dos microscópios eletrônicos é na caracterização dos materiais, não somente por poder observar estruturas que estavam inacessíveis pelo microscópio óptico, mas pela grande vantagem de que, como os elétrons são uma radiação ionizante, o choque dos elétrons de alta energia contra os átomos da amostra resulta na geração de uma série de sinais. Entre esses sinais temos os raios-X, que saem em comprimentos de ondas características de cada espécie atômica. Dessa forma os microscópios eletrônicos podem gerar análises químicas de cada fase simultaneamente à geração de imagens. Nos microscópios de transmissão pode-se ainda realizar a difração de elétrons de cada fase, determinando a estrutura cristalina.

Outra vantagem sobre os microscópios ópticos é que o microscópio eletrônico de varredura apresenta a propriedade de ter uma grande distância focal, ou seja, pode-se por em foco imagens de uma superfície muito irregular.

### **A.3 Análise térmica**

A análise térmica é um grupo de métodos pelos quais as propriedades físicas ou químicas de uma substância, uma mistura são medidas como funções de temperatura ou tempo, enquanto a amostra está sujeita a um programa de temperatura controlada. O programa pode consistir em aquecer ou resfriar (dinâmico), ou manter a temperatura constante (isotérmica). Na maioria das substâncias ocorre a mudança de alguma das propriedades de seu sistema como: massa, energia, dimensões, condutividade etc., em função da temperatura (DUARTE, 2005).

Em uma determinada temperatura, os sistemas têm a tendência de alcançar um estado no qual a energia livre é a mínima, uma substância que vai de uma forma cristalina para outra que, a uma dada temperatura tem uma energia livre menor, portanto mais estável.

A formação de uma estrutura cristalina mais estável ou mudança para um outro estado que a energia livre é menor pode ocorrer com aquecimento gradual da amostra ou via intermediária, com patamares. A transformação é caracterizada pela temperatura na qual ela ocorre e pela mudança no teor de calor, manifestado pelo acréscimo ou decréscimo da temperatura, dependendo da natureza da reação é exotérmica ou endotérmica. Esta é a base da análise térmica diferencial (DTA).

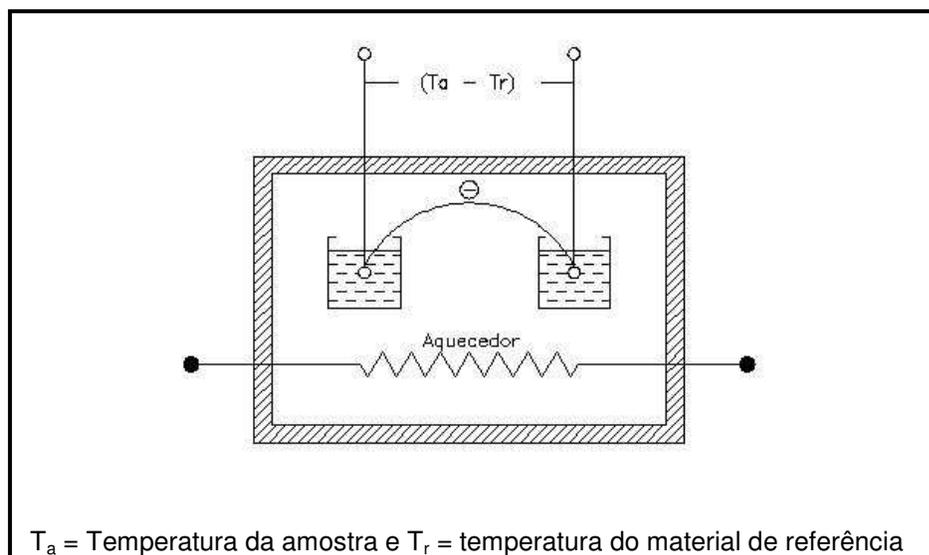
A mudança no teor de calor pode ser acompanhada pela mudança de massa. Estas mudanças são a base da termogravimetria (TG)

#### **A.3.1 Análise térmica diferencial (DTA)**

A análise térmica diferencial (DTA) é a técnica na qual determina-se a diferença de temperatura entre a amostra e um material de referência, em função do tempo ou temperatura (Figura A.16). Sendo a amostra e o material de referência submetidos ao mesmo regime de temperatura em uma taxa controlada. O gráfico obtido é chamado curva DTA. Ele mostra o decréscimo ou o acréscimo na diferença de temperatura, a sua

forma depende da mudança térmica da amostra, que pode causar absorção ou liberação de calor.

O método mostra se a substância é termicamente ativa na faixa de temperatura que é usada, uma série de picos, cuja posição irá depender da composição química e estrutura cristalina da substância e a área, e é relacionada com a energia envolvida na ocorrência da reação. A análise térmica diferencial registra todas as mudanças na entalpia, se é acompanhada pela mudança no peso ou não, ou reações químicas como, redução ou oxidação, decomposição, desidratação e dissociação. No entanto, a DTA não indica o tipo de mudança que ocorre, se é devido a mudança de fase ou reação química, ou se as mudanças ocorrem em um ou vários patamares. A natureza e os mecanismos da mudança podem ser analisados por outros métodos como a difração de raio X e termogravimetria (BLAZEK, 1972).



**Figura A.16 – Sistema DTA básico (Cincotto, 1977)**

O princípio básico é que todas as reações químicas ou transformações físicas liberam ou absorvem calor, causando uma mudança na temperatura, esta mudança de temperatura pode também ser acompanhada por uma variação de massa, correspondendo a formação de produtos de reação. A DTA é capaz de determinar

mudanças que não são acompanhadas de variações de massa, tal como, uma mudança na estrutura cristalina ou fusão, sendo assim mais vantajosa que a termogravimetria. Deste modo, a DTA registra todas as mudanças na entalpia do sistema, exotérmica ou endotérmica causadas por uma mudança estrutural ou química. (BLAZEK, 1972).

A Figura A.17 mostra uma curva DTA ideal onde:

$T_1$  = Temperatura de início da curva

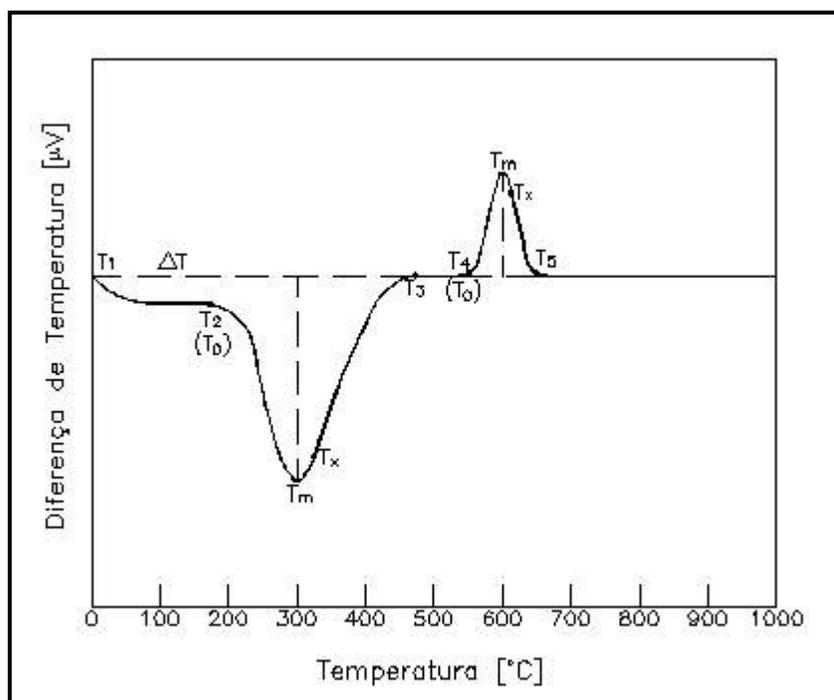
$T_2$  = Temperatura característica do início do desvio da curva da linha zero (podendo ser indicado como  $T_0$  pois é a temperatura de início do efeito)

$T_m$  = Temperatura do pico

$T_x$  = Temperatura do final do efeito

$T_3$  e  $T_5$  = Temperatura de retorno a curva para limite zero

$T_4$  = Temperatura de início do efeito exotérmico

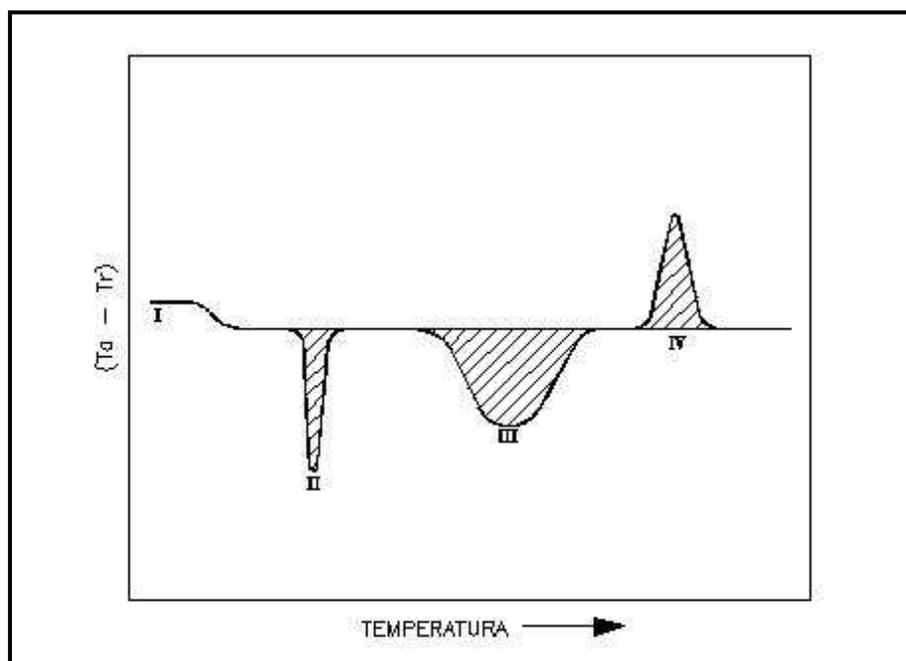


**Figura A.17 – Curva DTA ideal (Blazek, 1972)**

Geralmente, transição de fase, redução, desidratação, e algumas reações de decomposição são endotérmicas, enquanto que a oxidação, outras reações de decomposição, e cristalização são exotérmicas. A posição da mudança resultante de temperatura no eixo da temperatura é característica da substância investigada sobre determinadas condições experimentais, e pode ser utilizada para a sua investigação. O fator mais importante para uma dada mudança não é a quantidade total de calor liberado ou absorvido, mas a taxa em que ocorre essa mudança de calor.

O número, a forma e posição dos picos endotérmicos ou exotérmicos, com relação à temperatura são utilizados na identificação quantitativa de uma substância em estudo (Figura A.18), sendo:

- I = uma transição de 2ª ordem na qual é registrada uma mudança na linha de base;
- II = Um pico endotérmico devido a uma fusão ou transição de fusão;
- III = Um pico endotérmico devido a uma reação de dissociação ou decomposição;
- IV = Um pico exotérmico devido a uma mudança de fase cristalina.

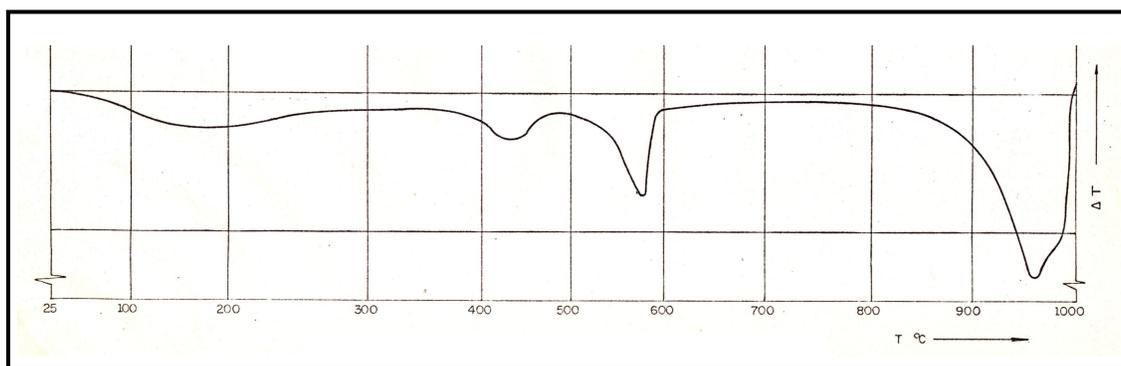


**Figura A.18 – Curvas DTA características (Cincotto, 1977)**

Também como a área do pico é proporcional à variação de calor envolvido, a técnica é útil para determinações do calor de reação. (CINCOTTO, 1977).

Como exemplo apresentamos a curva de DTA da cal hidratada. Considerando as seguintes reações de decomposição :  $Mg(OH)_2 \rightarrow MgO + H_2O$  ;  $C_a(OH)_2 \rightarrow C_aO + H_2O$  e  $C_aCO_3 \rightarrow C_aO + CO_2$ , embora a temperatura dos picos para cada uma dessas reações seja variável, eles são identificados nos seguintes intervalos, 350 °C a 450°C; 480°C a 620 °C e 850 °C a 950 °C respectivamente.

A Figura A 19 mostra a curva DTA da amostra de cal hidratada, fração retida na peneira nº200 em ar atmosférico.



**Figura A 19 – Curva DTA da cal hidratada (Cincotto, 1977)**

Os hidróxidos e os carbonatos são termicamente ativos, pois exibem picos endotérmicos de desidroxilação e de dissociação, respectivamente. Sendo esses dois compostos os constituintes normais da cal hidratada, a análise térmica diferencial é uma técnica útil no estudo da sua composição química (CINCOTTO, 1977).

Os principais parâmetros determinados pelas curvas de DTA são as temperaturas de início e fim do efeito térmico, temperatura do pico máximo, área sobre a curva e em avaliações quantitativas, a determinação da quantidade ativa do material ou calor de transformação correspondente. Os fatores que mais afetam os resultados obtidos pela curva de DTA são:

a) Características instrumentais

- Fonte de calor e regulagem de temperatura do sistema ( método de aquecimento, forma e tamanho do aquecedor);
- Sistema de detecção da curva de DTA;
- Sistema de determinação da temperatura (tipo e dimensão dos termopares, sua posição na amostra e a fixação dos mesmos);
- Sistema de registro da curva de DTA (taxa de sensibilidade do sistema de registro).

b) Método

- Natureza da amostra;
- Efeito da atmosfera e tipo de contato entre a atmosfera. (efeito da pressão e composição);
- Tipo de aquecimento (taxa, linearidade e regulagem);

c) Amostra e material de referência

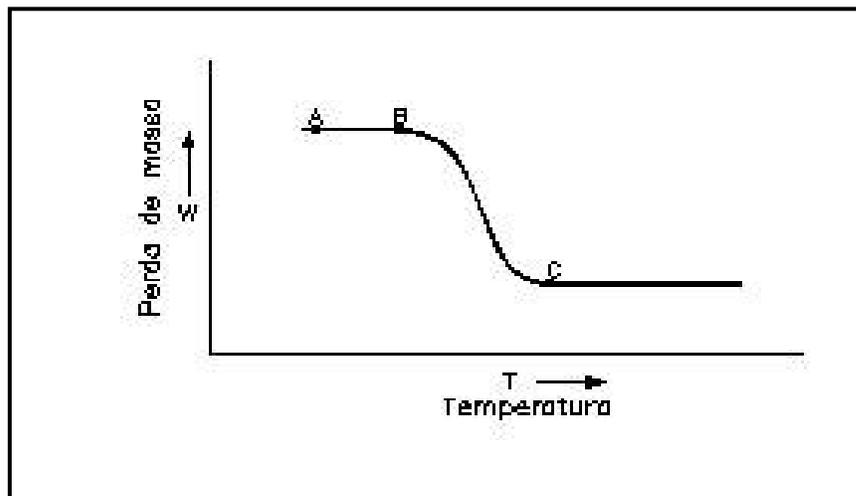
- Propriedades físicas e químicas das amostras;
- Propriedades físicas e químicas do material de referência;
- Diluição da amostra.

Os fatores mais importantes são o tamanho das partículas, grau de cristalização, condutividade térmica, densidade, e efeito de diluição das substâncias.

### **A.3.2 Análise termogravimétrica (TG)**

A termogravimetria é o método no qual o peso da amostra é constantemente determinado durante o aquecimento ou resfriamento. A variação da massa da amostra é plotada em função da temperatura sendo chamada de curva termogravimétrica. A curva termogravimétrica fornece informações sobre a composição da amostra inicial e

intermediária, estabilidade térmica, decomposição térmica, produtos formados pelo aquecimento e resíduos (Figura A.20).



**Figura A.20 – Curvas termogravimétricas característica (Dodd,1987)**

O patamar A-B é a parte da curva termogravimétrica em que a massa da amostra é constante. Na temperatura inicial B a amostra começa a perder peso, e C é a temperatura final, onde a variação de massa é máxima.

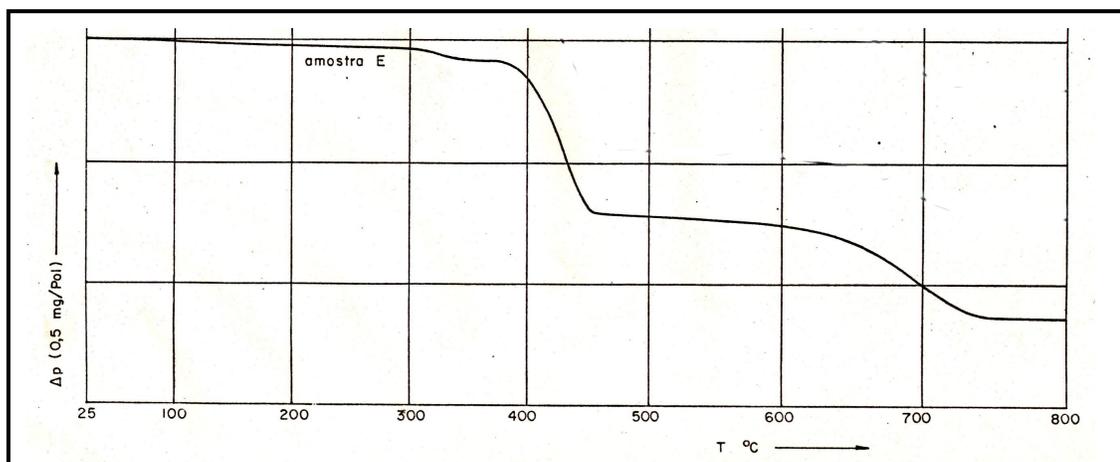
As curvas termogravimétricas podem ser de dois tipos distintos:

- Dinâmica, quando variamos a temperatura da amostra (massa versus temperatura ou taxa de perda de massa versus temperatura);
- Isométrica, quando a temperatura da amostra é constante (massa versus tempo).

Quando os componentes e propriedades principais da amostra são conhecidos, pelas transformações que ocorrem com a variação da massa, pode-se analisar quantitativamente a mesma e estimar a sua pureza.

Como exemplo podemos analisar a curva termogravimétrica da cal hidratada (Figura A 21). Com relação à curva TG do carbonato de cálcio, tem-se uma inflexão nítida entre 620 °C e 800 °C correspondente a 100% de perda nesse intervalo. Para o hidróxido de

cálcio, nota-se ligeiras inclinações situada entre 372 °C e 472 °C. Após 472 °C ainda se verifica perda de peso até 690 °C. Para o hidróxido de magnésio a perda de água é iniciada à temperatura ambiente e intensa a 620 °C, diminuindo gradativamente acima de 134 °C, sendo nula próximo a 287 °C; nessa temperatura há uma mudança brusca na perda de peso, e a maior parte da água combinada é perdida até 416 °C; o teor remanescente é perdido lentamente até 819 °C.

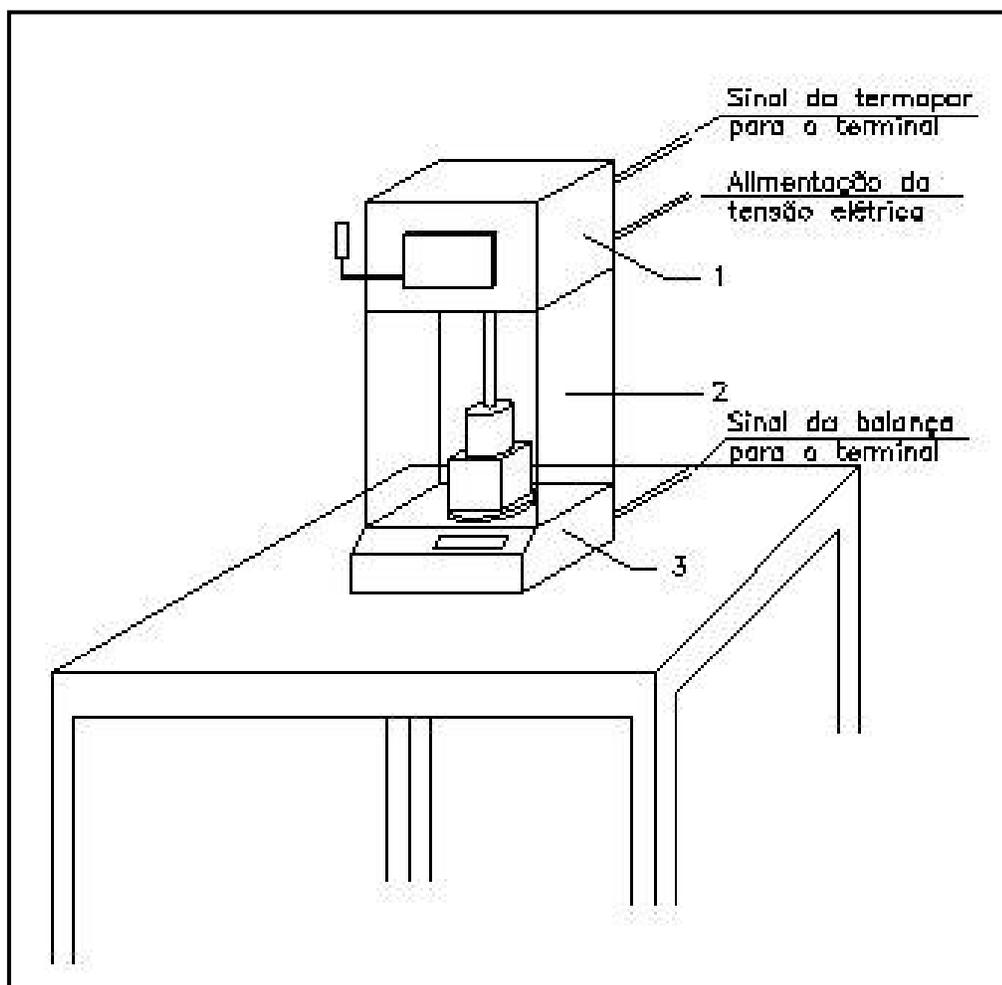


**Figura A 21 – Curva TG da cal hidratada (Cincotto, 1977)**

Portanto podemos resumir que para as curvas TG dos compostos individuais para a cal hidratada, admite-se aproximadamente que até 300 °C houve perda de umidade; entre 300°C e 380 °C desidroxilação do hidróxido de magnésio; entre 380°C e 620 °C desidroxilação do hidróxido de cálcio e finalmente, entre 620 °C e 740 °C dissociação do carbonato de cálcio. (Figura A 21) (CINCOTTO, 1977).

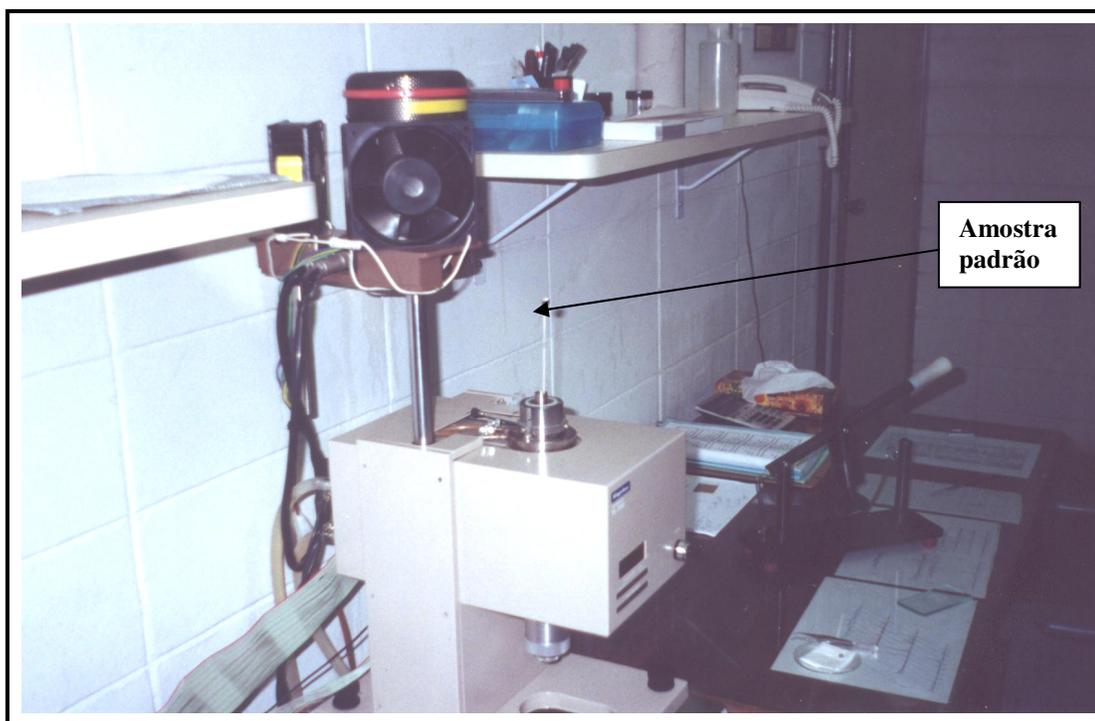
O sistema de análise termogravimétrica compõe-se de uma balança, de um suporte para amostras e um forno de aquecimento elétrico (mufla) (Figura A.22). O sistema de aquisição de dados e controle das condições operacionais pode ser tanto semi-automático ou totalmente automatizado, com processamento e aquisição de dados via microcomputador. A balança (3) situa-se na parte inferior do conjunto de análise termogravimétrica e geralmente tem capacidade de 500g, possibilitando o uso

de amostras de 50g com precisão de 0,001g. O suporte para a amostra apoia-se sobre o prato da balança, tendo a sua parte superior, uma superfície a qual se apóia a amostra ou o recipiente que a contém (superfície localizada dentro da câmara de aquecimento do forno). Para evitar flutuações nas medidas de massa resultantes de correntes de ar, é utilizado um anteparo (2) que envolve o suporte das amostras. O forno elétrico (1) possui no fundo uma abertura que permite a livre passagem e movimentação da parte superior do suporte. O controle de temperatura é realizado por termopar.



**Figura A.22 Sistema de análise Termogravimétrica (Dweck & Souza, 1989)**

Atualmente podemos realizar em um mesmo aparelho os ensaios de DTA e TG. A amostra moída é pesada numa balança digital até atingir  $30\text{mg} \pm 1$  e acondicionada num cadinho de platina e ouro. O cadinho é colocado na balança termogravimétrica no porta-amostra onde também está colocado uma amostra padrão de óxido de alumínio para referência de temperatura. O gradiente de temperatura é na ordem de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  por minuto durante 60 minutos (Figura A.23).



**Figura A.23 – Balança Termogravimétrica para ensaios de DTA e TG (De Milito, 2001)**

Vários fatores afetam os resultados da termogravimetria e que devem ser cuidadosamente controlados para a obtenção de um resultado confiável. Podem ser divididos nos seguintes grupos:

- a) Efeitos resultantes das propriedades de construção do material empregado e natureza geral da aparelhagem.

- Reações da amostra com o cadinho ou produtos de reações com partes da aparelhagem;
  - Sublimação ou condensação dos produtos de reações;
  - Formato, tamanho e material do cadinho.
- b) Efeitos resultantes das construções e métodos de uso.
- Taxa de aquecimento e transferência de calor;
  - Taxa de registro da curva;
  - A composição atmosférica na câmara de reação (forno);
  - Natureza do aquecimento e efeitos da flutuação;
  - Sensibilidade da balança e do sistema de registro;
  - Método da medida da temperatura.
- c) Efeitos das propriedades químicas e físicas da amostra.
- Quantidade da amostra;
  - Tamanho da partícula;
  - Calor de reação e condutividade térmica da amostra;
  - Natureza da amostra e tipo de mudança que ocorrem.

As análises térmicas são técnicas que incluem a termogravimetria, e a análise térmica diferencial como visto neste capítulo. Essas análises são de grande utilidade para o controle da qualidade e aplicações sobre produtos industriais como polímeros, metais, ligas entre outros.

## B – ENSAIOS REALIZADOS

### B.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise das microscopias foi realizada para as misturas submetidas a cura externa e interna conforme descrito na Tabela B1.

**Tabela B1 – Misturas ensaiadas**

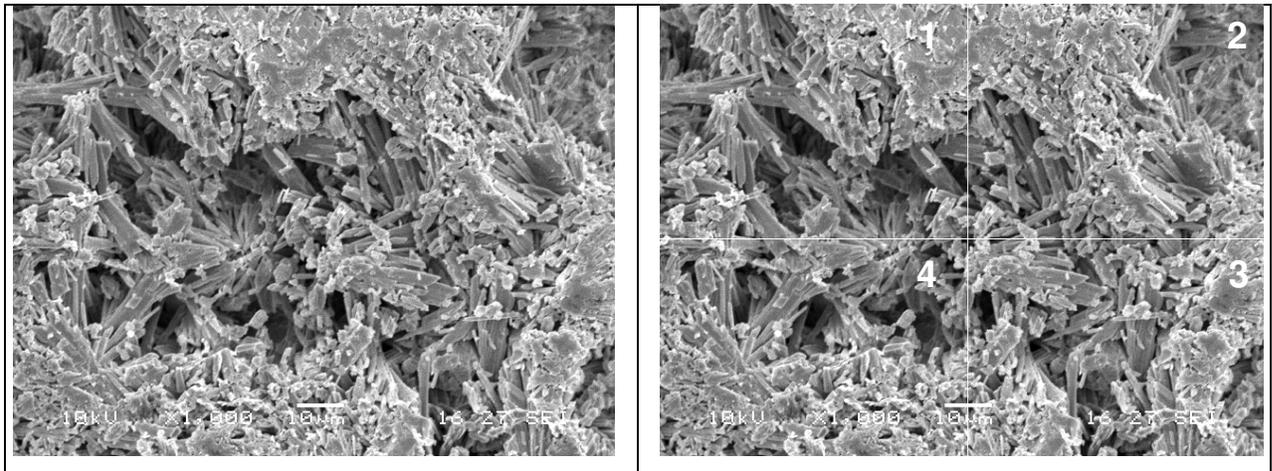
Locais	Misturas	%gesso	% cim.	% sílica	%superplastificante
EXTERNO	A1	100	0	0	0
	A2	75	25	0	2
	A3	75	20	5	2
INTERNO	A4	100	0	0	0
	A5	75	25	0	2
	A6	75	20	5	2

Relação água/aglomerante = 0,70

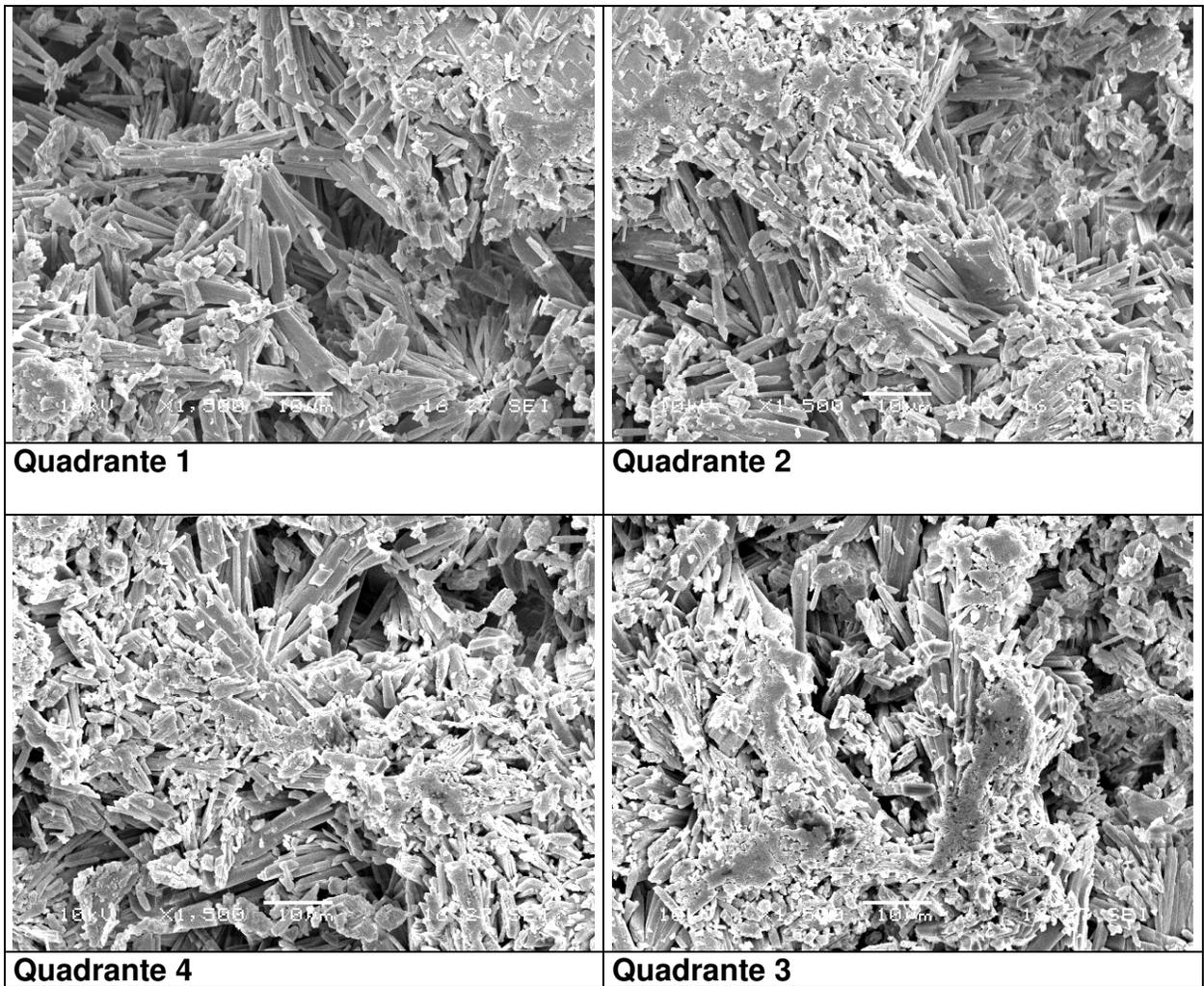
Para analisar a mistura A1 (100% gesso) cura externa tem-se as seguintes micrografias:

Figura B1(a) micrografia da mistura A1 ampliada 1.000 vezes e a Figura B1(b) a micrografia da Figura B1(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

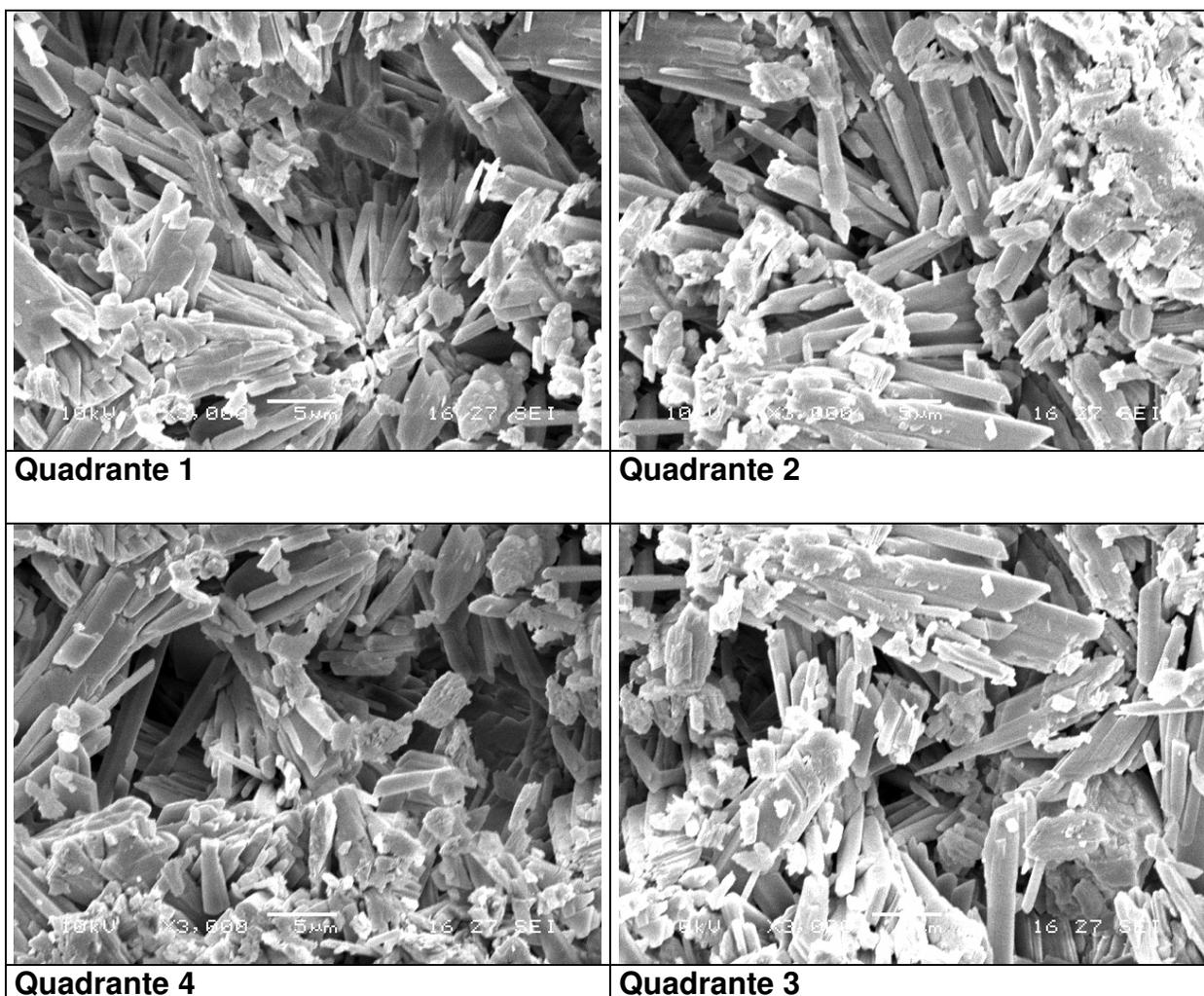
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B2 e 3.000 vezes Figura B3.



(a) (b)  
**Figura B1 – (a) Microscopia da mistura A1= 100% gesso (ampliação 1.000 vezes)**  
**(b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**



**Figura B2 - Microscopia da mistura A1= 100% gesso (ampliação 1.500 vezes)**  
**nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**

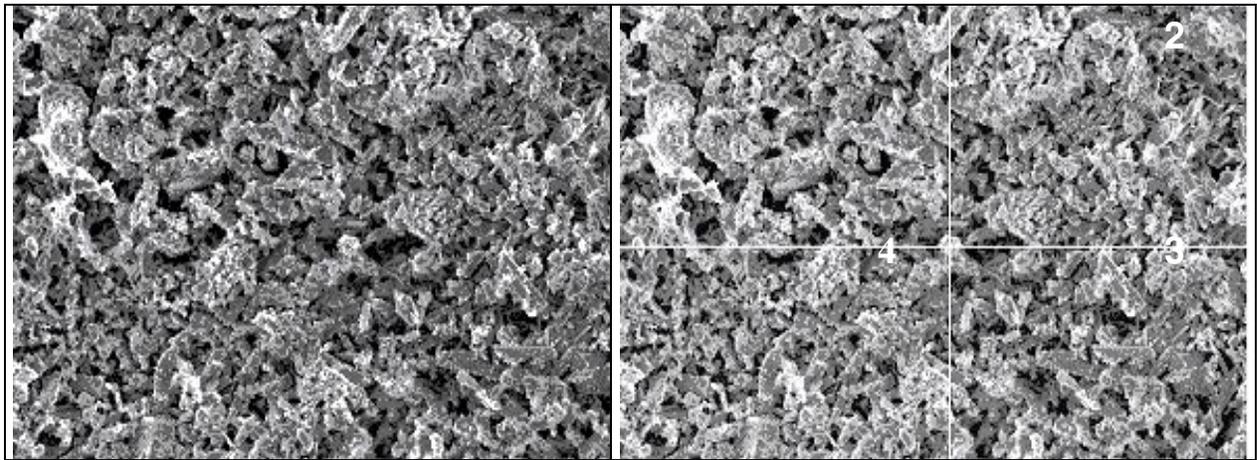


**Figura B3 – Microscopia da mistura A1= 100% gesso nos quadrantes 1, 2, 3 e 4 (ampliação 3000x), cura externa**

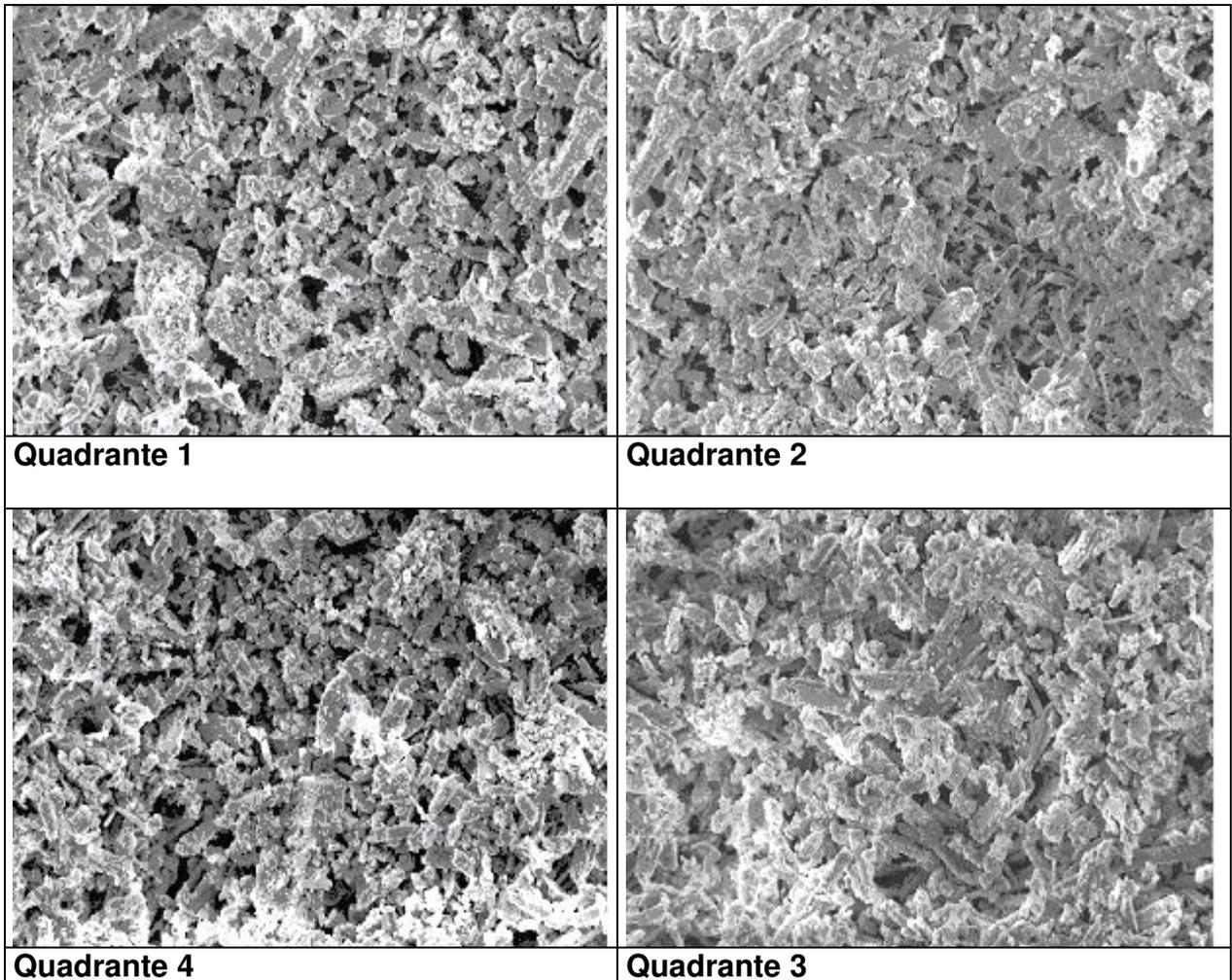
Para analisar a mistura A2 (75%gesso; 25% cimento Portland; 0% sílica ativa), cura externa, tem-se as seguintes micrografias:

Figura B4(a) micrografia da mistura A2 ampliada 1.000 vezes e a Figura B4(b) a micrografia da Figura B4(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

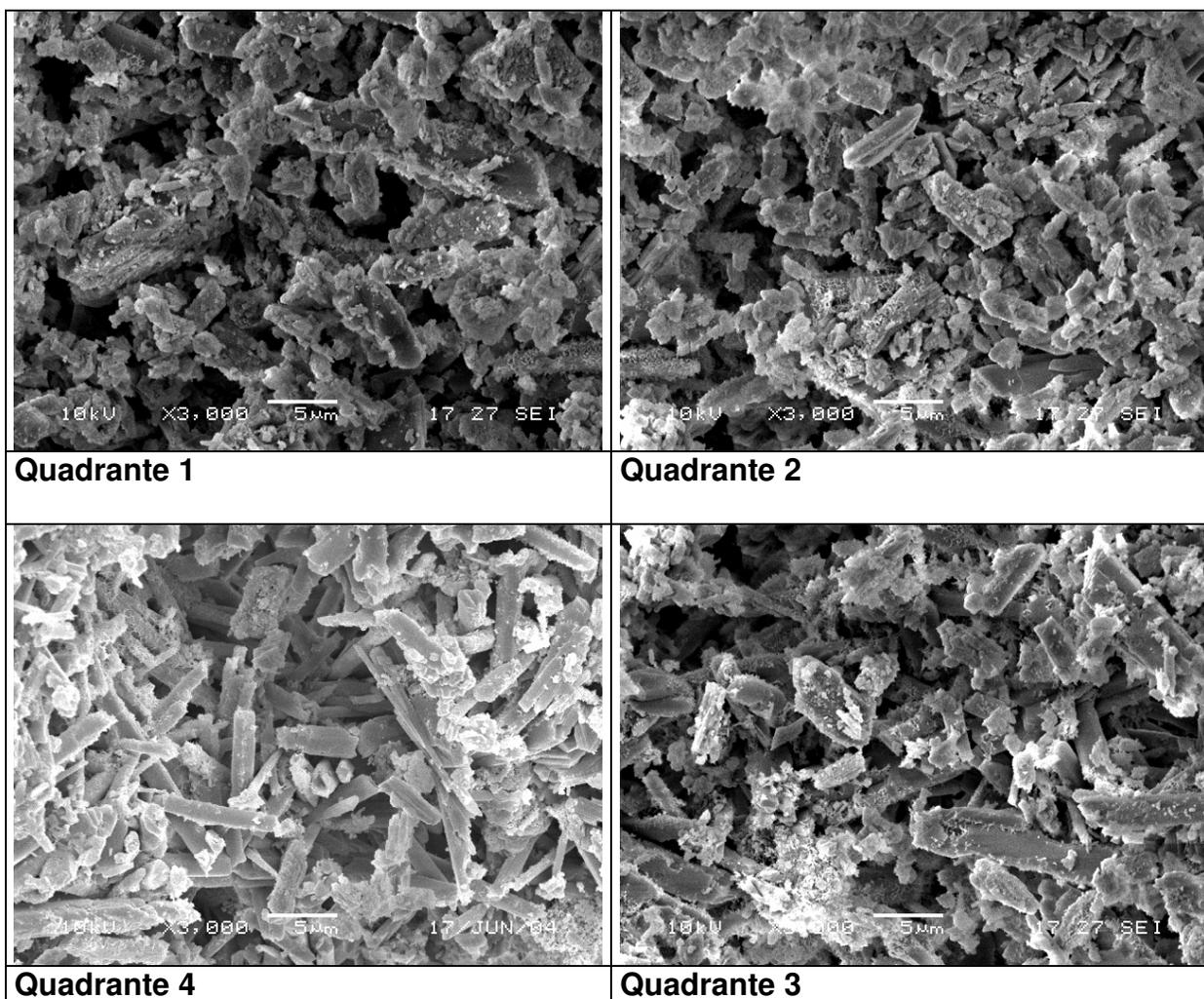
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B5 e 3.000 vezes Figura B6.



**(a)** **(b)**  
**Figura B4 – (a) Microscopia da mistura A2= 75% gesso, 25% cimento Portland, 0% sílica ativa (ampliação 1.000 vezes)**  
**(b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**



**Figura B5 – Microscopia da mistura A2= 75% gesso e 25% de cimento Portland, 0% sílica ativa,(ampliação 1.500 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**

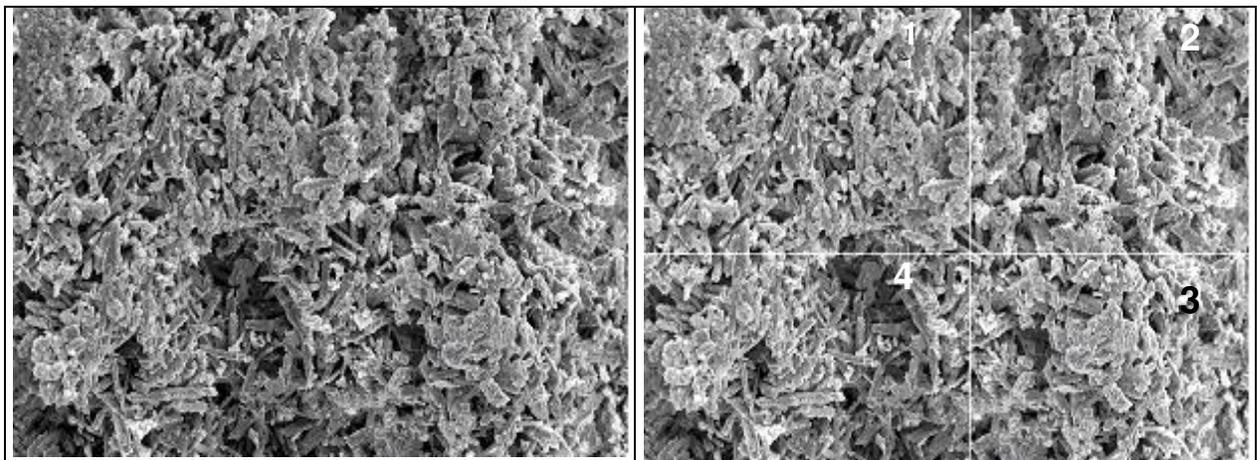


**Figura B6 – Microscopia da mistura A2= 75% gesso e 25% de cimento Portland,sílica ativa, (ampliação3.000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**

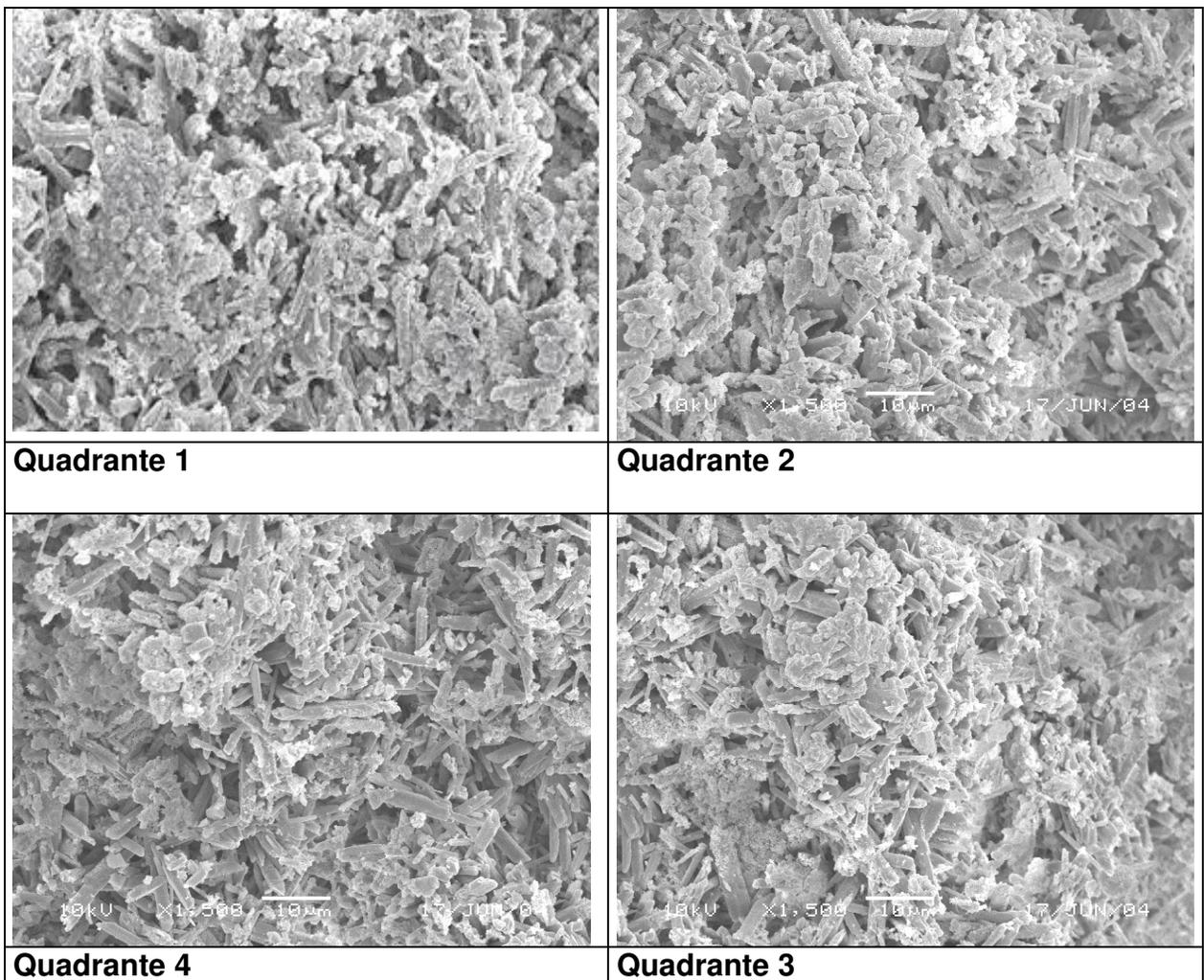
Para analisar a mistura A3 (75%gesso; 20% cimento Portland; 5% sílica ativa), cura externa, tem-se as seguintes micrografias:

Figura B7(a) micrografia da mistura A3 ampliada 1.000 vezes e a Figura B7(b) a micrografia da Figura B7(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

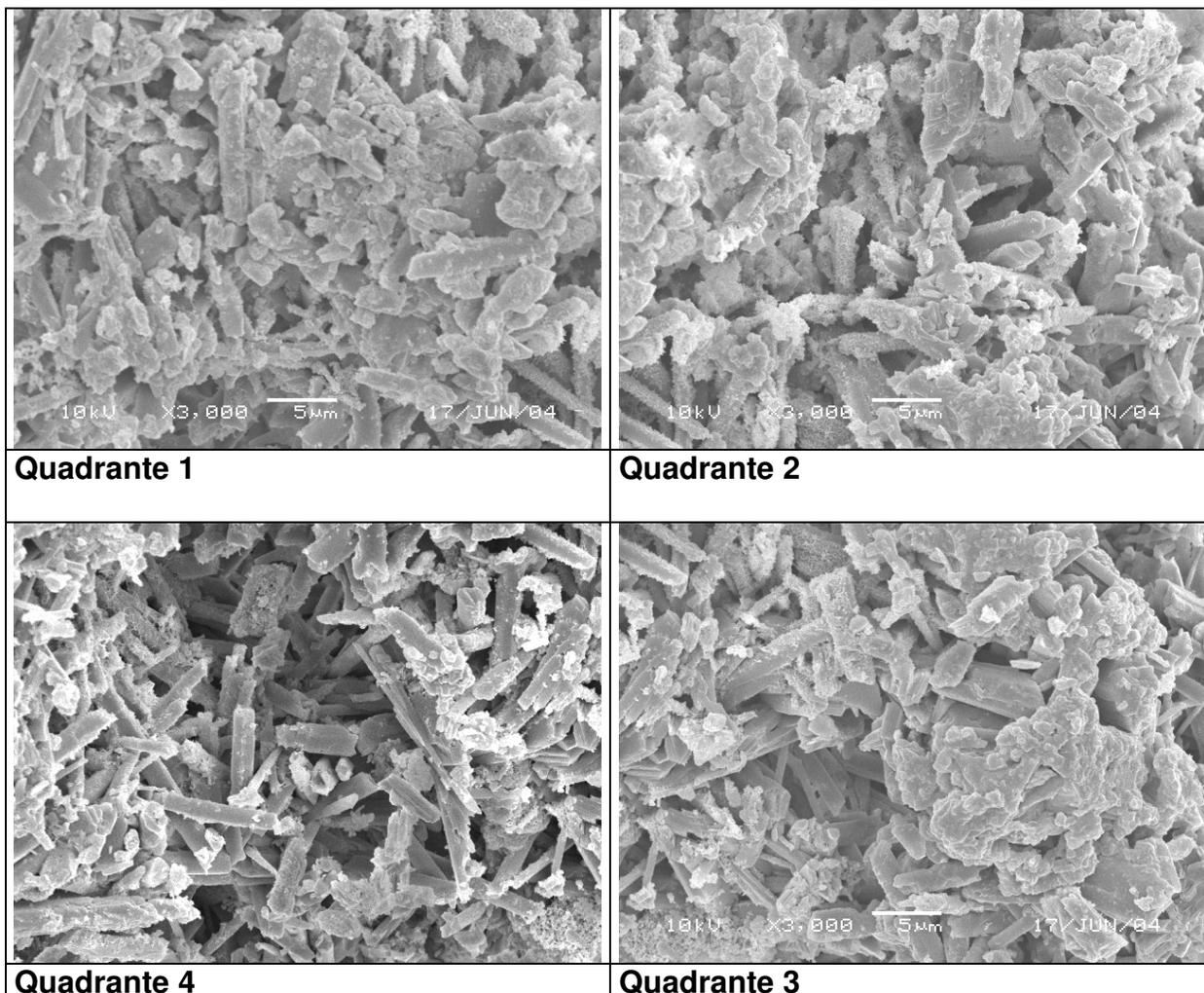
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B8 e 3.000 vezes Figura B9.



(a) Microscopia da mistura A3= 75% gesso, 20% cimento Portland, 5% sílica ativa (ampliação 1.000 vezes)  
 (b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa



Quadrante 1      Quadrante 2  
 Quadrante 4      Quadrante 3  
 Figura B8 – Microscopia da mistura A3= 75% gesso e 20% de cimento Portland, 5% de sílica ativa, (ampliação 1.500 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa

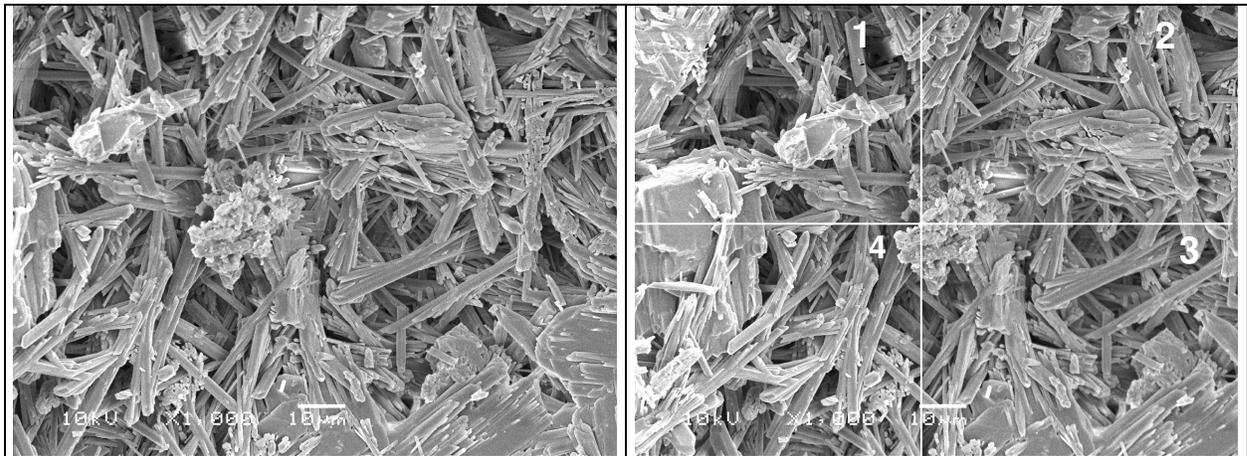


**Figura B9 – Microscopia da mistura A3= 75% gesso e 20% de cimento Portland, 5% de sílica ativa, (ampliação 3.000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura externa**

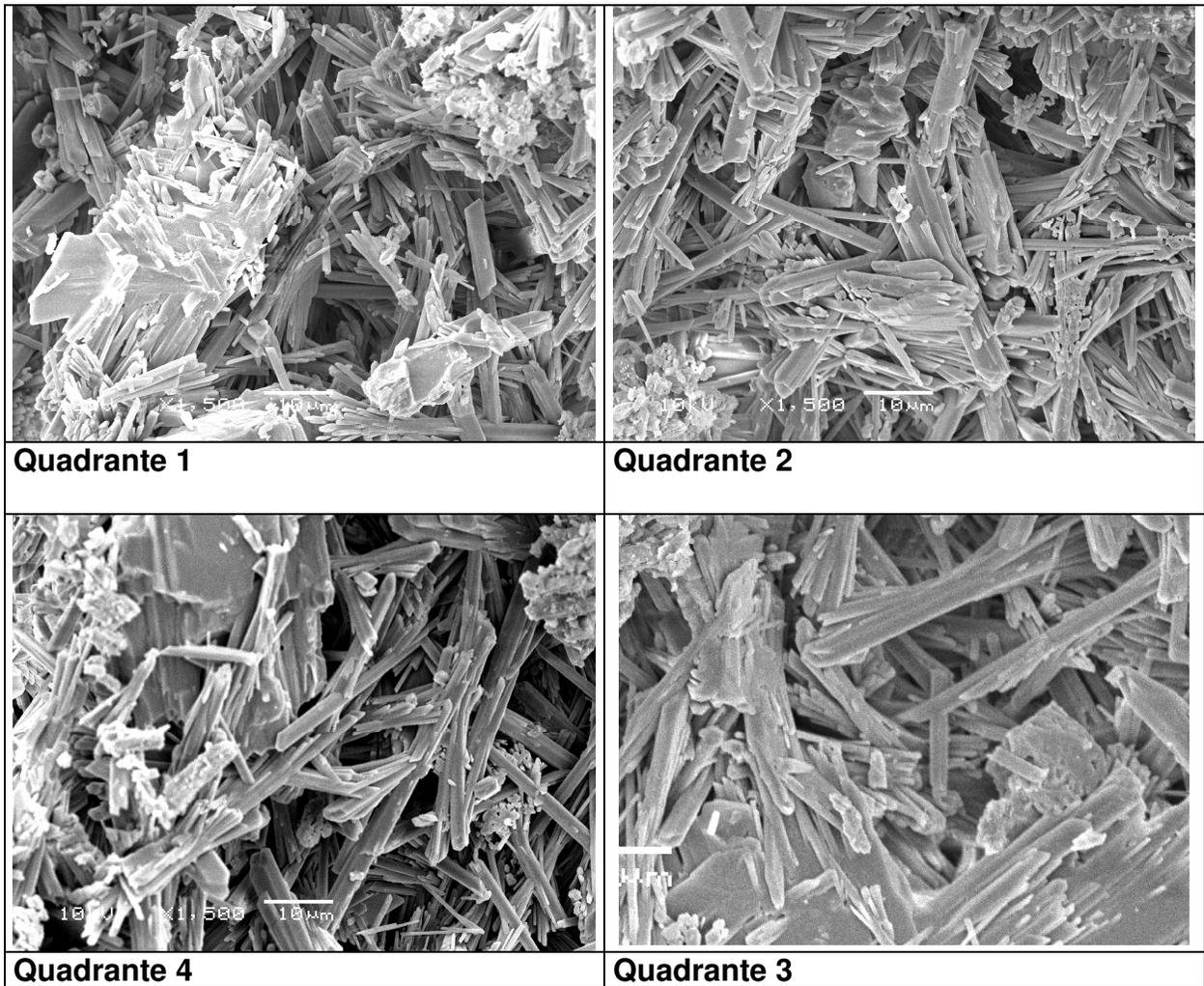
Para analisar a mistura A4 (100%gesso), cura interna, tem-se as seguintes micrografias:

Figura B10(a) micrografia da mistura A4 ampliada 1.000 vezes e a Figura B10(b) a micrografia da Figura B10(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

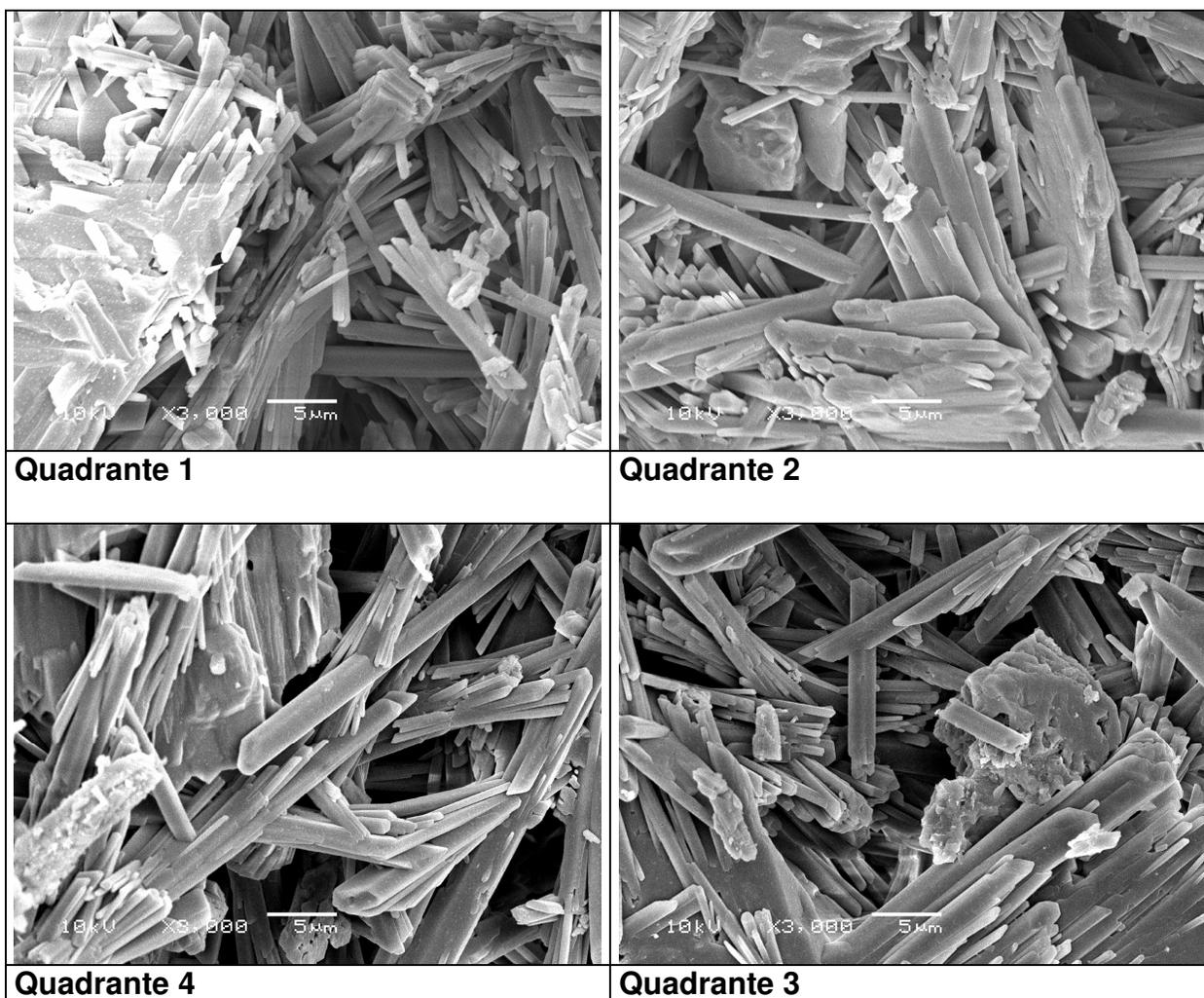
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B11 e 3.000 vezes Figura B12.



**(a)** **(b)**  
**Figura B10 – (a) Microscopia da mistura A4= 100% gesso (ampliação 1.000 vezes)**  
**(b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**



**Quadrante 1** **Quadrante 2**  
**Quadrante 4** **Quadrante 3**  
**Figura B11 – Microscopia da mistura A4= 100% gesso, (ampliação 1.500 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

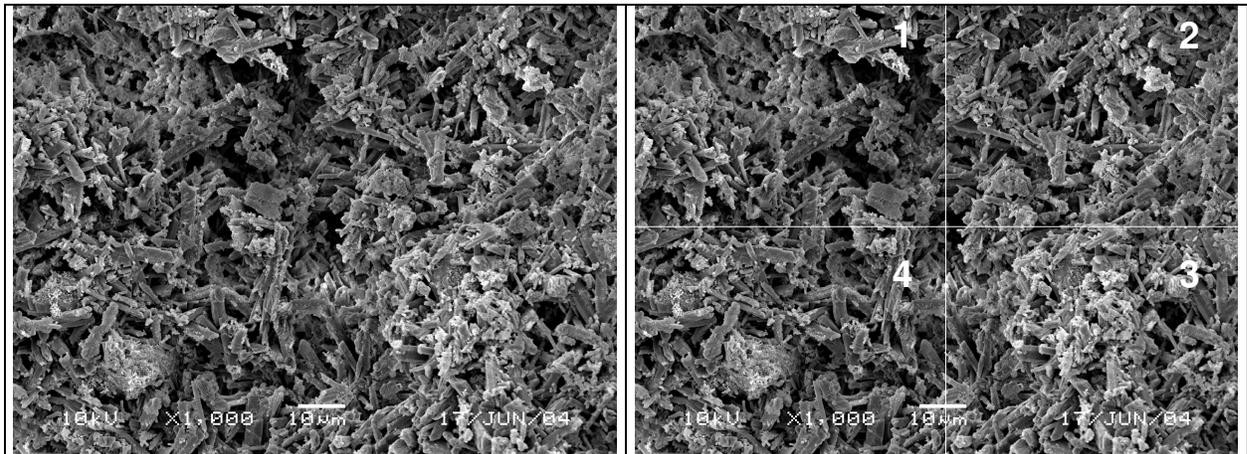


**Figura B12 – Microscopia da mistura A4= 100% gesso, (ampliação 3.000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

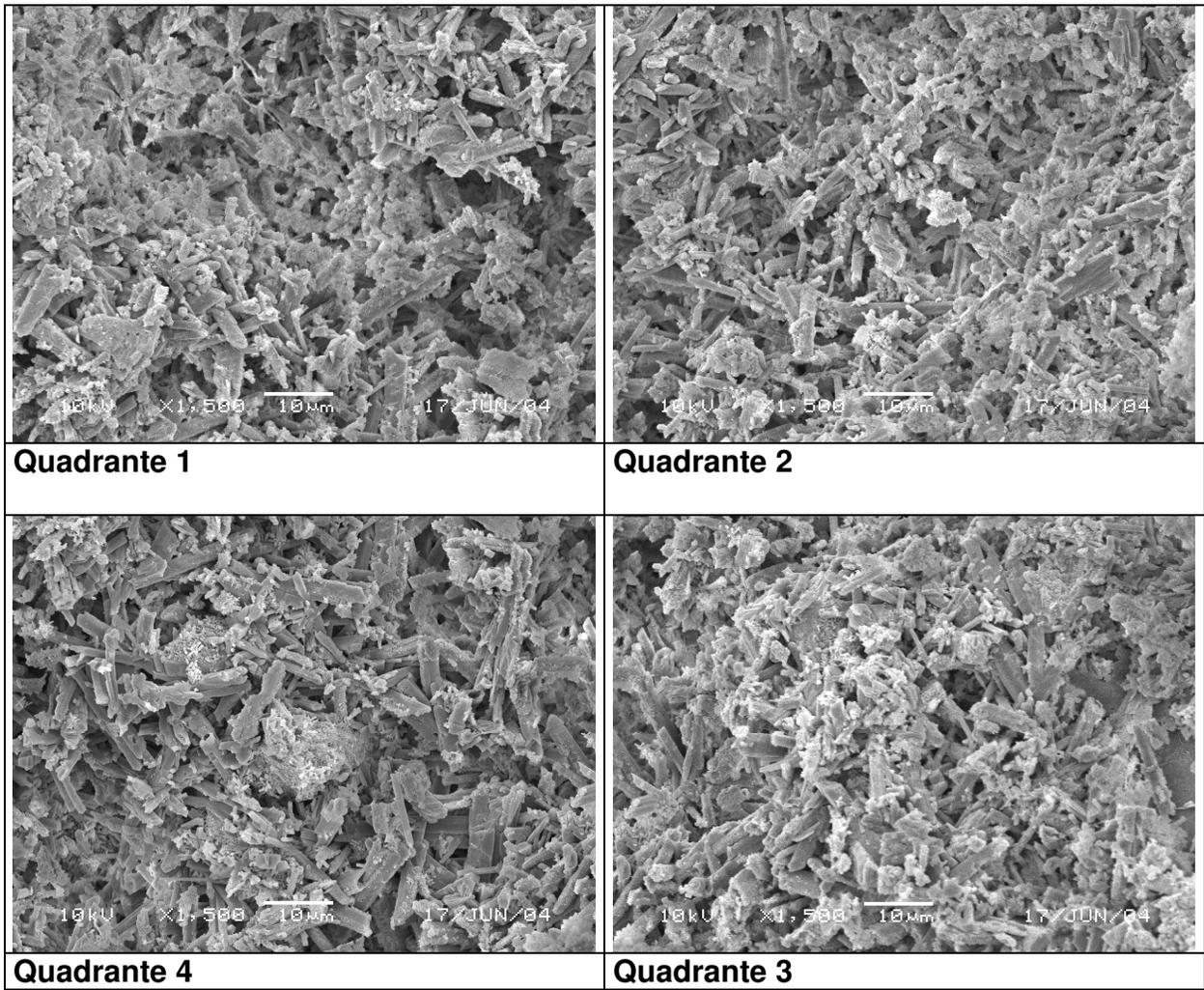
Para analisar a mistura A5 (75%gesso; 25% cimento Portland; 0% sílica ativa), cura interna, tem-se as seguintes micrografias:

Figura B13(a) micrografia da mistura A5 ampliada 1.000 vezes e a Figura B13(b) a micrografia da Figura B13(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

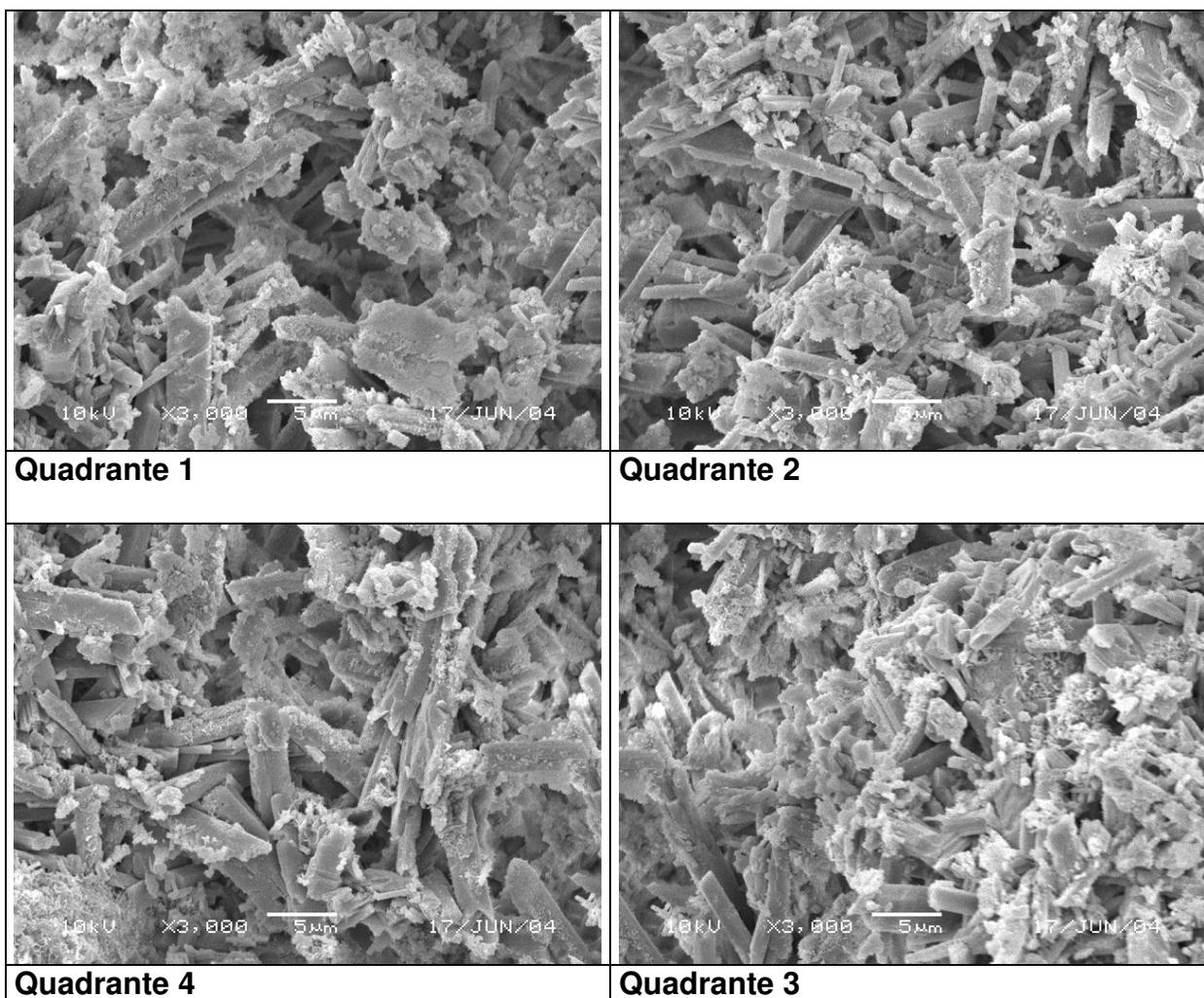
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B14 e 3.000 vezes Figura B15.



**Figura B13 – (a) Microscopia da mistura A5= 75% gesso, 25% cimento Portland, 0% sílica ativa (ampliação 1.000 vezes)  
(b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**



**Figura B14 – Microscopia da mistura A5= 75% gesso e 25% de cimento Portland, 0% de sílica ativa, (ampliação 1.500 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

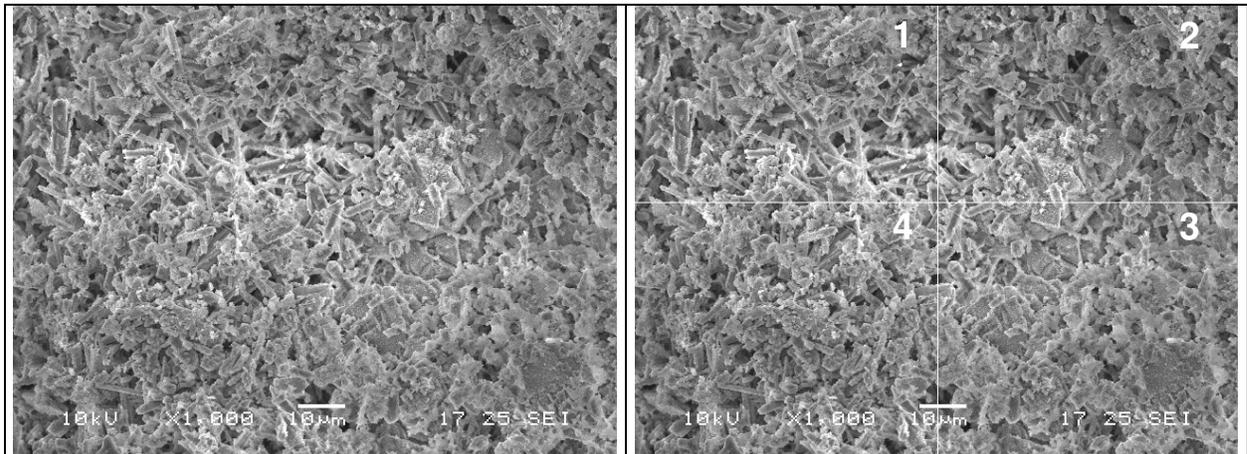


**Figura B15 – Microscopia da mistura A5= 75% gesso e 25% de cimento Portland, 0% de sílica ativa, (ampliação 3.000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

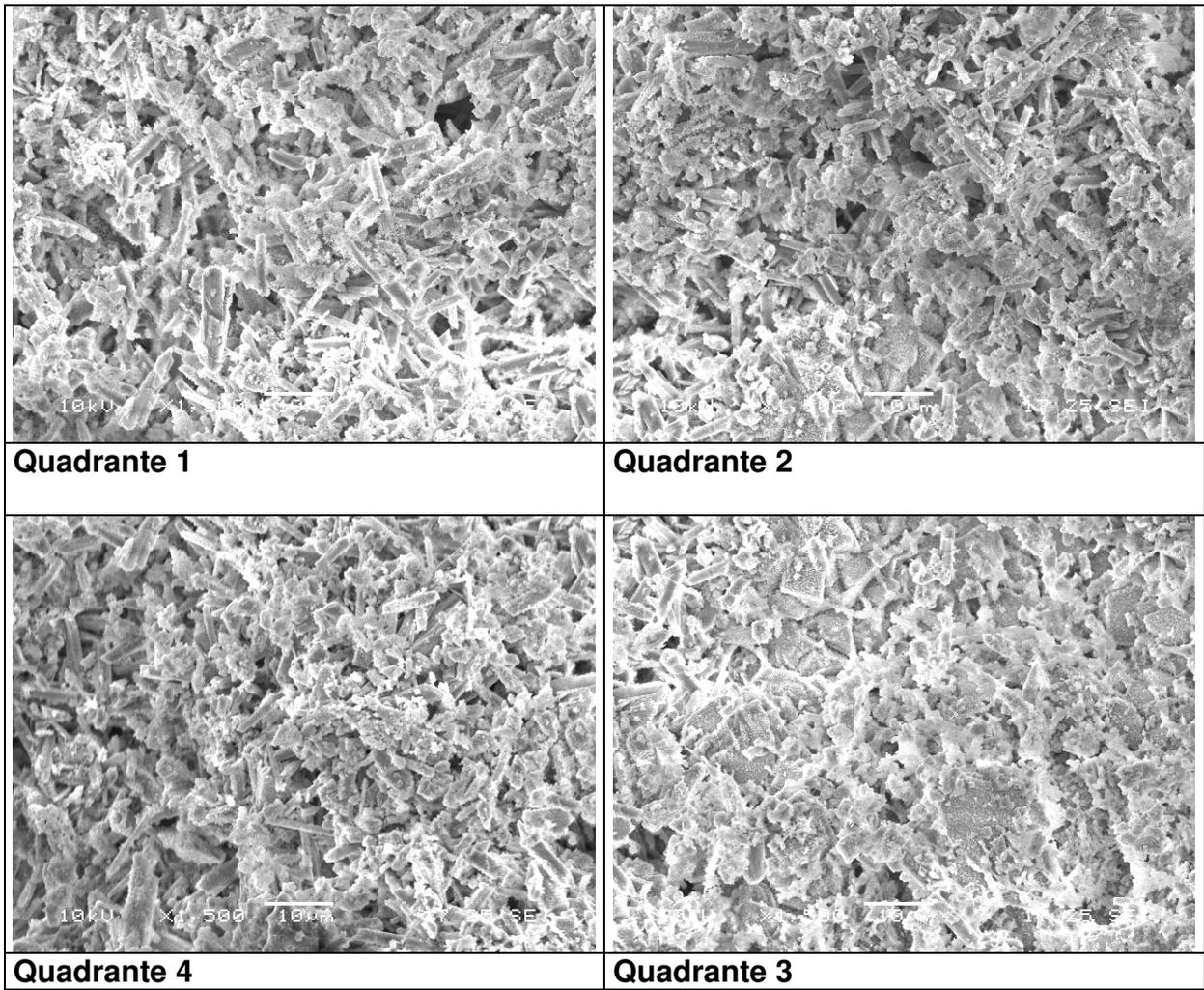
Para analisar a mistura A6 (75%gesso; 20% cimento Portland; 5% sílica ativa), cura interna, tem-se as seguintes micrografias:

Figura B16(a) micrografia da mistura A6 ampliada 1.000 vezes e a Figura B16 (b) a micrografia da Figura B16(a) dividida em quatro partes denominadas quadrante, enumerados no sentido horário, quadrante1; quadrante2; quadrante 3 e quadrante 4.

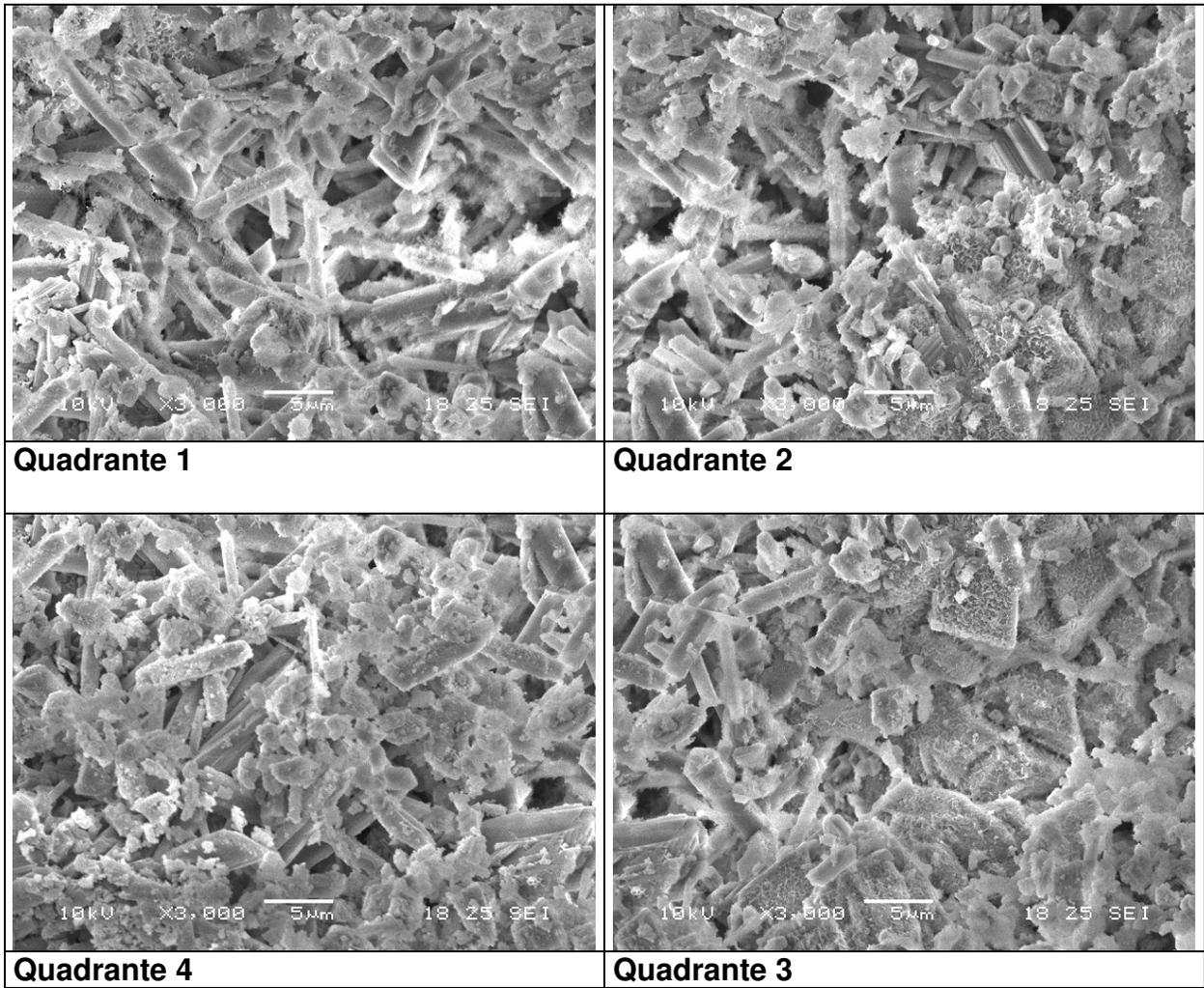
Cada quadrante foi ampliado em 1.500 vezes, Figura B17 e 3.000 vezes Figura B18.



**Figura B16 – (a) Microscopia da mistura A6= 75% gesso, 20% cimento Portland, 5% sílica ativa (ampliação 1.000 vezes)  
 (b) Micrografia (a) dividida nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

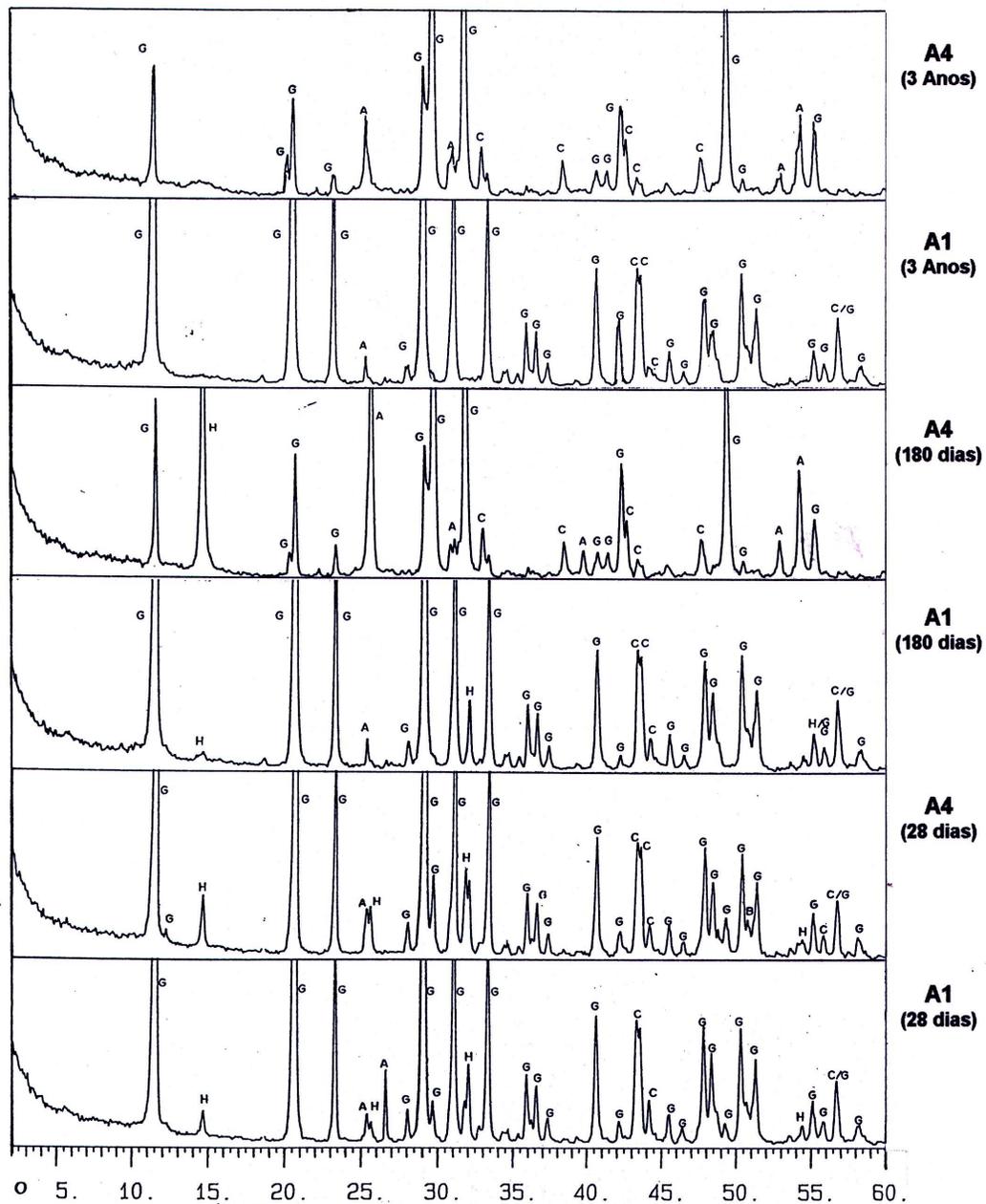


**Figura B17 – Microscopia da mistura A6= 75% gesso e 20% de cimento Portland, 5% de sílica ativa, (ampliação 1.5000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**



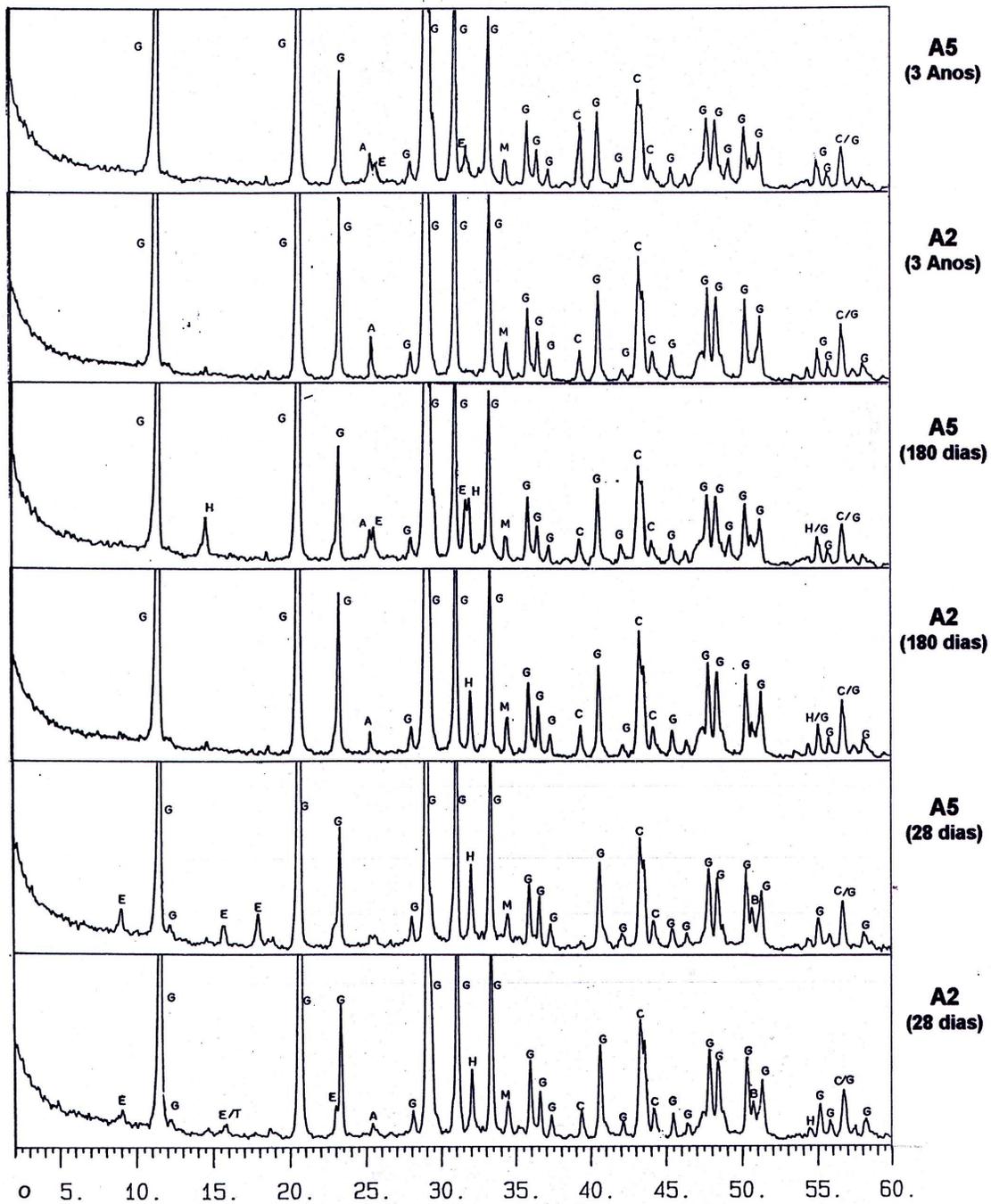
**Figura B18 – Microscopia da mistura A6= 75% gesso e 20% de cimento Portland, 5% de sílica ativa, (ampliação 3.000 vezes) nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, cura interna**

## B.2 Difração de raios-X



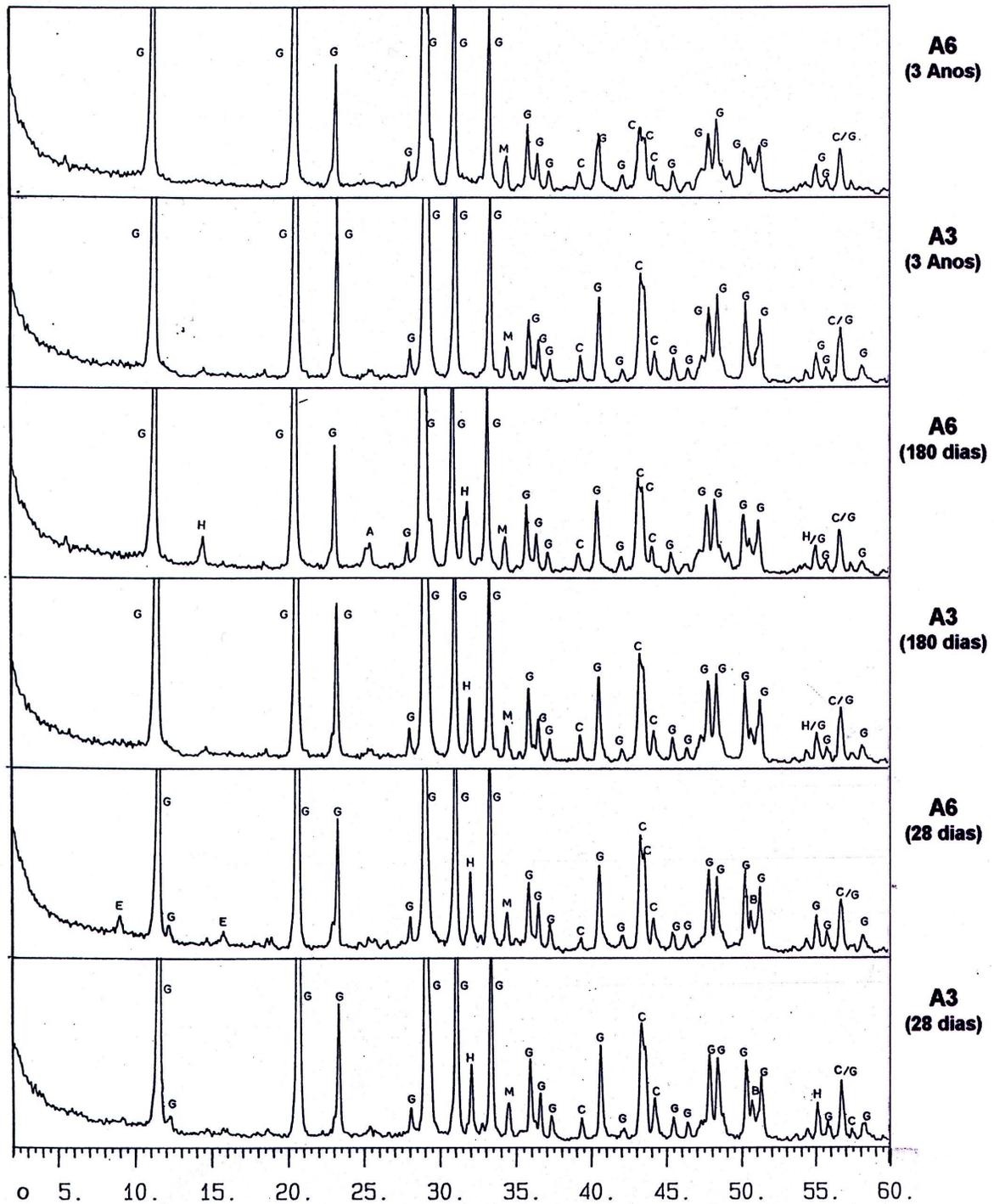
g = gesso c = cimento s = sílica ativa A1 (externa) = A4 (interna) (g=100; c=0; s=0)  
 A = anidrita B = C<sub>2</sub>S C = calcita E = etringita G = gipsita H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato T = thaumasita

**Figura B19 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos. (A1=externo e A4=interno)**



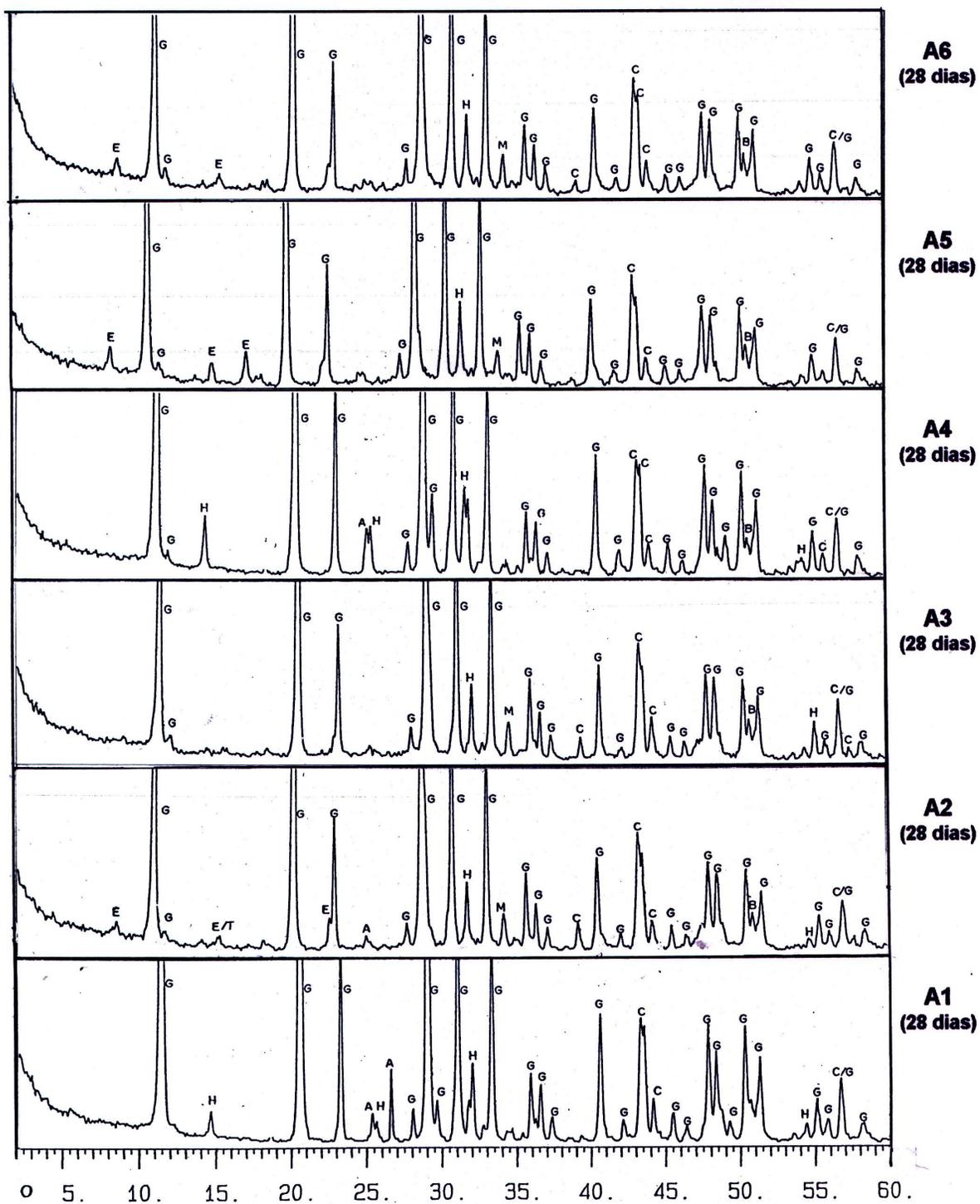
g = gesso            c = cimento            s = sílica ativa            A2 = A5 (g=75; c=25; s=0)  
 A = anidrita            B = C<sub>2</sub>S            C = calcita            E = etringita            G = gipsita            H = hemi-  
 hidrato            M = monosulfoaluminato            T = thaumasita

**Figura B20 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28, 180 dias e 3 anos - (A2=externo e A5=interno)**

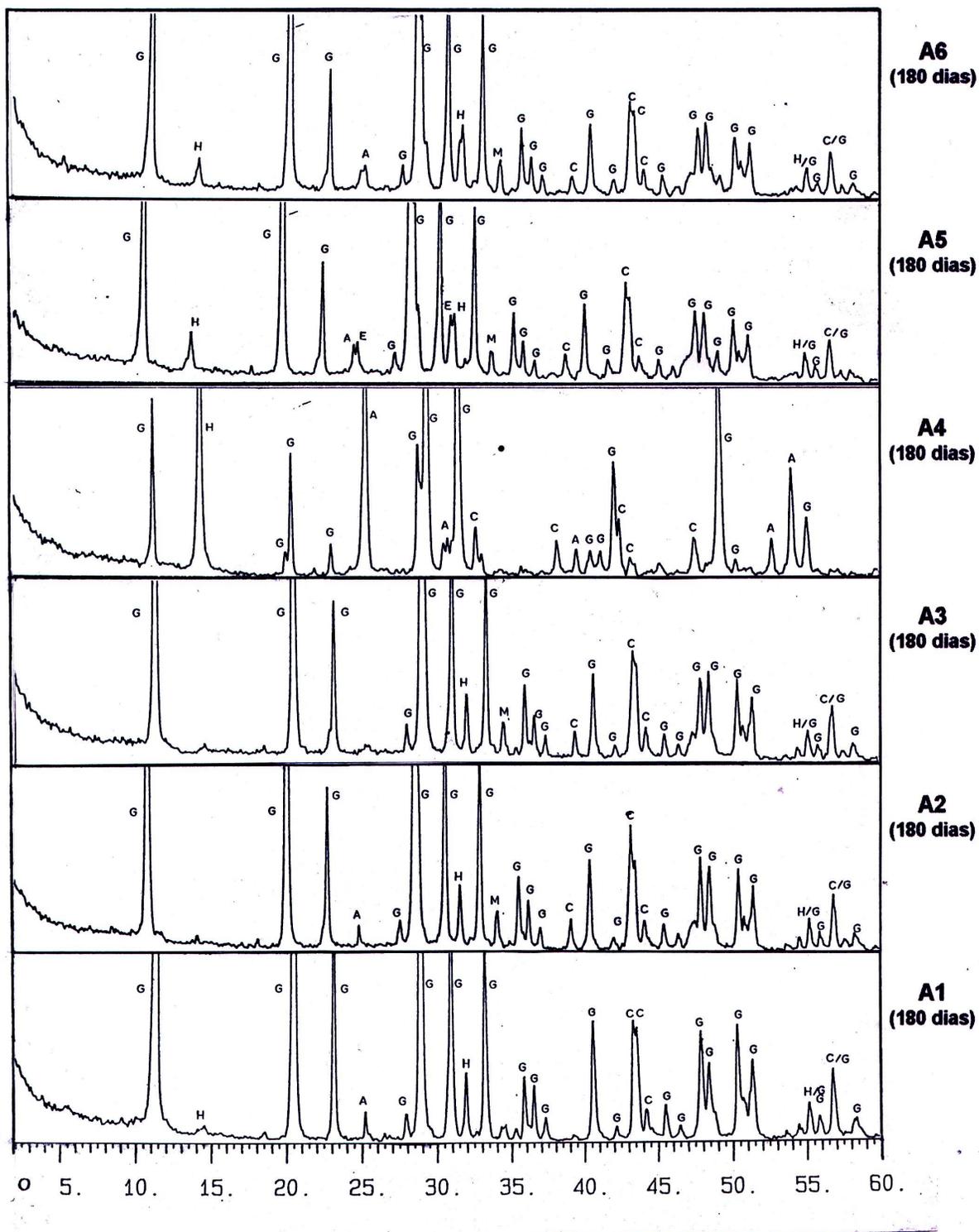


g = gesso            c = cimento            s = sílica ativa            A3 = A6 (g=75; c=20; s=5)  
 A = anidrita        B = C<sub>2</sub>S    C = calcita            E = etringita            G = gipsita            H = hemi-hidrato  
 M = monosulfoaluminato    T = thaumasita

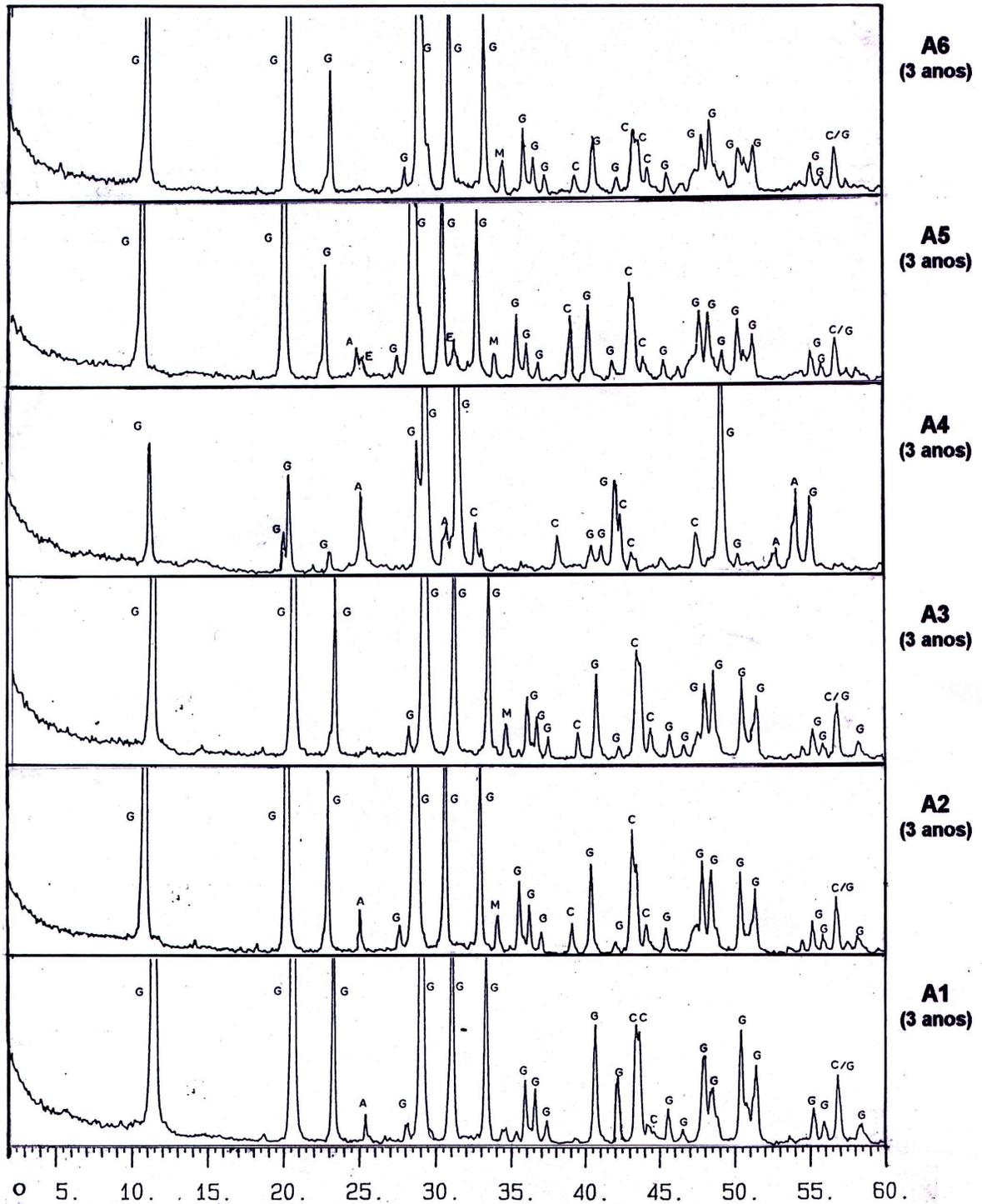
**Figura B21 – Comparação dos difratogramas das misturas de mesmo traço aos 28,180 dias e 3 anos - (A3=externo e A6=interno)**



**Figura B22 - Comparação dos difratogramas das misturas aos 28 dias - (A1, A2 e A3=externo e A4, A5 e A6=interno)**

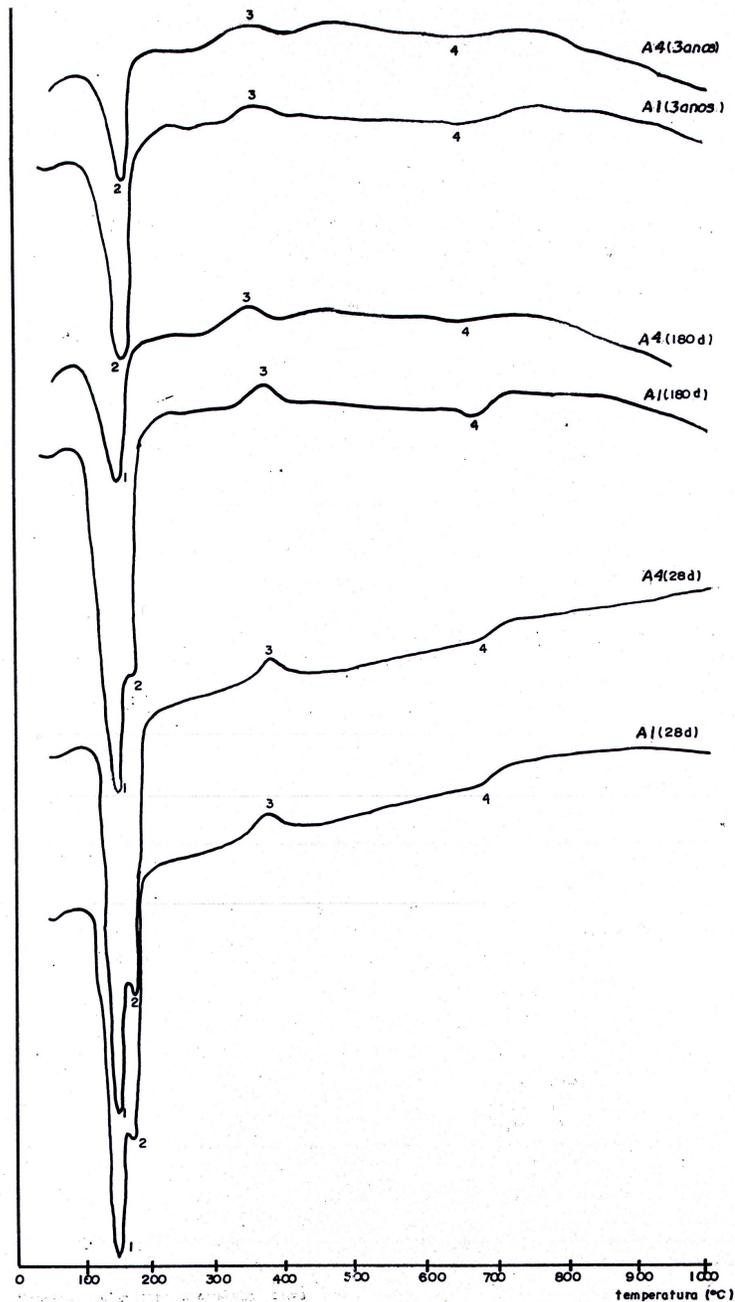


**Figura B23 - Comparação dos difratogramas das misturas aos 180dias - (A1, A2 e A3=externo e A4, A5 e A6=interno)**



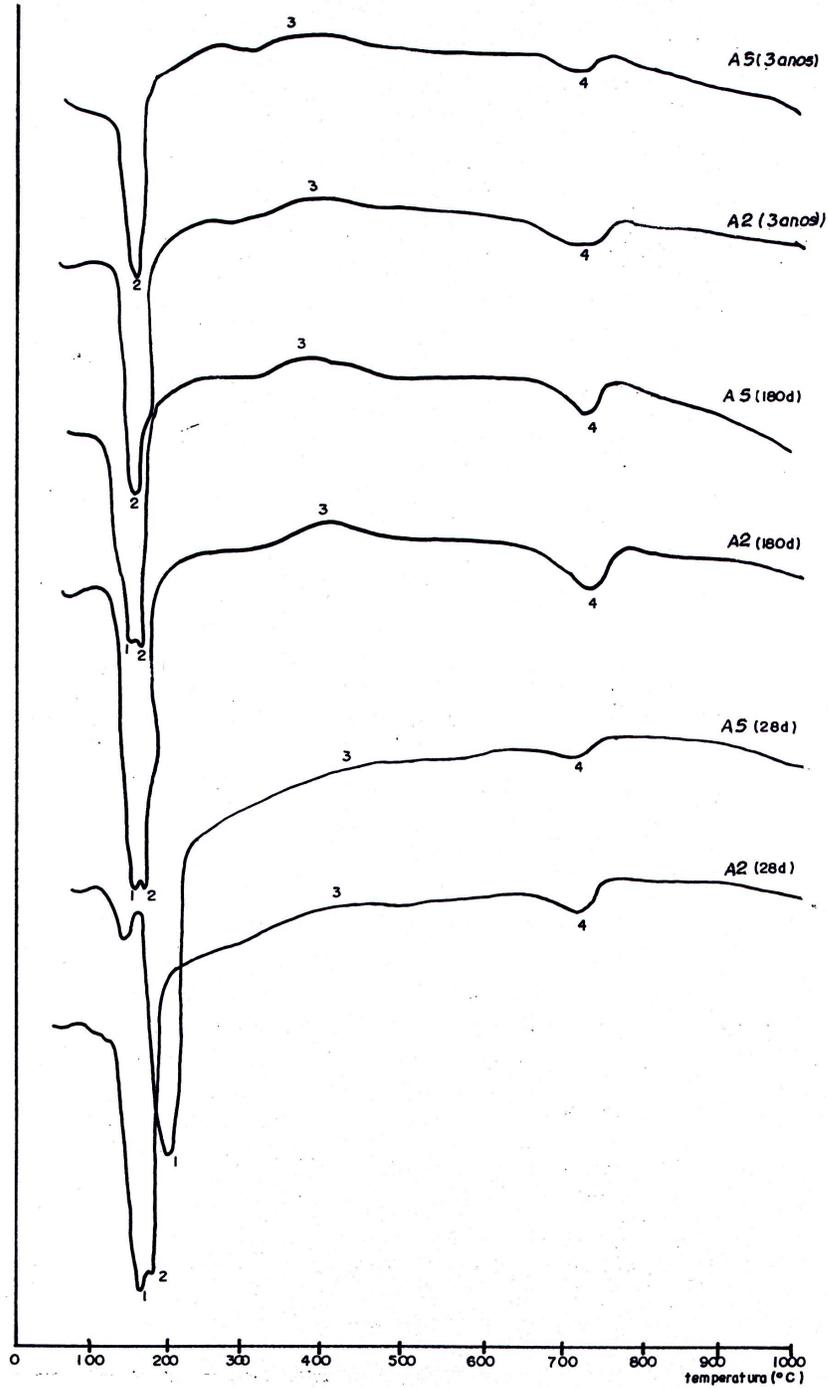
**Figura B24 - Comparação dos difratogramas das misturas aos 3 anos - (A1, A2 e A3=externo e A4, A5 e A6=interno)**

### B.3 Análise Térmica Diferencial



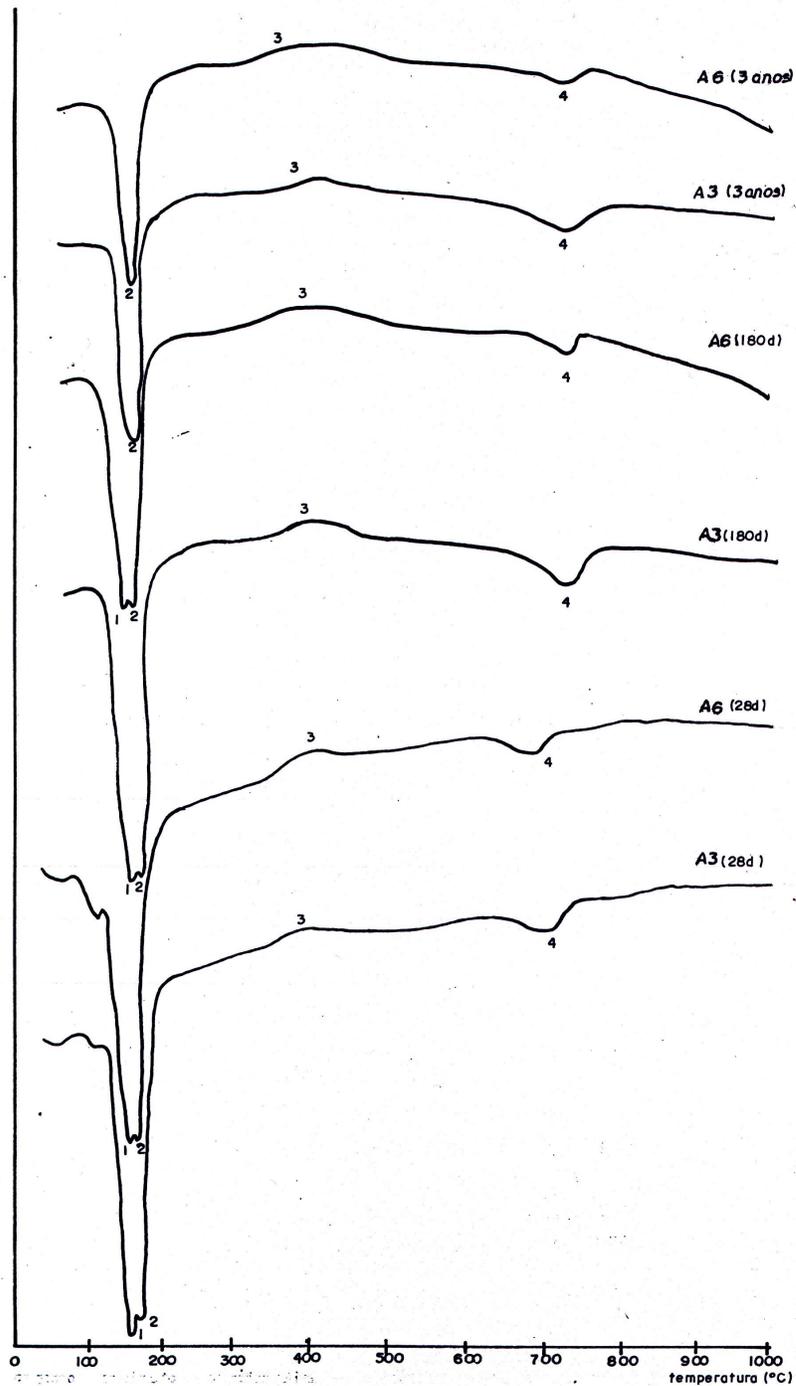
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
A1 = A4 (100/0/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
A1 (Externo) e A4 (interno) a/agl=0,70

**Figura – B25 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A1=externa e A4=interna)**



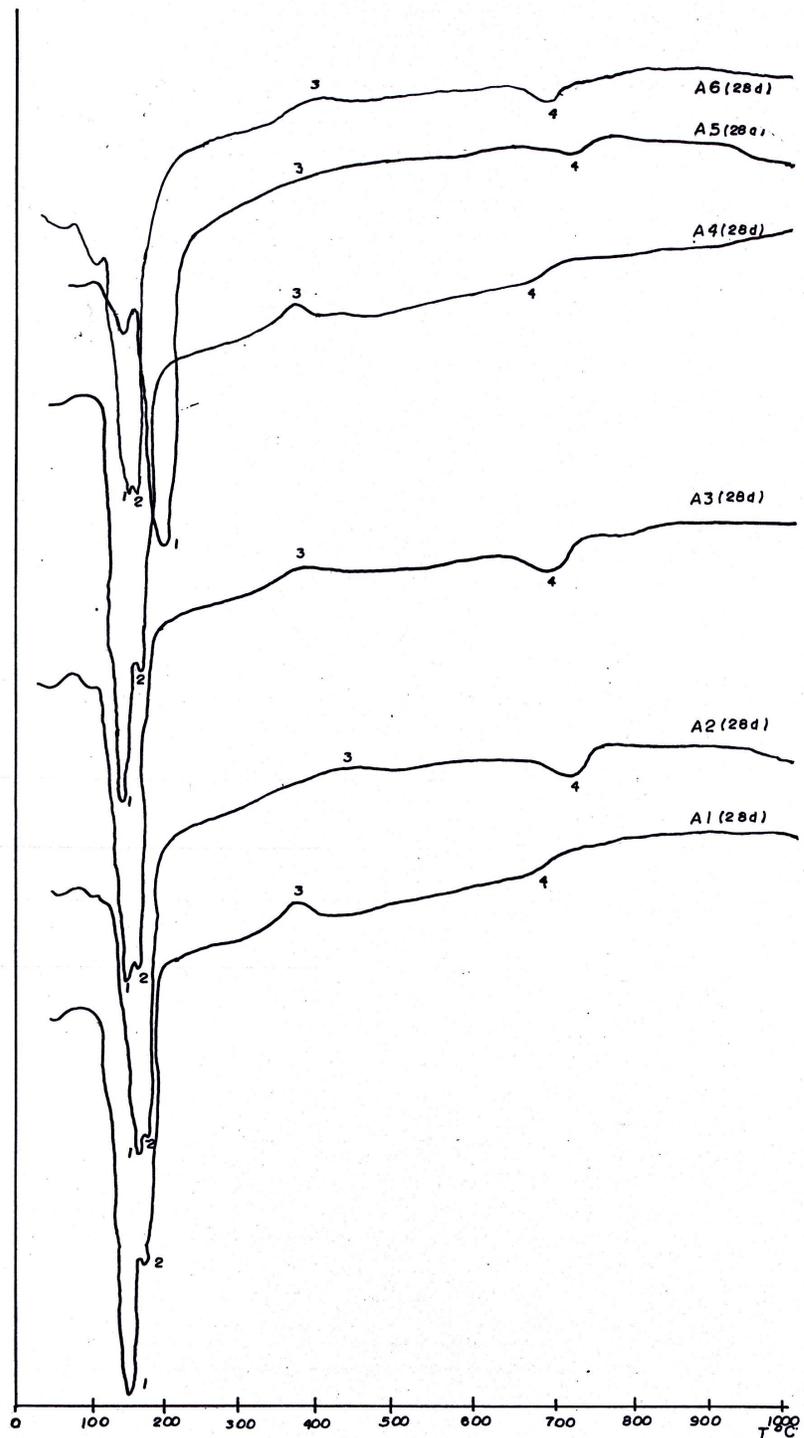
1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
 A2 = A5 (75/25/0) – (gesso/cimento/silica ativa)  
 A2 (Externo) e A5 (interno) a/agl=0,70

**Figura – B26 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A2=externa e A5=interna)**

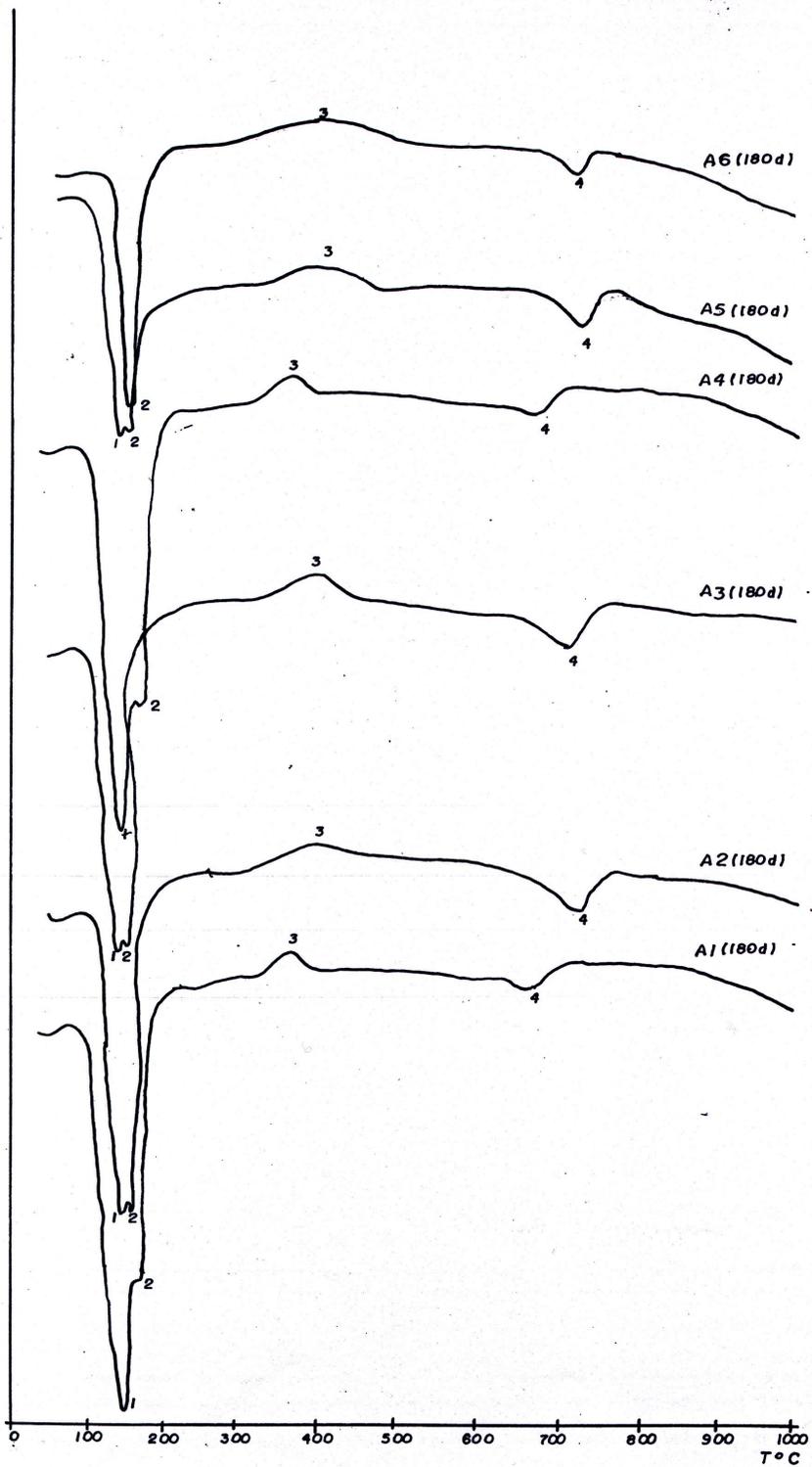


1 = hemi-hidrato; 2 = anidrita solúvel; 3 = transformação da anidrita solúvel em insolúvel; 4 =  $\gamma\text{C}_2\text{S}$   
 A3 = A6 (75/20/5) – (gesso/cimento/silica ativa)  
 A3 (Externo) e A6 (interno) a/agl=0,70

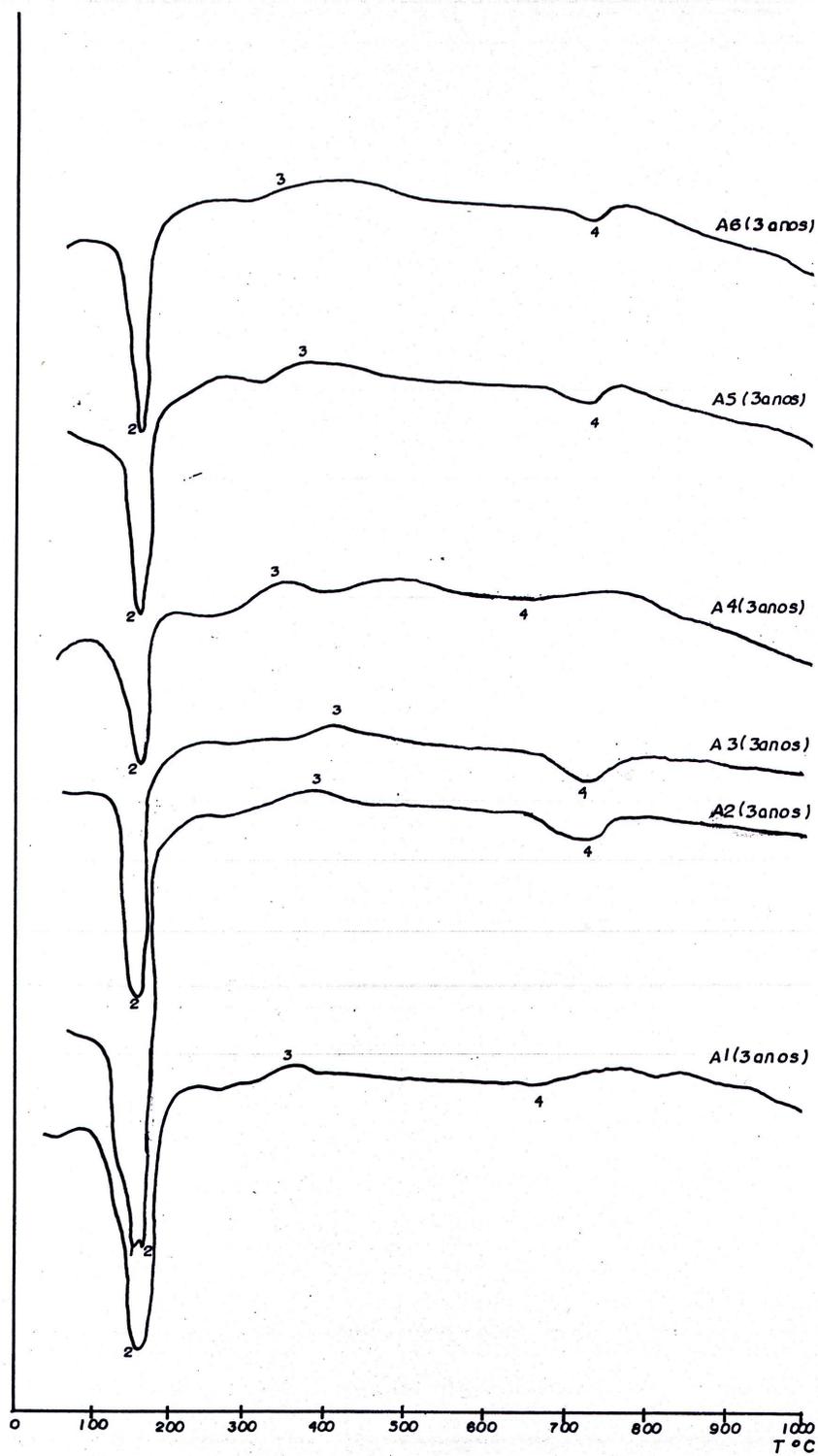
**Figura – B27 Comparação das curvas de DTA das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A3=externa e A6=interna)**



**Figura B28 - Comparação das curvas de DTA das misturas com cura interna e externa aos 28 dias - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)**

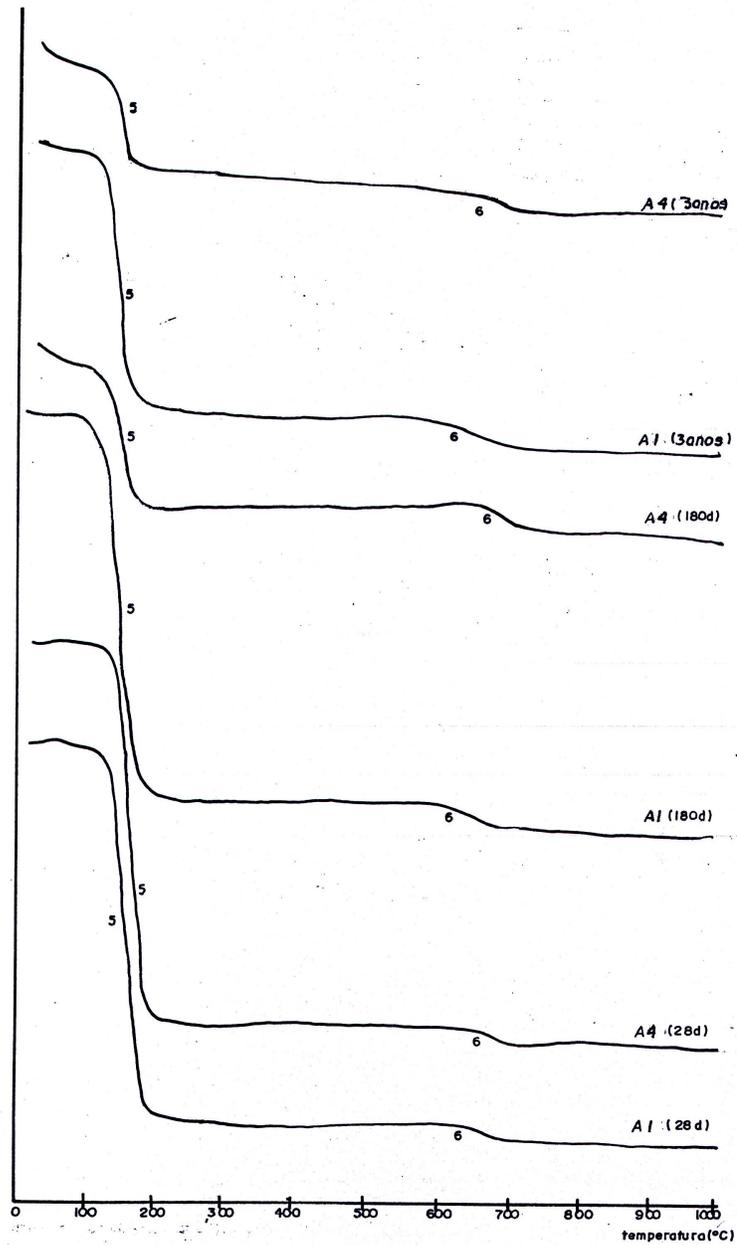


**Figura B29 - Comparação das curvas de DTA das misturas com cura interna e externa aos 180 dias - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)**



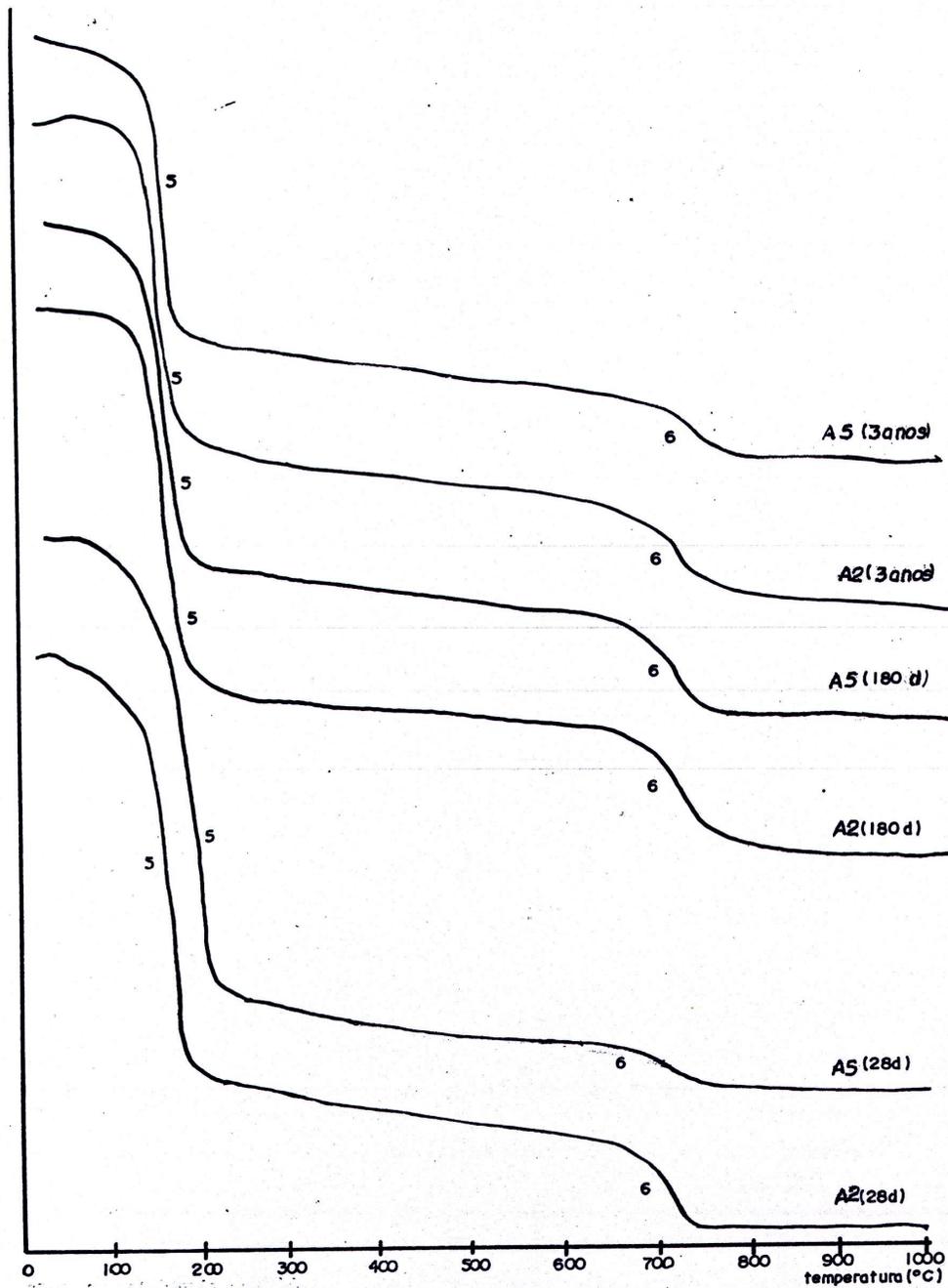
**Figura B30 - Comparação das curvas de DTA das misturas com cura interna e externa aos 3 anos - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)**

## B.4 Termogravimetria



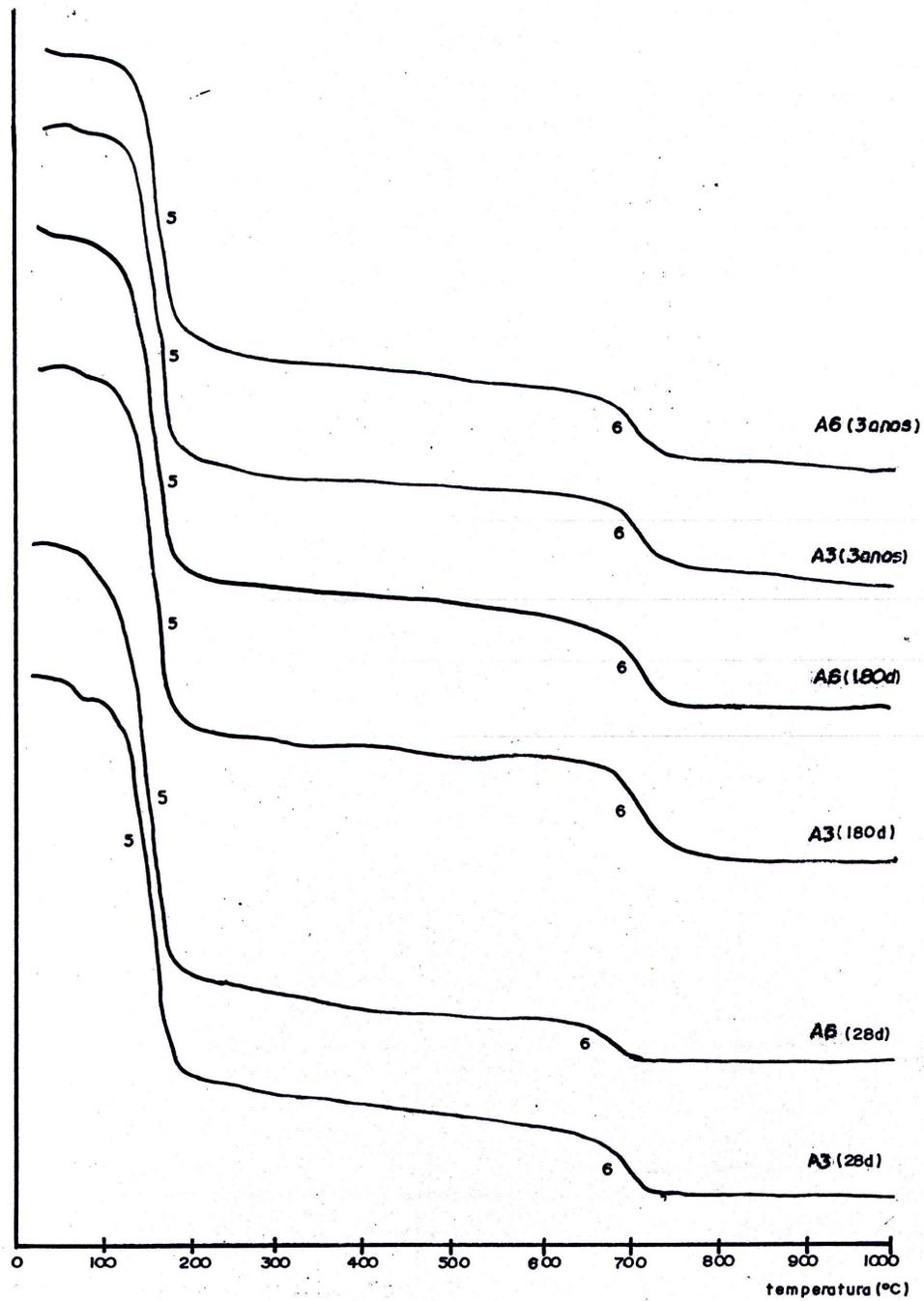
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
A1 = A4 (100/0/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
A1 (Externo) e A4 (interno) a/agl=0,70

**Figura – B31 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos - (A1=externa e A4=interna)**



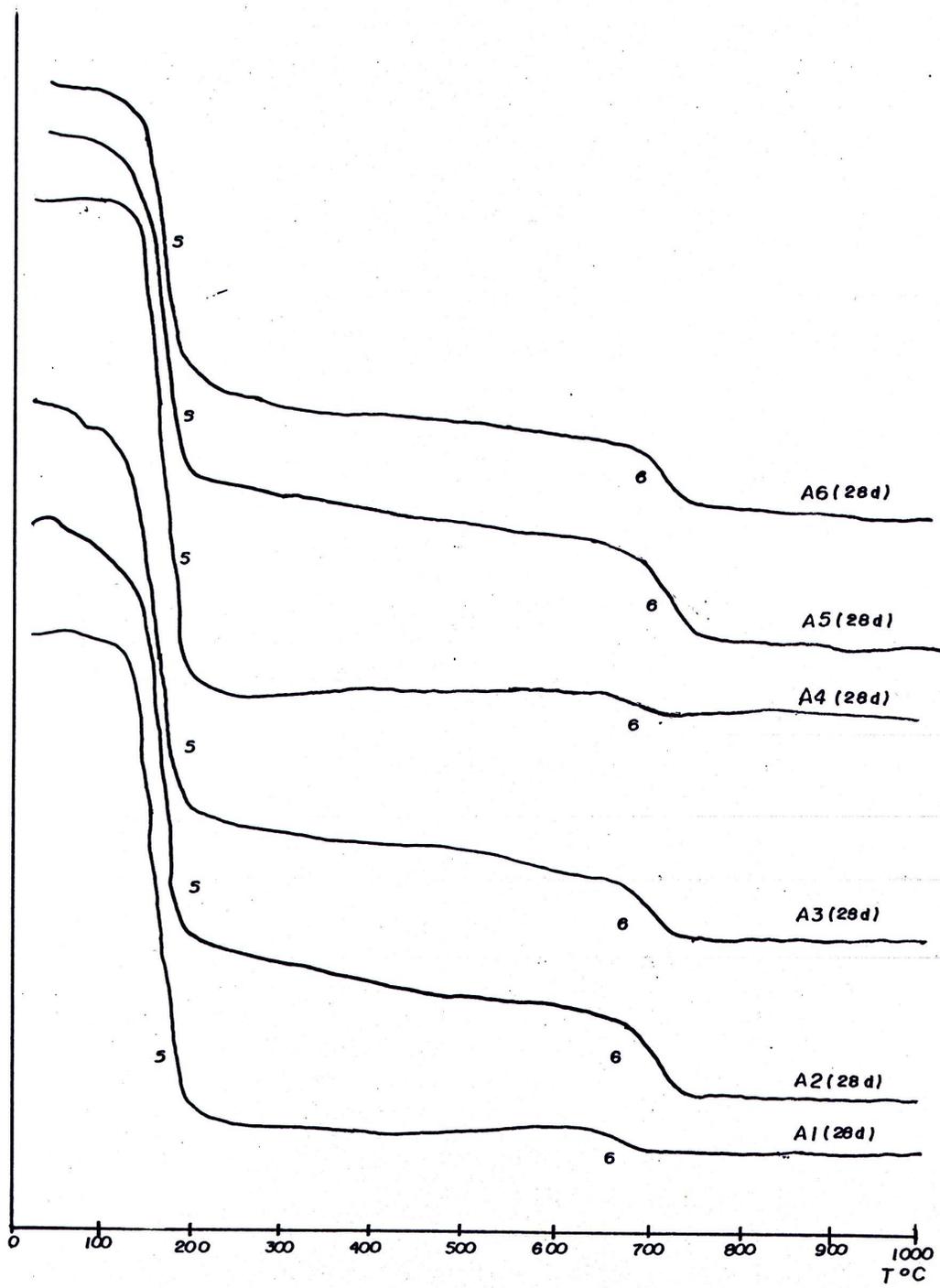
5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
 A2 = A5 (75/25/0) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A2 (Externo) e A5 (interno) a/agl=0,70

**Figura – B32 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos. - (A2=externa e A5=interna)**



5 = água de cristalização do gesso; 6 = liberação de CO<sub>2</sub>  
 A3 = A6 (75/20/5) – (gesso/cimento/sílica ativa)  
 A3 (Externo) e A6 (interno) a/agl=0,70

**Figura – B33 Comparação das curvas de TG das misturas de mesmo traço com cura interna e externa aos 28, 180 dias e 3 anos. - (A3=externa e A6=interna)**



**Figura B34 - Comparação das curvas de TG das misturas com cura interna e externa aos 28 dias - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)**

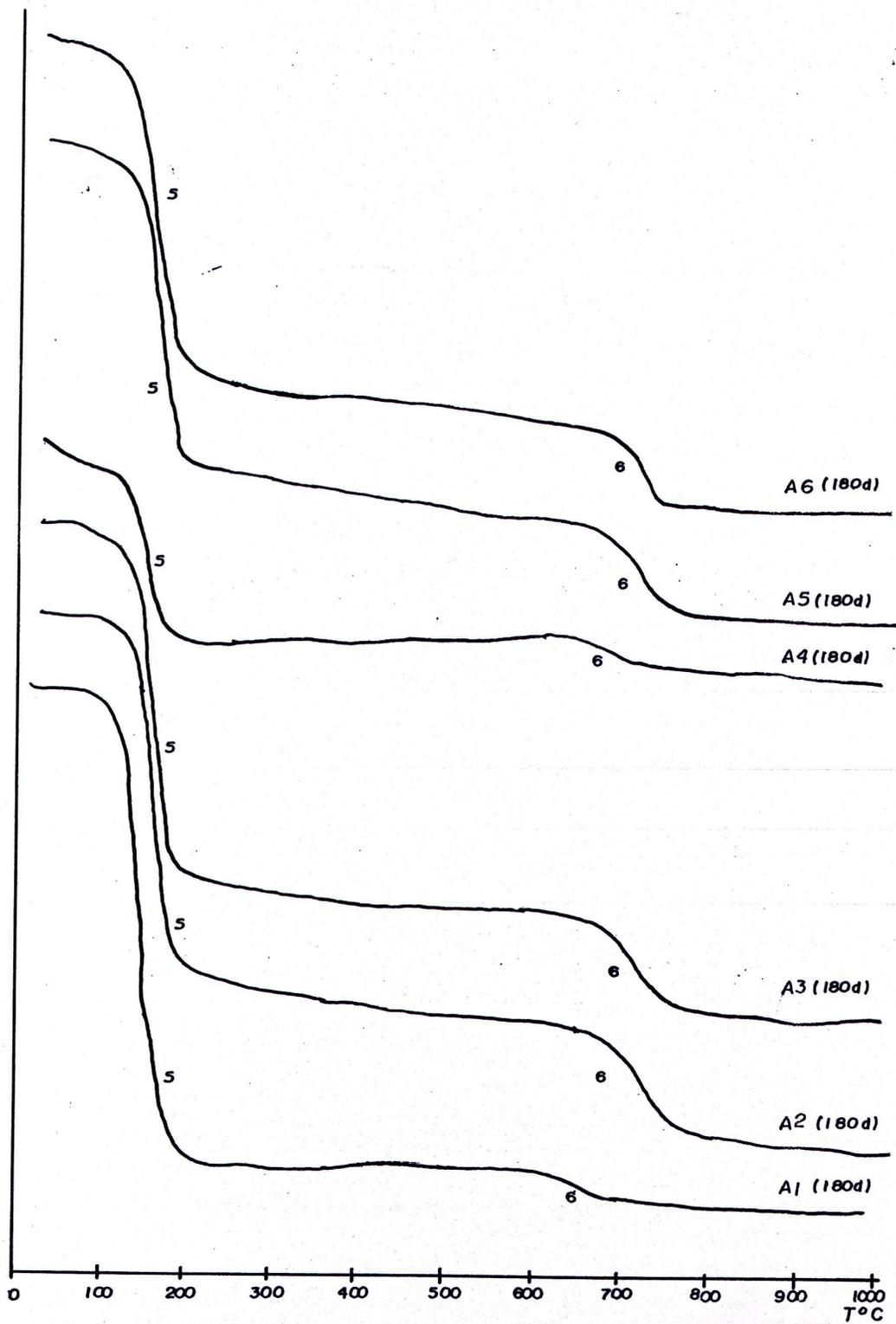
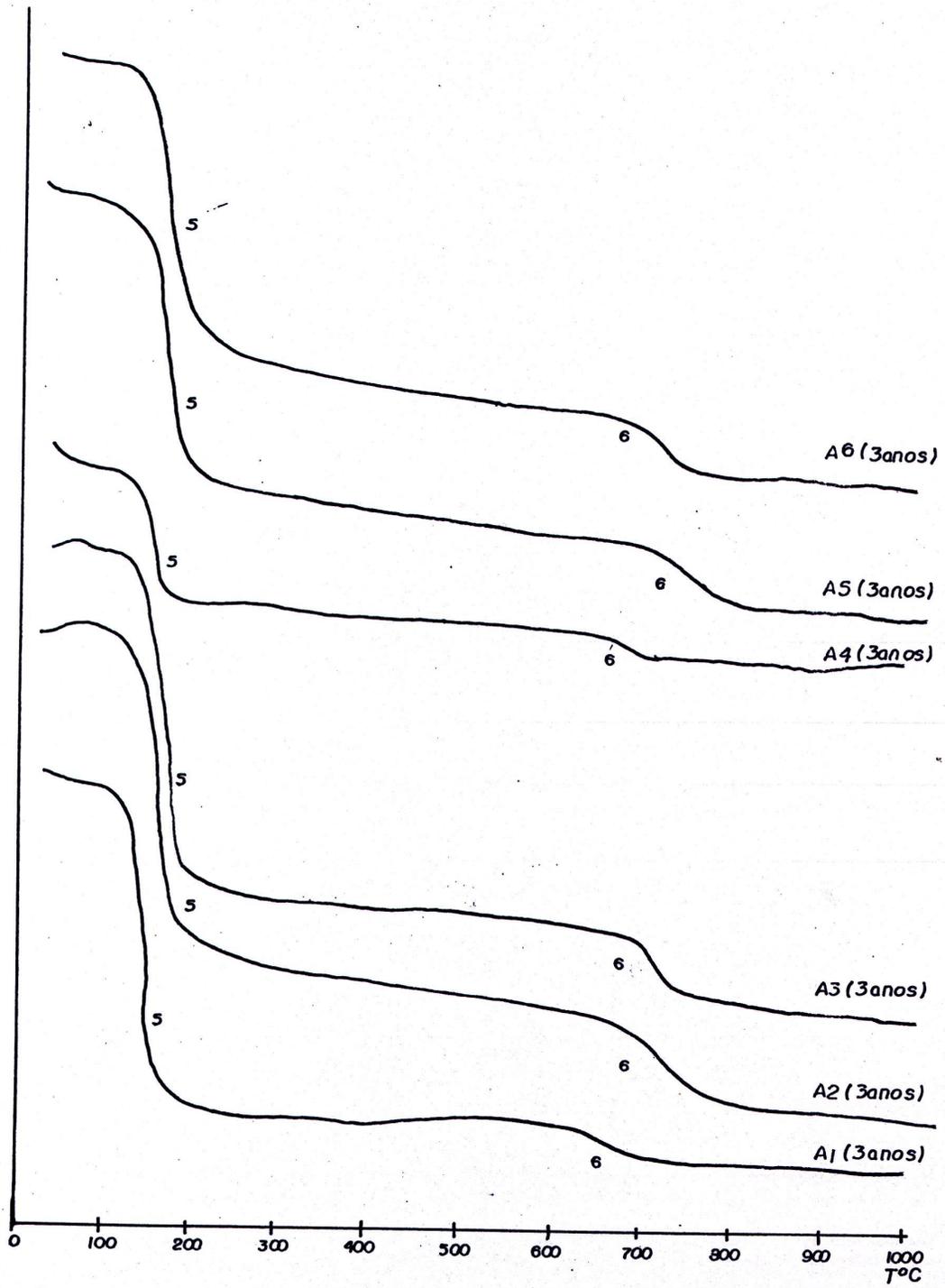
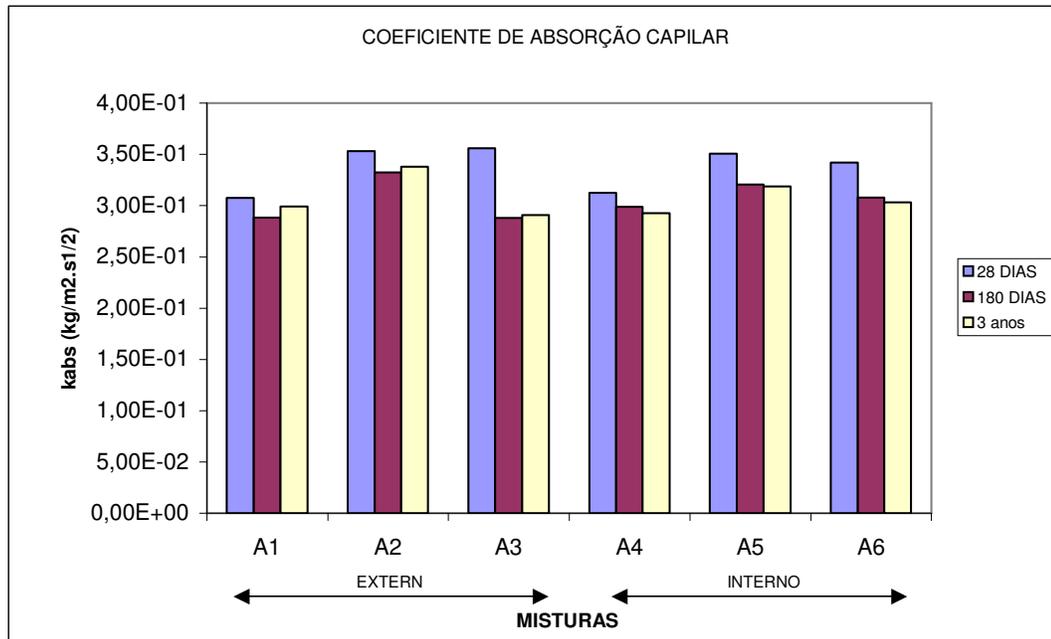


Figura B35 - Comparação das curvas de TG das misturas com cura interna e externa aos 180 dias - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)

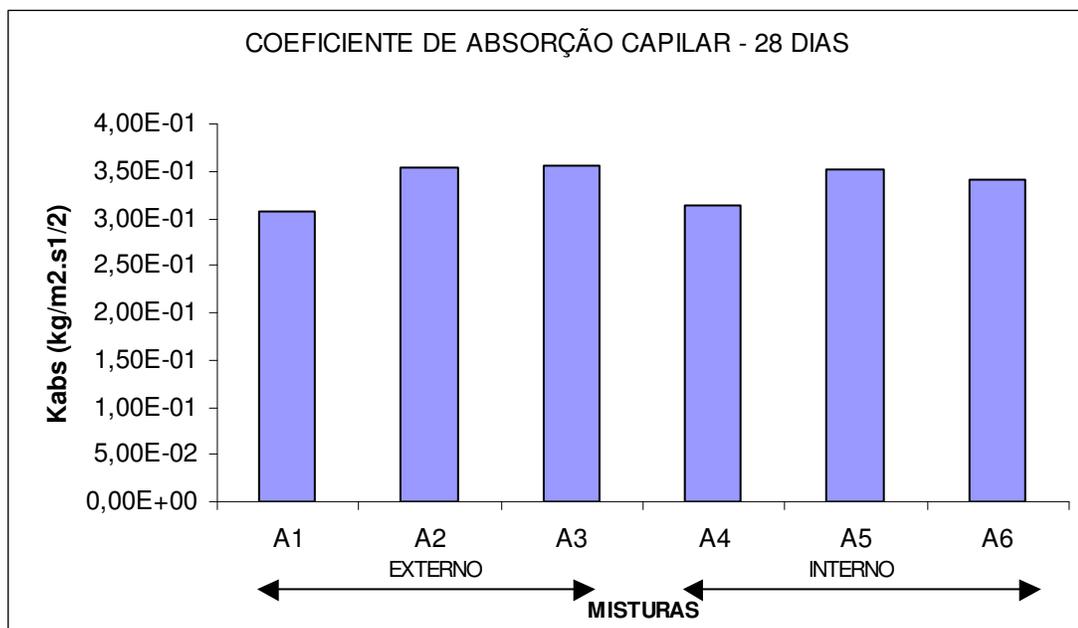


**Figura B36 - Comparação das curvas de TG das misturas com cura interna e externa aos 3 anos - (A1, A2 e A3=externa e A4, A5 e A6=interna)**

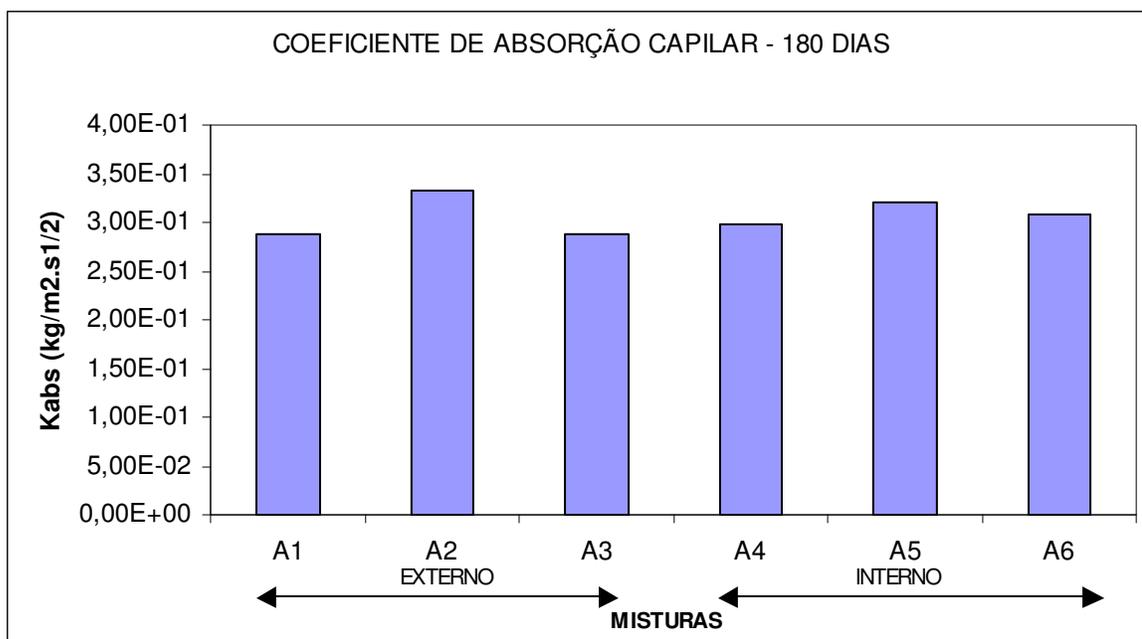
## B5 Absorção capilar em uma hora



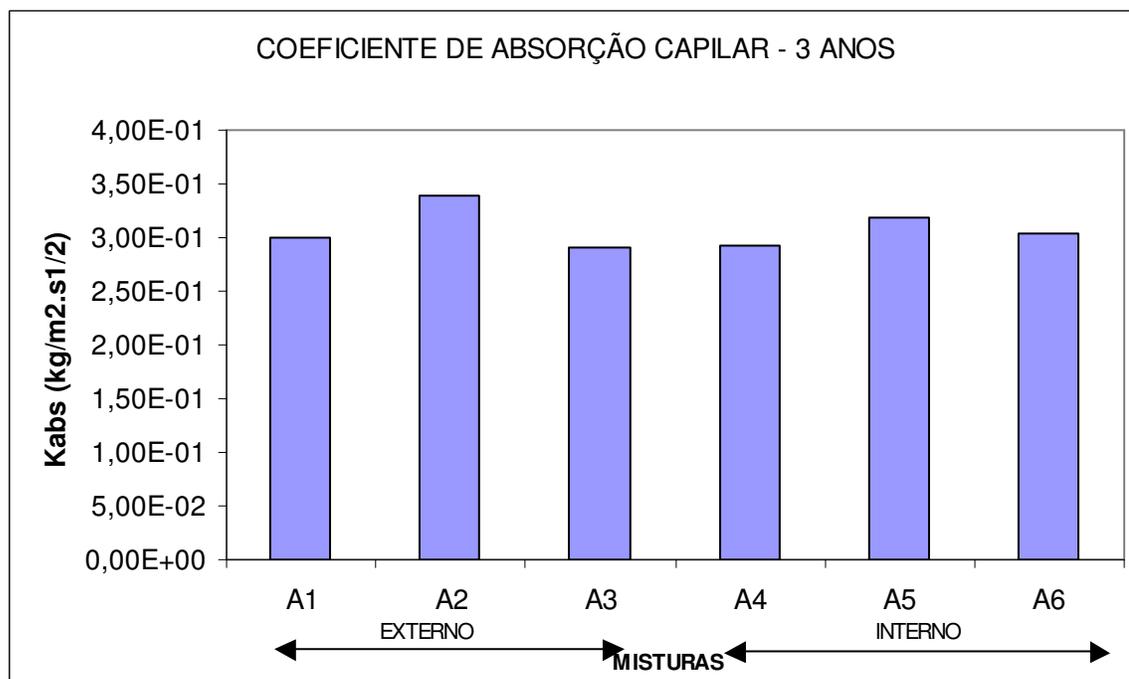
**Figura B37 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28 dias, 180 dias e 3 anos ( $k_{abs}$ )**



**Figura B38 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 28 dias ( $k_{abs}$ )**



**Figura B39 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 180 dias ( $k_{abs}$ )**



**Figura B40 – Coeficiente de absorção capilar em uma hora aos 3 anos ( $k_{abs}$ )**

## B6 Perda de massa em 24 horas

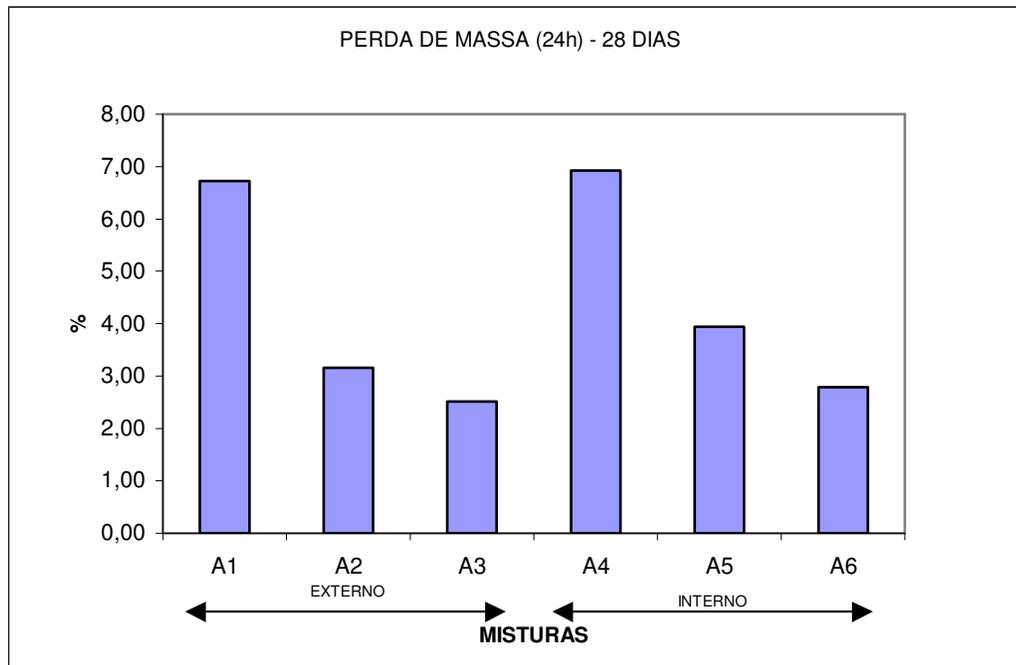


Figura B41 – Perda de massa(%) após 24 horas de imersão em água aos 28 dias

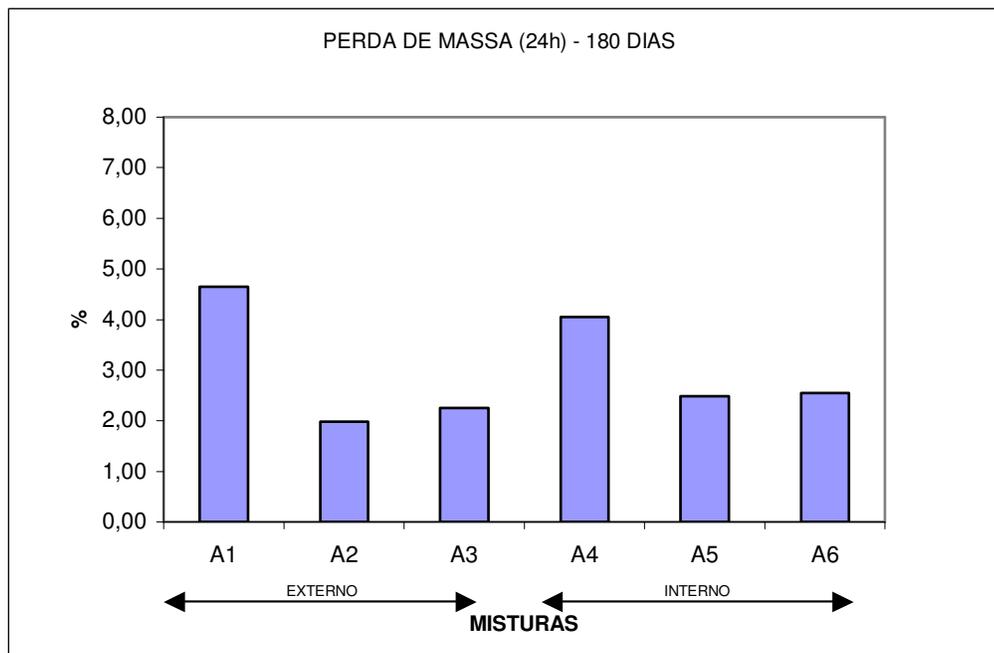
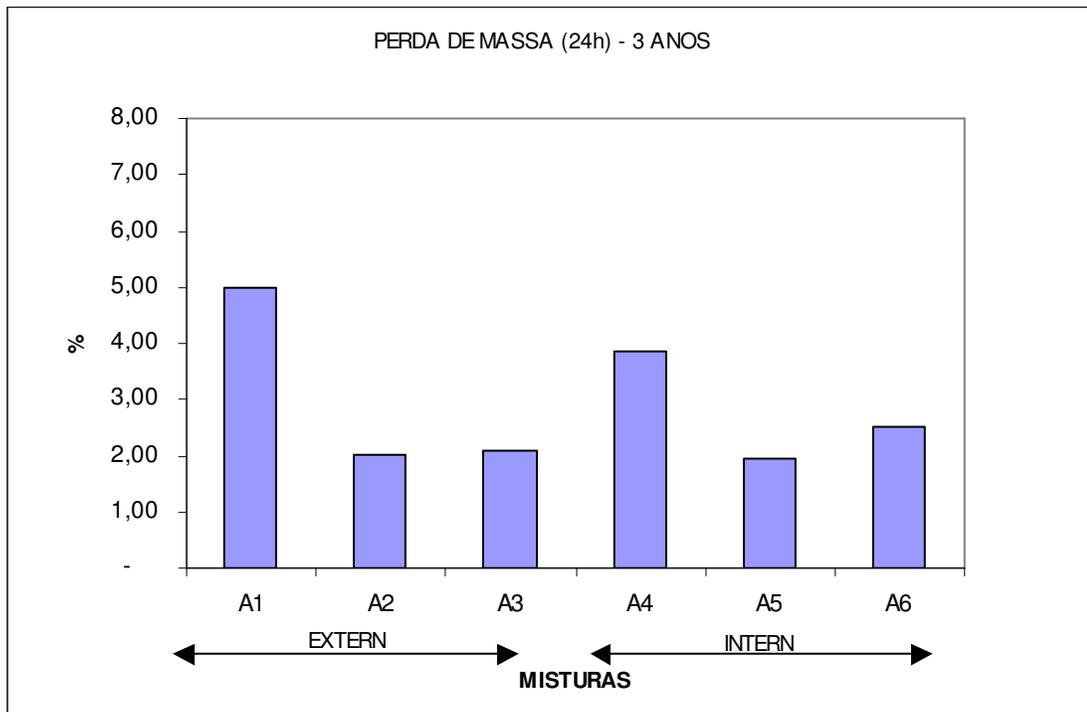
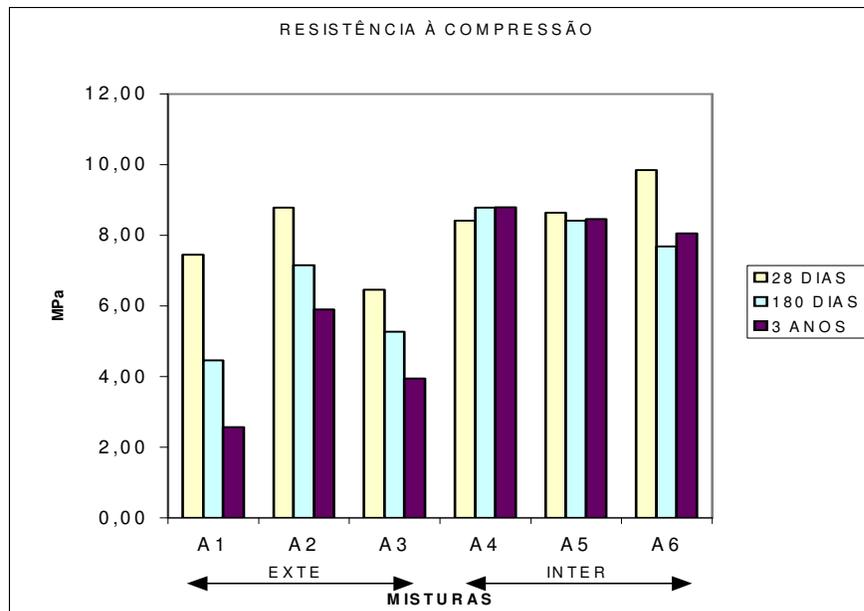


Figura B42 – Perda de massa(%) após 24 horas de imersão em água aos 180 dias

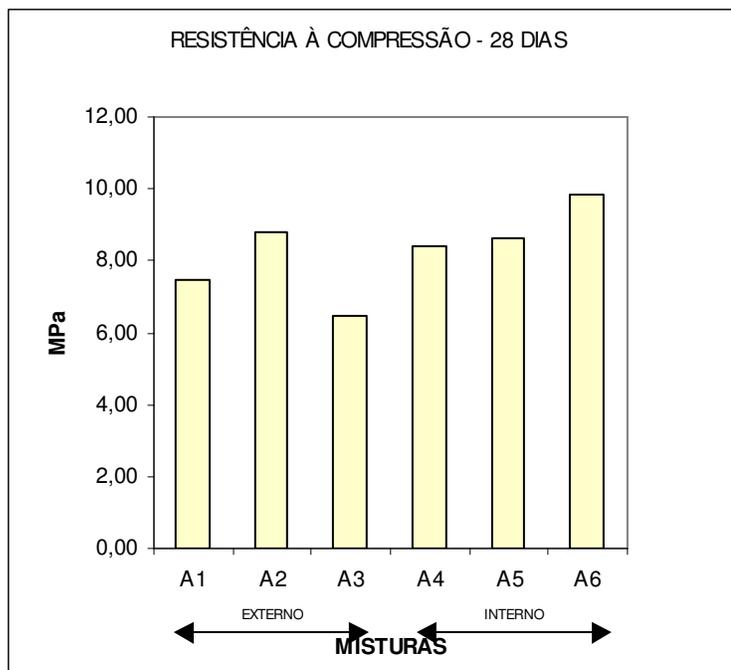


**Figura B43 – Perda de massa(%) após 24 horas de imersão em água aos 3 anos**

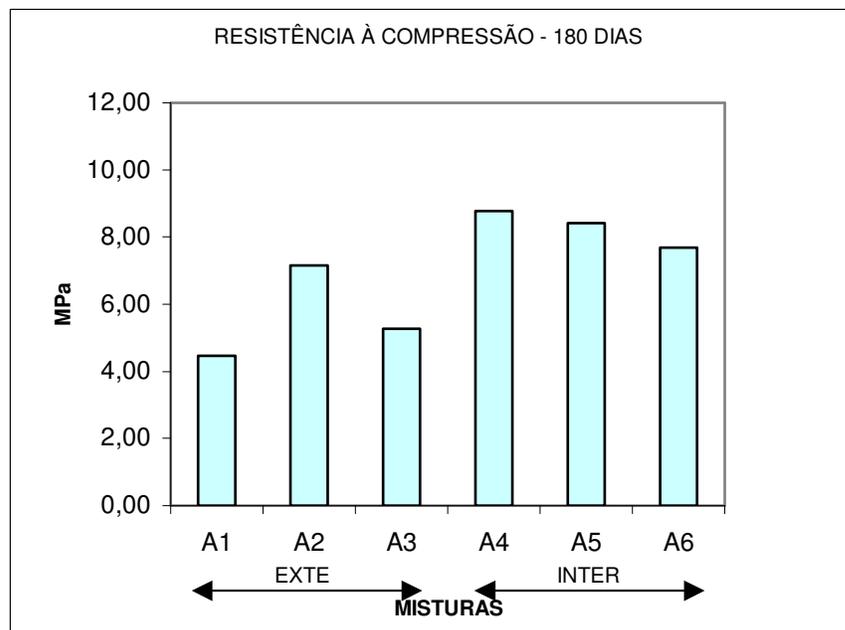
### B7 Resistência à Compressão



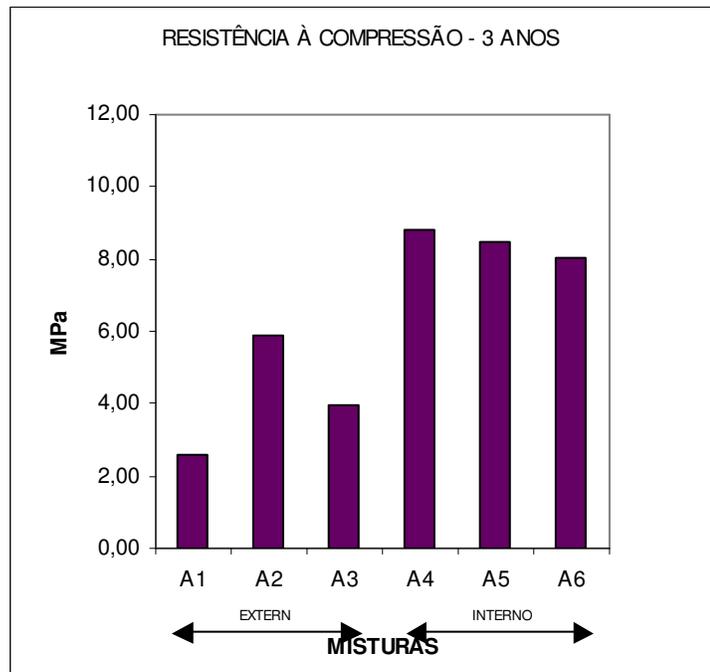
**Figura B44 – Resistência à compressão (Mpa) aos 28 dias, 180 dias e aos 3 anos**



**Figura B45 – Resistência à compressão (Mpa) aos 28 dias**

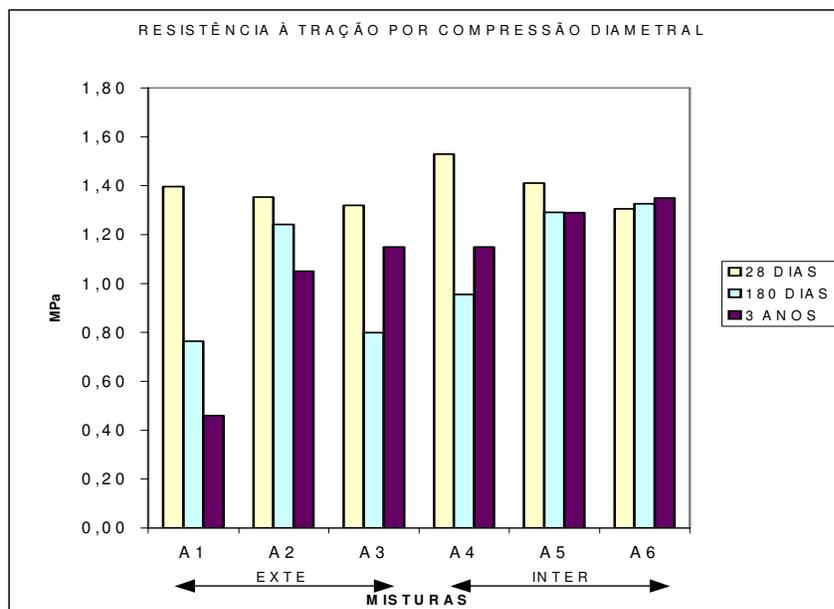


**Figura B46 – Resistência à compressão (Mpa) aos 180 dias**

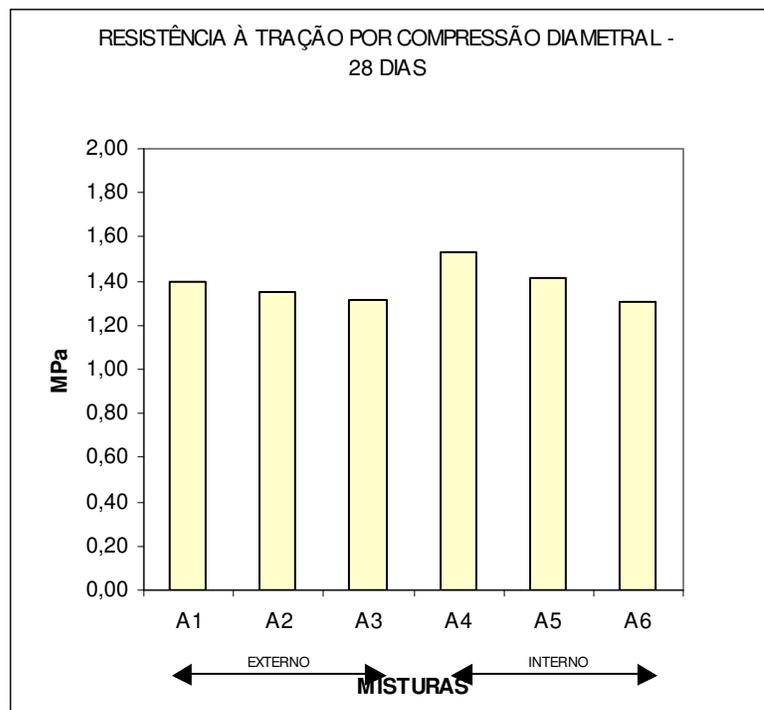


**Figura B47 – Resistência à compressão (Mpa) aos 3 anos**

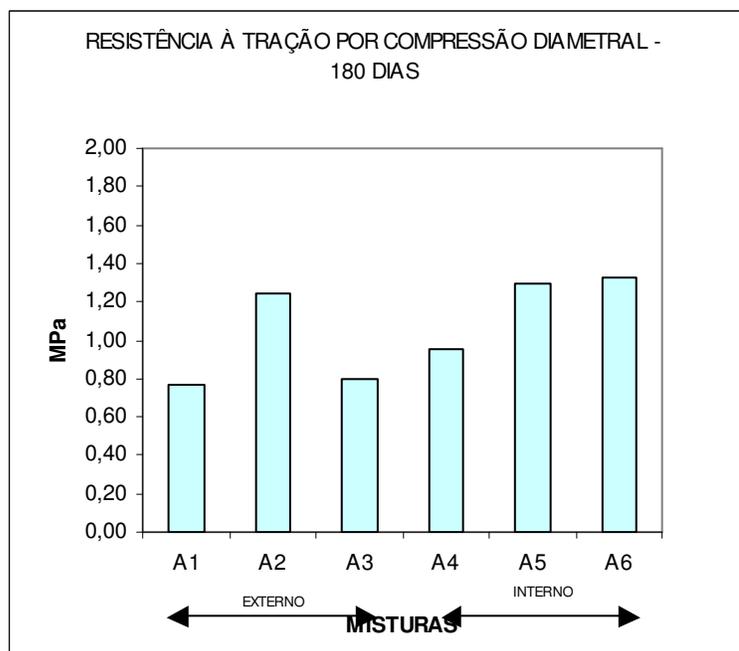
### B8 Resistência à tração



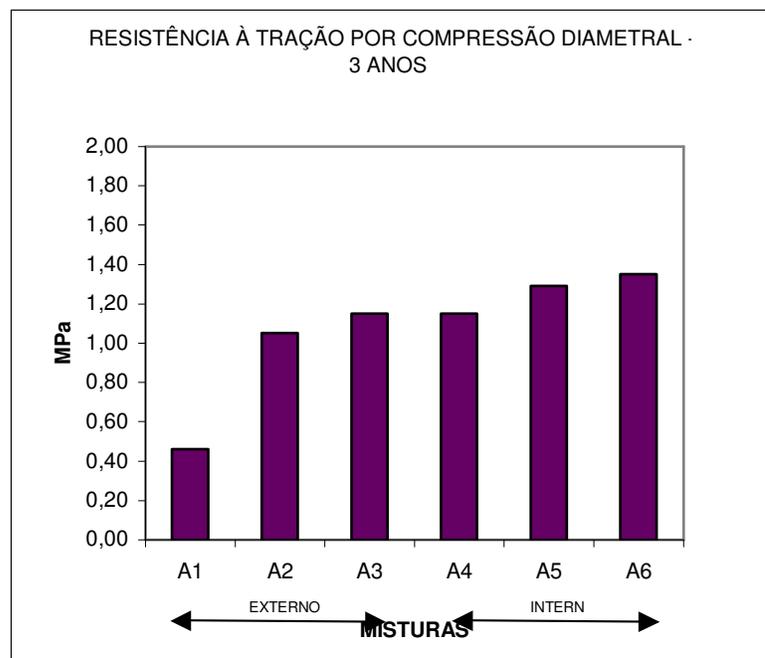
**Figura B48 – Resistência à tração (Mpa) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos**



**Figura B49 – Resistência à tração (Mpa) aos 28 dias**

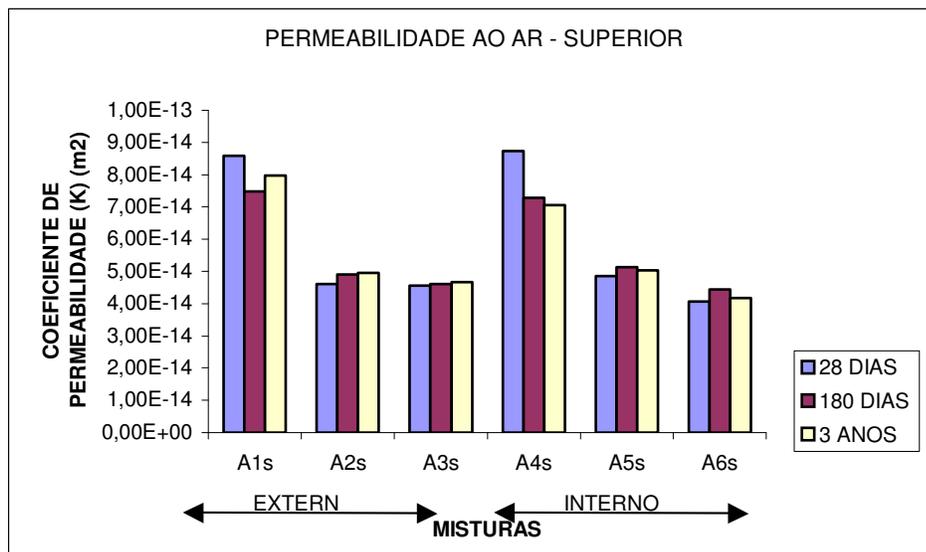


**Figura 50 – Resistência à tração (Mpa) aos 180 dias**

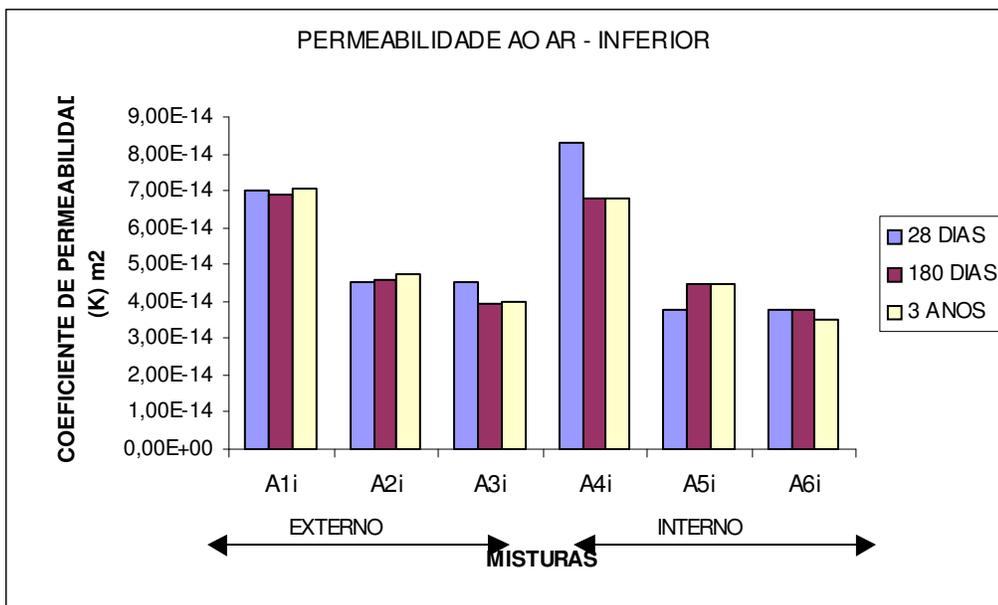


**Figura 51 – Resistência à tração (Mpa) aos 3 anos**

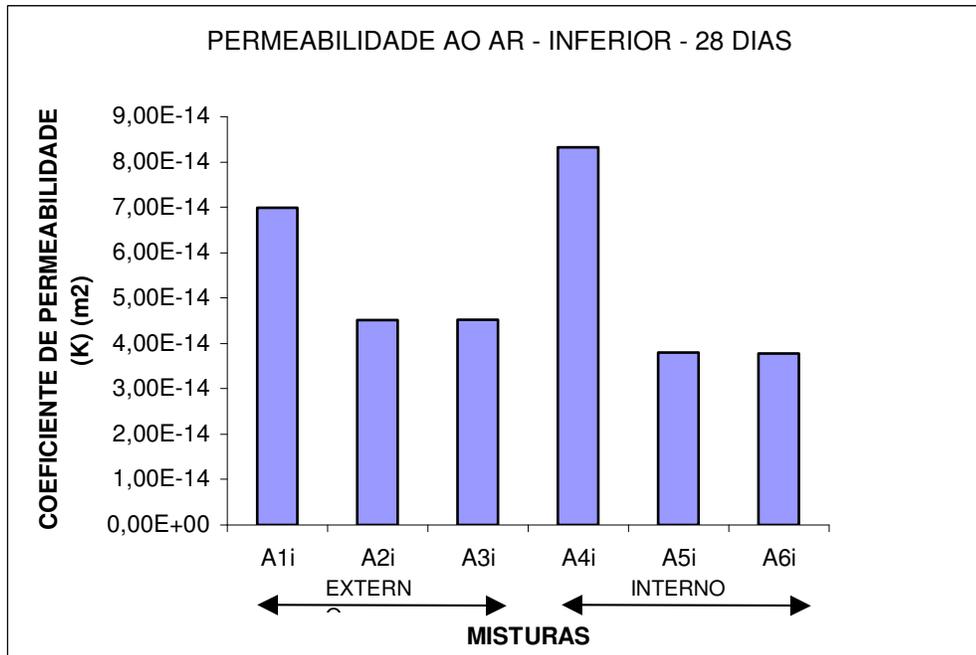
### B9 Permeabilidade ao ar



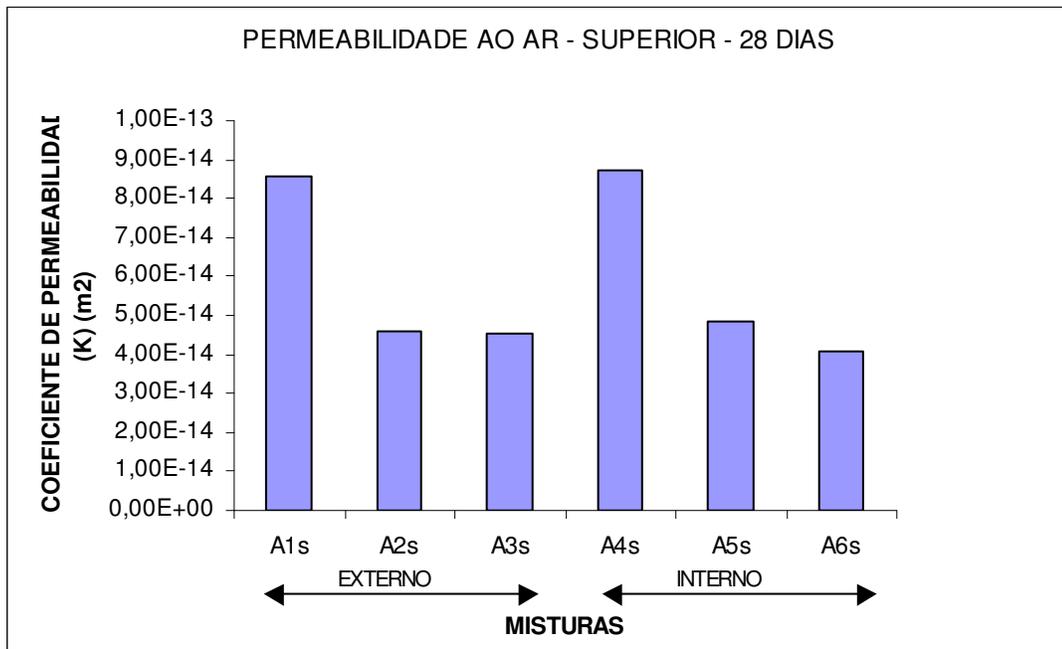
**Figura B52 – Resultados da permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos, amostra superior**



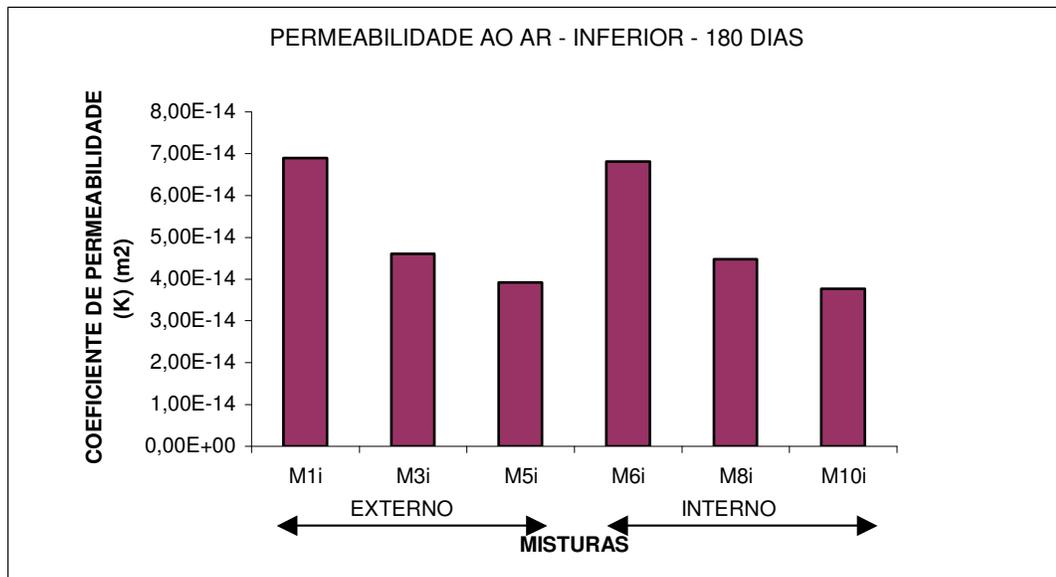
**Figura B53 – Resultados da permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos, amostra inferior**



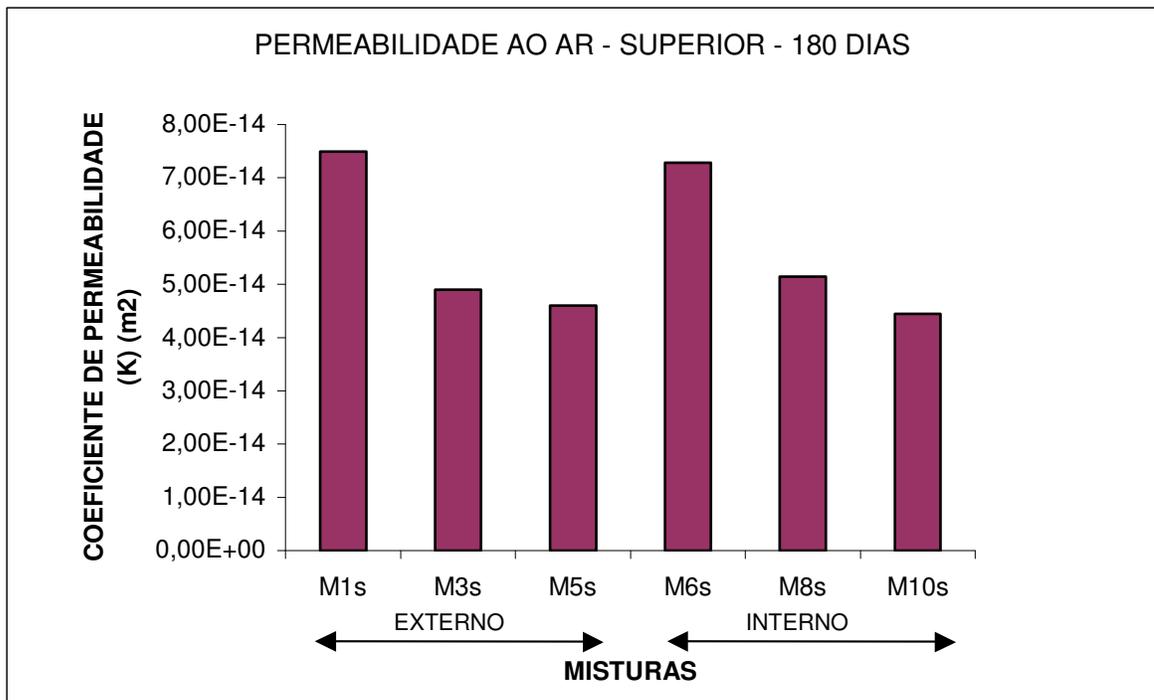
**Figura B54 – Resultados da permeabilidade ao ar ( $m^2$ ) aos 28 dias, amostra inferior**



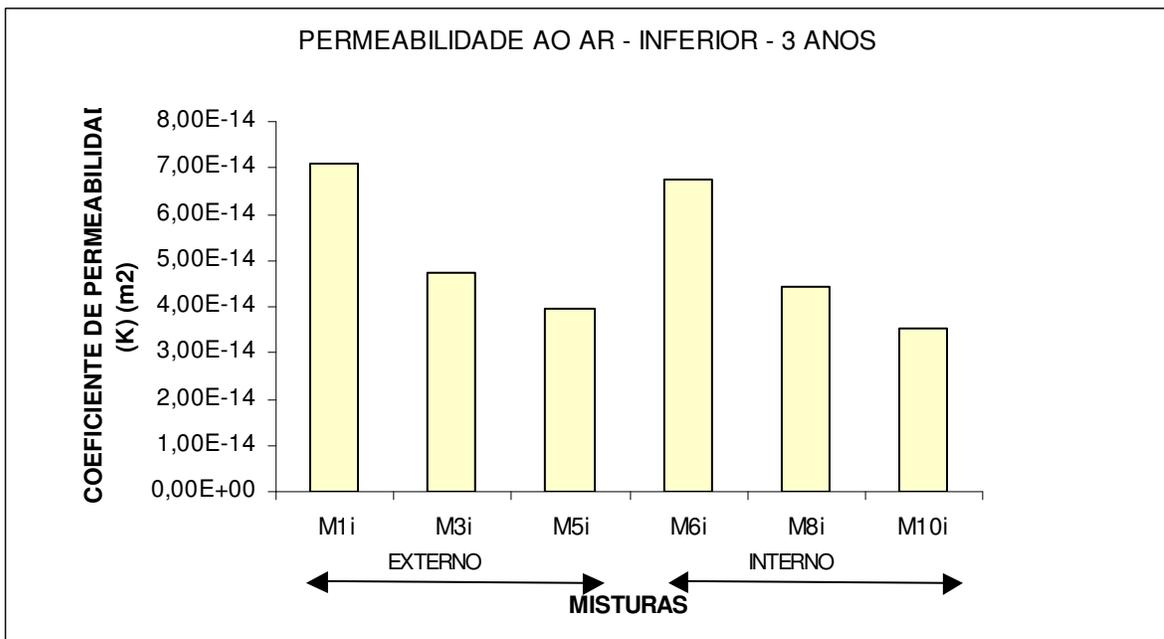
**Figura B55 – Resultados da permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 28 dias, amostra superior**



**Figura B56 – Resultados da permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 180 dias, amostra inferior**



**Figura B57 – Resultados da permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 180 dias, amostra superior**



**Figura B58 – Resultados da permeabilidade ao ar (m<sup>2</sup>) aos 3 anos, amostra inferior**

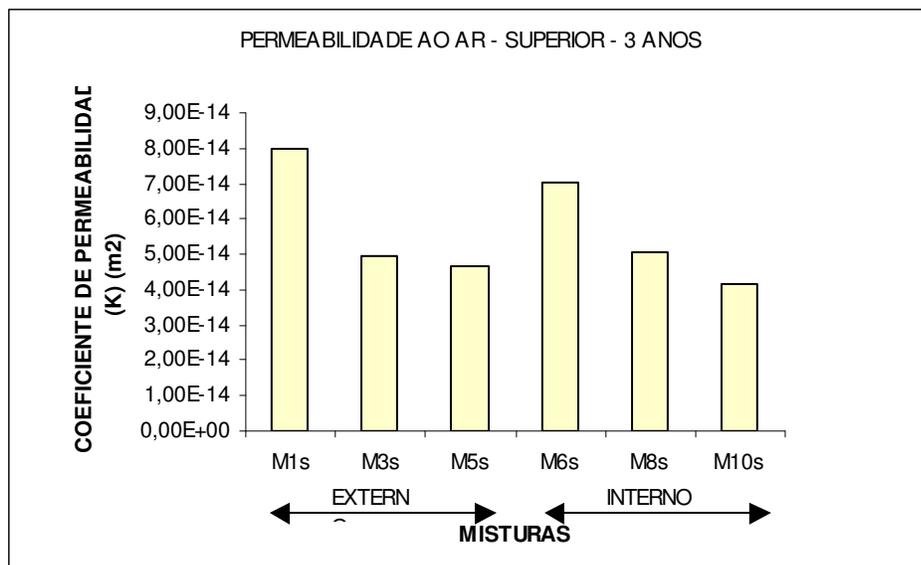


Figura B59 – Resultados da permeabilidade ao ar (m²) aos 3 anos, amostra superior

### B10 Expansibilidade longitudinal

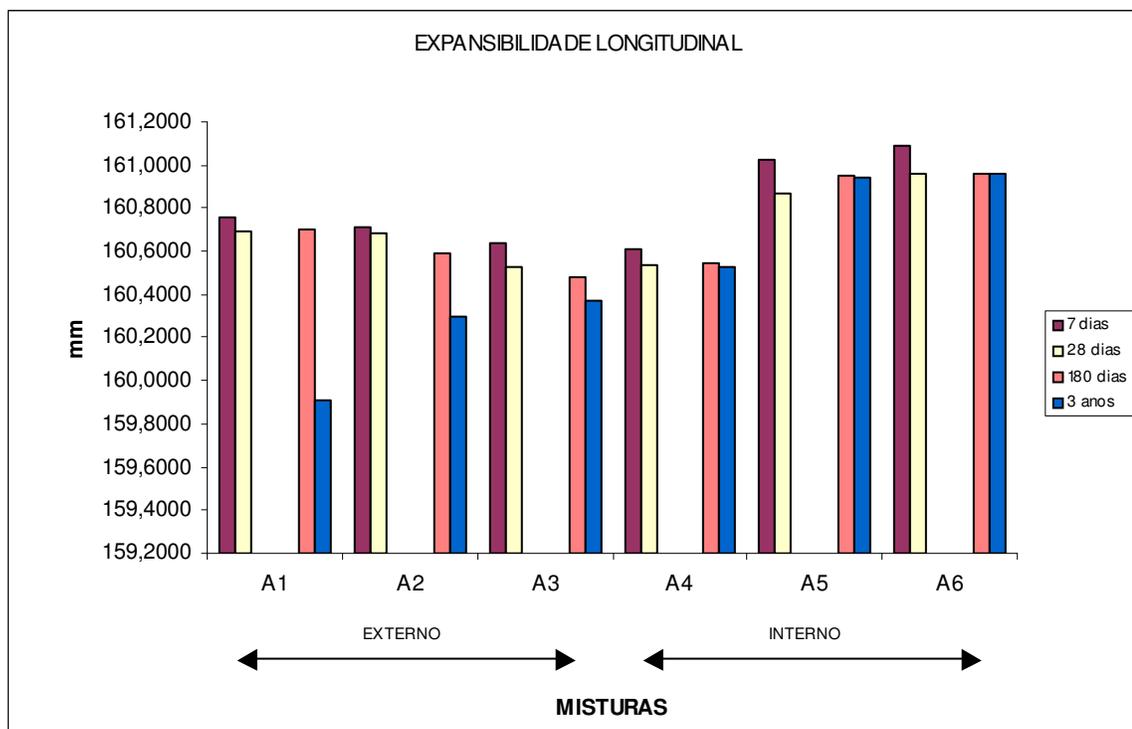
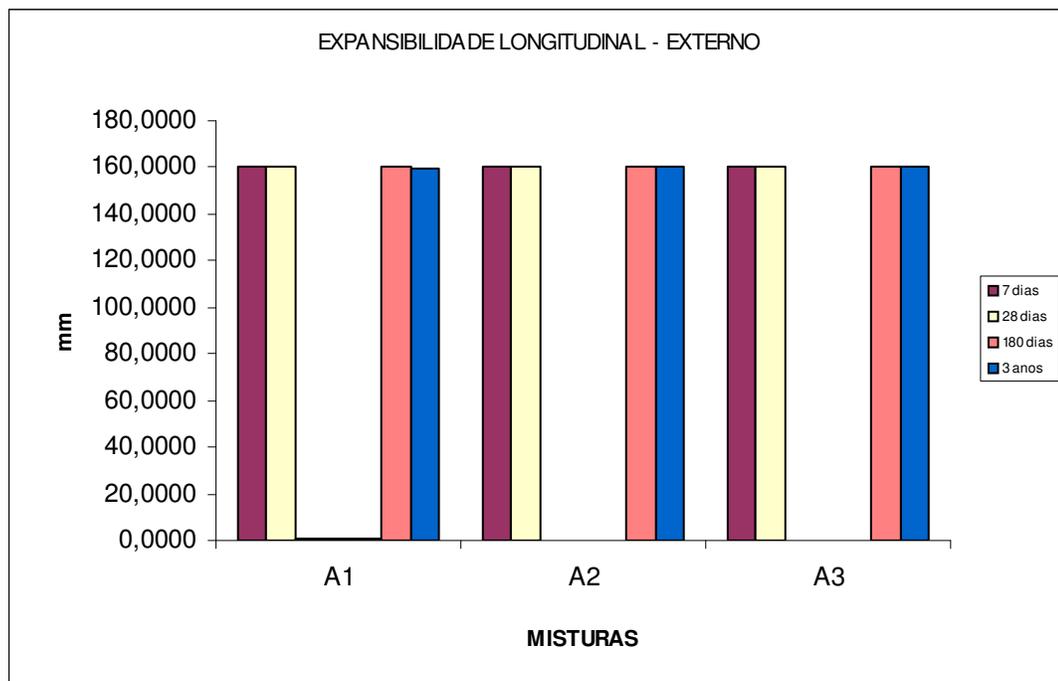
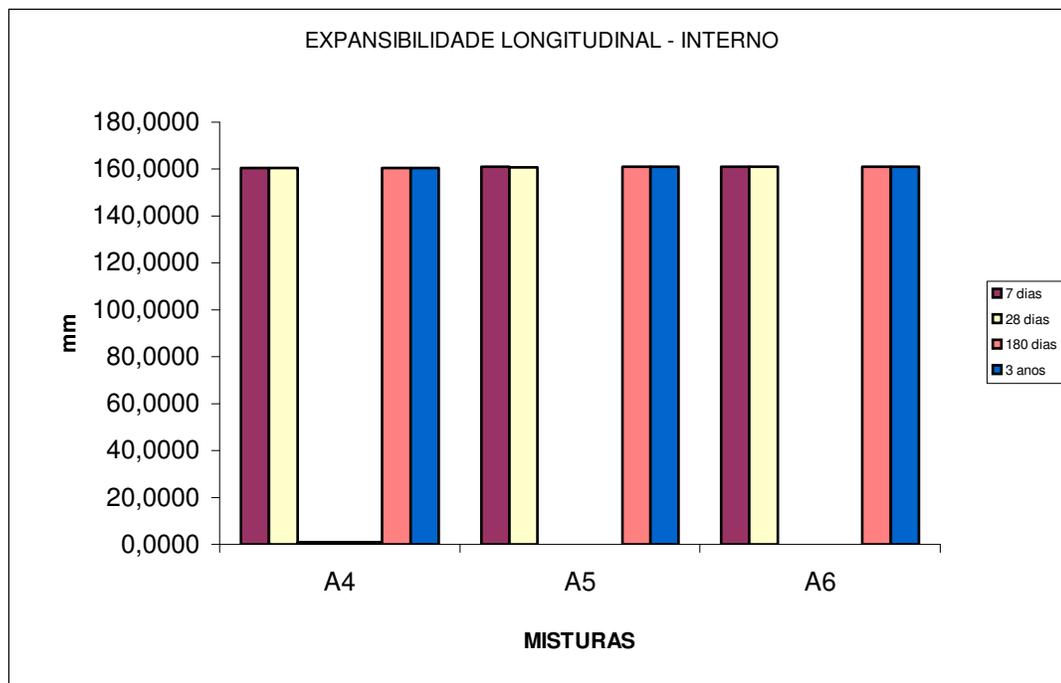


Figura B60 – Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos



**Figura B61 – Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos - externo**



**Figura B62 – Expansibilidade longitudinal (mm) aos 28 dias, 180 dias e 3 anos – interno**

## C - CONTROLE ESTATÍSTICO

Fazer uma análise estatística é utilizar técnicas para se fazer amostragem e a partir dos dados obtidos das amostras inferir ou estimar algum parâmetro para a população. O caso analisado neste trabalho é uma verificação de que modo às adições de cimento Portland e sílica ativa contribuíram para uma melhoria das pastas de gesso no uso em lugares úmidos bem como da redução da formação de etringita.

Os dados obtidos em laboratório foram analisados por estatística descritiva e por análise de variância (ANOVA) de forma que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95%. Em todos os ensaios, tomou-se como procedimento descartar os valores individuais que variaram mais que 15% em relação à média.

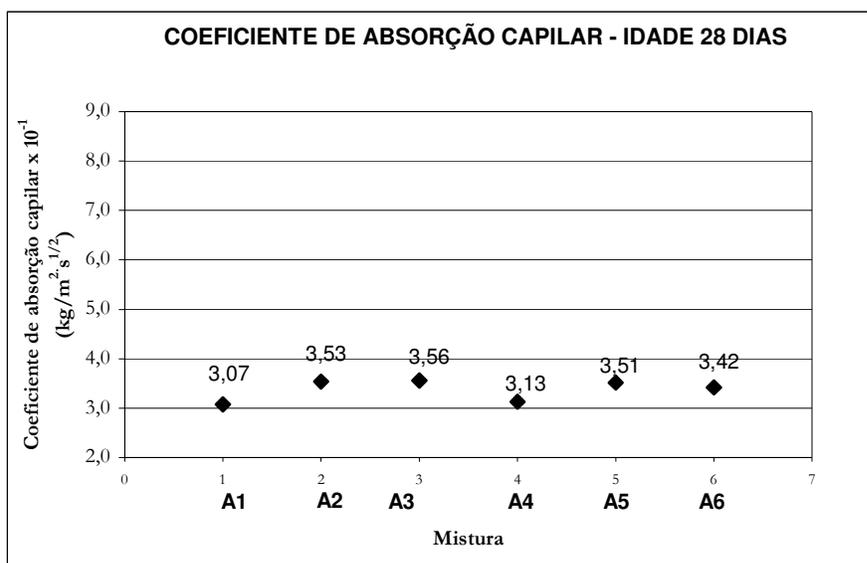
A estatística descritiva teve como objetivo a organização e descrição dos dados experimentais. A análise de variância (ANOVA) teve como objetivo determinar diferenças significativas entre médias, a ANOVA foi aplicada utilizando-se o Método de Tukey.

A análise foi realizada nas seguintes propriedades (Figura C1 a Figura C15):

- a) Absorção capilar em 24 horas aos 28, 180 dias e 3 anos
- b) Resistência à compressão aos 28, 180 dias e 3 anos
- c) Resistência à tração por compressão diametral aos 28, 180 dias e 3 anos
- d) Permeabilidade ao ar

Na Tabela C1 a Tabela C9 estão descritos os resultados obtidos das médias e desvios padrão dos ensaios:

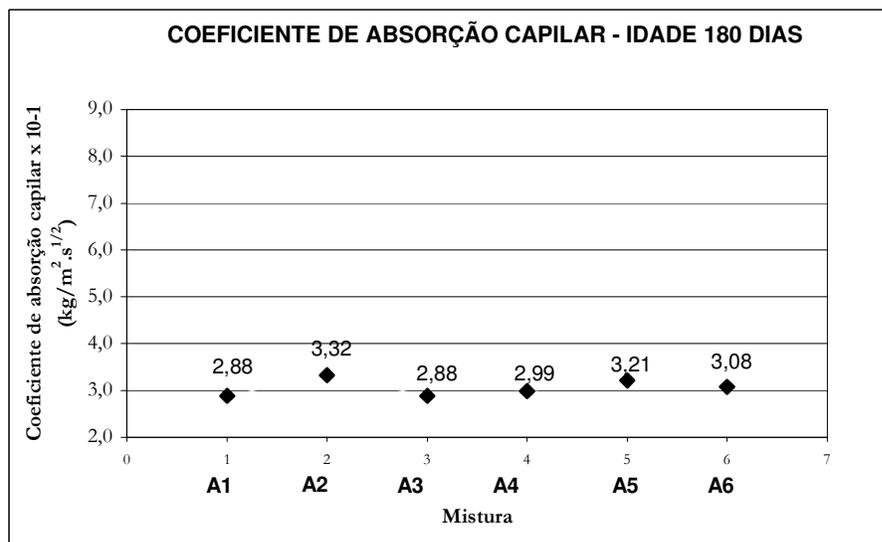
- a) Resistência à compressão
- b) Resistência à tração
- c) Expansibilidade longitudinal
- d) Permeabilidade ao ar
- e) Absorção Capilar



1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
2-3	2-4	2-5	2-6	
3-4	3-5	3-6		
4-5	4-6			
5-6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

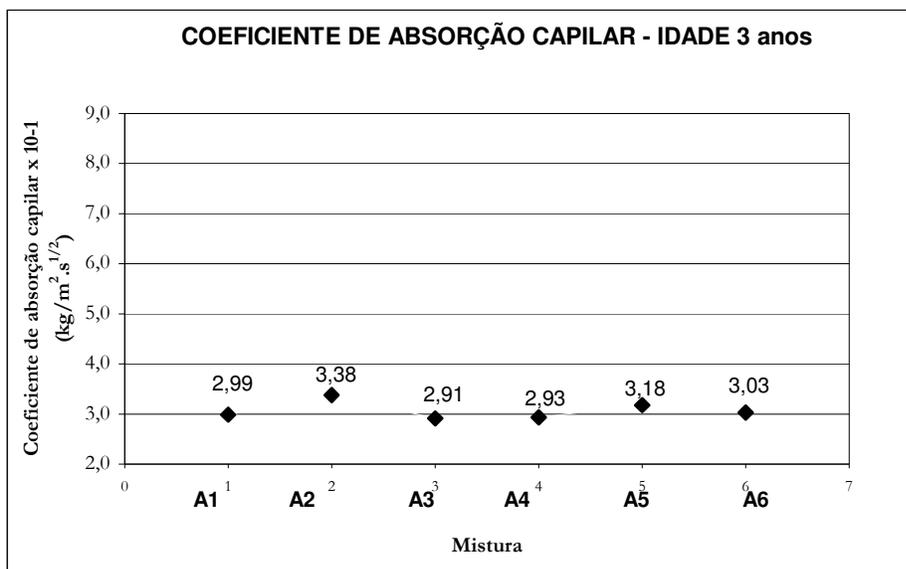
**Figura C1 - Coeficiente de Absorção Capilar aos 28 dias**



1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
2-3	2-4	2-5	2-6	
3-4	3-5	3-6		
4-5	4-6			
5-6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

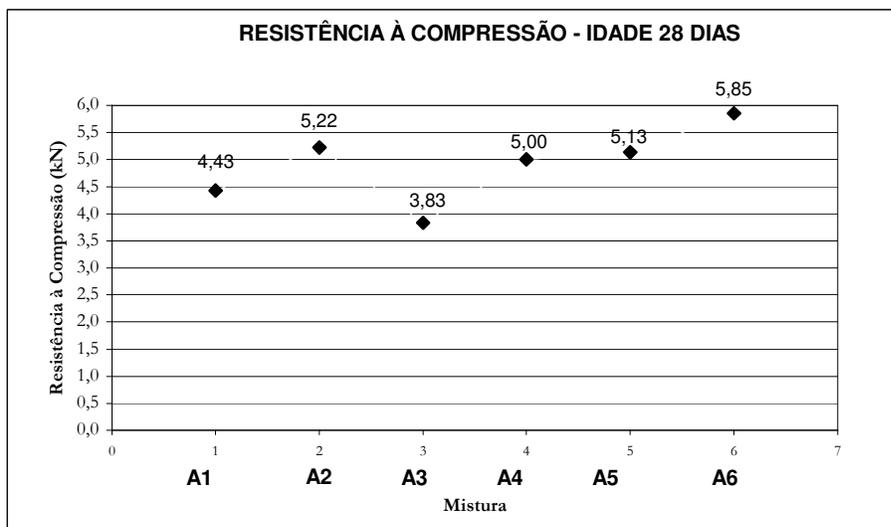
**Figura C2 Coeficiente de Absorção Capilar aos 180 dias**



1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5	1 - 6
2 - 3	2 - 4	2 - 5	2 - 6	
3 - 4	3 - 5	3 - 6		
4 - 5	4 - 6			
5 - 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

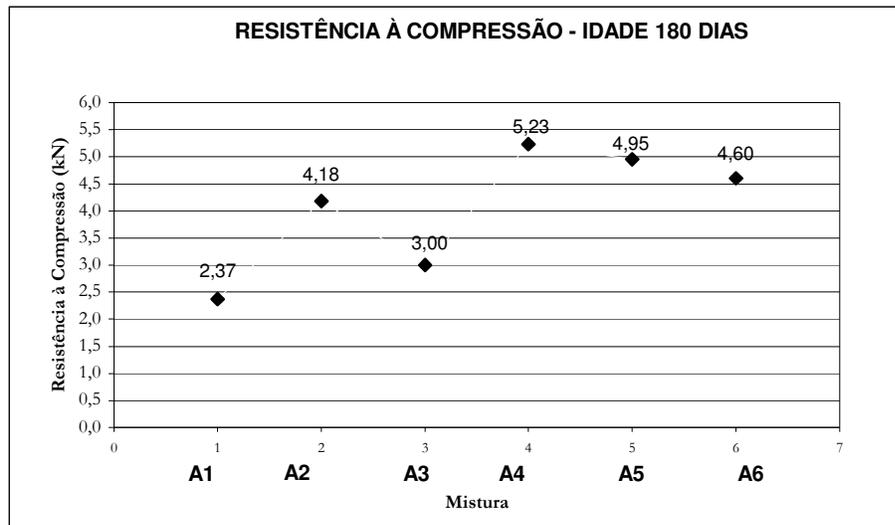
**Figura C3 - Coeficiente de Absorção Capilar aos 3 anos**



1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5	1 - 6 *
2 - 3 *	2 - 4	2 - 5	2 - 6	
3 - 4 *	3 - 5 *	3 - 6 *		
4 - 5	4 - 6			
5 - 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

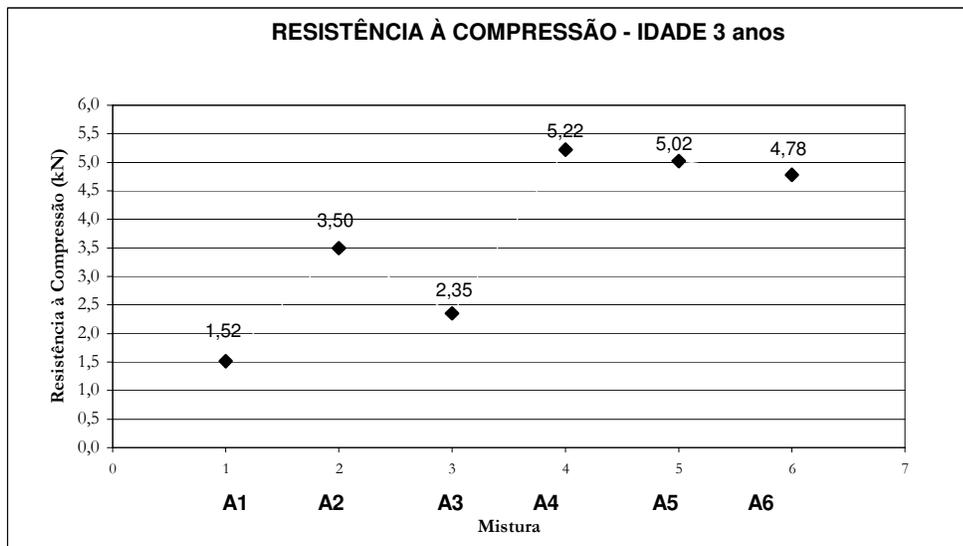
**Figura C4 - Resistência à Compressão aos 28 dias**



1 - 2 *	1 - 3	1 - 4 *	1 - 5 *	1 - 6 *
2 - 3 *	2 - 4 *	2 - 5	2 - 6	
3 - 4 *	3 - 5 *	3 - 6 *		
4 - 5	4 - 6			
5 - 6				

\* Diferença Estatisticamente Significativa

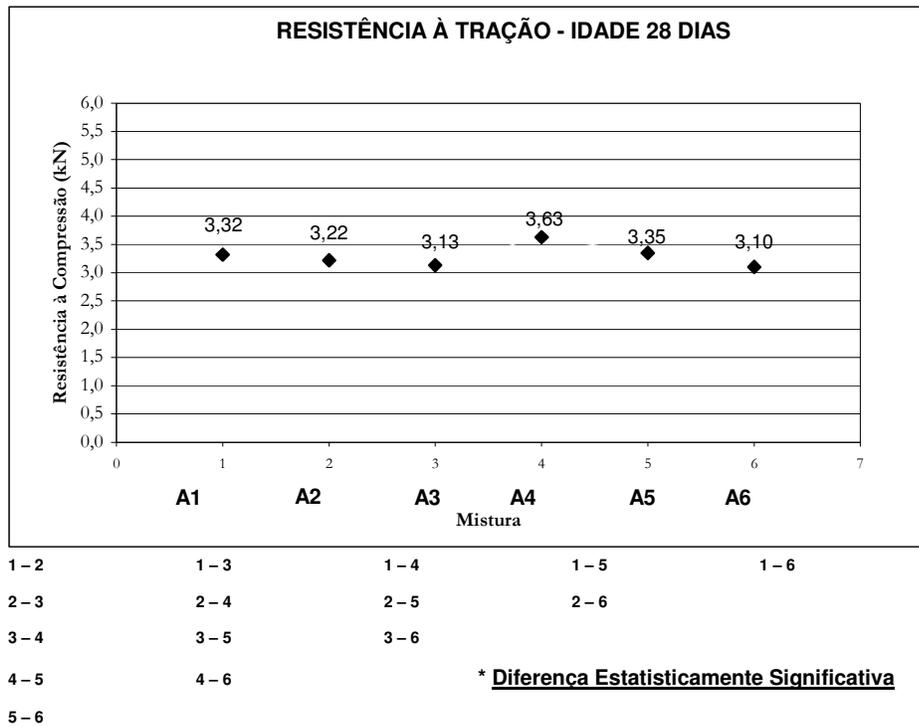
**Figura C5 – Resistência à Compressão aos 180 dias**



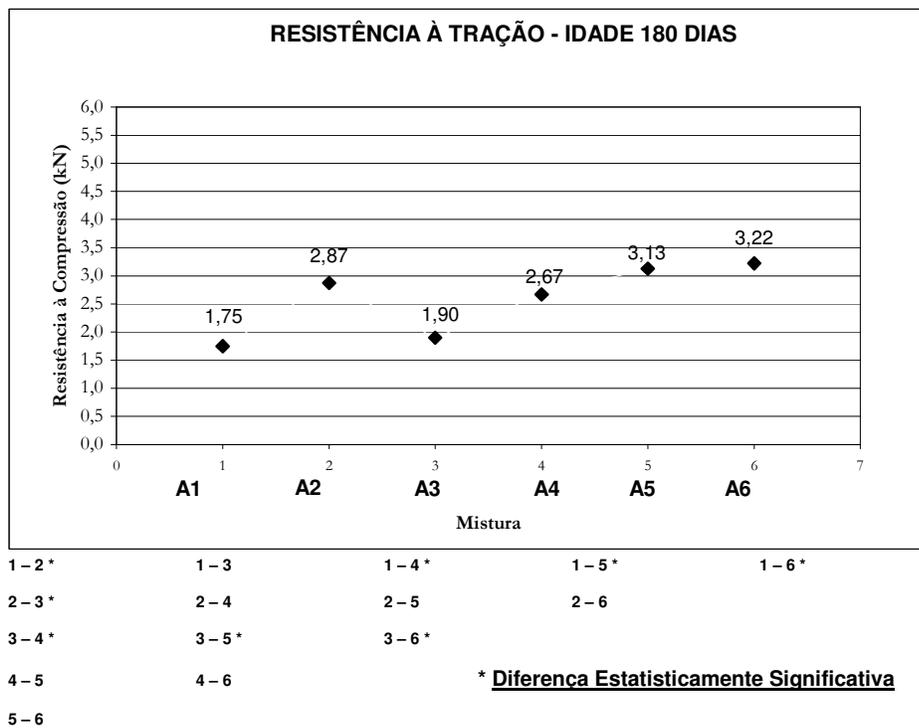
1 - 2 *	1 - 3 *	1 - 4 *	1 - 5 *	1 - 6 *
2 - 3 *	2 - 4 *	2 - 5 *	2 - 6 *	
3 - 4 *	3 - 5 *	3 - 6 *		
4 - 5	4 - 6			
5 - 6				

\* Diferença Estatisticamente Significativa

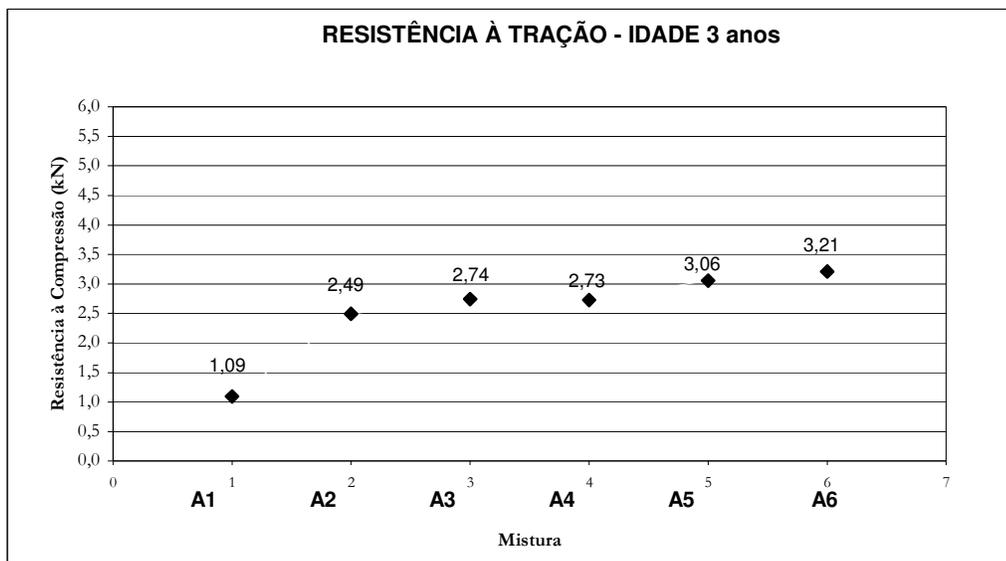
**Figura C6 – Resistência à Compressão aos 3 anos**



**Figura C7 – Resistência à Tração aos 28 dias**



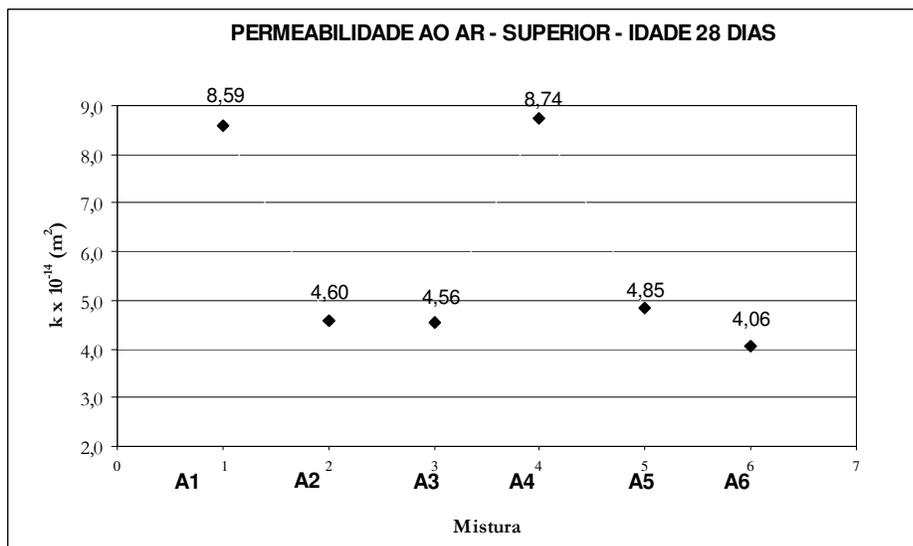
**Figura C8 – Resistência à Tração aos 180 dias**



1 - 2 *	1 - 3 *	1 - 4 *	1 - 5 *	1 - 6 *
2 - 3	2 - 4	2 - 5 *	2 - 6 *	
3 - 4	3 - 5	3 - 6		
4 - 5	4 - 6			
5 - 6				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

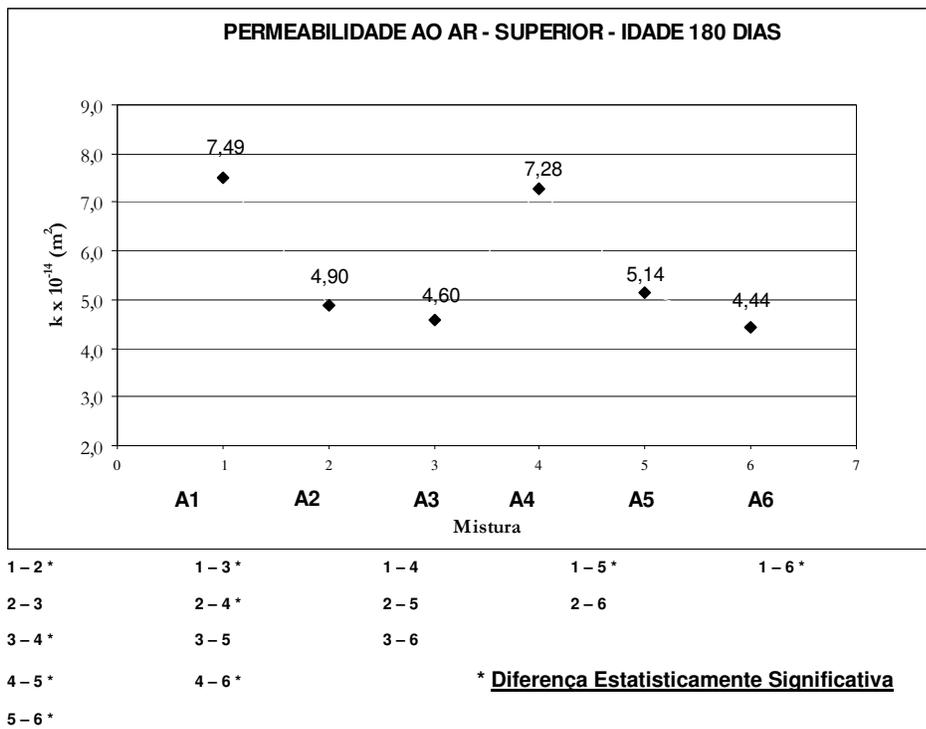
**Figura C9 – Resistência à Tração aos 3 anos**



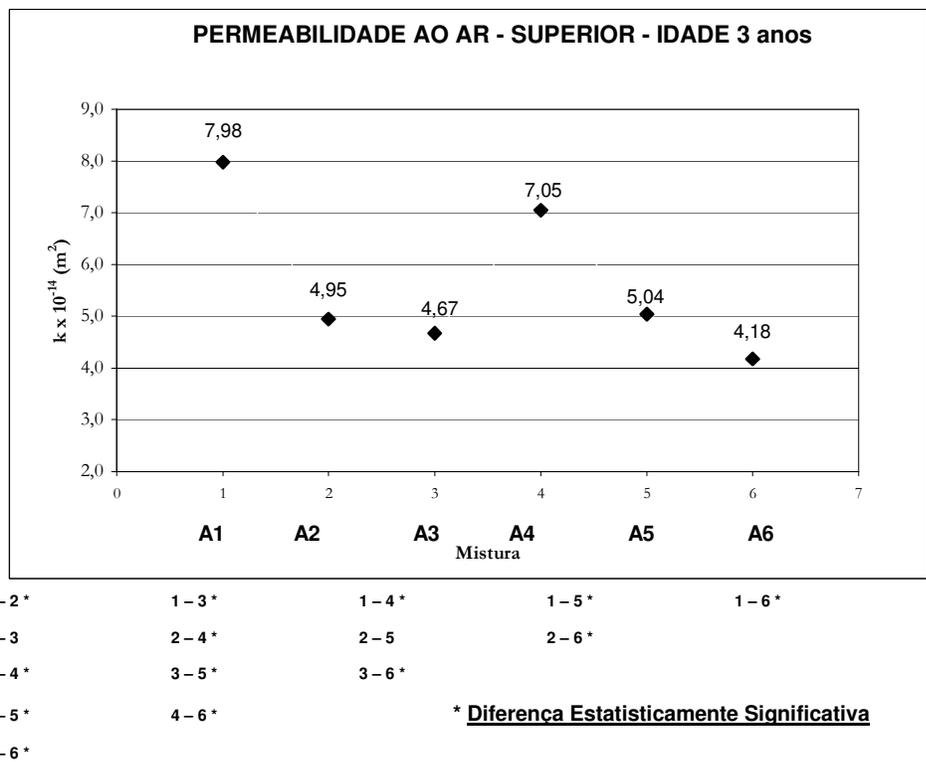
1 - 2 *	1 - 3 *	1 - 4	1 - 5 *	1 - 6 *
2 - 3	2 - 4 *	2 - 5	2 - 6 *	
3 - 4 *	3 - 5	3 - 6 *		
4 - 5 *	4 - 6 *			
5 - 6 *				

**\* Diferença Estatisticamente Significativa**

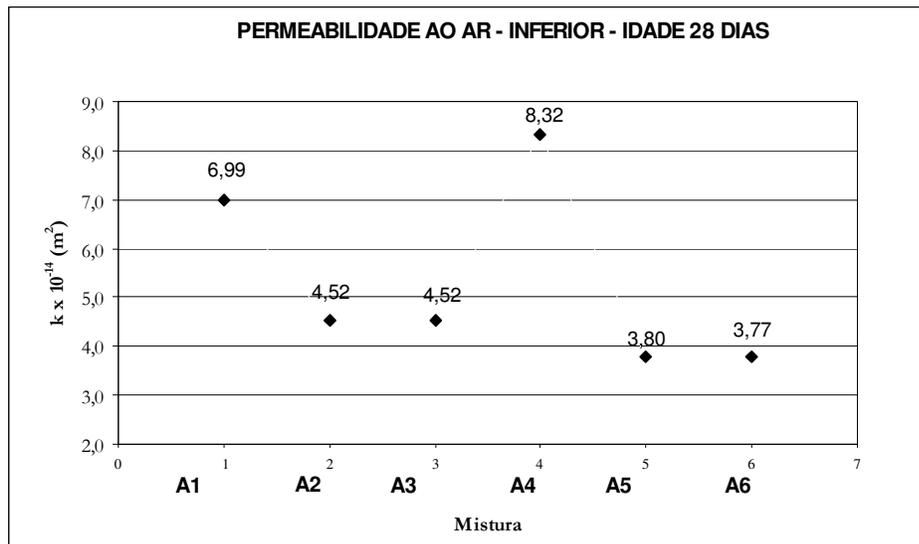
**Figura C10 – Permeabilidade ao ar – superior - aos 28 dias**



**Figura C11 – Permeabilidade ao ar – superior - aos 180 dias**



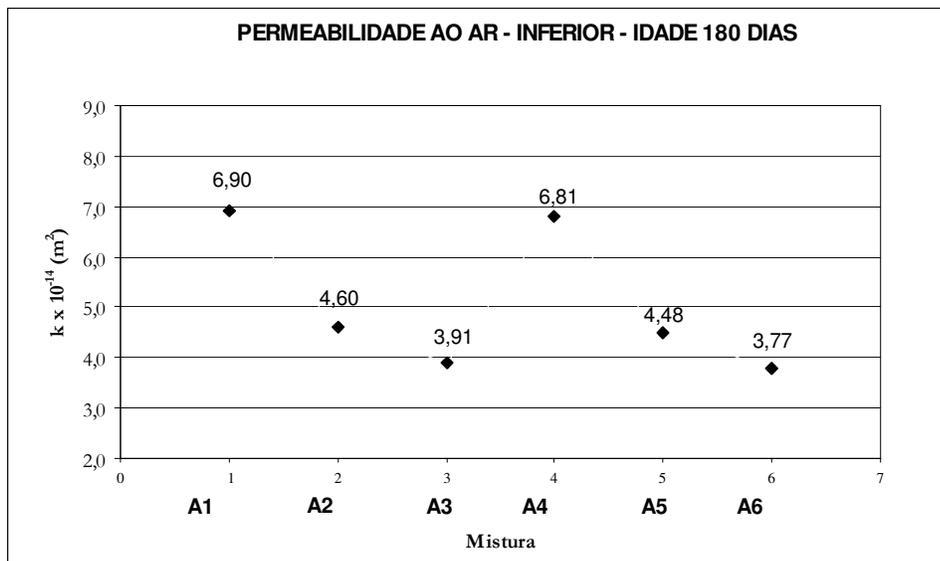
**Figura C12 – Permeabilidade ao ar – superior - aos 3 anos**



1-2 *	1-3 *	1-4 *	1-5 *	1-6 *
2-3	2-4 *	2-5 *	2-6 *	
3-4 *	3-5 *	3-6 *		
4-5 *	4-6 *			
5-6				

\* Diferença Estatisticamente Significativa

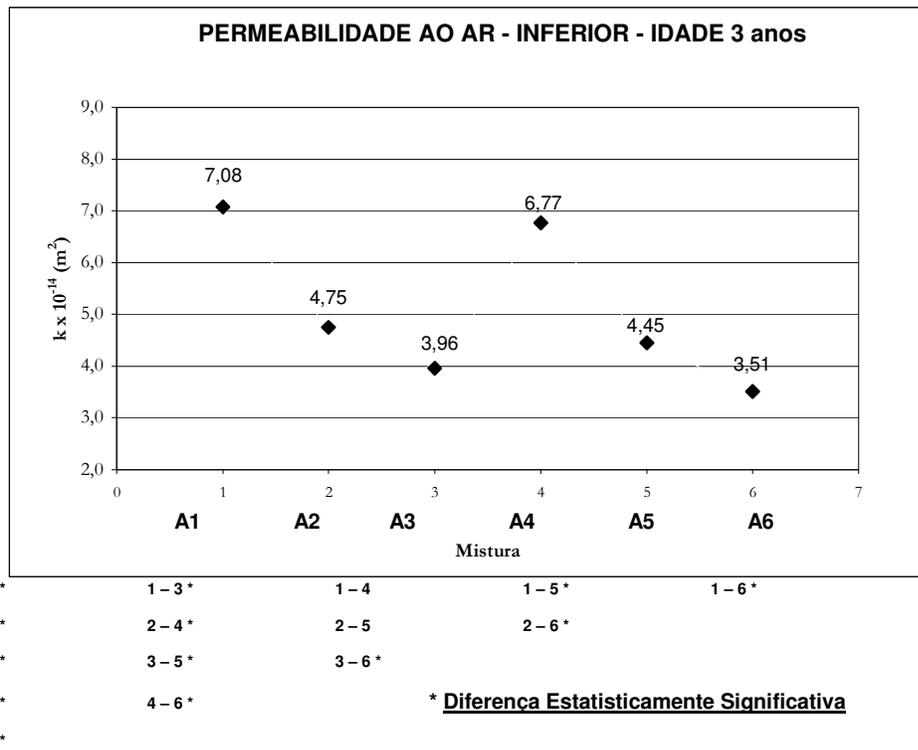
**Figura C13 – Permeabilidade ao ar – Inferior - aos 28 dias**



1-2 *	1-3 *	1-4	1-5 *	1-6 *
2-3 *	2-4 *	2-5	2-6 *	
3-4 *	3-5 *	3-6		
4-5 *	4-6 *			
5-6 *				

\* Diferença Estatisticamente Significativa

**Figura C14 – Permeabilidade ao ar – inferior - aos 180 dias**



**Figura C15 – Permeabilidade ao ar – inferior - aos 3 anos**

Na Tabela C1 a Tabela C9 estão descritos os resultados obtidos das médias e desvios padrão dos ensaios:

- Resistência à compressão
- Resistência à tração
- Expansibilidade longitudinal
- Permeabilidade ao ar
- Absorção Capilar

**Tabela C1 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Compressão das misturas A1 a A3, que diferem de 15% (NBR7215/96) e desvio padrão**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - externa		
			28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A1 (externo)	100/0/0	28/Ago	25/Set	24/Fev	28/Ago
			6,75	2,20	1,05
			3,95	2,35	1,40
			4,90	2,55	1,64
		<b>media</b>	<b>4,43</b>	<b>2,37</b>	<b>1,52</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,48</b>	<b>0,14</b>	<b>0,17</b>
		-15%	3,76	2,01	1,29
		+15%	5,09	2,72	1,75
A2 (externo)	75/25/0	30/Ago	27/Set	26/Fev	30/Set
			5,35	4,20	3,35
			5,35	4,30	3,70
			4,95	4,05	3,46
		<b>media</b>	<b>5,22</b>	<b>4,18</b>	<b>3,50</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,19</b>	<b>0,10</b>	<b>0,18</b>
		-15%	4,43	3,56	2,98
		+15%	6,00	4,81	4,03
A3 (externo)	75/20/5	01/Set	29/Set	28/Fev	02/Out
			4	3,2	2,48
			3,75	3,1	1,95
			3,75	2,7	2,21
		<b>media</b>	<b>3,83</b>	<b>3,00</b>	<b>2,35</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,12</b>	<b>0,22</b>	<b>0,19</b>
		-15%	3,26	2,55	1,99
		+15%	4,41	3,45	2,70

**Tabela C2 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Compressão das mistura A4 a A6, que diferem de 15% (NBR7215/96) e desvio padrão**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - interna		
			28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A4 (interno)	100/0/ 0	28/Ago	25/Set	24/Fev	28/Ago
			6,70	5,40	5,52
			4,80	5,60	4,99
			5,20	4,70	5,15
		<b>media</b>	<b>5,00</b>	<b>5,23</b>	<b>5,22</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,20</b>	<b>0,39</b>	<b>0,27</b>
		-15%	4,25	4,45	4,44
		+15%	5,75	6,02	6,00
A5 (interno)	75/25/ 0	30/Ago	27/Set	26/Fev	30/Set
			5,00	5,10	5,17
			5,00	4,90	4,85
			5,40	4,85	5,05
		<b>media</b>	<b>5,13</b>	<b>4,95</b>	<b>5,02</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,19</b>	<b>0,11</b>	<b>0,16</b>
		-15%	4,36	4,21	4,27
		+15%	5,90	5,69	6,78
A6 (interno)	75/20/ 5	01/Set	29/Set	28/Fev	02/Out
			5,70	4,05	5,02
			5,15	4,65	6,35
			6,70	5,10	4,54
		<b>media</b>	<b>5,85</b>	<b>4,60</b>	<b>4,78</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,64</b>	<b>0,43</b>	<b>0,34</b>
		-15%	4,97	3,91	4,06
		+15%	6,73	5,29	5,50

**Tabela C3 – Valores das cargas (kN) descontados no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Tração das misturas A1 a A3, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão**

mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - externa		
			28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A1 (externo)	100/0/0	28/Ago	25/Set	24/Fev	28/Ago
			3,25	1,80	0,87
			3,15	1,65	1,15
			3,55	1,80	1,03
		<b>media</b>	<b>3,32</b>	<b>1,75</b>	<b>1,09</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,17</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>
		-15%	2,82	1,49	0,93
		+15%	3,81	2,01	1,25
A2 (externo)	75/25/0	30/Ago	27/Set	26/Fev	30/Set
			3,55	2,75	3,05
			3,00	3,00	2,33
			3,10	2,85	2,65
		<b>media</b>	<b>3,22</b>	<b>2,87</b>	<b>2,49</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,15</b>	<b>0,10</b>	<b>0,23</b>
		-15%	2,73	2,44	2,12
		+15%	3,70	3,30	2,86
A3 (externo)	75/20/5	01/Set	29/Set	28/Fev	02/ut
			3,25	2,10	3,04
			3,15	1,65	2,44
			3,00	1,95	2,73
		<b>media</b>	<b>3,13</b>	<b>1,90</b>	<b>2,74</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,10</b>	<b>0,19</b>	<b>0,30</b>
		-15%	2,66	1,62	2,33
		+15%	3,60	2,19	3,15

**Tabela C4 – Valores das cargas (kN) descontadas no cálculo das médias, no ensaio de Resistência à Tração das misturas A4 a A6, que diferem de 15% (NBR7222/94) e desvio padrão**

Mistura	traço g/c/s	data mold	cura ao ar - interna		
			28 (dias)	180 (dias)	3 (anos)
A4 (interno)	100/0/0	28/Ago	25/Set	24/Fev	28/Ago
			3,80	2,85	2,95
			3,55	2,50	2,55
			3,55	2,65	2,70
		<b>media</b>	<b>3,63</b>	<b>2,67</b>	<b>2,73</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,12</b>	<b>0,14</b>	<b>0,20</b>
		-15%	3,09	2,27	2,32
		+15%	4,18	3,07	3,14
A5 (interno)	75/25/0	30/Ago	27/Set	26/Fev	30/Set
			3,10	3,45	2,97
			3,15	3,05	3,15
			3,80	2,90	3,05
		<b>media</b>	<b>3,35</b>	<b>3,13</b>	<b>3,06</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,32</b>	<b>0,23</b>	<b>0,09</b>
		-15%	2,85	2,66	2,60
		+15%	3,85	3,60	3,52
A6 (interno)	75/20/5	01/Set	29/Set	28/Fev	02/Out
			3,30	3,70	<b>3,85</b>
			3,00	3,00	3,04
			3,00	2,95	3,38
		<b>media</b>	<b>3,10</b>	<b>3,22</b>	<b>3,21</b>
		<b><math>\sigma</math></b>	<b>0,14</b>	<b>0,34</b>	<b>0,24</b>
		-15%	2,64	2,73	2,73
		+15%	3,57	3,70	3,69

**Tabela C5 – Valores, média e desvio padrão do ensaio de expansibilidade longitudinal aos 7, 28, 180 dias e 3 anos.**

mistura	traço g/c/s	data mold.	cura ao ar - externa					
			inicial	7 (dias)	28( dias)	180( dias)	3 (anos)	
A1	100/0/0		160,0000	160,7410	160,7000	160,6991	160,0091	
			160,0000	161,1643	161,1083	161,0061	159,8941	
			160,0000	160,3586	160,2606	160,3989	159,8289	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>160,7546</b>	<b>160,6896</b>	<b>160,7014</b>	<b>159,9107</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,4030</b>	<b>0,4239</b>	<b>0,3036</b>	<b>0,0912</b>
A2	75/25/0		160,0000	160,6694	160,6877	160,5771	160,1471	
			160,0000	160,9456	160,8689	160,8601	160,4101	
			160,0000	160,5216	160,4889	160,3400	160,3400	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>160,7122</b>	<b>160,6818</b>	<b>160,5924</b>	<b>160,2991</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,2152</b>	<b>0,1901</b>	<b>0,2604</b>	<b>0,1362</b>
A3	75/20/5		160,0000	160,7711	160,6341	160,5800	160,3800	
			160,0000	160,4738	160,3477	160,3870	160,3170	
			160,0000	160,6688	160,5966	160,4891	160,4091	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>160,6379</b>	<b>160,5261</b>	<b>160,4854</b>	<b>160,3687</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,1510</b>	<b>0,1557</b>	<b>0,0966</b>	<b>0,0471</b>
<b>cura ao ar - interna (dias)</b>								
mistura	traço g/c/s	data mold.	inicial	7 (dias)	28( dias)	180( dias)	3 (anos)	
			inicial	7 (dias)	28( dias)	180( dias)	3 (anos)	
A4	100/0/0		160,0000	160,7389	160,6462	160,5979	160,5479	
			160,0000	160,4454	160,4385	160,4909	160,4609	
			160,0000	160,6430	160,5210	160,5563	160,5663	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>160,6091</b>	<b>160,5352</b>	<b>160,5484</b>	<b>160,5250</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,1497</b>	<b>0,1046</b>	<b>0,0539</b>	<b>0,0563</b>
A5	75/25/0		160,0000	161,1104	160,9566	160,8587	160,8527	
			160,0000	160,8563	160,7453	160,9460	160,9368	
			160,0000	161,0983	160,9117	161,0374	161,0371	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>161,0217</b>	<b>160,8712</b>	<b>160,9474</b>	<b>160,9422</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,1433</b>	<b>0,1113</b>	<b>0,0894</b>	<b>0,0923</b>
A6	75/20/5		160,0000	161,4880	161,4097	161,4272	161,4268	
			160,0000	160,6891	160,5185	160,4029	160,4030	
			160,0000	161,0818	160,9503	161,0547	161,0537	
			<b>media</b>	<b>160,0000</b>	<b>161,0863</b>	<b>160,9595</b>	<b>160,9616</b>	<b>160,9612</b>
			<b><math>\sigma</math></b>		<b>0,3995</b>	<b>0,4457</b>	<b>0,5185</b>	<b>0,5181</b>

**Tabela C6 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 28 dias**

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1s	8,59E-14	2,71E-14
A2s	4,60E-14	3,43E-15
A3s	4,56E-14	2,81E-15
A4s	8,74E-14	0,00E+00
A5s	4,85E-14	0,00E+00
A6s	4,06E-14	6,77E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1i	6,99E-14	9,31E-15
A2i	4,52E-14	2,23E-15
A3i	4,52E-14	0,00E+00
A4i	8,32E-14	1,32E-14
A5i	3,80E-14	7,79E-16
A6i	3,77E-14	4,25E-15

**Tabela C7 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 180 dias**

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1s	7,49E-14	2,55E-14
A2s	4,90E-14	6,48E-16
A3s	4,60E-14	4,59E-15
A4s	7,28E-14	5,74E-15
A5s	5,14E-14	0,00E+00
A6s	4,44E-14	1,07E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1i	6,90E-14	2,15E-14
A2i	4,60E-14	1,14E-15
A3i	3,91E-14	2,48E-15
A4i	6,81E-14	6,28E-15
A5i	4,48E-14	3,80E-15
A6i	3,77E-14	4,25E-15

**Tabela C8 – Média e desvio padrão superior e inferior do ensaio de permeabilidade ao ar aos 3 anos**

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1s	7,98E-14	2,57E-14
A2s	4,95E-14	6,33E-16
A3s	4,67E-14	4,29E-15
A4s	7,05E-14	5,04E-15
A5s	5,04E-14	1,00E-01
A6s	4,18E-14	1,02E-15

Mistura	k (m2)	$\sigma$
A1i	7,08E-14	2,35E-14
A2i	4,75E-14	1,10E-15
A3i	3,96E-14	2,48E-15
A4i	6,77E-14	6,17E-15
A5i	4,45E-14	3,80E-15
A6i	3,51E-14	4,05E-15

**Tabela C9 – Média e desvio padrão do ensaio de absorção capilar e perda de massa aos 28, 180 e 3 anos**

28 (dias) misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
A1	0,0384	0,0494	3,07E-01	0,35	6,72	0,30
A2	0,0376	0,0502	3,53E-01	0,16	3,16	0,27
A3	0,0363	0,0490	3,56E-01	0,13	2,51	0,12
A4	0,0383	0,0494	3,13E-01	0,08	6,93	0,03
A5	0,0375	0,0500	3,51E-01	0,09	3,94	0,08
A6	0,0366	0,0488	3,42E-01	0,36	2,78	0,37

180 (dias) misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
A1	0,0366	0,0469	2,88E-01	0,25	4,64	0,25
A2	0,0367	0,0486	3,32E-01	0,21	1,98	0,21
A3	0,0355	0,0458	2,88E-01	0,08	2,25	0,08
A4	0,0375	0,0481	2,99E-01	0,09	4,05	0,04
A5	0,0382	0,0497	3,21E-01	0,07	2,49	0,07
A6	0,0376	0,0486	3,08E-01	0,4	2,55	0,4

3 (anos) misturas	MÉDIA W0 massa seco	MÉDIA Wt massa 1:00h	kabs	$\sigma$ abs	PERDA DE MASSA	
					%	$\sigma$ pm
A1	0,0360	0,0467	2,99E-01	0,22	5,00	0,28
A2	0,0369	0,0489	3,38E-01	0,25	2,03	0,24
A3	0,0356	0,0460	2,91E-01	0,12	2,10	0,09
A4	0,0376	0,0480	2,93E-01	0,07	3,85	0,07
A5	0,0381	0,0494	3,18E-01	0,07	1,96	0,07
A6	0,0381	0,0489	3,03E-01	0,35	2,52	0,45