

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**PROPRIEDADES DOS MICROCONCRETOS
FABRICADOS COM AGREGADOS
CONTAMINADOS POR RESÍDUOS DE GESSO**

Alexandre Lopes Vieira

Belo Horizonte

2008

**PROPRIEDADES DOS MICROCONCRETOS
FABRICADOS COM AGREGADOS
CONTAMINADOS POR RESÍDUOS DE GESSO**

Alexandre Lopes Vieira

Alexandre Lopes Vieira

**PROPRIEDADES DOS MICROCONCRETOS
FABRICADOS COM AGREGADOS
CONTAMINADOS POR RESÍDUOS DE GESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Linha de pesquisa: Resíduos de Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2008.

V657p Vieira, Alexandre Lopes
Propriedades dos microconcretos fabricados com agregados contaminados por resíduos de gesso [manuscrito] / Alexandre Lopes Vieira – 2008.
148 f., enc.: il.

Orientador: Adriano de Paula e Silva
Co-orientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.
Bibliografia: f. 141-148

1. Propriedades físicas da matéria – Teses 2. Propriedades mecânicas – Teses 3. Gesso – Teses 4. Concreto – pesquisa – Teses 5. Reaproveitamento (sobras, refugos, etc) – Teses 6. Contaminação (Tecnologia) – Teses 7. Agregados (materiais de construção) – Teses I. Silva, Adriano de Paula e II. Aguiar, Maria Teresa Paulino III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia IV. Título.

CDU: 666.97 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**PROPRIEDADES DOS MICROCONCRETOS FABRICADOS COM
AGREGADOS CONTAMINADOS POR RESÍDUOS DE GESSO**

Alexandre Lopes Vieira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
DEMC/UFMG (Orientador)

Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
DEMC/UFMG (Co-Orientadora)

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
DEMC/UFMG

Prof. Dr. Cícero Murta Diniz Starling
DEMC/UFMG

Belo Horizonte, 26 de junho de 2008.

Dedico este trabalho a Deus, pais e principalmente a minha querida esposa Daniela, pois: os caminhos da vida são sinuosos, porém com eles se tornaram grandes retas.

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas ajudaram-me na elaboração deste trabalho. E para todas estas: MUITO OBRIGADO.

A Deus presente em todos os momentos da minha vida.

Aos santos: São Judas Tadeu, Santo Antônio e Santo Expedito por nunca me abandonarem, protegendo e guiando os meus caminhos.

A minha esposa, fonte da minha vida, pelo apoio, incentivo e tudo que apenas o amor pode explicar.

Aos meus pais, por me ajudarem a galgar mais este degrau. Meus sogros e cunhado pelo incentivo. Aos meus familiares por todo o apoio dado até este momento.

Aos professores Maria Teresa Paulino Aguilár e Adriano de Paula e Silva pela confiança, orientação, dedicação e pela amizade construída.

Aos colegas de mestrado pela amizade e ajuda nos ensaios, em especial ao Augusto Bezerra, à Ludmila Costa e ao aluno de iniciação científica Silvío Martins de Almeida.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais pelos ensinamentos.

À equipe do Laboratório de concreto da Holcim S.A., em Pedro Leopoldo, principalmente ao Ednaldo Ribeiro Martins, pelo auxílio prestado durante a elaboração dos corpos de prova.

A URBEL, em especial aos meus chefes, Patrícia de Castro e Eduardo Henrique, pelo apoio e compreensão.

Aos funcionários, Admilson, Isa e Ivonete do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

RESUMO

A utilização do gesso na construção civil tem se ampliado muito nos últimos anos, principalmente como revestimento interno de paredes em substituição ao processo convencional (chapisco/reboco). Porém, essa atividade é uma grande geradora de resíduos, devido ao tempo de aplicação e às técnicas utilizadas no processo. Esses resíduos, por não serem segregados, são armazenados nas obras juntamente com resíduos de diversos outros materiais, sendo seu descarte feito em aterros sanitários. Esses resíduos são denominados RCDs (resíduos de construções e demolições) e quando não contaminados por resíduos de gesso poderiam ter uma outra destinação, sendo reaproveitados na fabricação de agregados, em substituição aos naturais, na produção de concretos. Contudo, os RCDs quando enviados para a usina para a fabricação de agregados podem conter contaminantes de gesso, devido a este controle ser feito apenas de forma visual, ou seja, um agregado de RCD considerado sem gesso poderia conter um teor de gesso imperceptível à vista desarmada e tais agregados quando utilizados na fabricação de concreto provocam reações expansivas diminuindo, assim, a sua vida útil. Dessa forma, faz-se interessante o estudo de concretos fabricados com diferentes índices de contaminação por gesso. Neste trabalho, é analisada a influência desse contaminante nas propriedades de concretos fabricados sem agregados graúdos (microconcretos). Os resultados dos ensaios de resistência à compressão na idade de 150 dias apresentam uma perda de resistência quando comparados aos resultados obtidos com 28 dias, devido à formação da etringita nos microconcretos com contaminantes.

Palavras-chave: resíduos de gesso, agregados reciclados, microconcretos.

ABSTRACT

The use of plaster in the construction has enlarged a lot in the last few years; mainly as internal coating of walls replacing the conventional process (mortar). However this type of activity is a big generator of residues due to the time of application and the techniques used in the process. Because these residues aren't segregated, they are stored in the construction place all together with the residues from other materials and its discard is done in sanitary embankments. These residues are denominated RCDs (residues of constructions and demolitions) and when they are not contaminated by plaster residues, they could have had a different destiny; they could be reused in the production of aggregate, substituting the natural ones in the concrete production. The RCDs when they are sent to the plant in order to product aggregate can have plaster pollution because the control is done only by visual manner. An aggregate of RCD without plaster could have, even though, a tiny and imperceptible quantity of plaster and such aggregates when they are used in the production of concrete, they provoke can cause expansible reactions, decreasing thus its useful life. So, having all these facts in account, the study of concrete made with different rates of plaster residues becomes very important and interesting. In this paper the influence of this pollutant is analyzed in the concrete properties manufactured without great aggregate (microconcrete). The tests results for resistance to compression at the age of 150 days show a damage of strength when compared to the results of 28 days, due to the etringita formation in microconcretes with contaminants.

Word-key: plaster residues, recycled aggregate, microconcrete.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE QUADROS	17
LISTA DE TABELAS	18
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	20
1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivo	23
1.2 Desenvolvimento do Trabalho	23
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	25
2.1 Gesso	25
2.1.1 Histórico do gesso.....	26
2.1.2 Mineralogia e geologia	27
2.1.2.1 Mineralogia	27
2.1.2.2 Geologia.....	29
2.1.3 Produção de gipsita / gesso.....	30
2.1.4 Fabricação de gesso.....	35
2.1.4.1 Lavra	35
2.1.4.2 Processamento	37
2.1.5 Prescrições normativas.....	45
2.1.6 Aplicações.....	47
2.1.7 Procedimentos para aplicação de pasta de gesso.....	51
2.1.7.1 Comparação com o revestimento de argamassa de cimento	53
2.1.7.2 Componentes do sistema	55

2.1.7.3	Condições para execução do serviço	57
2.1.7.3.1	Preparo da superfície	57
2.1.7.3.2	Preparação da pasta de gesso.....	58
2.1.7.3.3	Aplicação.....	58
2.1.7.3.4	Acabamento	59
2.1.8	Propriedades da pasta de gesso.....	59
2.1.8.1	Densidade.....	59
2.1.8.2	Dureza	60
2.1.8.3	Hidratação e pega.....	60
2.1.8.4	Resistência mecânica	62
2.1.8.5	Aderência.....	62
2.1.8.6	Isolamento	62
2.1.9	Resíduos do gesso	63
2.2	Cimento Portland	67
2.2.1	Histórico do cimento.....	67
2.2.2	Matérias-primas na fabricação do cimento Portland	69
2.2.3	Processo de fabricação do cimento Portland	70
2.2.3.1	Processo seco	71
2.2.3.2	Processo úmido	73
2.2.4	Composição química.....	74
2.2.5	Hidratação do Cimento Portland	77
2.2.6	Tipos de cimento Portland	85
2.2.6.1	Cimento Portland Comum (CP I)	86
2.2.6.2	Cimento Portland Composto (CP II).....	86
2.2.6.3	Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)	86

2.2.6.4	Cimento Portland Pozolânico (CP IV)	87
2.2.6.5	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V -ARI).....	87
2.2.6.6	Cimento Portland Resistente aos Sulfatos (RS)	88
2.2.6.7	Cimento Portland Branco	89
2.2.6.8	Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação.....	89
2.2.7	Propriedades físicas.....	93
2.2.7.1	Propriedades do cimento	93
2.2.7.1.1	Densidade	93
2.2.7.1.2	Finura	93
2.2.7.1.3	Tempo de pega	94
2.2.7.1.4	Expansibilidade	96
2.2.7.1.5	Calor de hidratação	96
2.2.7.2	Propriedades do concreto	96
2.2.7.2.1	Resistência.....	97
2.2.7.2.2	Permeabilidade e absorção.....	97
2.2.7.2.3	Módulo de elasticidade.....	98
2.2.8	A importância do gesso no cimento	99
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	100
3.1	Materiais.....	100
3.2	Métodos	105
3.2.1	Confecção e cura dos corpos de prova.....	105
3.2.2	Determinação da resistência à compressão	110
3.2.3	Determinação da permeabilidade	110

3.2.4	Determinação da rigidez	111
3.2.5	Determinação do tempo de pega	112
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
4.1	Ensaio de Resistência à Compressão.....	115
4.2	Ensaio de Absorção.....	125
4.3	Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	128
4.4	Ensaio de Tempo de Pega.....	135
5	CONCLUSÕES.....	138
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....	140
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Célula cristalina do mineral gipsita (CANUT, 2006).	28
Figura 2.2- Mapa do Brasil e do estado de Pernambuco, com enfoque no pólo gesseiro de Araripe (http://www.guianet.com.br).	32
Figura 2.3- Variedades de gipsita utilizadas para a fabricação de gesso, conhecidas no Araripe como: a) e b) Cocadinha; c) Johnson + Estrelinha; d) Selenita; e) Alabastro; f) Anidrita (Adaptado de BALTAR <i>et al.</i> , 2004 e 2005).	34
Figura 2.4– Macroprocesso da cadeia produtiva de gesso (ADENE/ATECEL, 2006)...35	
Figura 2.5– Mostra de lavras a céu aberto no pólo gesseiro de Araripe (ADENE/ATECEL, 2006).	37
Figura 2.6– Tipos de trituradores: a) quebradores de mandíbulas b) quebrador cônico c) triturador de rolos dentados (NOVO DE MIGUEL, 1963).	38
Figura 2.7– Tipos de fornos: a) Marmita vertical; b) Marmita horizontal; c) Rotativo horizontal; d) Marmita rotativa (Adaptado de ADENE/ATECEL, 2006; BALTAR <i>et al.</i> , 2005 e 2004).	41
Figura 2.8– Foto do forno tipo autoclave (ADENE/ATECEL-2006).	43
Figura 2.9- a) Partículas de hemidrato alfa e b) hemidrato beta (CINCOTTO <i>et al.</i> , 1985).	44
Figura 2.10- Consumo setorial em 2004 no Brasil (DNPM, 2005).	48
Figura 2.11– Fluxograma do gesso no canteiro (adaptado de ALVES <i>et al.</i> , 2006).	51
Figura 2.12– Fotos da argamassa de gesso e sua aplicação sobre alvenaria em construções de unidades habitacionais do Programa Vila Viva do Aglomerado da Serra executado em Belo Horizonte.	53
Figura 2.13– Instrumentos para execução do revestimento de gesso (HINCAPIÉ <i>et al.</i> , 1996b).	56
Figura 2.14– Exemplo de curva de hidratação de uma pasta de gesso (CLIFTON <i>apud</i> ANTUNES <i>et al.</i> , 1999).	61
Figura 2.15- Fontes de geração de resíduo de gesso na construção civil (AGOPYAN <i>et al.</i> , 2005).	64
Figura 2.16– Foto do resíduo de gesso em obra em Belo Horizonte e microestrutura do gesso hidratado (NIGLIO e CAMARINI, 2005).	65
Figura 2.17– Foto do resíduo de gesso lançado em caçamba junto com outros materiais em obra do Programa Vila Viva em Belo Horizonte.	66

Figura 2.18– Processo de moagem em um moinho de bolas (CIENCIAQUÍMICA, 2007).	71
Figura 2.19– Esquema da fabricação de cimento pelo processo seco (adaptado de DURANTE, 2001).	72
Figura 2.20- Transformação de fases ao longo do forno rotativo na fabricação de cimento (COUTINHO, 2002).	74
Figura 2.21– Estrutura de um clínquer Portland relativamente comum, observado ao microscópio óptico. C ₃ S: cristais amarelados, de forma aproximadamente hexagonal; C ₂ S: cristais mais escuros, arredondados (COUTINHO, 2002). .	76
Figura 2.22– Aspecto esquemático dos principais componentes do nódulo de clínquer (DURANTE, 2001).	76
Figura 2.23- Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento com 3 dias de idade mostrando os cristais de CSH (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	79
Figura 2.24- Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento com 3 dias de idade, mostrando os grandes cristais de Ca(OH) ₂ e a estrutura fibrosa formada pela CSH (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	80
Figura 2.25- Fotografia com MEB que mostra a formação da etringita sendo: a) etringita cristalina e b) etringita coloidal (ESTRADA <i>et al.</i> , 2005).	81
Figura 2.26- Micrografia eletrônica de varredura (MEV) de cristais hexagonais típicos de monossulfato hidratado e cristais aciculares de etringita formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 1994).	82
Figura 2.27 - Fissuração na base de concreto armado, de uma torre de rede elétrica, devido ao cimento apresentar um alto teor de sulfatos (THOMAZ, 2003).	83
Figura 2.28- Representação esquemática da evolução do calor de hidratação (PINTO <i>apud</i> CARVALHO, 2002).	84
Figura 2.29- Descrição esquemática dos produtos e microestruturas formados durante a hidratação do cimento Portland (YOUNG <i>et al.</i> , 1998).	85
Figura 2.30– Evolução da resistência média à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).	88
Figura 2.31– Aparelho de Vicat e molde tronco cônico	95
Figura 2.32– Foto do equipamento ERUDITE MKII para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.	99
Figura 3.1– Foto dos corpos de prova moldados com microconcretos.	106

Figura 3.2– Foto do misturador mecânico utilizado na confecção dos corpos de prova.	109
Figura 4.1- – Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos sem adição nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traço 1).....	118
Figura 4.2– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 3,8% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 2, 3 e 4).	119
Figura 4.3– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 2,5% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 5, 6 e 7).	120
Figura 4.4– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 1,3% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 8, 9 e 10).	121
Figura 4.5- Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos sem adição e contaminados com 3,8% nas idades de 28 dias e após cura acelerada em água aos 150 dias (traços 1, 2, 3 e 4).....	123
Figura 4.6- Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 2,5% e 1,3% nas idades de 28 dias e após cura acelerada em água aos 150 dias (traços de 5 a 10).....	124
Figura 4.7– Resultados da absorção das amostras de microconcretos na idade de 31 dias.....	127
Figura 4.8– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos sem adição nas idades de 7, 14 e 28 dias (traço 1).....	131
Figura 4.9– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 3,8% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 2, 3 e 4).	132
Figura 4.10– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 2,5% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 5, 6 e 7).	133
Figura 4.11– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 1,3% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 8, 9 e 10).	134
Figura 4.12– Resultados dos tempos de pega dos dez traços de microconcretos.....	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1- Propriedades físicas da gipsita (BALTAR <i>et al.</i> , 2005).....	29
Quadro 2.2- Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento (CANUT, 2006).	40
Quadro 2.3- Materiais e equipamentos necessários para execução de revestimento manual de gesso.	55
Quadro 3.1- Características físicas do cimento CP V ARI PLUS - Ultra Rápido fornecido pela HOLCIM no período de 18/08/2007 a 13/10/2007.....	101
Quadro 3.2- Análise química do cimento CP V ARI PLUS - Ultra Rápido da HOLCIM.	102
Quadro 3.3- Traços dos microconcretos utilizados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção.	107
Quadro 3.4- Proporção dos materiais empregados nos traços dos microconcretos. ..	108
Quadro 3.5- Traços dos cimentos com adição de gesso e resíduo para ensaio de tempo de pega.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição química da gipsita (BALTAR <i>et al.</i> , 2005).....	28
Tabela 2.2- Produção de Gipsita no mundo (adaptado de BALTAR <i>et al.</i> , 2004 e DNPM, 2005).....	30
Tabela 2.3- Especificações químicas para uso de gesso na construção civil (ABNT, 1994).	46
Tabela 2.4- Exigências físicas e mecânicas do gesso para a construção civil (ABNT, 1994).	46
Tabela 2.5- Exigências físicas do gesso para a construção civil (ABNT, 1994).	47
Tabela 2.6- Consumo <i>per capita</i> de gesso em alguns países da América do Sul (BALTAR <i>et al.</i> , 2005).	47
Tabela 2.7- Principais usos comerciais do gesso no Brasil (DNPM, 2005).	48
Tabela 2.8- Composição de um cimento Portland (adaptado de YOUNG <i>et al.</i> , 1998).	75
Tabela 2.9- Nomenclatura dos cimentos Portland.....	90
Tabela 2.10- Exigências químicas dos diferentes tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).	91
Tabela 2.11- Exigências físicas e mecânicas dos diversos tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).....	92
Tabela 3.1- Propriedades físicas e químicas da água utilizada no trabalho e fornecida pela COPASA no período de 09/2007 a 12/2007 do município de Pedro Leopoldo.....	103
Tabela 3.2- Características técnicas do gesso da INGENOR, utilizado na fabricação dos microconcretos, fornecidas pelo fabricante.....	104
Tabela 3.3- Análise química do resíduo de gesso realizado de acordo com as prescrições da ABNT (NBR 12130 e NBR 13207).	105
Tabela 4.1- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 7 dias.	115
Tabela 4.2- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 14 dias.....	116
Tabela 4.3- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 21 dias.....	116
Tabela 4.4- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 28 dias.....	117

Tabela 4.5- Valores de resistência à compressão das amostras após cura acelerada aos 150 dias.	122
Tabela 4.6- Resultados de absorção das amostras de microconcretos na idade de 31 dias (ABNT-NBR NM 65, 2003).....	125
Tabela 4.7- Resultados do módulo de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 7 dias.....	129
Tabela 4.8- Resultados dos módulos de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 14 dias.	130
Tabela 4.9- Resultados dos módulos de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 28 dias.	130
Tabela 4.10- Tempos de pega das dez amostras de microconcretos.	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A/AGL. – fator água/aglomerante

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difração de Raio-X

EDS – Energia Dispersive X-Ray Detector (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raio-X)

FRX – Fluorescências de Raio-X

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

NBR – Norma Brasileira Registrada

MEV – Microestrutura Eletrônica de Varredura

RCD – Resíduos de construção e demolição

Sindusgesso – Sindicato das Indústrias e Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcáreos, Derivados de Gesso e de Minerais Não-metálicos do Estado de Pernambuco.

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos da construção civil são provenientes da preparação e escavação de terrenos, de construções, reformas, reparos e demolições. São constituídos por: fragmentos de tijolos, blocos cerâmicos, concretos, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas etc. Esses resíduos devem ser classificados em diferentes classes, tendo cada tipo uma destinação específica. A Resolução 306 da Comissão Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (2002) denomina como RCDs (resíduos de construção e demolição) os resíduos da Classe A, ou seja, resíduos que podem ser reutilizáveis ou recicláveis para serem utilizados como agregados. São constituídos por solos, componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassas e concretos pré-moldados (blocos, tubos, meios-fios etc.). Os resíduos da Classe C são aqueles para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação. Destacam-se entre eles os produtos oriundos do gesso. Do ponto de vista do desenvolvimento sustentável seria importante que se reduzissem os resíduos da construção civil e que a porção gerada fosse reutilizada ou reciclada para que pudesse ser aplicada na própria cadeia produtiva.

A reutilização dos RCDs praticamente se limita ao reuso de terra proveniente de escavações. Por outro lado, a reciclagem de RCDs na construção civil pode ser considerada uma realidade nos dias atuais, muito embora ainda haja, sem dúvida, um longo caminho a ser percorrido. Segundo ROCHA e CHERIAF (2004), a importância do aproveitamento de resíduos deve-se basicamente a dois fatores. O primeiro deles diz respeito à possibilidade de desenvolvimento de materiais de baixo custo. O segundo fator está relacionado à interface direta do setor da construção com a cadeia produtiva fornecedora de insumos.

Os RCDs após beneficiamento são comumente utilizados como matéria-prima para execução de base e sub-base de pavimentos, e empregados como agregados para

concreto. Em ambos os casos a preparação dos resíduos se dá em estações de tratamento específicas para tal fim. No caso de resíduos cerâmicos, o único quesito para que o mesmo seja aceito para tratamento é que esteja aparentemente isento de matéria orgânica e de gesso. A presença de gesso, que é solúvel em água, nos agregados de RCDs para execução de base e sub-base poderia trazer problemas a longo prazo devido à formação de vazios pela lixiviação do gesso, além de afetar a composição e pHs da água e do solo (JOHN e CINCOTTO, 2003). Se presente nos agregados reciclados a serem utilizados para fabricação de concretos, o gesso pode promover reações expansivas devido à sua interação com os produtos da hidratação do cimento. Segundo AGOPYAN *et al.* (2005) o teor de gesso presente na massa de concreto não deve ultrapassar a 1% da massa total, sendo o valor de 0,5%, o valor adequado para controle da pega do composto sem que ocorram problemas na durabilidade. Quando os RCDs que forem utilizados na fabricação de concretos possuírem grau de contaminação acima do informado por AGOPYAN *et al.* (2005), poderão ocasionar uma perda na durabilidade do mesmo, com a formação de produto que causa uma expansibilidade no concreto.

A maior utilização do gesso, dentro da construção civil, é como revestimento interno de paredes. Segundo NITA *et al.* (2004), nesta atividade a geração de resíduos resultante do desperdício em obra é de aproximadamente 45%. Existe a possibilidade de reciclagem desse material pela indústria do cimento. No entanto, a falta de segregação e controle nos canteiros de obras das empresas de pequeno e médio porte, que são responsáveis em Belo Horizonte pela maior parte dos RCDs gerados, faz com que o gesso residual seja armazenado na obra juntamente com resíduos de vários outros materiais construção. Esse entulho tem como destino final os aterros e lixões das cidades, devido à impossibilidade da fabricação de agregados contaminados por gesso. Além disso, o gesso é presença não desejável nos aterros. Segundo JOHN e CINCOTTO (2003), o gesso em contato com umidade, em condições anaeróbicas, com baixo pH, e sob ação de bactérias redutoras de sulfatos, pode formar gás sulfídrico (H_2S), que é tóxico e inflamável e possui odor característico de ovo podre. Isso constitui um grande problema econômico com graves conseqüências de impacto ambiental. O controle da presença de gesso no RCD é visual, ou seja, um RCD considerado sem gesso poderia conter um teor de gesso imperceptível à vista desarmada e que poderia comprometer o produto fabricado com esses materiais após reciclagem. Nesse

contexto, este trabalho se propõe a avaliar a influência de três graus de contaminação de agregados por gesso nas propriedades de concretos fabricados utilizando tais materiais como agregados miúdos.

1.1 Objetivo

Visando contribuir para o desenvolvimento sustentável no tocante a uma correta disposição e reutilização dos resíduos de construção e demolição, este trabalho se propõe a avaliar a influência da contaminação dos agregados por resíduos de gesso nas propriedades do concreto confeccionado sem agregado graúdo (microconcreto).

Para se atingir o objetivo proposto é necessário que os seguintes objetivos específicos sejam atingidos:

- avaliação das propriedades físicas dos microconcretos fabricados com agregados contaminados por gesso e resíduo de gesso;
- avaliação das propriedades mecânicas dos microconcretos fabricados com agregados contaminados por gesso e resíduo de gesso.

1.2 Desenvolvimento do Trabalho

Para atender os objetivos propostos foi inicialmente feita uma revisão bibliográfica, basicamente sobre dois temas. O primeiro aborda tópicos sobre o gesso, suas características, produção, fabricação e resíduos. Já no segundo tema é estudado o cimento, matéria-prima principal para a fabricação do concreto.

Em função dos estudos realizados e dos objetivos propostos foi desenvolvido um trabalho experimental utilizando microconcretos confeccionados com agregados miúdos (concretos sem agregado graúdo) com diferentes índices de contaminantes por gesso e resíduo de gesso. Esses microconcretos foram submetidos a ensaios de

resistência à compressão, de módulo de elasticidade dinâmico, de absorção de água e de tempo de pega.

A partir da análise dos resultados obtidos foram estabelecidas algumas conclusões que são apresentadas ao final deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica do trabalho ficou dividida em duas partes. A primeira aborda o gesso de forma abrangente. Sua história, mineralogia, processo de produção e fabricação, além das prescrições normativas são apresentadas. Os procedimentos para aplicação da argamassa de gesso, suas propriedades e principalmente o resíduo gerado, também são referenciadas de maneira a destacar a sua real importância para a indústria da construção civil e a conscientização da necessidade do reaproveitamento desse resíduo.

Na segunda parte, de forma similar à primeira, são apresentados alguns aspectos da origem do cimento Portland, assim como uma descrição de seu processo de fabricação, suas propriedades e tipos. É ressaltada a importância do teor ideal de gesso que há na composição do cimento.

2.1 Gesso

A gipsita é um mineral abundante na natureza e como tal existem jazidas espalhadas por muitos países do mundo. Quimicamente é um sulfato de cálcio hidratado cuja fórmula é $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

O mineral gipsita é encontrado em granulação variando de fina a média, estratificada ou maciça e na coloração que varia entre tons claros de amarelo e marrom, constituindo as denominadas rochas gipsíferas. Dessas, fazem parte também outros minerais, sempre em quantidades subordinadas, entre os quais se incluem dolomita, quartzo, anidrita, calcita, halita, enxofre, quartzo e argilas (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2001).

Quando calcinada à temperatura da ordem de 160°C a gipsita desidrata-se parcialmente, originando um hemidrato conhecido comercialmente como gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Os termos “gipsita”, “gipso” e “gesso”, são freqüentemente usados como sinônimos. Todavia, a denominação gipsita é reconhecidamente a mais adequada ao mineral em estado natural, enquanto gesso é o termo mais apropriado para designar o produto calcinado.

Então, o gesso é definido como um termo genérico de uma família de aglomerantes simples, constituídos basicamente de sulfatos mais ou menos hidratados e anidros de cálcio que são obtidos pela calcinação da gipsita natural, constituída de sulfato di-hidratado de cálcio geralmente acompanhado de certa proporção de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio.

2.1.1 Histórico do gesso

O gesso é um dos mais antigos materiais de construção fabricados pelo homem. Em recentes descobertas arqueológicas, tornou-se evidente que o emprego do gesso remonta ao 8º milênio a.C. (ruínas na Síria e na Turquia). Foi encontrado, também, na grande pirâmide erguida por Quéops, rei do Egito, da 4ª dinastia, no ano de 2.800 antes da nossa era, nas juntas de assentamento estanques, de precisão, entre imensos blocos de cerca de 16 toneladas que constituem o monumento.

O filósofo Teofrasto, que viveu entre os séculos III e IV a.C., é o mais antigo dos autores que se interessaram pelo gesso. Tornou-se conhecido por seu “Tratado de Pedra” que cita a existência de gesseiras em Chipre, na Fenícia e na Síria, e indica que o gesso era utilizado, como argamassa, para a ornamentação.

Na África, os bárbaros construíram as barragens e os canais, que garantiram, por muitos séculos, a irrigação das palmeiras de Mozabe, com o gesso.

Já na França, após a Invasão Romana, iniciou-se o conhecimento dos processos construtivos chamados de pedreiros de gesso (constituía-se do emprego do gesso voltado ao aproveitamento das construções em 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.

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. No século XVIII, a utilização do gesso na construção foi tão generalizada na França, a ponto de, do montante das construções existentes, 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 a Academia de Ciências Francesa, com o primeiro estudo científico dos fenômenos, que é a base da preparação do gesso.

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.

2.1.2 Mineralogia e geologia

2.1.2.1 Mineralogia

Os minerais de sulfato de cálcio, segundo BALTAR *et al.* (2005), podem ocorrer na natureza nas seguintes formas: di-hidratada (gipsita: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), desidratada (anidrita: CaSO_4) e, raramente, semi-hidratada (bassanita: $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

A microestrutura da gipsita, em seu estado natural, é constituída de cristais geminados de sistema monoclinico (DANA, 1969). A célula unitária da gipsita é cúbica de face centrada (CFC), composta por quatro moléculas de SO_4^{2-} , quatro átomos de Ca^{2+} e duas moléculas de água (Figura 2.1).

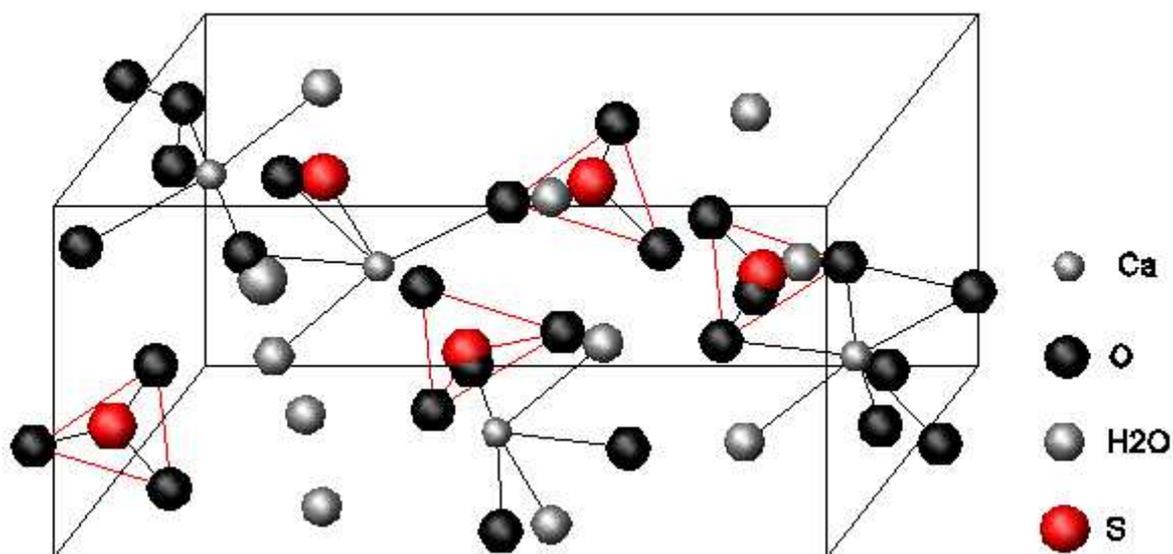


Figura 2.1- Célula cristalina do mineral gipsita (CANUT, 2006).

A estrutura do sulfato de cálcio di-hidratado é essencialmente composta por duas camadas de grupos SO_4 . Essas camadas estão fortemente unidas entre si, por íons de cálcio, formando um estrato. Estes estratos, por sua vez, estão unidos por uma camada de moléculas de água, cada uma das quais une um íon de cálcio com um oxigênio do seu mesmo estrato e com um outro oxigênio do estrato vizinho (CANUT, 2006).

A gipsita cristaliza no sistema monoclinico e pode apresentar-se sob formas variadas:

- espato acetinado: variedade com aspecto fibroso e brilho sedoso;
- alabastro: variedade maciça, microgranular e transparente, usada em esculturas;
- selenita: cristais com clivagens largas, incolores e transparentes.

A composição química e as características físicas da gipsita são apresentadas na tabela 2.1 e no quadro 2.1.

Tabela 2.1- Composição química da gipsita (BALTAR *et al.*, 2005).

Composto	Composição (%)
CaO	32,5
SO ₃	46,6
H ₂ O	20,9

Propriedade Física	Característica
Cor	Variável, podendo ser incolor, branca, cinza e outras (dependendo das impurezas)
Brilho	Vítreo, nacarado ou sedoso
Dureza (Escala de Mohs)	2
Densidade	2,3
Hábito	Prismático
Clivagem	Em quatro direções
Morfologia e tamanho dos cristais	Varia de acordo com as condições e ambientes de formação.

Quadro 2.1- Propriedades físicas da gipsita (BALTAR *et al.*, 2005).

2.1.2.2 Geologia

Os minerais do tipo gipsita e anidrita são encontrados em depósitos de origem evaporítica, cuja formação resulta da precipitação de sulfato de cálcio presente na água dos oceanos quando submetida à evaporação (ROQUE *et al.*, 2005). A evaporação e, conseqüentemente, a concentração do sal são favorecidas em ambiente quente e seco. Os depósitos de gipsita costumam apresentar, além da anidrita, contaminantes como: argilas, quartzo, carbonatos de cálcio e magnésio, cloretos e outros sulfatos (BALTAR *et al.*, 2005). Em geral, a produção é obtida a partir de minério com 80 a 95% de pureza.

Suas jazidas apresentam camadas intercaladas de argilas, carbonatos, sílex e minerais evaporíticos tais como, halita e anidrita (BALTAR *et al.*, 2005). As jazidas do Estado de Pernambuco estão inseridas em domínios da Formação Santana, do Cretáceo Inferior, formada por siltitos, margas, calcários, folhelhos e intercalações de gipsita (LUZ *et al.*, 2001). Por ser a gipsita e a anidrita minerais instáveis, quando submetidas a diferentes condições de temperatura e pressão, podem sofrer transformações em sua composição e textura. A gipsita acumulada na superfície terrestre pode desidratar-se a determinada profundidade e transformar-se em anidrita. Por sua vez, a ocorrência de fenômenos geológicos, como movimento tectônico ou erosão, pode levar o depósito de

anidrita a situar-se mais próximo à superfície, onde pode experimentar uma re-hidratação em contato com águas meteóricas e voltar à forma de gipsita, denominada secundária, com formas cristalinas distintas da anidrita e da gipsita original (BALTAR *et al.*, 2005).

A gipsita também pode ser encontrada em regiões vulcânicas, especialmente, onde o calcário sofreu ação dos vapores de enxofre. Nesse tipo de ocorrência, a gipsita aparece como mineral de ganga, nos veios metálicos, podendo estar associado a diversos minerais, sendo os mais comuns a halita, anidrita, dolomita, calcita, enxofre, pirita e o quartzo (BALTAR *et al.*, 2005).

2.1.3 Produção de gipsita / gesso

A produção brasileira de gipsita em comparação com os principais países produtores do mundo é apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2- Produção de Gipsita no mundo (adaptado de BALTAR *et al.*, 2004 e DNPM, 2005).

PAÍS	PRODUÇÃO (10 ³ T)			
	2002	%	2004	%
Estados Unidos	16.100	15,39	18.000	17,00
Irã	11.000	10,51	11.500	10,80
Canadá	8.600	8,22	9.000	8,5
Espanha	7.500	7,17	7.500	7,10
Brasil	1.633	1,56	1.472	1,40

O Brasil possui reservas abundantes de gipsita, estimadas em 1,2 milhões de toneladas, distribuídas em oito estados da federação, sendo os principais: Bahia, Pará e Pernambuco. O estado de Pernambuco possui 18% das reservas, mas é responsável por 89% da produção nacional de gipsita (BALTAR *et al.*, 2004). Segundo LYRA (2002) isso pode ser explicado pelo fato das suas minas apresentarem melhores condições de

lavra (menor razão de mineração e maior pureza do minério); mais adequada infraestrutura (fácil acesso, vias de escoamento asfaltadas e disponibilidade de energia elétrica); e ainda, uma maior proximidade do mercado consumidor do que as da maioria dos outros estados produtores.

A maior região produtora de gipsita foi denominada de Pólo Gesseiro do Araripe, e está localizada no epicentro do semi-árido brasileiro, na região do extremo oeste do Estado de Pernambuco, a cerca de 700 km da capital Recife, e abrange os Municípios de Araripina, Bodocó, Exú, Ipubi, Ouricuri e Trindade (figura 2.2).

Este Pólo Gesseiro é formado por 18 minas em atividade, 69 unidades industriais de calcinação e 250 indústrias de pré-moldado, proporcionando cerca de 12 mil empregos diretos e cerca de 60 mil indiretos, segundo o Sindusgesso (Sindicato das Indústrias de Extração e Beneficiamento de Gipsita, Calcários, Derivados de Gesso e de Minerais Não-Metálicos do Estado de Pernambuco), (LUZ *et al.*, 2001).

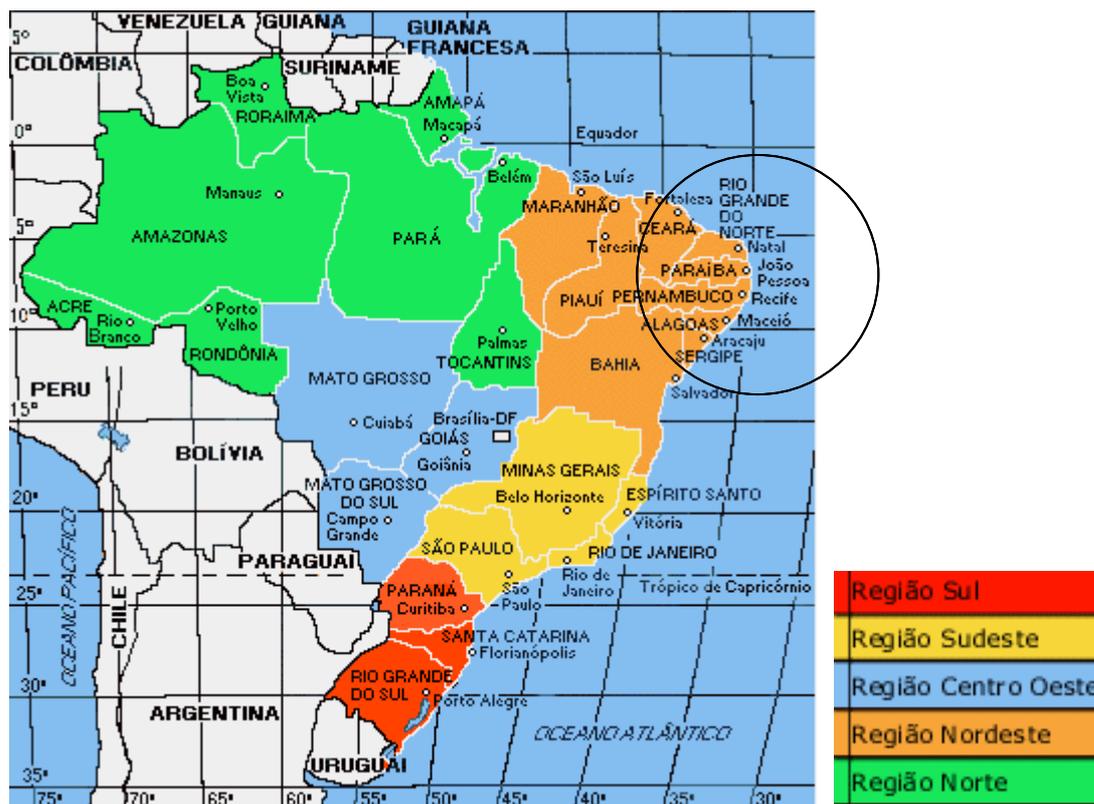


Figura 2.2- Mapa do Brasil e do estado de Pernambuco, com enfoque no pólo gessoire de Araripe (<http://www.guianet.com.br>).

As diferentes variedades mineralógicas de gipsita, segundo BALTAR *et al.* (2004), são conhecidas na região do Araripe, com os seguintes nomes:

- Cocadinha: um tipo de gipsita estratificada com raros filmes de argila verde;
- Rapadura: variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde;
- Pedra Johnson: variedade mais pura, com a coloração variando de branco a creme e que caracteriza-se por apresentar uma estrutura com “nódulos” e “estrelas”;
- Estrelinha: gipsita que apresenta cristais radiados em forma de estrela;
- Alabastro: variedade maciça e transparente, muito usada em esculturas, que caracteriza-se por apresentar problemas na calcinação devido ao seu caráter fibroso que promove anisotropia;
- Selenita: variedade placosa, incolor e transparente;
- Boró: mistura de alabastro e argila;
- Anidrita.

A utilização de cada uma dessas variedades depende do produto que se deseja obter. Por exemplo, as variedades cocadinha, rapadura e estrelinha são utilizadas na produção do gesso beta. A pedra Johnson é usada na produção do gesso alfa; enquanto que os tipos alabastro, boró e anidrita são utilizados na fabricação de cimento ou na agricultura. A selenita é usada em polarizadores (BALTAR *et al.*, 2004). Na figura 2.3 são apresentados alguns desses tipos de gipsitas.

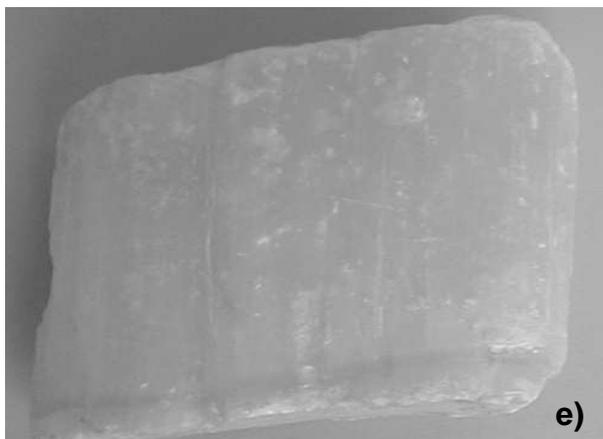
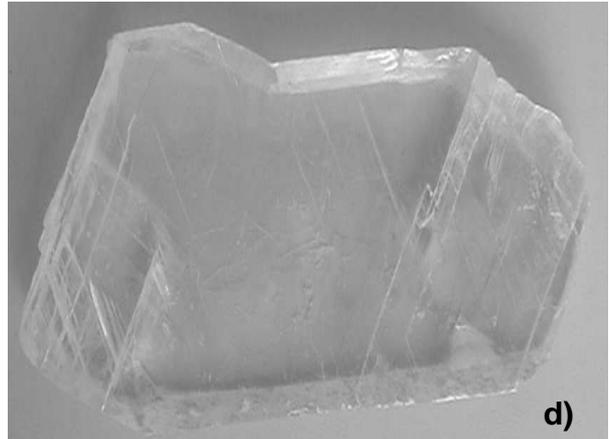
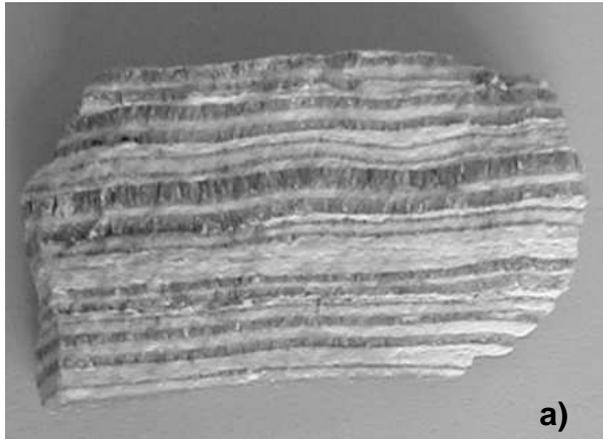


Figura 2.3- Variedades de gipsita utilizadas para a fabricação de gesso, conhecidas no Araripe como: a) e b) Cocadinha; c) Johnson + Estrelinha; d) Selenita; e) Alabastro; f) Anidrita (Adaptado de BALTAR *et al.*, 2004 e 2005).

2.1.4 Fabricação de gesso

A fabricação do gesso será dividida neste trabalho em dois tópicos: a lavra e o processamento. A figura 2.4 apresenta o macroprocesso da cadeia produtiva do gesso:

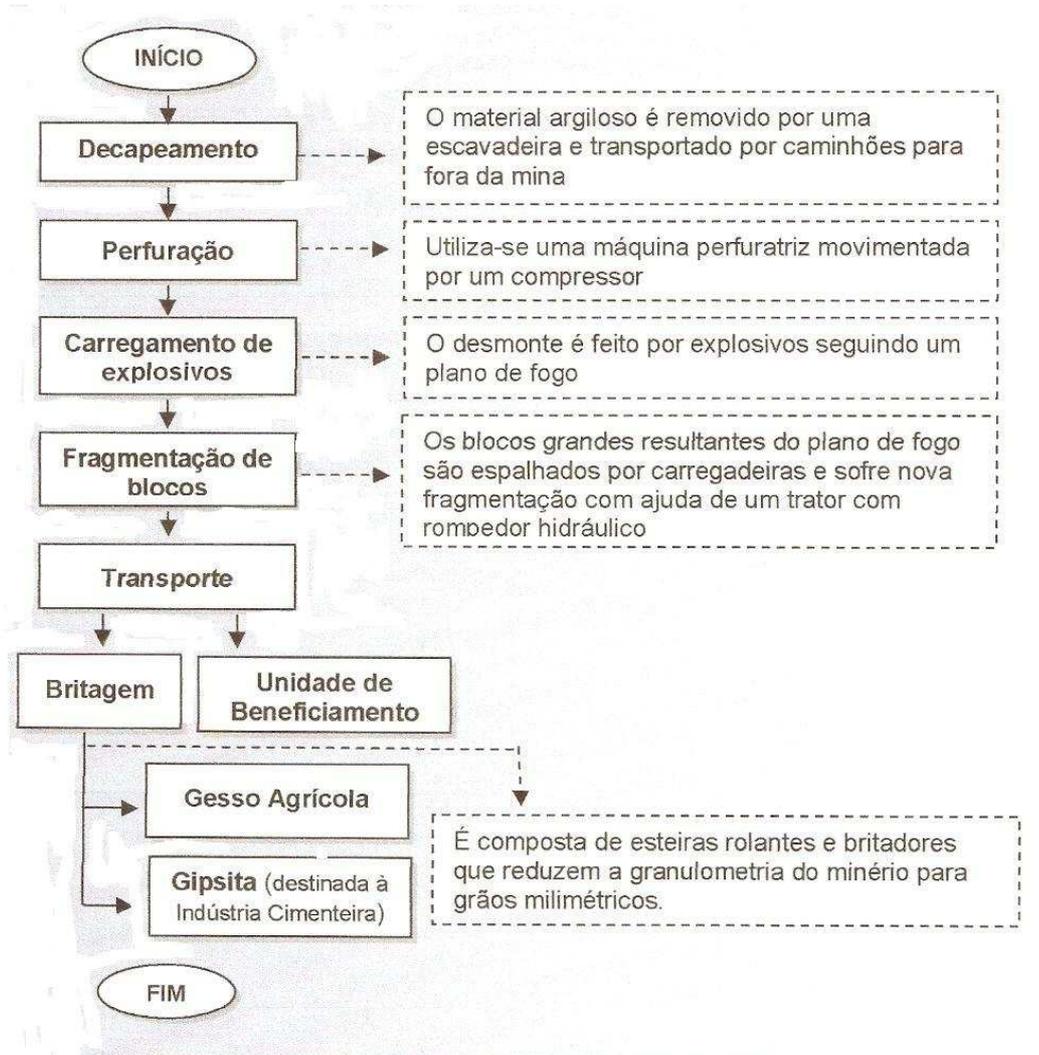


Figura 2.4– Macroprocesso da cadeia produtiva de gesso (ADENE/ATECEL, 2006).

2.1.4.1 Lavra

Existem duas formas de obtenção da gipsita: a lavra subterrânea ou a céu aberto, sendo que esta última utiliza métodos e equipamentos convencionais. Segundo BALTAR *et al.* (2005), um detalhe importante a ser observado é que a gipsita absorve

parte da força do explosivo dificultando o seu desmonte. Devido a isso, na perfuração, os furos costumam ser programados com diâmetros entre 50 e 100 mm e com pequeno espaçamento a fim de possibilitar uma distribuição mais densa dos explosivos. É comum o uso de explosivos à base de nitrato de amônia e óleo combustível na proporção de 1 kg/t de material desmontado.

No caso de lavra subterrânea, o método empregado é o de câmaras e pilares. Este método é empregado em diversos países, sendo mais freqüente nos Estados Unidos.

No Brasil, o método de lavra empregado é a céu aberto (figura 2.5), através de bancadas simples. Esse tipo de extração é recomendado para minerar corpos com dimensões horizontais que permitam altas taxas de produção e baixos custos unitários de produção. O acesso à cava geralmente é feito através de uma rampa única. Na lavra da gipsita são empregados equipamentos como: rompedores hidráulicos, marteletes hidráulicos, tratores de esteira, pás mecânicas e caminhões (BALTAR *et al.*, 2005).

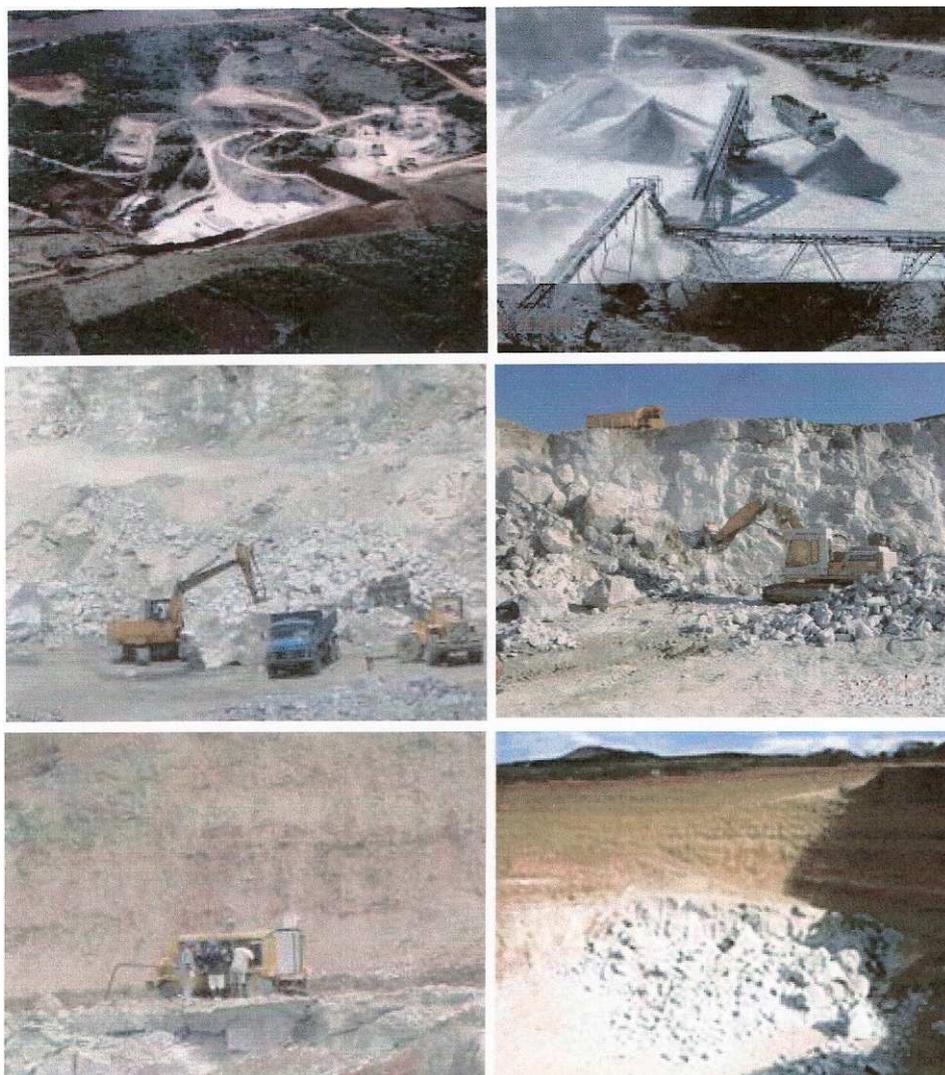


Figura 2.5– Mostra de lavras a céu aberto no pólo gesseiro de Araripe (ADENE/ATECEL, 2006).

2.1.4.2 Processamento

O beneficiamento da gipsita é essencial para a obtenção de um gesso com as propriedades adequadas para um uso específico, seja como aglomerantes ou até na medicina (CANUT, 2007).

Para sua fabricação utiliza-se uma única matéria prima, que é a gipsita, um sulfato de cálcio com duas moléculas de água, em geral acompanhado de impurezas como SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , CaCO_3 , MgO , num total não ultrapassando 6%.

No Araripe, o beneficiamento da gipsita para a produção de gesso, segundo BALTAR *et al.* (2004), envolve as seguintes operações: (1) catação manual; (2) britagem; (3) rebritagem; (4) peneiramento (usado apenas em algumas empresas); (5) encilamento; (6) calcinação; (7) estabilização térmica em silos; (8) moagem (de acordo com as especificações de mercado para o produto); (9) encilamento e (10) ensacamento.

Após a catação manual, para a execução da britagem podem ser utilizados britadores de mandíbula, cônicos ou rolos dentados (figura 2.6). Em alguns casos, a britagem é realizada em dois estágios em circuito fechado com peneiras vibratórias a seco.

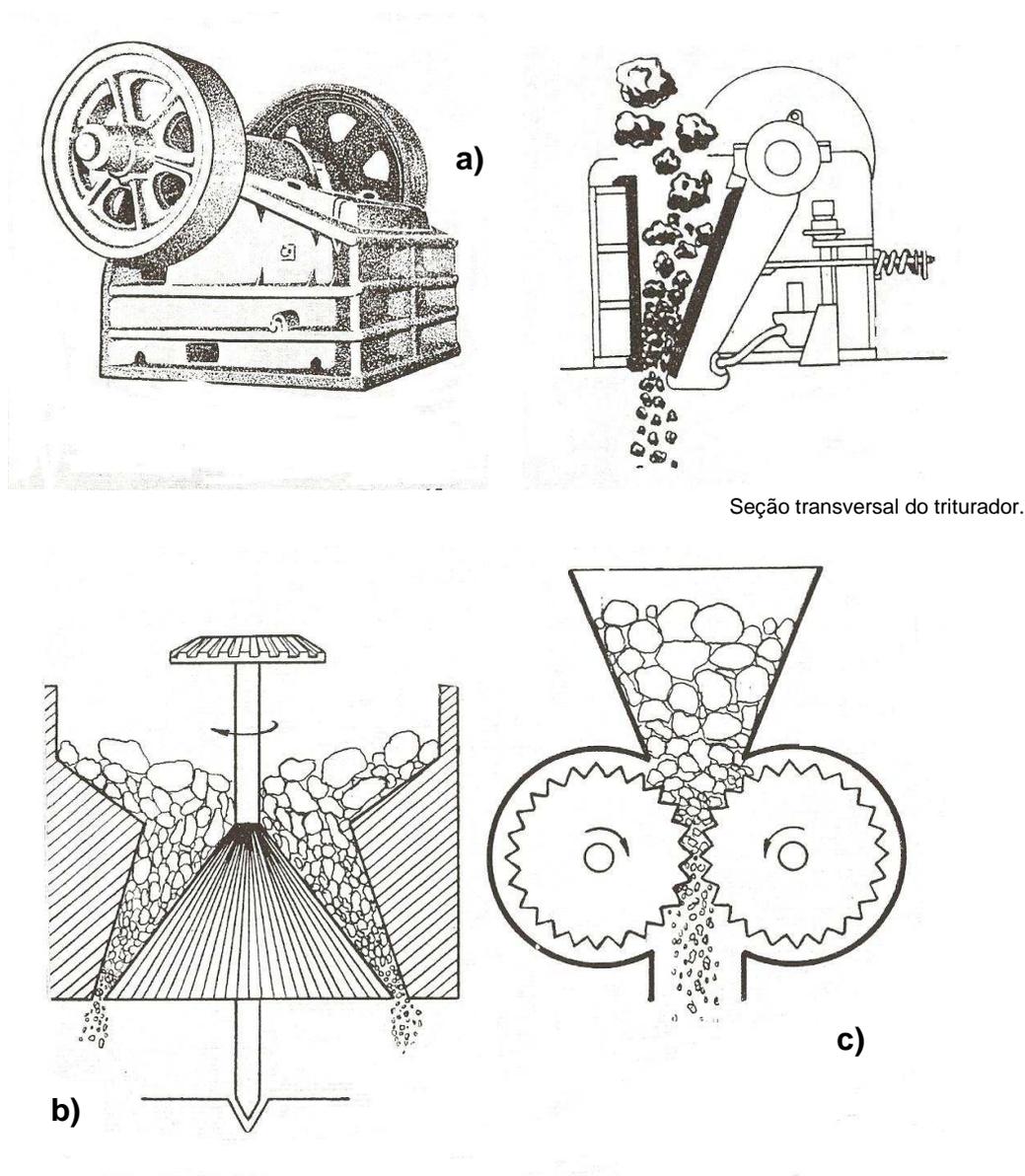


Figura 2.6– Tipos de trituradores: a) quebradores de mandíbulas b) quebrador cônico c) triturador de rolos dentados (NOVO DE MIGUEL, 1963).

Após a britagem, existindo a necessidade de melhorar a qualidade do gesso, é possível remover minerais de ganga, descartando-se a fração granulométrica com maior concentração de contaminantes, (argilas ou areia), antes da calcinação. Em alguns casos, usa-se uma operação de lavagem.

A calcinação é o processo de aquecimento térmico pelo qual a gipsita é desidratada, transformando o di-hidrato em hemidrato:



Nas temperaturas entre 125°C a 180°C, a gipsita perde $\frac{3}{4}$ partes de água, passando de di-hidrato a hemidrato, muito mais solúvel que o primeiro. Esse hemidrato é conhecido por gesso de Paris, gesso de estucador ou gesso rápido. Como o tempo requerido é inversamente proporcional à temperatura, procura-se, por economia, elevar o mais possível esta.

A desidratação total da gipsita ocorre em temperaturas acima de 180°C, o que resulta em diferentes formas de anidrita (CaSO_4), conforme BALTAR *et al.* (2005), relatam:

- na faixa entre 180 e 250°C: forma-se a anidrita III (anidrita ativa), um produto solúvel, instável e ávido por água, que pode absorver umidade atmosférica e passar à forma de hemidrato. Essa propriedade torna a anidrita III um produto com características apropriadas para uso como acelerador de tempo de pega, cuja equação é:



- entre as temperaturas de 300 a 700°C: obtêm-se a anidrita II, um produto totalmente desidratado, insolúvel, com natureza mineralógica semelhante à anidrita natural, sendo sua equação:



- entre as temperaturas de 700 e 900°C: forma-se um produto inerte, sem aplicação industrial, sendo a equação:



- nas temperaturas acima dos 900°C: ocorre a dissociação do sulfato de cálcio com formação do CaO livre.

As reações de desidratação da gipsita decorrentes das diversas temperaturas de beneficiamento fazem com que também aconteçam mudanças no sistema cristalino como pode ser observado no quadro 2.2.

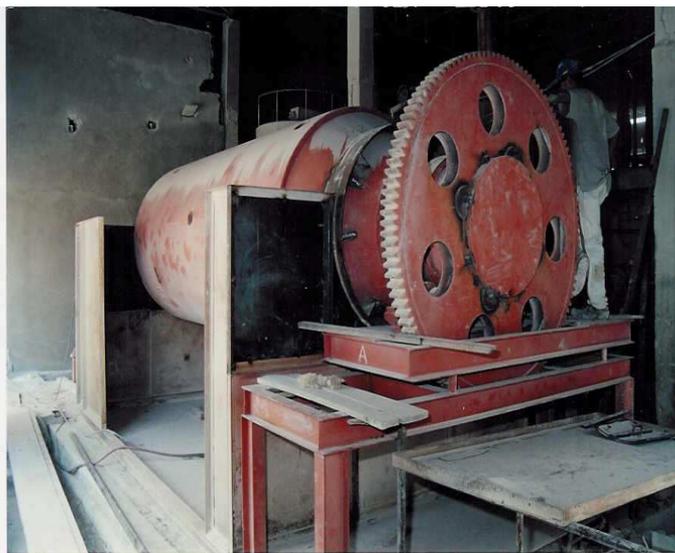
Mineral	Fórmula	Sistema Cristalino
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico
Hemidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Anidrita III	$\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Anidrita II	CaSO_4	Ortorrômbica
Anidrita I	CaSO_4	Cúbica

Quadro 2.2- Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento (CANUT, 2006).

O processo de calcinação da gipsita varia de acordo com os tipos de fornos utilizados, os quais devem assegurar uma distribuição e desidratação regular do material. Existem, basicamente, quatro tipos de fornos para executar a calcinação do material, que são: panela, marmita, rotativo tubular e marmita rotativa. Alguns desses tipos estão apresentados na figura 2.7.



a)



b)



c)



d)

Figura 2.7– Tipos de fornos: a) Marmita vertical; b) Marmita horizontal; c) Rotativo horizontal; d) Marmita rotativa (Adaptado de ADENE/ATECEL, 2006; BALTAR *et al.*, 2005 e 2004).

Os fornos do tipo panela são os mais rudimentares e estão em extinção. Usam a lenha como combustível e pás agitadoras que homogeneízam a calcinação, e os controles de temperatura e do tempo de residência do material são realizados pela experiência do “fornheiro”, ou seja, de forma empírica (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2001).

Os fornos do tipo marmitta têm forma de panelões fechados; a temperatura pode ser controlada através de pirômetros, e um sistema de palhetas internas garante a homogeneidade do material e o combustível pode ser a lenha ou óleo BPF (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2001). A gipsita pulverizada é aquecida dentro de um grande recipiente com capacidade variável entre 10 e 20 toneladas. O material é agitado e aquecido por fogo indireto.

Os rotativos tubulares têm uma pequena inclinação e grande extensão, sendo em aço e material refratário. LYRA SOBRINHO *et al.* (2001), descrevem que o minério moído entra em contato direto com a chama de um maçarico localizado do lado da alimentação, a calcinação ocorre à proporção que o material se desloca, por gravidade, ao longo de toda a extensão do forno e o tempo de residência é controlado pela velocidade de rotação do tubo.

Os do tipo marmitta rotativas também têm a forma tubular e são fabricados do mesmo material que os rotativos tubulares, sua extensão depende do volume de produção. O minério não entra em contato direto com a chama, em alguns casos o forno tem controle de tempo de residência, de temperatura e de perda de massa, como também da pressão interna. O material permanece na cuba e a descarga é intermitente. Seus controles podem ser automatizados com auxílio de computadores ou empíricos (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2001).

Além desses fornos, que proporcionam uma calcinação sob pressão atmosférica, existem fornos do tipo autoclave que são equipamentos utilizados para o tratamento de materiais através de calor, umidade e alta pressão (figura 2.8).



Figura 2.8– Foto do forno tipo autoclave (ADENE/ATECEL-2006).

Quando a calcinação é realizada à pressão atmosférica, obtém-se o gesso *beta* (β), porém quando se dá em equipamentos fechados (autoclave), sob pressão maior que a atmosférica, o gesso obtido é o *alfa* (α). Nesse último processo, a tecnologia empregada é mais sofisticada e o controle de qualidade, tanto da matéria-prima quanto do produto final, é bem mais rígido. No primeiro caso, o processo é realizado nos diferentes tipos de forno acima mencionados.

No processo para produção de gesso β a água de cristalização é liberada, rapidamente, fabricando cristais mal formados e porosos, resultando em um produto que caracteriza-se pela forma irregular e natureza esponjosa dos seus cristais. Por sua vez, o gesso α é um produto mais homogêneo e menos poroso devido a modificação da estrutura cristalina do gesso (BALTAR *et al.*, 2005).

Os hemidratos denominados alfa e beta, segundo CANUT (2006), possuem a mesma estrutura cristalina, entretanto, sua morfologia (tamanho e superfície do cristal) difere devido ao método de produção conforme figura 2.9.

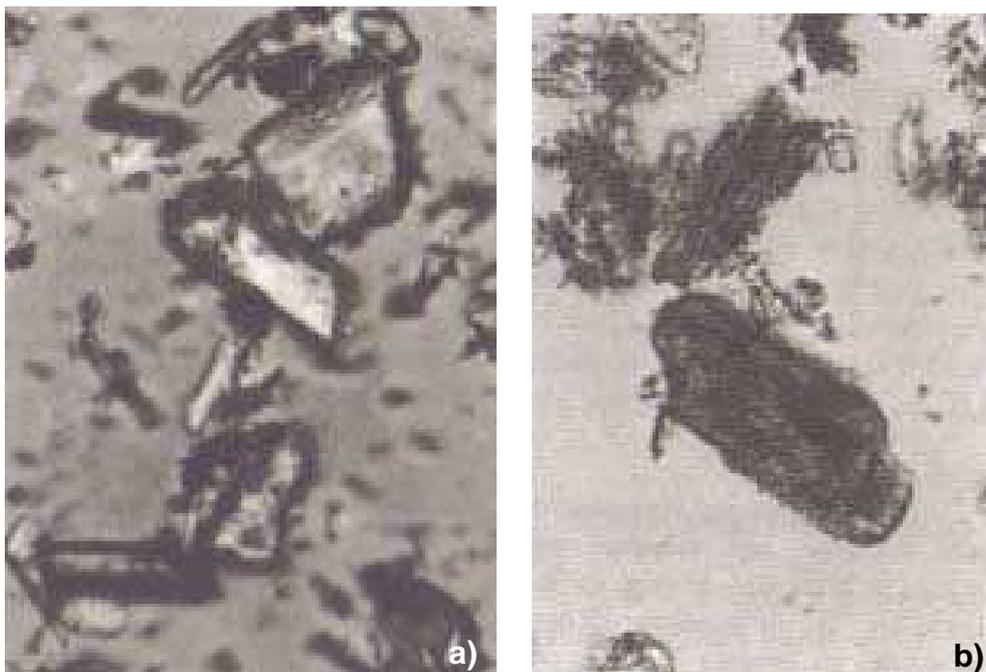


Figura 2.9- a) Partículas de hemidrato alfa e b) hemidrato beta (CINCOTTO *et al.*, 1985).

Na figura 2.9, CINCOTTO *et al.* (1985), observam que as partículas de hemidrato alfa são nitidamente cristalinas e com textura lisa, enquanto as partículas de hemidrato beta são predominantemente sombrias, estriadas e preferencialmente arredondadas. As diferenças morfológicas exercem influência sobre as propriedades da pasta e do gesso endurecido.

O hemidrato beta é utilizado na indústria da construção civil, indústria cerâmica e indústria de modelagem. Já o hemidrato alfa passa por uma modificação na morfologia do gesso que resulta em um produto mais homogêneo e resistente, de aplicações mais nobres e que alcança preços mais elevados.

O gesso alfa é caracterizado por apresentar cristais compactos, regulares e resistentes (CANUT, 2006). Dentre suas principais utilizações destacam-se: odontologia, ortopedia, na indústria automobilística, em matrizes para indústria cerâmica, indústria de modelagem e em bandagens médicas.

Quando há necessidade, o gesso é moído e misturado a aditivos, antes do ensacamento, fabricando assim, tipos especiais, com propriedades físicas e químicas preestabelecidas, como por exemplo, a redução ou a dilatação do tempo de pega, e a impermeabilização. Os aditivos são utilizados em pequenas proporções com a

finalidade de modificar propriedades específicas, dentre os principais utilizados destacam-se: perlita, vermiculita, areia ou calcário e/ou produtos químicos. Os aditivos podem ter diferentes funções (DOMÍNGUEZ e SANTOS; PERES *apud* BALTAR *et al.*, 2005):

- 1) modificador do tempo de pega (acelerador ou retardador): usados para adequar o tempo de pega. Esses aditivos também costumam ter influência sobre outras propriedades do gesso, como a expansão da massa durante a hidratação do hemidrato. Como exemplos de aditivos comumente usados com essa finalidade, podem ser citados o sulfato de potássio (acelerador) e o bórax (retardador);
- 2) retentores de água: usados com o objetivo de garantir uma recristalização homogênea e eficiente da pasta de gesso, como por exemplo, os reagentes derivados de ésteres de celulose;
- 3) fluidificantes: usados para possibilitar a redução da quantidade de água durante o empastamento. A redução da relação água/gesso contribui para o aumento da resistência mecânica da peça obtida após o endurecimento da pasta. Um exemplo de aditivo é o carbonato de cálcio quando adicionado em pequena quantidade;
- 4) impermeabilizantes: são produtos que provocam a obstrução dos poros da massa de gesso, proporcionando um certo grau de impermeabilidade à água;
- 5) umectantes: usados para evitar o surgimento de grumos indesejáveis, durante a preparação da pasta de gesso;
- 6) espessantes: usados para aumentar a consistência da pasta de gesso, por exemplo, o amido;
- 7) reforçadores de aderência: são usados quando há necessidade de aumentar a aderência das pastas de gesso. Esses aditivos são à base de polímeros sintéticos solúveis em água;
- 8) aerantes: usados em situações que necessitem incorporar ar nas pastas de gesso;

2.1.5 Prescrições normativas

A utilização do gesso na construção civil no Brasil é regulada pela norma ABNT NBR – 13207: Gesso para Construção Civil, de outubro de 1994. Para a aplicação dessa norma é necessário consultar as seguintes outras normas:

- NBR 12127 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio;
- NBR 12128 – Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta – Método de ensaio;
- NBR 12129 – Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas – Método de ensaio;
- NBR 12130 – Gesso para construção - Determinação de água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico – Método de ensaio.

A definição do gesso para a construção, segundo a NBR 13207 (ABNT, 1994), é: “material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de tempo de pega”. As Tabelas 2.3, 2.4 e 2.5 apresentam as exigências com relação às propriedades químicas, físicas, mecânicas e físicas do gesso para a construção civil.

Tabela 2.3- Especificações químicas para uso de gesso na construção civil (ABNT, 1994).

Determinações	Limites (%)
Água livre	1,3 (máx)
Água de cristalização	4,2 – 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	39,0 (mín)
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	53,0 (mín)

Tabela 2.4- Exigências físicas e mecânicas do gesso para a construção civil (ABNT, 1994).

Determinações físicas e mecânicas	Unidade	Limites
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	>8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	>30,00
Massa unitária (NBR 12127)	Kg/m ³	>700,00

Tabela 2.5- Exigências físicas do gesso para a construção civil (ABNT, 1994).

Classificação do gesso	Tempo de pega (min) (NBR 12128)		Módulo de finura
	Início	Fim	(NBR 12127)
Gesso fino para revestimento	>10	>45	<1,10
Gesso grosso para revestimento	>10	>45	>1,10
Gesso fino para fundição	4-10	20-45	<1,10
Gesso grosso para fundição	4-10	20-45	>1,10

2.1.6 Aplicações

Apesar do crescimento nos últimos anos, o consumo *per capita* de gesso no Brasil é bastante baixo se comparado com o que ocorre em outros países da América do Sul (Tabela 2.6), sendo esse um indicador importante do potencial de crescimento de consumo no país, nos próximos anos (BALTAR *et al.*, 2005).

Tabela 2.6- Consumo *per capita* de gesso em alguns países da América do Sul (BALTAR *et al.*, 2005).

País	Consumo anual (kg/hab)
Chile	41
Argentina	21
Brasil	9,3

Nos países desenvolvidos o maior consumo de gipsita ocorre na produção de gesso, enquanto que naqueles em desenvolvimento é a indústria cimenteira que mais a utiliza. No Brasil a fase atual é de transição entre o modelo histórico de predomínio da indústria cimenteira e o desenvolvimento da produção de gesso. O consumo setorial em 2004 no Brasil, segundo DNPM (2005) consolidou o predomínio do segmento de calcinação, conforme figura 2.10.

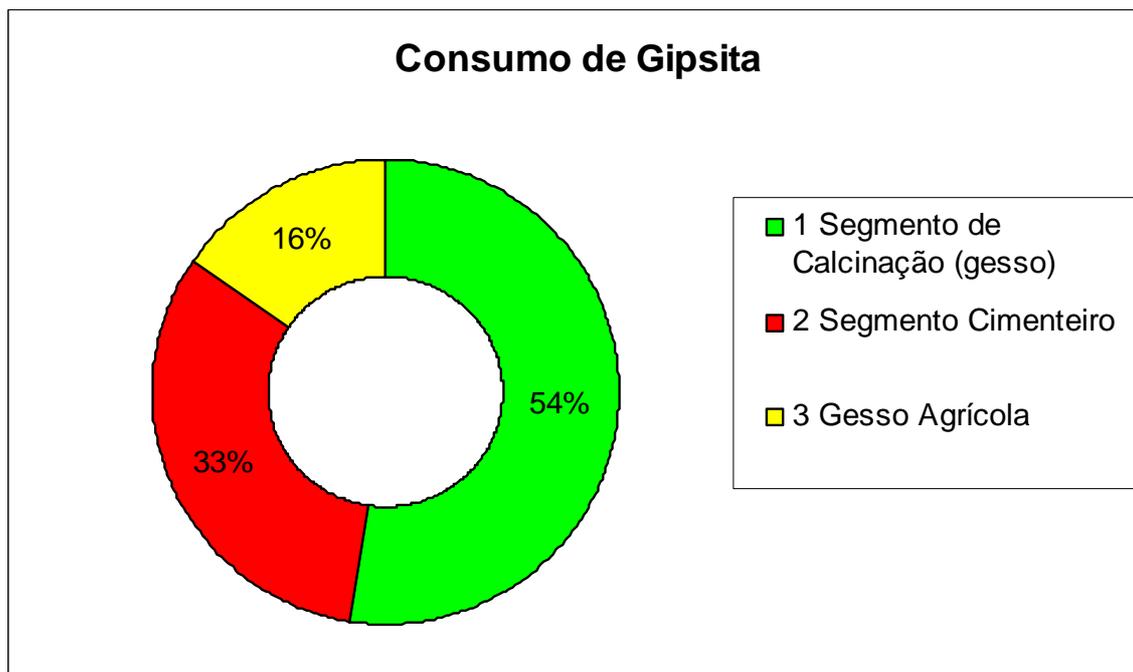


Figura 2.10- Consumo setorial em 2004 no Brasil (DNPM, 2005).

No seu estado natural a gipsita é utilizada pela indústria cimenteira e pela agricultura. Na fabricação de cimento Portland a gipsita é utilizada como fonte de SO_3 , adicionada ao clínquer, na proporção de 3 a 5% em peso, com a finalidade de retardar o tempo de pega. Na agricultura, a gipsita pode atuar como: agente corretivo de solos ácidos, fonte de cálcio, fertilizante em culturas específicas (amendoim, batatas, legumes e algodão) e condicionador de solos, aumentando a permeabilidade, a aeração, a drenagem, a penetração e retenção da água (BALTAR *et al.*, 2004). Já o gesso, segundo DNPM (2005), tem como principais usos comerciais, os dados apresentados na tabela 2.7.

Tabela 2.7- Principais usos comerciais do gesso no Brasil (DNPM, 2005).

Usos	Consumo (%)
Pré-moldado	61
Revestimento	35
Moldes cerâmicos	3
Outros usos	1

O hemidrato (gesso) pode ser utilizado em dois grandes grupos: o gesso para construção civil e o gesso industrial. O gesso industrial é um produto de maior pureza e valor agregado, podendo ser obtido a partir dos hemidratos α ou β , dependendo da aplicação (REQUEIRO e LOMBARDER *apud* BALTAR, 2005):

- 1) Cerâmica: a pasta obtida a partir do hemidrato α (ou mistura de hemidratos α e β) tem importante uso na produção de moldes e matrizes. Na preparação dos moldes costuma-se formar uma mistura com 78 a 90 partes de água para 100 partes de gesso;
- 2) Indústria do Vidro: o gesso é utilizado na fabricação do vidro como fonte de cálcio e de enxofre em substituição ao sulfato de sódio;
- 3) Carga Mineral: as características do gesso que proporcionam a utilização para este fim são: inércia química, pouca abrasividade, baixo peso específico, alto índice de refração, absorção adequada de óleo, elevado grau de brancura, poder opacificante, baixa demanda de ligantes, baixo preço e compatibilidade com pigmentos. Por isso, tem sido utilizado como carga de alta qualidade ou diluente na fabricação de papel, plásticos, adesivos, tintas, madeira, têxteis e alimentos entre outros. Em geral, o gesso carga é produzido a partir do hemidrato do tipo β . Na utilização na indústria do papel, o gesso confere a esse uma estrutura aberta e porosa, o que resulta em elevada absorção de tinta e rápida secagem;
- 4) Indústria Farmacêutica: a facilidade de compressão e desagregação do gesso possui características que facilitam o seu uso. O gesso para esse fim tem elevado valor comercial, devendo atender às normas e especificações exigidas para produtos de alimentação e remédios;
- 5) Decoração: utilizado para confecção de elementos decorativos (estatuetas e imagens), sendo obtido a partir do gesso β ;
- 6) Escolar (giz): produzido a partir do gesso β de fundição, com o uso de aditivos;
- 7) Ortopédico: obtido a partir do gesso α , após a adição de produtos químicos;
- 8) Dental: Usado para a confecção de moldes e modelos, utilizando o gesso α , após a adição de produtos químicos;
- 9) Bandagens de alta resistência: obtido a partir do gesso α ;
- 10) Outros Usos: Indústria automobilística, fabricação de fósforos, fabricação de cerveja, indústria eletrônica, etc.

Por apresentar como característica uma excelente resistência ao fogo, o gesso é empregado na confecção de portas corta-fogo, na mineração de carvão para vedar

lâmpadas, engrenagens e áreas onde há perigo de explosão de gases. Isolantes para cobertura de tubulações e caldeiras são confeccionados com uma mistura de gesso e amianto, enquanto que isolantes acústicos são produzidos com a adição de material poroso ao gesso.

O gesso para a construção civil encontra a sua maior aplicação substituindo outros materiais como a cal, o cimento, a alvenaria e a madeira. Os produtos que se obtêm do gesso, para aplicação na construção civil são (BALTAR *et al.*, 2005):

- 1) gesso de fundição utilizado para a confecção de pré-moldados (fabricados simplesmente com gesso ou com placas de gesso acartonado);
- 2) placas para rebaixamento de teto, com produção artesanal ou em plantas modernas com máquinas automáticas com sistemas de alimentação de pasta;
- 3) blocos para paredes divisórias;
- 4) gesso para isolamento térmico e acústico (produto misturado com vermiculita ou perlita);
- 5) gesso para portas corta-fogo;
- 6) gesso de revestimento de aplicação manual, utilizado para paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento;
- 7) gesso de projeção, para aplicação mecanizada de revestimento de parede;
- 8) gesso com pega retardada, para aplicação de revestimento manual;
- 9) gesso cola, para rejunte de pré-moldados em gesso;

Na construção civil, o gesso é usado especialmente em revestimentos e decorações interiores. O material presta-se admiravelmente a esse tipo de serviço, quer utilizado simplesmente como pasta obtida pelo amassamento do gesso com água, quer em mistura com areia, sob a forma de argamassa. Na prática, a quantidade de água utilizada varia em função do tempo de pega que se deseja obter (MUNHOZ e RENOFIO, 2007). No Brasil, utiliza-se cada vez mais a pasta de gesso em acabamentos em substituição ao tradicional sistema chapisco/emboço/reboco (SILVA *et al.*, 1998).

O revestimento de gesso em pasta ou em argamassa, tal como acontece com o revestimento feito com argamassa de cal e areia, é feito em uma única camada, em duas ou mesmo três. A reação de hidratação, ou seja, de endurecimento do gesso,

inversa ao processo de calcinação, é de onde resulta a pasta de gesso que pode ser trabalhada para seus diversos fins (MUNHOZ e RENOFIO, 2007). Nesta hidratação o gesso sofre um processo de endurecimento que é essencialmente uma conversão química de hidratação, voltando a apresentar-se na forma de sulfato di-hidratado (ROQUE *et al.*, 2005).

Pode-se proceder ao alisamento final da superfície do revestimento com a colher ou desempenadeira, ou com a raspagem final, quando o material já adquiriu dureza suficiente. De qualquer forma, o acabamento é sempre muito bom, podendo alcançar polimentos excepcionais. O material não se presta, ordinariamente, para aplicações exteriores por deteriorar-se em consequência da solubilização na água. A seguir são abordadas as principais propriedades e características da pasta de gesso para aplicação sobre alvenaria.

2.1.7 Procedimentos para aplicação de pasta de gesso

Segundo a NBR 13867 (ABNT, 1997), a pasta de gesso é a mistura pastosa de gesso e água, possuindo capacidade de aderência e endurecimento. O fluxograma de recebimento de gesso para revestimento em obras é apresentado na figura 2.11.



Figura 2.11– Fluxograma do gesso no canteiro (adaptado de ALVES *et al.*, 2006).

O sistema construtivo de revestimento manual de gesso, segundo MELO (2005) e HINCAPIÉ *et al.* (1996a), é um processo destinado à aplicação de revestimento interno de superfícies construídas com concreto, blocos cerâmicos, blocos de cimento e pré-

moldados de gesso das edificações residenciais, comerciais, industriais, escolas e hospitais, utilizando-se a pasta de gesso aplicada manualmente em uma ou mais camadas superpostas com acabamento final liso e homogêneo.

Para a utilização como revestimento, o gesso tem que apresentar as seguintes características:

- densidade do pó: 950 a 1000 Kg/cm³;
- trabalhabilidade: 25 a 35 minutos;
- consumo por m²: 1,0 Kg/mm/m².

Como já dito, este revestimento somente pode ser aplicado em áreas internas, pois o gesso não resiste à ação permanente da água, por ser um material solúvel, que perde resistência mecânica quando umedecido, além de alterar-se sob exposição a temperaturas acima de 50°C. A temperatura ideal para execução do revestimento é entre 20°C e 35°C (HINCAPIÉ *et al.*, 1996b).

Este sistema de revestimento é mais prático e produtivo do que o sistema convencional. Sendo a produtividade, a relação entre resultados obtidos e esforços despendidos para executar um produto ou uma tarefa (MAEDA e SOUZA, 2000), a pasta de gesso consegue obter melhores índices do que os demais sistemas de acabamento. Na figura 2.12 são apresentadas fotos da aplicação do revestimento de gesso em alvenaria.



Figura 2.12– Fotos da argamassa de gesso e sua aplicação sobre alvenaria em construções de unidades habitacionais do Programa Vila Viva do Aglomerado da Serra executado em Belo Horizonte.

2.1.7.1 Comparação com o revestimento de argamassa de cimento

As vantagens que o revestimento com pasta de gesso têm em relação ao método tradicional de revestimento com argamassa de cimento são:

- prazo de cura menor: a argamassa de cimento tem que esperar até 30 dias para cura, enquanto o gesso é de no máximo 14 dias; antecipando, assim, a pintura (ANTUNES *et al.*, 1999);
- maior produtividade global: monocamada e rugosidade final lisa;
- apresenta rugosidade lisa e superfície branca: o que dispensa ou reduz em muito a aplicação de massa corrida;
- aplicação fácil e rápida;
- excelente trabalhabilidade;
- garante um perfeito acabamento;
- ideal para todos os tipos de acabamentos finos, para trabalhos de reparos e modelagem, podendo receber todos os tipos de tintas, revestimentos de cerâmica, papel de parede, etc.
- pode ser aplicado em pequenas espessuras: entre 3 a 5mm – sobre blocos de concreto e massa única; e de 5 a 10mm – sobre alvenaria convencional;
- fácil de ser perfurado;
- facilidade de restauração em caso de quebra ou perfuração - basta aplicar a pasta de gesso na área danificada;
- custo: gesso liso R\$ 7,87 e argamassa com chapisco R\$ 10,89 por metro quadrado (Planilha disponibilizada para funcionários da URBEL em maio de 2008);
- não necessita de chapisco antes da aplicação;
- a densidade da massa do gesso é de 0,9 a 1,0 Kg/m³, enquanto que a da argamassa é de 1,7 a 2,0 Kg/m³ (SABBATINI *et al.*, 2006).

Já SABBATINI *et al.* (2006) especificam as seguintes limitações desse sistema quando comparado com o tradicional:

- reduzida espessura;
- bastante suscetível ao desenvolvimento de bolor (HINCAPIÉ, 1996a);
- necessidade de base com boa regularidade superficial e precisão geométrica;
- não auxilia no comportamento mecânico da parede;
- maior susceptibilidade à deformação dos substratos;
- maior susceptibilidade a choques;

- não auxilia na fixação de cargas suspensas;
- requer habilidades especiais para aplicação;
- propicia a corrosão de peças em aço-carbono comum;
- elevada geração de resíduo, devido ao rápido endurecimento;
- suscetível a água (deterioração) e umidade excessiva (possibilidade de desenvolvimento de microorganismos);
- dificuldade de acerto de quinas;
- “fotografia” da base quando aplicado em pequenas espessuras;
- grande instabilidade na presença de pequenos focos de umidade.

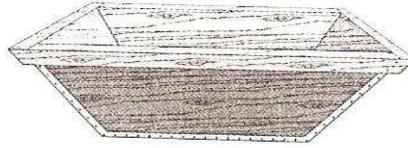
2.1.7.2 Componentes do sistema

Os materiais e os equipamentos necessários para a execução do revestimento manual de gesso são apresentados no quadro 2.3 e ilustrados na figura 2.13.

Item	Descrição	Item	Descrição
1	Gesso lento em pó	7	Desempenadeira de PVC
2	Tambor com água	8	Desempenadeira de aço
3	Balde	9	Pá e espátula
4	Caixote com suporte	10	Lona plástica
5	Régua e cantoneira de alumínio	11	Vassoura
6	Colher de pedreiro	12	Andaime

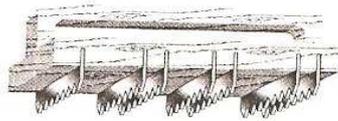
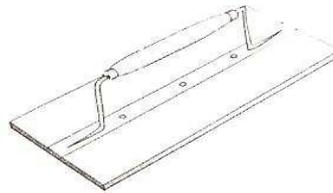
Quadro 2.3- Materiais e equipamentos necessários para execução de revestimento manual de gesso.

Caixote para preparo da pasta (dimensões internas aproximadas 0,30 m x 0,40 m x 0,60 m, com volume interno superior a 100 L)



Desempenadeira em chapa de PVC reforçado (tubo de esgoto Ø = 6", esp. 4 mm, dimensões aproximadas 0,80 ou 0,60 x 0,25 m)

Desempenadeira de aço de cinco cravos



Carril, carrinho, guião ou pente

Colher de pedreiro



Réguas de alumínio (2,0 m)

Cantoneiras de alumínio nos comprimentos (2,5; 2,0; 1,5; 1,0; 0,8 m)



Espátula



Figura 2.13– Instrumentos para execução do revestimento de gesso (HINCAPIÉ *et al.*, 1996b).

2.1.7.3 Condições para execução do serviço

As condições de execução do serviço de revestimento de gesso, segundo MELO (2005), são divididas em: preparo da superfície, preparação da pasta de gesso, aplicação, acabamento e por último a limpeza do local onde foi aplicado o serviço. Para o início da atividade, deve-se observar a existência dos equipamentos e materiais mencionados no quadro 2.3 e figura 2.13.

2.1.7.3.1 Preparo da superfície

Antes do início do serviço de revestimento é recomendável uma verificação dos desaprumos, da falta de alinhamento ou desníveis existentes na base. A superfície onde será aplicado esse revestimento deve estar limpa, livre de pó, graxa, óleos ou outros materiais que diminuam a aderência. As eflorescências visíveis devem ser eliminadas ou neutralizadas (ABNT, 1997). Nas superfícies caiadas ou pintadas, recomenda-se um tratamento adequado, de forma a garantir uma boa aderência ao revestimento de gesso (MELO, 2005).

Os seguintes serviços concluem a verificação inicial da base do revestimento:

- as instalações elétricas devem estar concluídas. Devem-se proteger as caixas destinadas a tomadas, interruptores e pontos de luz com papel do próprio saco de gesso (MELO, 2005);
- as instalações hidráulicas também devem estar concluídas, verificando a correta localização e estanqueidade;
- inspecionar a existência de umidade nas paredes e tetos, caso existam, eliminar as fontes (HINCAPIÉ *et al.*, 1996a);
- verificar as irregularidades superficiais na base, tais como: pregos, formas, pontas de ferro, rebarbas de concreto, excesso de argamassa de rejunte dos blocos, etc., procedendo-se a sua remoção;
- limpar todo o ambiente que vai ser revestido, inclusive o piso;
- verificar a existência de fissuras ou juntas de dilatação. Nestes pontos devem-se adotar soluções, tais como: reforço com tela de náilon na região, para garantir a lisura do revestimento, ou seja, que elas não se propaguem para o revestimento.

2.1.7.3.2 *Preparação da pasta de gesso*

A pasta de gesso para revestimento deve ser preparada em quantidade suficiente para ser aplicada antes do início da pega, que segundo HINCAPIÉ *et al.* (1996b), é de no máximo 40 minutos. A pasta que já se encontrar no estado de endurecimento não se tornará novamente trabalhável com adição de água.

Em sua preparação, recomenda-se utilizar a relação água/gesso recomendada pelo fabricante. Para a execução de um ciclo completo de preparo da pasta de gesso, ANTUNES *et al.* (1999) descrevem alguns procedimentos: o gesso é polvilhado em toda a água colocada no recipiente a ser utilizado de forma a preencher toda masseira por igual; para a dissolução do hemidrato faz-se necessário respeitar um período de repouso (cerca de 5 minutos), sem que haja qualquer intervenção manual ou mecânica nesse processo; a mistura é realizada manualmente, com utilização de uma espátula plástica, variando de 30 segundos a 1 minuto. Após isso, é necessário um tempo de espera para a consistência da pasta, para que a quantidade de cristais precipitados aumente a consistência, possibilitando assim a aplicação da pasta.

2.1.7.3.3 *Aplicação*

Antes de fazer a aplicação do revestimento de gesso, a superfície-base deve estar suficientemente umedecida (ABNT, 1997). Também tem que se fazer uma conferência final da planeza, esquadro e nível da superfície a revestir localizando as áreas mais críticas, onde o espalhamento da pasta deve começar.

O revestimento em pasta de gesso pode ser aplicado em várias camadas até atingir o nivelamento perfeito, porém deve ter espessura a mais uniforme possível e ser cuidadosamente espalhado. Durante todo o processo não se deve entrar em contato manual com a pasta, a fim de evitar a aceleração da pega.

O serviço de revestimento começa pelo teto. Depois, cada plano de parede é revestido na sua metade superior, ou no seu pé direito total, conforme altura. Concluído o espalhamento e antes que a pega esteja muito avançada, é verificada a planeza da última camada aplicada a fim de dar ao revestimento um plano mediamente regular,

que irá receber os retoques, raspagens e a camada final de acabamento de pasta (HINCAPIÉ *et al.*, 1996b).

2.1.7.3.4 Acabamento

O acabamento final consiste na aplicação de uma camada fina de pasta fluida sobre a última camada de espalhamento, que já deve estar bem endurecida deixando a parede plana e lisa (ABNT, 1997).

As superfícies revestidas com gesso, após completa secagem, podem receber um acabamento final, como pintura e papéis colantes. Porém, no que diz respeito à aplicação de pinturas, não utilizar tintas à base de cimento (MELO, 2005).

Ao final da aplicação do revestimento, todo o local deve ser limpo, retirando o material que caiu no chão. Esta limpeza é facilitada quando o local já tiver sido forrado com lona plástica.

2.1.8 Propriedades da pasta de gesso

Independente do processo de fabricação o gesso tem algumas propriedades intrínsecas que viabilizam a sua aplicação como um material de construção: o tempo de pega, a expansão, o comportamento como isolante térmico e acústico, etc. (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2001). As principais propriedades da pasta de gesso são descritas a seguir:

2.1.8.1 Densidade

No estado em que se encontra no mercado, o gesso é um pó branco, de elevada finura, cuja densidade aparente varia de 0,70 a 1,00, diminuindo com o grau da finura. Sua densidade absoluta é de cerca de 2,7.

2.1.8.2 Dureza

As pastas de gesso para execução de revestimento têm dureza entre 14 e 53MPa.

2.1.8.3 Hidratação e pega

O gesso misturado com água começa a endurecer em razão da formação de uma malha imbricada, de finos cristais de sulfato hidratado. Segundo ANTUNES *et al.* (1999), o mecanismo de hidratação do gesso é a *dissolução-precipitação*, ou seja, ao entrar em contato com a água o gesso se dissolve dando origem a uma solução de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , que, ao atingir a saturação, precipitam cristais de di-hidrato:



O fenômeno da pega pode ser explicado através da calorimetria (figura 2.14), que se divide em três etapas, (CLIFTON *apud* ANTUNES *et al.*, 1999):

1. Ocorre uma pequena hidratação seguida do período de indução e do início da pega;
2. Há o crescimento rápido da curva, ou seja, a evolução rápida da reação de hidratação;
3. A reação atinge o ponto máximo de incremento de temperatura; corresponde à conclusão da hidratação, isto é, ao final da pega.

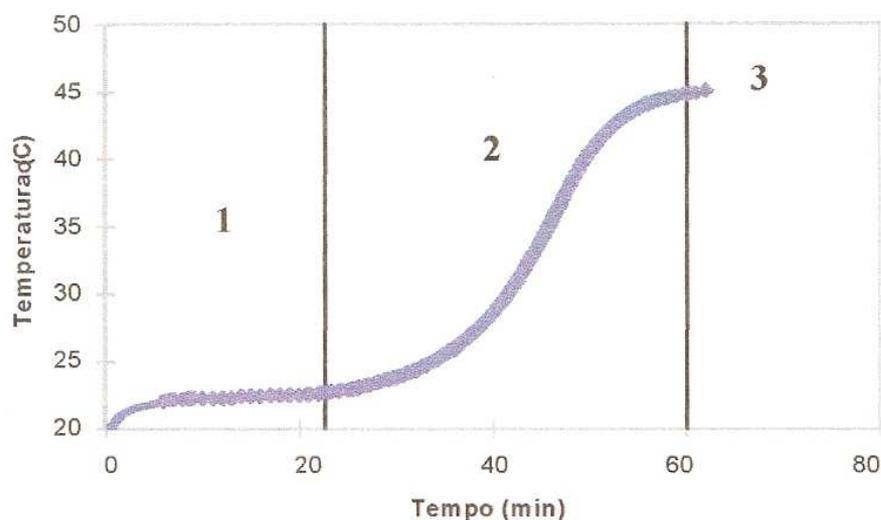


Figura 2.14– Exemplo de curva de hidratação de uma pasta de gesso (CLIFTON *apud* ANTUNES *et al.*, 1999).

De acordo com a calorimetria o início da pega é o instante em que a taxa de crescimento da temperatura ultrapassa $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (CLIFTON *apud* ANTUNES *et al.*, 1999). Depois do início da pega o gesso continua a endurecer, ganhando resistência, num processo que pode durar semanas. A velocidade de endurecimento da massa de gesso depende dos seguintes fatores:

- temperatura e tempo de calcinação;
- finura;
- quantidade de água de amassamento;
- presença de impurezas ou aditivos.

A calcinação realizada em temperaturas mais elevadas ou durante tempo mais longo conduz à produção de material de pega mais lenta, porém de maior resistência. O gesso de Paris, que é constituído de semi-hidrato puro, dá pega em poucos minutos; gessos obtidos em segunda cozedura, constituídos principalmente de sulfato-anidro solúvel, podem ter a pega tão lenta quanto se desejar. Material supercozido, com predominância de sulfato-anidro insolúvel, não dá pega, é sem valor aglutinante. Gesso de elevada finura dá pega mais rápida e atinge maiores resistências, em razão do aumento da superfície específica, disponível para hidratação.

A quantidade de água de amassamento influencia negativamente o fenômeno da pega e do endurecimento, quer por deficiência, quer por excesso. A quantidade ótima se aproxima da quantidade teórica de água necessária à hidratação (18,6%).

O semi-hidrato puro, gesso de Paris, dá pega tão rapidamente, entre 2 e 5 minutos, que é virtualmente inútil como material de construção, pois endurece antes que possa ser trabalhado. A presença de impurezas, que naturalmente ocorre na gipsita original, diminui em muito a velocidade de endurecimento. Pode-se também reduzir o tempo de pega mediante o emprego de aditivos apropriados, como retardadores, cola, serragem fina de madeira, sangue e outros produtos de matadouro usados em proporção de 0,1 a 0,5%. Tais produtos retardam a hidratação por interferência mecânica, formando membranas protetoras intergranulares. Contrariamente, outras substâncias, como o sal de cozinha ou mesmo o gesso hidratado, são aceleradores de pega. A cal hidratada, em mistura com até cerca de 15%, melhora a qualidade plástica da pasta.

2.1.8.4 Resistência mecânica

As pastas de gesso, depois de endurecidas, segundo BAUER (1994), atingem resistência à tração entre 0,7 e 3,5 MPa e à compressão entre 5 e 15 MPa.

2.1.8.5 Aderência

As pastas e argamassas de gesso aderem muito bem ao tijolo, pedra e ferro, e aderem mal às superfícies de madeira. A aderência ferro-gesso, embora traduza uma compatibilidade físico-química entre os dois materiais, tem, infelizmente, o defeito de ser instável, permitindo a corrosão do metal. Não se pode fazer gesso armado como se faz concreto armado. No entanto, a estabilidade é alcançada quando se faz a armadura com ferro galvanizado.

2.1.8.6 Isolamento

As pastas endurecidas de gesso gozam de excelentes propriedades de isolamento térmico, isolamento acústico e impermeabilidade de ar. Sua condutibilidade térmica é

muito fraca ($0,40 \text{ cal/h/cm}^2/^\circ\text{C/cm}$), cerca de $1/3$ do valor para o tijolo comum. O gesso é material que confere aos revestimentos com ele realizados considerável resistência ao fogo. A água de cristalização é eliminada pelo calor, reduzindo o material superficial à condição de pó, que não sendo removido, atua como um isolador que protege a camada interior de gesso.

2.1.9 Resíduos do gesso

De acordo com NBR 15112 (ABNT, 2004b), os resíduos sólidos são definidos como resíduos que estão nos estados sólidos e semi-sólidos, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e varrição, e ainda lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, bem como líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto.

Os resíduos de gesso de construção foram classificados pela resolução CONAMA 307 como resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação (CONAMA, 2002). Sua presença em agregados reciclados pode causar problemas de tempo de pega e expansibilidade dos produtos a base de cimento, segundo AGOPYAN *et al.* (2005) os limites para utilização dos RCDs contaminados com gesso são entre 0,5 a 1,0 % da massa total do concreto.

A solubilidade em água do gesso hidratado pode resultar na formação de soluções com íons sulfato, capazes de contaminar os solos e os lençóis freáticos (JOHN e CINCOTTO, 2003). Sua disposição em aterros em contato com matéria orgânica pode levar a formação de gás sulfídrico, o qual possui odor desagradável o que tem provocado a proibição de deposição dos gessos em aterros sanitários.

Além disso, a resolução 307 do CONAMA não permite que os aterros de resíduos domiciliares, áreas de bota-fora, encostas, corpos d'água e lotes vagos recebam esse resíduo de construção civil. As principais fontes de resíduo de gesso na construção civil estão apresentadas na figura 2.15.

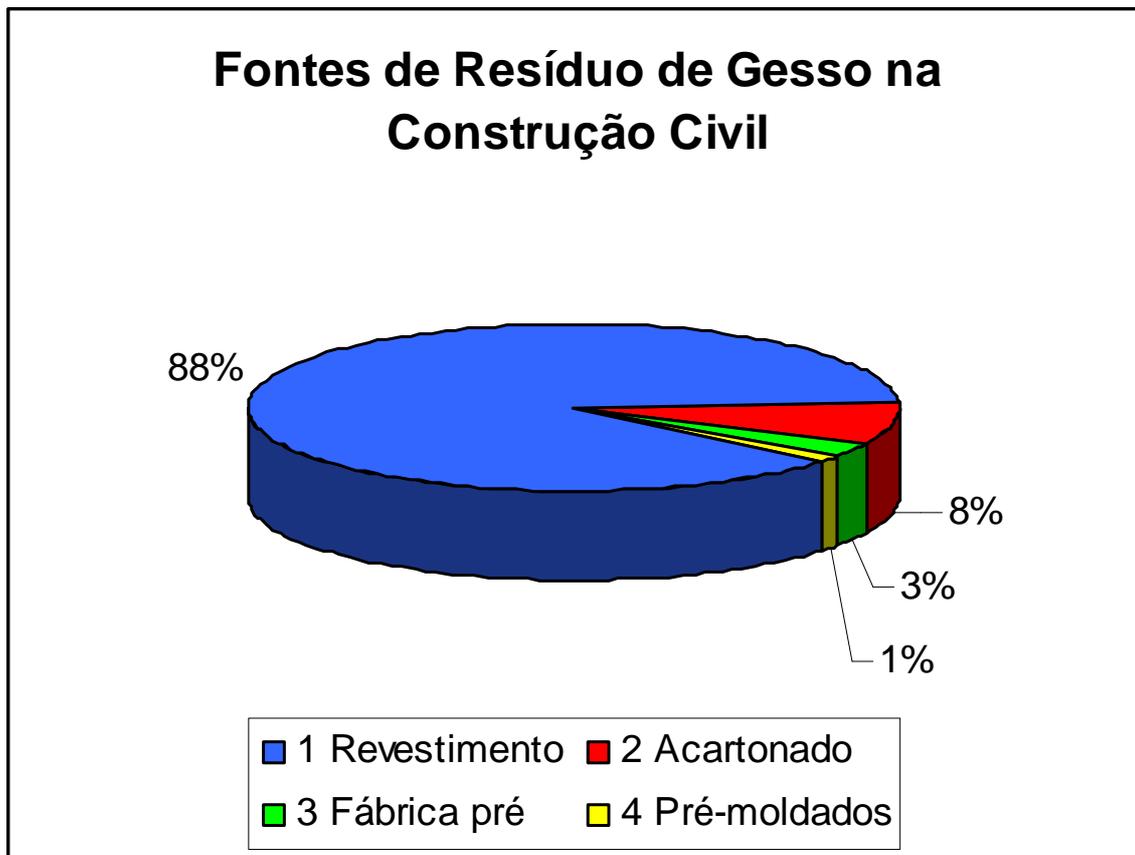


Figura 2.15- Fontes de geração de resíduo de gesso na construção civil (AGOPYAN *et al.*, 2005).

A geração de resíduos de gesso em pasta na construção civil, como pode-se observar na figura 2.15, tem como maior responsável o revestimento. Segundo NITA *et al.* (2004), cerca de 45% de todo o gesso utilizado para esse fim, se torna desperdício. Já ALVES *et al.* (2006) informam que o desperdício chega a 24%. Um dos fatores que contribuem para essa grande perda é o rápido endurecimento da pasta de gesso, que limita o tempo de aplicação entre 20 e 40 minutos, no máximo, como relatam MAEDA e SOUZA (2000). Na figura 2.16 é mostrado o resíduo gerado na execução de revestimento de gesso.



Figura 2.16– Foto do resíduo de gesso em obra em Belo Horizonte e microestrutura do gesso hidratado (NIGLIO e CAMARINI, 2005).

Para reduzir a geração no processo de revestimento, seria necessário aumentar o tempo útil das pastas de gesso, propiciar um treinamento melhor à mão-de-obra e também melhorar a quantidade da alvenaria que será revestida (MUNHOZ e RENOFIO, 2007).

O descarte e a separação das peças pré-moldadas de gesso acartonado são muito mais fáceis. Porém, os resíduos de gesso em forma de pasta por estarem aderidos a concretos e alvenarias, são mais difíceis de separar, por apresentarem elevada aderência aos materiais.

Além das matérias-primas, os resíduos tipicamente incluem contaminantes diversos, oriundos também do processo de gestão dos resíduos em canteiro (figura 2.17). A ausência de procedimentos adequados de gestão de resíduos de gesso no canteiro ou

durante a fase de demolição podem introduzir outros contaminantes (JOHN e CINCOTTO, 2003).

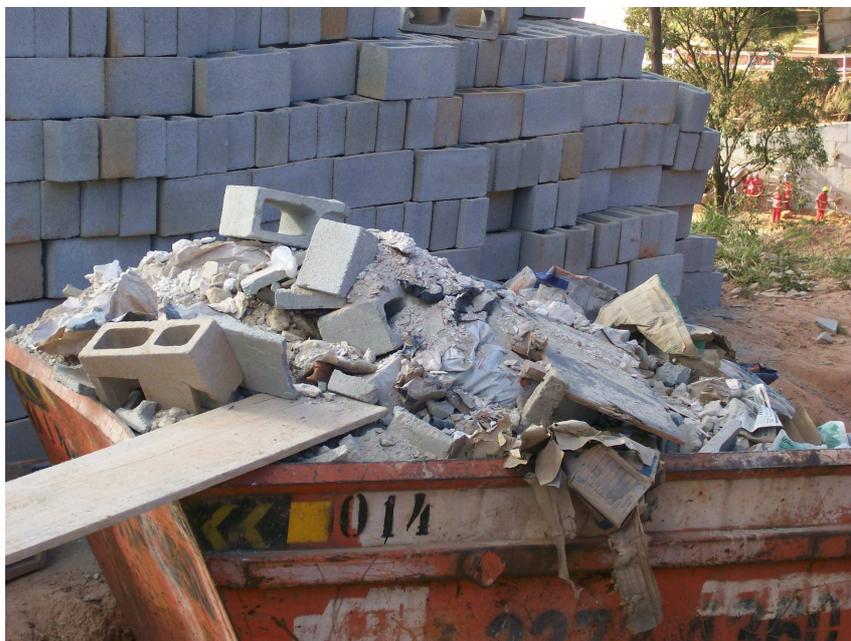


Figura 2.17– Foto do resíduo de gesso lançado em caçamba junto com outros materiais em obra do Programa Vila Viva em Belo Horizonte.

Assim, pode-se concluir que, mesmo que seja respeitada a triagem pela Resolução 307/2 (CONAMA, 2002) e pela NBR 1004 (ABNT, 2004a), uma fração de resíduos de gesso sempre poderá estar presente nos resíduos de construção e demolição (RCDs) que chegam às centrais de reciclagem (AGUIAR, 2004), principalmente de alvenarias, paredes e estruturas de teto. Sendo que esta fração quase sempre pode ser maior que a sugerida pelo AGOPYAN *et al.* (2005). Por conseguinte, os agregados fabricados com RCDs não podem ser utilizados na fabricação de concretos. Porém, como o índice de aceitação dessa contaminação é muito pequeno e de difícil percepção, é certo que os RCDs têm sido utilizados com índices maiores nos concretos. Diante disso, devem-se fazer estudos para saber o que acontece se forem utilizados concretos com agregados contaminados com gesso em valores maiores que o permitido. Esses estudos podem contribuir para que se aumente o índice de contaminação sem que haja um comprometimento das propriedades do concreto.

2.2 Cimento Portland

O cimento é o mais importante material de construção, com vastíssimo campo de aplicação, incluindo desde a construção civil de habitações, estradas e barragens, a diversos tipos de produtos acabados, como telhas de fibrocimento, pré-moldados, caixas d'água e outros.

O Cimento Portland, por definição, é o produto obtido pela pulverização de clínquer constituído essencialmente de silicatos hidráulicos de cálcio, com uma certa proporção de sulfato de cálcio natural, contendo, eventualmente, adições de certas substâncias que modificam suas propriedades ou facilitam seu emprego.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) o cimento sozinho não é aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes, como resultado da hidratação (ou seja, de reações químicas entre os minerais do cimento e água).

O principal componente, o clínquer, é um produto de natureza granulosa, resultante da calcinação de uma mistura de materiais, que foi conduzida até a temperatura de sua fusão incipiente.

Os silicatos de cálcio hidratados, formados pela hidratação do cimento Portland, são os principais responsáveis por sua característica adesiva e são estáveis em meios aquosos.

2.2.1 Histórico do cimento

Os romanos chamavam os materiais aglomerantes, que melhorariam a segurança e durabilidade das edificações de "caementum", termo que originou a palavra cimento.

O engenheiro John Smeaton, em 1756, para facilitar a reconstrução do farol de Edystone, na Inglaterra, pesquisou um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água. A mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções.

Porém, o pedreiro Joseph Aspdin, em 1824, patenteou a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência à Portlandstone, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra. Naquela época, o calcário era moído com argila, em meio úmido, até transformar-se em pó impalpável. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois moídos bem finos.

Poucos anos antes, na França, o engenheiro e pesquisador Louis Vicat publicou o resultado de suas experiências contendo a teoria básica para produção e emprego de um novo tipo de aglomerante: o cimento artificial. No entanto, exceto pelos princípios básicos, estava longe do cimento Portland que atualmente se conhece, resultante de pesquisas que determinam as proporções adequadas da mistura, o teor de seus componentes, o tratamento térmico requerido e a natureza química dos materiais.

O cimento Portland desencadeou uma verdadeira revolução na construção, por suas propriedades de moldabilidade, hidráulica (endurecer tanto na presença do ar como da água), elevadas resistências aos esforços e por ser obtido a partir de matérias-primas relativamente abundantes e disponíveis na natureza.

A precisão dos modernos métodos de cálculo, a criatividade dos profissionais e construtores, impulsionaram o avanço das tecnologias do cimento e do concreto, possibilitando ao homem transformar o meio em que vive, conforme suas necessidades. Obras cada vez mais arrojadas e indispensáveis, que propiciam conforto, bem-estar (barragens, pontes, viadutos, edifícios, estações de tratamento de água, rodovias, portos e aeroportos) e o contínuo surgimento de novos produtos e aplicações fazem do cimento um dos produtos mais consumidos da atualidade, conferindo uma dimensão estratégica à sua produção e comercialização (CIENCIAQUIMICA, 2007).

2.2.2 Matérias-primas na fabricação do cimento Portland

As matérias-primas que são usadas na fabricação do cimento são de natureza calcária e argilosa. Porém, às vezes, pode-se usar um único material calcário, que deve conter o teor necessário de argila.

Usualmente são usados dois materiais, e às vezes até mais, para que se consigam as correções necessárias. O sucesso das operações de fabricação do cimento depende diretamente das proporções dos materiais utilizados. Sendo a composição química dos materiais componentes e a do clínquer desejado, calculam-se as quantidades a misturar. Os materiais podem ser dosados em peso ou em volume.

As principais matérias-primas utilizadas para a fabricação de cimento são: o calcário, a argila, e a gipsita/gesso.

O calcário é uma rocha sedimentar, sendo a terceira mais abundante na crosta terrestre, constituído basicamente de carbonato de cálcio CaCO_3 e dependendo da sua origem geológica pode conter várias impurezas, como magnésio, silício, alumínio ou ferro. O carbonato de cálcio é conhecido desde épocas muito remotas, sob a forma de minerais tais como a greda, o calcário e o mármore. De acordo com o teor de magnésio o calcário se classifica em:

- calcário calcítico (CaCO_3): cujo teor de MgO varia de 0 a 4%. Este calcário por ter menor quantidade de carbonato de magnésio exige maior temperatura para descarbonatar;
- calcário magnesiano (MgCO_3): o teor de MgO varia de 4 a 18%. A presença maior de carbonato de magnésio faz com que este calcário tenha características bem diferentes do calcítico, necessitando de menos calor e uma temperatura menor para descarbonatar do que o calcítico;
- calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): cujo teor de MgO é acima de 18% e por isso possui uma temperatura de descarbonatação ainda menor do que o calcário magnesiano.

As argilas são silicatos complexos contendo alumínio e ferro como cátions principais e potássio, magnésio, sódio, cálcio, titânio e outros. Sua escolha envolve disponibilidade,

distância, relação sílica/alumínio/ferro e elementos menores como álcalis. Ela fornece os componentes Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 . Podendo ser utilizado bauxita, minério de ferro e areia para corrigir, respectivamente, os teores dos componentes necessários, porém são pouco empregados.

A gipsita/gesso é o produto de adição final no processo de fabricação do cimento, com o fim de regular o tempo de pega por ocasião das reações de hidratação. Sem sua adição, o cimento endureceria muito rapidamente, uma vez misturado à água de amassamento, inviabilizando sua utilização. É encontrado sob as formas de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemidratado ou bassanita ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$) e anidrita ($CaSO_4$).

2.2.3 Processo de fabricação do cimento Portland

A mistura em proporções convenientes de calcário, argila, bauxita, minério de ferro, e areia, finamente pulverizada e homogeneizada, é submetida à ação do calor no forno produtor de cimento, até a temperatura de fusão incipiente, que resulta na obtenção do clínquer. Esse produto após a adição de gipsita/gesso em teor adequado é submetido a moagem. O produto resultante é o cimento. A qualidade desse produto depende de uma boa dosagem e preparo da mistura com as matérias-primas.

Antes de serem calcinados, os materiais sofrem uma preparação, com a finalidade de poderem ser mais facilmente misturados e de aumentar a superfície específica. Essa preparação consiste em uma moagem que, em geral, é dividida em duas fases: uma preliminar e outra de acabamento; depois desta, 85 a 90% do material deve passar na peneira de 200 malhas por polegada quadrada, o que corresponde à abertura quadrada de 0,074mm ou 0,0029 polegada de lado. Esse processo de moagem é apresentado na figura 2.18, que consiste na entrada dos materiais dosados, num moinho de bolas ou de rolos, onde a moagem ocorre com impacto e por atrito.

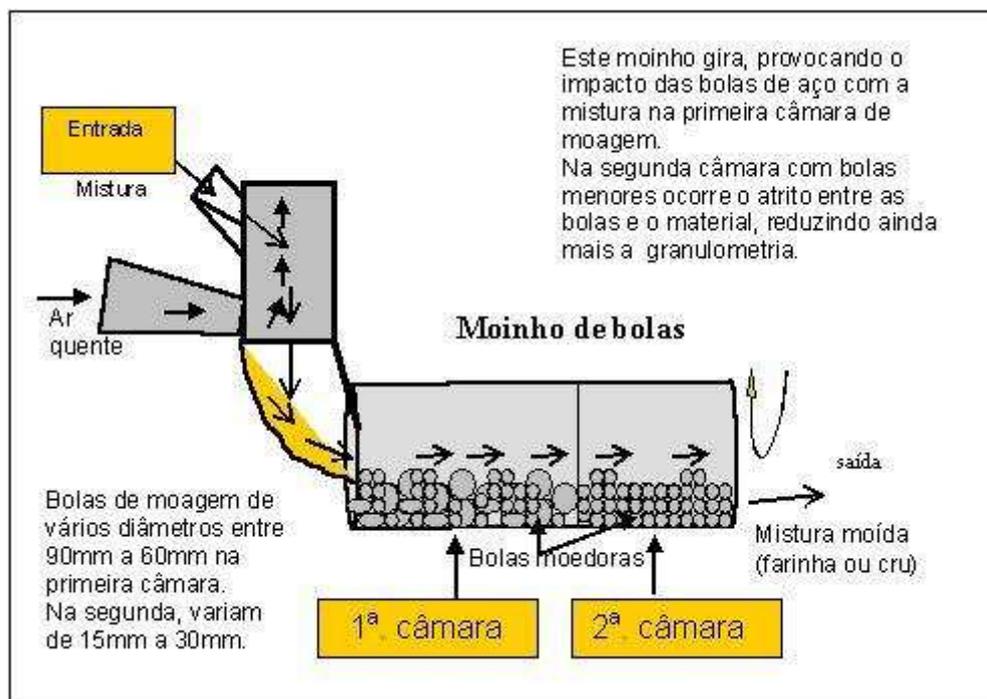


Figura 2.18– Processo de moagem em um moinho de bolas (CIENCIAQUÍMICA, 2007).

O pó resultante da homogeneização das matérias-primas é denominado farinha. Para produzir uma tonelada de clínquer, são necessárias de 1,5 a 1,8 toneladas de farinha (DURANTE, 2001).

Existem dois métodos para se fabricar o cimento: o processo seco e o processo úmido, sendo este último, muito pouco utilizado. Em ambos, os materiais são extraídos das minas e britados de forma mais ou menos parecida. No entanto, a diferença é grande no processo de moagem, mistura e queima. No processo úmido o preparo da matéria-prima conduz à obtenção de uma pasta (via úmida) e de um pó (via seca). Dos dois métodos produz-se clínquer e o cimento final é idêntico nos dois casos.

Sempre que o material apresentar baixo grau de umidade, houver dificuldade de obter água na fábrica e for elevado o custo do combustível, deve ser preferido o processo por via seca.

2.2.3.1 Processo seco

Este é o processo mais moderno para fabricação de cimento (figura 2.19). Tem como vantagem determinante a economia de combustível já que não tem água para evaporar

no forno. Comparativamente, um forno de via úmida consome cerca de 1250 kcal por kg de clínquer contra 750 kcal de um forno por via seca. Este processo foi desenvolvido no Japão, sendo atualmente utilizado na maior parte da produção mundial de cimento. As principais fases, antes da entrada do material no forno, são: moagem preliminar e fina, dosagem, mistura íntima.

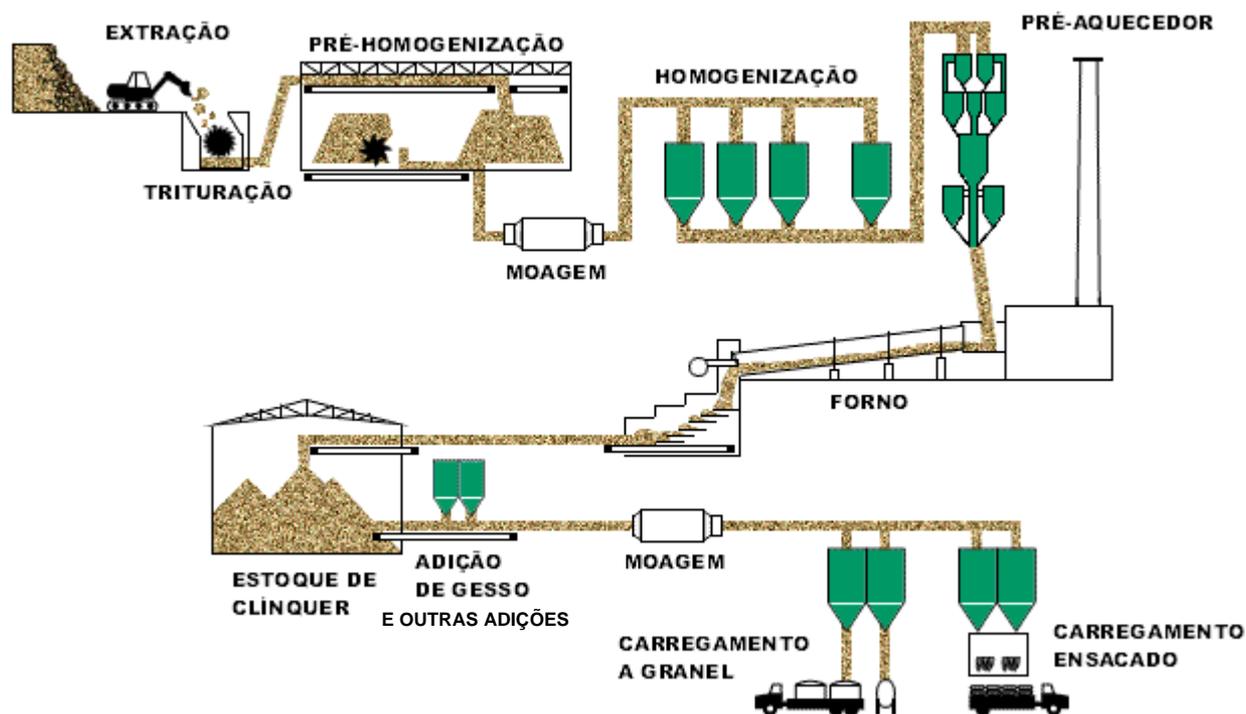


Figura 2.19– Esquema da fabricação de cimento pelo processo seco (adaptado de DURANTE, 2001).

A secagem pode ser feita antes ou durante a moagem. Porém, é normalmente executado junto com ela, com um tipo comum de secador de cilindro giratório, levemente inclinado sobre a horizontal, e revestido interiormente de material refratário. O calor é fornecido pelos gases de combustão, provenientes de óleo ou carvão pulverizado. Apesar de simples de construir e operar, esse tipo de secador é de baixa eficiência. Modernamente está sendo intensificado o uso da secagem durante a moagem, isto é, o material é seco nas moagens preliminares devido ao calor gerado pelo atrito.

Quando as matérias-primas são muito úmidas (mais de 15%) com relação ao processo adotado (via seca), faz-se a secagem pela circulação do ar quente, já na moagem

preliminar. A temperatura de secagem não é tão elevada, o que vem a representar uma economia de combustível no forno.

A moagem preliminar reduz o material às dimensões da peneira de 20 malhas por polegada quadrada e a moagem fina às de 200 malhas por polegada quadrada. Em geral são usados moinhos de bolas. A moagem é dita de circuito aberto quando o material passa uma única vez pelo moinho. Na moagem a circuito fechado, o material é classificado em um separador após a saída do moinho, voltando a este a parte grossa.

Depois de feita uma dosagem aproximada dos materiais, eles devem ser homogeneizados. É mais difícil homogeneizar um pó do que uma pasta, havendo necessidade de controles freqüentes para garantir o resultado final.

Modernamente a homogeneização é feita pneumaticamente por fluidificação do pó, que consiste em submeter o material a uma pressão de ar, de modo a dirigir a corrente de baixo para cima. A presença do ar em torno das partículas diminui consideravelmente o atrito interno do pó, funcionando este como se fora um fluido.

2.2.3.2 Processo úmido

O processo úmido foi o originalmente utilizado no início da fabricação industrial do cimento e é caracterizado pela simplicidade da instalação e da operação dos moinhos e fornos. Além disso, produz pouca sujeira e consegue-se uma excelente mistura.

Neste caso, após a moagem preliminar, o material é conduzido para os misturadores que são constituídos por grandes recipientes onde giram grandes e pesadas pás de aço. O material, que recebeu através de uma canalização a quantidade de água necessária para formação de uma pasta, é atritado e triturado. Essa pasta contém de 30 a 40% de água.

A pasta que sai do misturador é em geral ainda muito grossa, devendo sofrer uma moagem final. Alguns materiais muito duros são tratados em moinhos de bolas, com adição de água, formando também uma pasta de finura desejada.

O transporte dos materiais se faz por bombas e se podem combinar os produtos de vários misturadores. A pasta final é elevada a um reservatório de estocagem, onde, para não perder a homogeneidade, é agitada continuamente, quer por meios mecânicos, quer por meios pneumáticos (insuflação de ar comprimido).

A queima, cujo resultado é o clínquer, constitui a operação fundamental da fabricação de cimento. Hoje, os fornos rotativos são os mais utilizados. O clínquer sai do forno com uma temperatura elevada (cerca de 1000°C) devendo passar por um aparelho especial: o resfriador, onde pode ser recuperado o calor.

2.2.4 Composição química

Os componentes da mistura constituída por calcário, argila, bauxita, minério de ferro e areia, quando sujeitos à ação da temperatura do forno de calcinação, reagem quimicamente conforme esquema de transformação representado na figura 2.20.

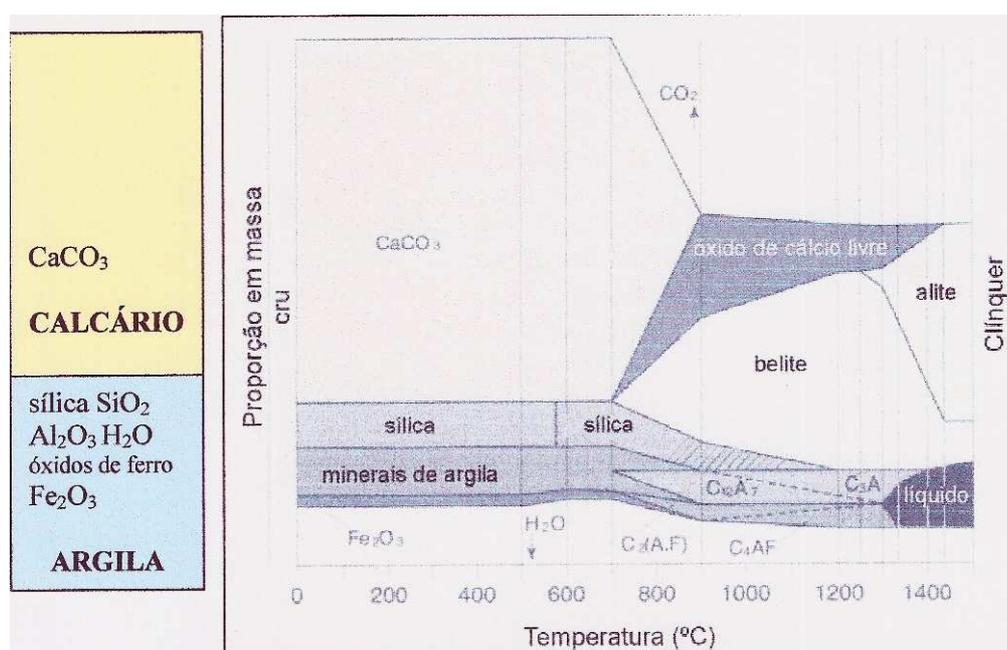


Figura 2.20- Transformação de fases ao longo do forno rotativo na fabricação de cimento (COUTINHO, 2002).

Após a adição de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ao clínquer e posterior à moagem, tem-se o cimento, cujos elementos fundamentais são compostos constituídos por CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_3 e H_2O . Além das impurezas, o cimento tem ainda como constituintes em menores teores o óxido de sódio (Na_2O), o óxido de potássio (K_2O), o óxido de titânio (TiO_2) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento.

Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes essenciais do cimento Portland e constituem, geralmente, 95 a 96% do total na análise de óxidos. A magnésia, que parece permanecer livre durante todo o processo de calcinação, está usualmente presente na proporção de 2 a 3%, limitada, pelas especificações, a um máximo permissível de 5%. No Brasil, esse limite é um pouco superior (6,4%). Os óxidos menores aparecem em proporção inferior a 1%, excepcionalmente 2%.

Esses óxidos dão origem a compostos que basicamente constituem as quatro principais fases presentes no cimento que podem reagir com água originando os diferentes produtos de hidratação. A composição dessas fases e o seu conteúdo em um cimento normal são apresentados na tabela 2.8. Analisando esta tabela observa-se que todos são constituídos por óxidos que são materiais abundantes na crosta terrestre (YOUNG *et al.*, 1998).

Tabela 2.8- Composição de um cimento Portland (adaptado de YOUNG *et al.*, 1998).

Compostos	Fórmula	Abreviação	Fração (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C_3S)	55
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	(C_2S)	20
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	(C_3A)	10
Ferro aluminato de cálcio	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	(C_4AFe)	8
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	(CSH_2)	5

Os aspectos de alguns desses compostos podem ser visualizados nas figuras 2.21 e 2.22 que apresentam a microestrutura de um grão de clínquer.

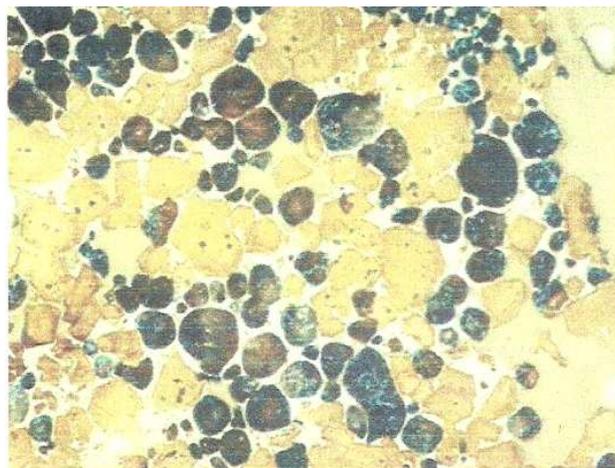


Figura 2.21– Estrutura de um clínquer Portland relativamente comum, observado ao microscópio óptico. C₃S: cristais amarelados, de forma aproximadamente hexagonal; C₂S: cristais mais escuros, arredondados (COUTINHO, 2002).

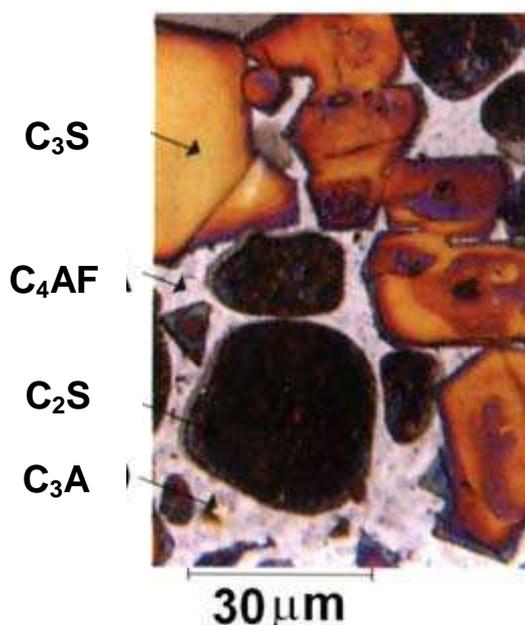


Figura 2.22– Aspecto esquemático dos principais componentes do nódulo de clínquer (DURANTE, 2001).

Dependendo da finalidade do cimento, são adotados limites diferenciados para seus componentes básicos (C₃S, C₂S, C₃A e C₄AF) e limites máximos para as impurezas. Definem-se ainda adições ao cimento. Dessa forma surgem cimentos com diferentes características de resistência a ataques químicos e evolução da resistência à compressão, que são abordados no item 2.2.6.

A análise química dos cimentos Portland resulta na determinação das proporções dos óxidos inicialmente mencionados. As propriedades do cimento são, entretanto, relacionadas diretamente com as proporções dos silicatos e aluminatos. As proporções destes últimos podem ser determinadas a partir do resultado da análise em óxidos.

A importância do conhecimento das proporções dos compostos constituintes do cimento reside na correlação existente entre esses e as propriedades finas do cimento e também do concreto.

O silicato tricálcico (C_3S) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico (C_2S) adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável pelo ganho de resistência a um ano ou mais. O aluminato tricálcico (C_3A) também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia. O ferro aluminato de cálcio (C_4AF) em nada contribui para a resistência.

No que diz respeito ao calor de hidratação, o aluminato de cálcio (C_3A) muito contribui, especialmente no início do período de cura. O silicato tricálcico é o segundo componente em importância no processo de liberação de calor. Os dois outros componentes contribuem pouco para a liberação do calor.

O aluminato de cálcio, quando presente em forma cristalina, é o responsável pela rapidez de pega. Com a adição de proporção conveniente de gesso, o tempo de hidratação é controlado. O silicato tricálcico (C_3S) é o segundo componente com responsabilidade pelo tempo de pega do cimento. Os outros constituintes se hidratam lentamente, não tendo efeito sobre o tempo de pega.

2.2.5 Hidratação do Cimento Portland

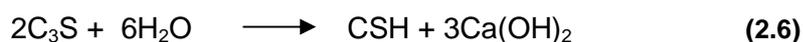
O mecanismo de hidratação, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), é constituído por um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases seguido de um processo topoquímico. Dessa forma, a hidratação do cimento pode ser analisada como a soma de todas as reações dos compostos individuais, sendo que essas reações ocorrem simultaneamente, proporcionando, assim, uma sobreposição e interação entre cada

uma delas (CARVALHO, 2002). O enrijecimento da pasta é caracterizado pela hidratação dos aluminatos, e a evolução da resistência (endurecimento) é realizada pelos silicatos.

Os quatro principais compostos existentes no cimento (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF), quando hidratados, produzem três elementos principais, que caracterizam a pasta de cimento endurecida, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994): silicato de cálcio (50 a 60% do volume de sólidos), hidróxido de cálcio (20 a 25% do volume de sólidos) e sulfoaluminatos de cálcio (15 a 20% do volume de sólidos).

Quando o cimento entra em contato com a água, os silicatos (C_3S e C_2S) se hidratam em algumas horas após o início da hidratação do cimento, produzindo, assim, silicatos de cálcio hidratados, genericamente conhecidos como CSH, e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). Os dois compostos formados, CSH e $Ca(OH)_2$ preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas do cimento em dissolução.

Cálculos estequiométricos determinaram que a reação de hidratação do C_3S resulta em 61% de $C_3S_2H_8$ e 39% de $Ca(OH)_2$ e a do C_2S em 82% de $C_3S_2H_8$ e 18% de $Ca(OH)_2$. O C_3S precisa de 24% de água para hidratar e o C_2S apenas 21%. As reações estequiométricas para a hidratação completa dos silicatos presentes em uma pasta de cimento podem ser representadas como (CARVALHO, 2002):



Os silicatos hidratados possuem composição química muito variada quanto à relação cálcio/sílica e ao teor de água quimicamente combinada, sendo apresentados genericamente sob a fórmula ($C_3S_2H_8$). Essa composição depende de fatores tais como a relação água/cimento, temperatura e idade de hidratação (CARVALHO, 2002). Tendo em vista que é a estrutura do composto que irá determinar a sua propriedade, as variações entre os teores de cálcio/sílica e de água, terão efeito sobre as características físicas do C_3S e o C_2S (CARVALHO, 2002; KAEFER, 2008). A morfologia do CSH varia de fibras pouco cristalinas a uma malha reticulada, formada por cristais pequenos, conforme figura 2.23.

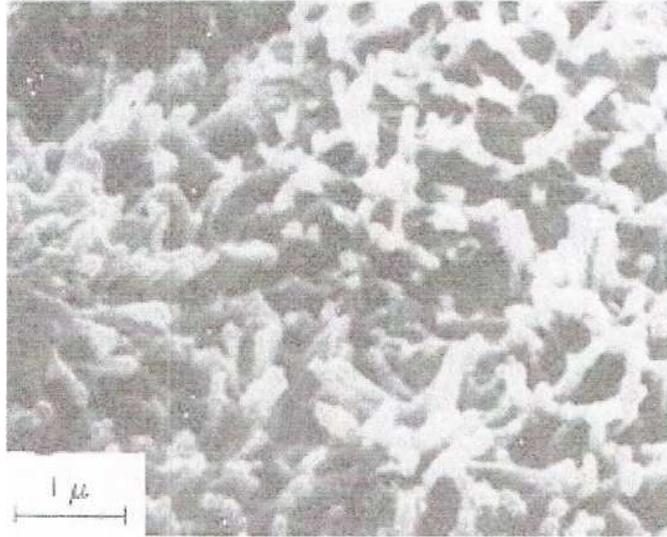


Figura 2.23- Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento com 3 dias de idade mostrando os cristais de CSH (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

O CSH é o principal responsável pela resistência da pasta a esforços mecânicos. Por outro lado o C_3S hidrata mais rapidamente e é responsável por desenvolver a resistência do concreto nas primeiras idades.

A morfologia do $Ca(OH)_2$ é bem definida, formando cristais prismáticos, conforme figura 2.24, sendo que o tamanho dos cristais aumenta à medida que aumenta o espaço livre (aumento da relação água/cimento). O hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência da pasta de cimento endurecida. Além disso, em virtude de sua baixa superfície específica, que lhe confere um baixo poder de adesão, é facilmente carregado pela água. Aparentemente, o único aspecto positivo decorrente da presença do hidróxido de cálcio é a alcalinidade conferida ao meio, responsável pela passivação das armaduras.

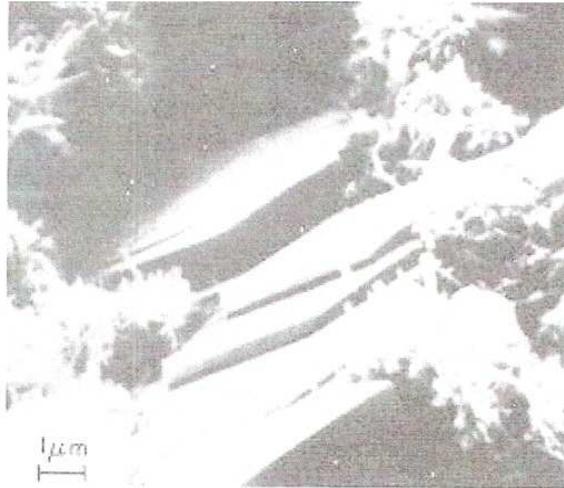
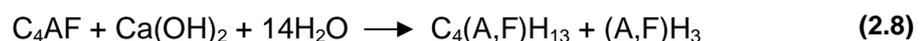


Figura 2.24- Micrografia eletrônica de varredura de uma pasta de cimento com 3 dias de idade, mostrando os grandes cristais de Ca(OH)_2 e a estrutura fibrosa formada pela CSH (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Como o CSH é o principal responsável pela resistência da pasta endurecida e que uma maior quantidade de Ca(OH)_2 diminui a resistência do concreto a ataques de ácidos e de sulfatos, verifica-se que um cimento com maior teor de C_3S resulta em um concreto mais suscetível ao ataque químico e com menor resistência mecânica.

Os produtos formados pela hidratação dos outros constituintes do cimento, C_3A e C_4AF , são estruturalmente semelhantes. Em geral a reatividade do C_4AF é mais lenta que a do C_3A , mas ela cresce com o aumento do teor de alumina. O processo de hidratação do C_4AF , pelo fato desse designar genericamente uma série de compostos, é de difícil caracterização e tem pouca influência na pasta endurecida. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994) seus compostos resultantes são estruturalmente similares aos formados a partir do C_3A e uma representação melhor da reação de C_4AF é, segundo YOUNG *et al.* (1998):



Segundo YOUNG *et al.* (1998), o composto C_3A , sem a presença de gesso, reagiria imediatamente com água para produzir em pouco tempo uma quantidade grande de aluminatos de cálcio hidratado (C_3AH_6 , C_4AH_9 e C_2AH_8) que endureceriam em alguns minutos, tornando mínimo o tempo de pega da pasta. Esta perda de trabalhabilidade é indesejável porque o concreto deveria permanecer no estado fresco durante pelo

menos algumas horas. Para retardar esse efeito de perda de plasticidade da mistura, adiciona-se uma pequena quantidade de gipsita/gesso. Esse material reage com C_3A formando um mineral chamado de etringita ($C_6AS_3H_{32}$), conforme mostrado na figura 2.25, que constrói uma camada que previne a hidratação rápida (KAEFER, 2008 CARVALHO, 2002).

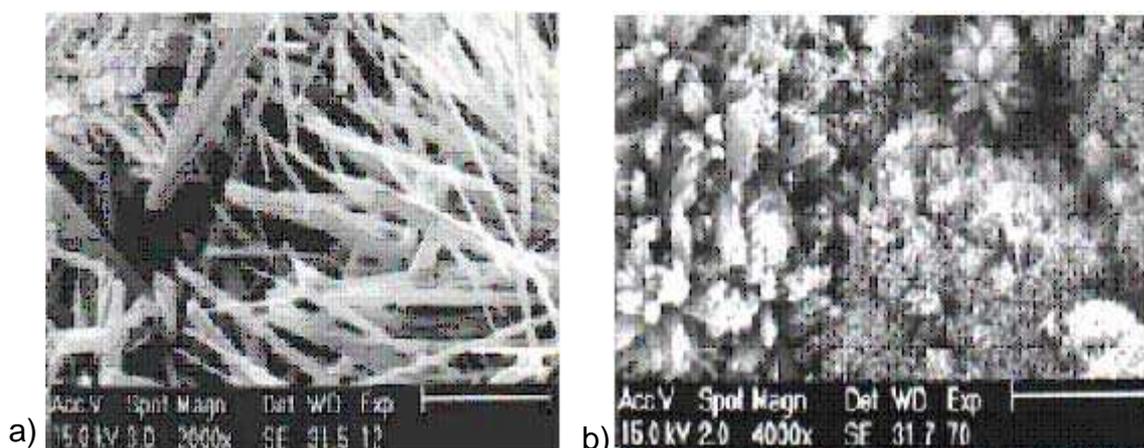
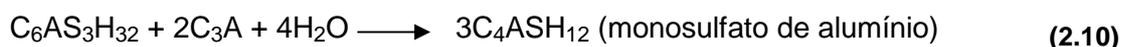
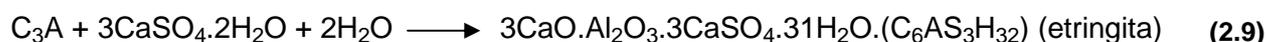


Figura 2.25- Fotografia com MEB que mostra a formação da etringita sendo: a) etringita cristalina e b) etringita coloidal (ESTRADA *et al.*, 2005).

A etringita cristaliza-se como pequenas agulhas prismáticas na superfície do C_3A , formando assim, uma barreira que reduz a velocidade de hidratação do aluminato tricálcico.

Normalmente a formação das agulhas de etringita é o primeiro hidrato a cristalizar-se, antes mesmo do C_3S , devido à elevada reação sulfato/aluminato no início da hidratação.

Quando a concentração de sulfatos na mistura diminui e ocorre um aumento do teor de aluminatos devido à renovação da hidratação do C_3A e do C_4AF , a etringita torna-se instável e é gradativamente convertida em monossulfato, que é o produto final da hidratação desses compostos, sendo essa forma a mais estável. A reação química desses compostos é dada abaixo (YOUNG *et al.*, 2005):



A reação global é então:



O monosulfoaluminato de cálcio hidratado (monosulfato) possui a forma de placas hexagonais delgadas, conforme figura 2.26.

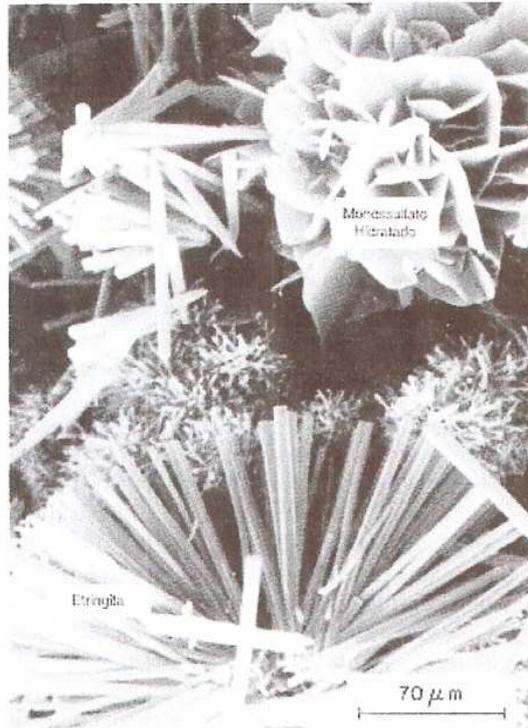
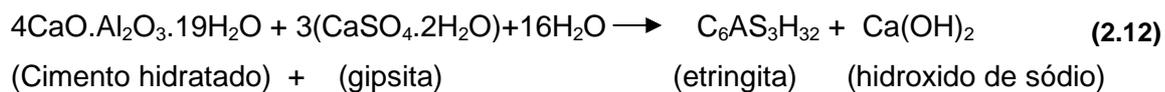


Figura 2.26- Micrografia eletrônica de varredura (MEV) de cristais hexagonais típicos de monosulfato hidratado e cristais aciculares de etringita formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A formação da etringita nas primeiras idades, como dito anteriormente, é benéfica para o concreto. Porém, quando essa formação acontece depois do concreto endurecido, ocasiona patologias, por ser a etringita um composto instável e altamente expansivo. Essa reação indesejável pode ocorrer quando existir umidade ou sulfato no ambiente, ou quando os constituintes do concreto contiverem teores de sulfatos superiores aos aceitáveis. Segundo THOMAZ (2003) a gipsita em excesso permanece inerte no concreto devido à falta de C_3A para a reação. Na presença de água, essa gipsita reage com um dos tipos de aluminatos de cálcio hidratado presente na pasta de cimento, conforme equação:



A formação da etringita é acompanhada por um aumento do volume (expansividade), o que leva a formação de fissuras na pasta endurecida ao redor da etringita. Como consequência ocorre o aumento da permeabilidade, que por sua vez ocasiona um maior ataque de sulfatos do meio ambiente externo, resultando mais formação de etringita, o que provoca mais fissuração, ou seja, uma degradação progressiva. Na figura 2.27 é apresentada uma patologia em concreto devido à formação da etringita depois do concreto endurecido.



Figura 2.27 - Fissuração na base de concreto armado, de uma torre de rede elétrica, devido ao cimento apresentar um alto teor de sulfatos (THOMAZ, 2003).

A evolução das reações químicas envolvidas na hidratação do cimento e descritas acima são apresentadas na figura 2.28, em função do calor envolvido no processo (calor de hidratação).

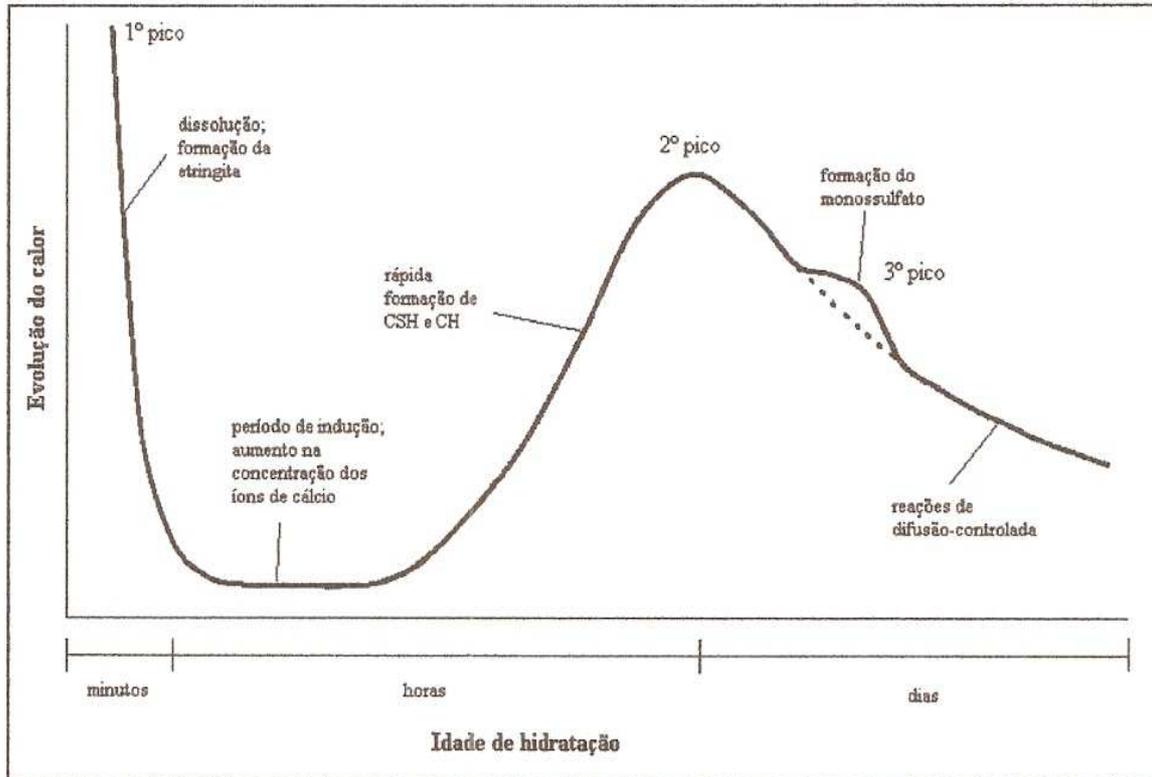


Figura 2.28- Representação esquemática da evolução do calor de hidratação (PINTO *apud* CARVALHO, 2002).

O primeiro pico, mostrado na figura 2.28, possui uma duração curta e ocorre instantaneamente com a adição de água à mistura, liberando uma grande quantidade de calor. Os produtos dessa hidratação formam uma barreira ao redor das partículas de C_3S e C_3A . Em seguida, ocorre um período de pouca atividade química onde acontece a dissolução do C_3S com formação de silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados, como dito anteriormente, por CSH (KAEFER, 2008). Os produtos formados nesse período são em pequena quantidade devido à membrana ao redor das partículas do C_3S formada pela gipsita existente no cimento. A existência desse período permite à mistura, o lançamento e o seu adensamento, antes que comece o endurecimento. À medida que a concentração dos compostos aumenta, o período de dormência termina e começam a se formar os primeiros hemidratos, e por consequência a microestrutura da mistura. Já o segundo pico é observado pela hidratação do C_3S e C_3A . A influência do C_3A depende da quantidade de gipsita da mistura (CARVALHO, 2002). Ao se aproximar desse ponto a mistura perde plasticidade, até tornar-se não trabalhável. No terceiro pico a etringita torna-se instável devido a alta concentração de sulfatos e aluminatos, e se converte em

monossulfato. A figura 2.29 apresenta um esquema da hidratação do cimento, com a formação desses compostos e da microestrutura do cimento.

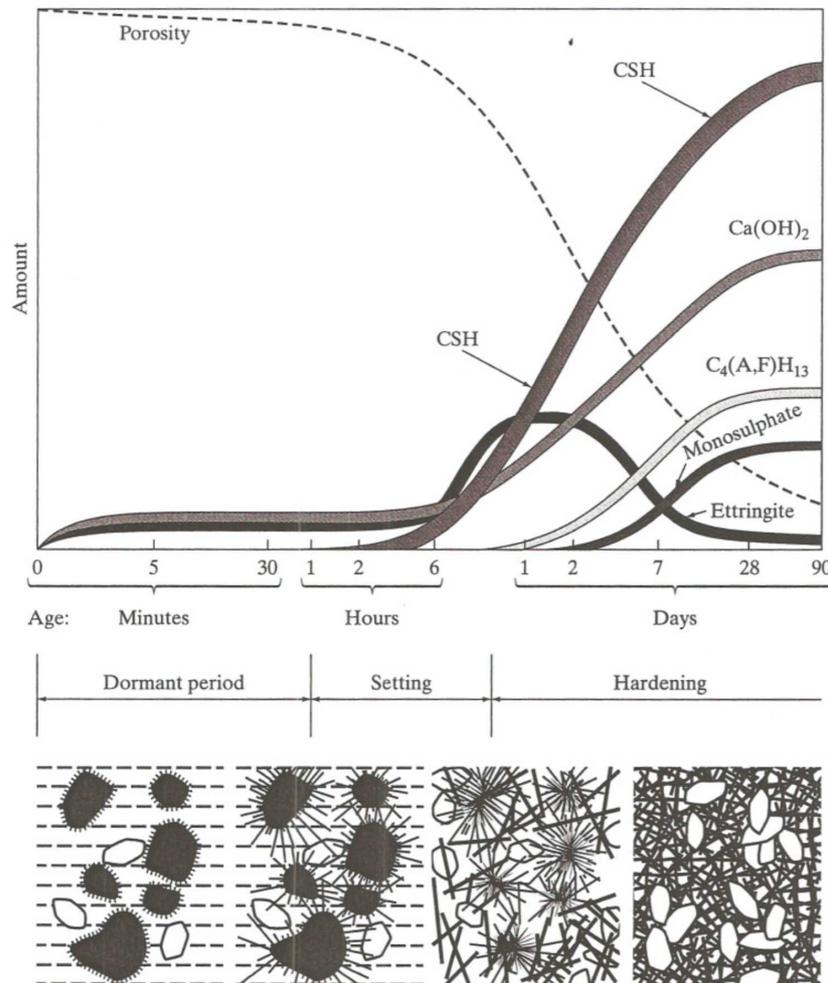


Figura 2.29- Descrição esquemática dos produtos e microestruturas formados durante a hidratação do cimento Portland (YOUNG *et al.*, 1998).

2.2.6 Tipos de cimento Portland

Os cimentos Portland passaram a ter as seguintes designações, de acordo com as normas da ABNT:

2.2.6.1 Cimento Portland Comum (CP I)

O Cimento Portland Comum (CPI) é um tipo de cimento sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega) ou com pequenas adições. É usado em serviços de construção em geral, quando não são exigidas propriedades especiais do cimento.

Os tipos de CPI são:

- CP I (Cimento Portland Comum),
- CP I – S (Cimento Portland Comum com Adição).

2.2.6.2 Cimento Portland Composto (CP II)

As pesquisas tecnológicas indicaram, com o tempo, que cimentos antes classificados como especiais, em razão de adições de escória de alto-forno, pozolana e material carbonático, tinham desempenho equivalente ao do cimento Portland comum. Depois de conquistados bons resultados na Europa o Cimento Portland Composto (CP II) surgiu no mercado brasileiro em 1991. Trata-se de um cimento com composição intermediária entre os cimento Portland comum e o cimento Portland com adição de escória ou pozolana. Atualmente, os cimentos Portland compostos respondem por 70% da produção industrial brasileira, sendo utilizados na maioria das aplicações usuais, em substituição ao antigo CP. Os tipos existentes são:

- CP II – E (Cimento Portland Composto com Escória),
- CP II – Z (Cimento Portland Composto com Pozolana),
- CP II – F (Cimento Portland Composto com Filer).

É recomendado para obras correntes de engenharia civil sob a forma de argamassa, concreto simples, concreto armado, concreto protendido, elementos pré-moldados e artefatos de cimento.

2.2.6.3 Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)

O Cimento Portland Alto-Forno (CP III) é obtido pela adição de escória granulada de alto forno. As escórias apresentam propriedades hidráulicas latentes. Mas as reações

de hidratação da escória são muito lentas e, para que seu emprego seja possível são necessários ativadores físicos e químicos. A ativação física obtém-se com a finura, decorrente da moagem da escória separada ou conjuntamente com o clínquer. A diferença entre este e o CII E é que a porcentagem de adição é de 35% a 70% adição de escória maior que o CII, o que garante um cimento de baixo calor de hidratação, ou seja, ganhando resistência de forma mais lenta, chegando a uma resistência equivalente a CP II-E aos 28 dias.

É utilizado em obras de concreto-massa, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, concretos com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

2.2.6.4 Cimento Portland Pozolânico (CP IV)

O Cimento Portland Pozolânico (CP IV) é obtido pela adição de pozolana ao clínquer, que pode ser moída em conjunto ou separada (ABNT, 1991b). Ao contrário da escória, a pozolana não reage com a água em seu estado natural. Quando finamente moída, reage com o hidróxido de cálcio em presença de água e em temperatura ambiente, dando origem a compostos com propriedades aglomerantes. Diferencia-se do CII-Z pela porcentagem, o CIIV pode ter teor de material pozolânico entre 15% e 50% da massa total de aglomerante (ABNT, 1991b), enquanto que o CII-Z possui uma quantidade menor. É especialmente indicado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.

2.2.6.5 Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V -ARI)

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) tem a propriedade de atingir altas resistências já nas primeiras idades após a aplicação. Isso é possível pela utilização de uma dosagem específica de calcário e argila na produção do clínquer, além de uma moagem mais fina para que o cimento, ao reagir com a água, adquira elevadas resistências com maior velocidade. Suas aplicações são: em blocos para alvenaria, blocos para pavimentação, tubos, lajes, meio-fio, mourões, postes,

elementos arquitetônicos pré-moldados, pré-fabricados e em estruturas que precisem de desformar com rapidez.

Segundo a ABNT NBR 5733 (1991a) é o aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial (ARI), obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura, em até 5%, materiais carbonáticos.

Na figura 2.30 mostra-se a evolução da resistência média dos diferentes tipos de cimento Portland já citados.

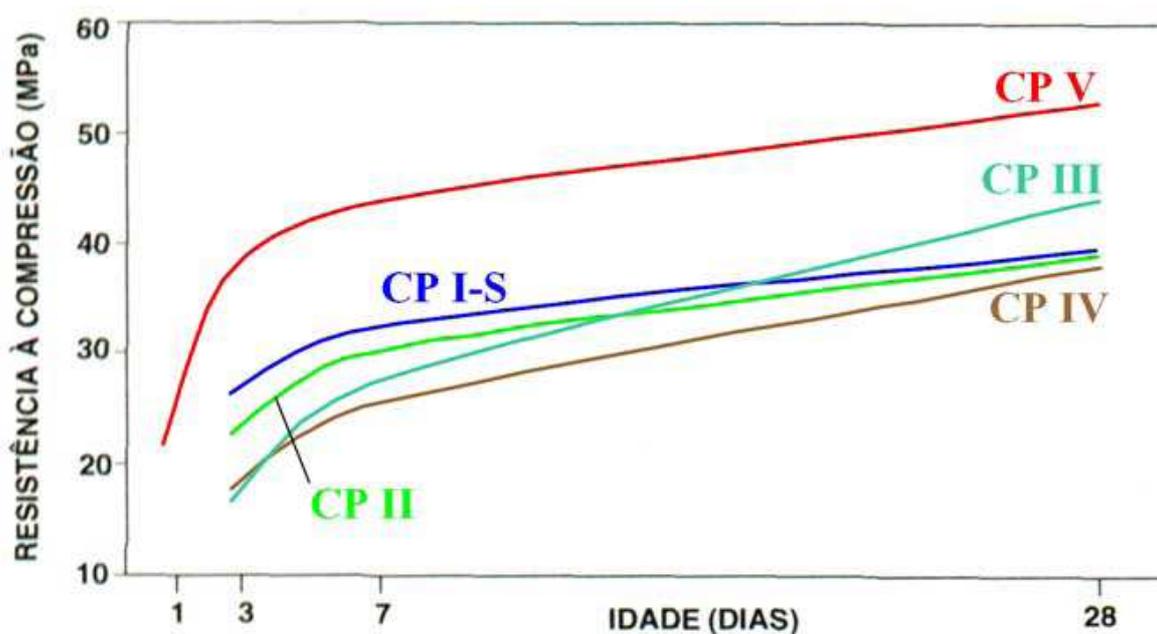


Figura 2.30– Evolução da resistência média à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).

2.2.6.6 Cimento Portland Resistente aos Sulfatos (RS)

Este cimento resiste aos meios agressivos, tais como os encontrados nas redes de esgotos domésticos ou industriais, água do mar e alguns tipos de solos. Qualquer um dos cinco tipos de cimento Portland citados anteriormente, podem ser considerados

resistentes a sulfatos, desde que apresentem pelo menos uma das características abaixo:

- teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;
- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração que comprovem resistência aos sulfatos.

Os cimentos são designados pela sigla original de seu tipo acrescida de RS.

2.2.6.7 Cimento Portland Branco

A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante a fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim no lugar da argila.

Os tipos são o estrutural e o não-estrutural. Suas aplicações são:

- estrutural: Em concretos brancos para fins arquitetônicos.
- não-estrutural: Em rejuntamento de azulejos e em aplicações não estruturais.

2.2.6.8 Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação

Em concretagens de estruturas que necessitam de grandes volumes de concreto continuamente, o calor produzido pela hidratação do cimento pode causar o aparecimento de fissuras de origem térmica. Nesses casos, recomenda-se o emprego de cimentos com taxas lentas de evolução de calor, chamados Cimentos Portland de Baixo Calor de Hidratação.

Nas tabelas 2.9, 2.10 e 2.11 seguem respectivamente, a nomenclatura, as exigências químicas e as exigências físicas e mecânicas dos diferentes tipos de cimento Portland.

Tabela 2.9- Nomenclatura dos cimentos Portland.

NOME TÉCNICO		SIGLA	CLASSE
			25
Cimento Portland Comum (NBR 5732)	Cimento Portland Comum	CP I	32
			40
	Cimento Portland Comum com Adição	CP I-S	
			25
	Cimento Portland Composto com Escória	CPII-E	32
			40
Cimento Portland Composto (NBR 11578)	Cimento Portland Composto com Pozolana	CPII-Z	25
			32
			40
			25
	Cimento Portland Composto com Filer	CPII-F	32
			40
			25
Cimento Portland de Alto-Forno (NBR 5735)		CPIII	32
			40
			25
Cimento Portland Pozolânico (NBR 5736)		CPIV	32
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (NBR 5733)		CPV-ARI	
			25
Cimento Portland Resistente aos Sulfatos (NBR 5737)		Sigla e classes acrescidos do sufixo RS	32
			40
			25
Cimento Portland Branco (NBR 12989)	Cimento Portland Branco Estrutural	CPB	32
			40
	Cimento Portland Branco Não Estrutural	CPB	
			25
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (NBR 13116)		Sigla e classes acrescidos do sufixo BC	32
			40

Tabela 2.10- Exigências químicas dos diferentes tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).

Tipos de Cimento Portland	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0	–
CPI-S	≤ 5,0	≤ 4,5			≤ 3,0	
CP II-E	≤ 2,5					
CP II-Z	≤ 16,0	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	–
CP II-F	≤ 2,5					
CP III ⁽²⁾	≤ 1,5	≤ 4,5	–	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	⁽³⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	–
CP V-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,0 ≤ 4,5 ⁽⁴⁾	≤ 3,0	–

(1) Ensaio Facultativo.

(2) NBR5752 e NBR5753.

(3) O teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel.

(4) O teor de SO₃ igual a 3,5% aplica-se quando C₃A 8,0% e 4,5% quando C₃A > 8,0%.

Tabela 2.11- Exigências físicas e mecânicas dos diversos tipos de cimento Portland (DURANTE, 2001).

Tipo de Cimento Portland	Classe	Finura		Tempos de Pega		Expansibilidade		Resistência à Compressão (MPa)					
		Resíduo Peneira 75 mm (%)	Área Específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	
CP I CPI-S	25		≥ 240		≤ 10 ⁽¹⁾				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0		
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	–	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0		–
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0		
CP II-E CP II-Z CP II-F	25		≥ 240		≤ 10 ⁽¹⁾				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0		
	32	≤ 12,0	≥ 260	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	–	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0		–
	40	≤ 10,0	≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0		
CP III ⁽²⁾	25				≤ 12 ⁽¹⁾				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0		≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32	≤ 8,0	–	≥ 1,0	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0		≥ 40,0 ⁽¹⁾
	40								≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0		≥ 48,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	25				≤ 12 ⁽¹⁾				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0		≥ 32,0
	32	≤ 8,0	–	≥ 1,0	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0		≥ 40,0
CP V-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	–	–	

(1) Ensaio Facultativo.

(2) Outras características podem ser exigidas, como calor de hidratação, inibição da expansão devida à relação álcali-agregado, resistência a meios agressivos, tempo máximo de início de pega.

2.2.7 Propriedades físicas

As propriedades físicas do cimento Portland são consideradas sob três aspectos distintos: propriedades do produto em sua condição natural (em pó), da mistura de cimento e água e proporções convenientes de pasta e, finalmente, da mistura da pasta com agregados.

2.2.7.1 Propriedades do cimento

As principais propriedades do produto em sua condição natural são: densidade, finura, tempo de pega, expansibilidade e calor de hidratação.

2.2.7.1.1 Densidade

A densidade absoluta do cimento Portland é usualmente considerada com 3,15, embora, na verdade, possa variar para valores ligeiramente inferiores. A utilidade do conhecimento desse valor se encontra nos cálculos de consumo do produto nas misturas geralmente feitas com base nos volumes específicos dos constituintes.

2.2.7.1.2 Finura

A finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É usualmente definida de duas maneiras distintas: pelo tamanho máximo do grão, quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido na operação de peneiramento em malha de abertura definida, e, alternativamente, pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em um grama de cimento).

A finura do cimento influencia a sua reação com a água. Quanto mais fino for o cimento maior será a resistência à compressão, a impermeabilidade, a trabalhabilidade e a coesão dos concretos. Por outro lado, a finura aumenta o calor de hidratação e a retração, tornando os concretos mais sensíveis à fissuração. A finura pode ser

aumentada através de uma moagem mais intensa. Porém, o custo de moagem e o calor de hidratação, estabelecem os limites de finura.

Os ensaios para a avaliação da finura do cimento podem ser complexos e onerosos, como é o caso dos ensaios de sedimentação, difratometria por laser, etc. Essa avaliação pode ser obtida conhecendo-se algumas características dos ramos inferior e superior da amostra. Para isso, utilizam-se dois ensaios: peneiramento através da peneira da ABNT 75 μ m (0,075mm) e da área específica.

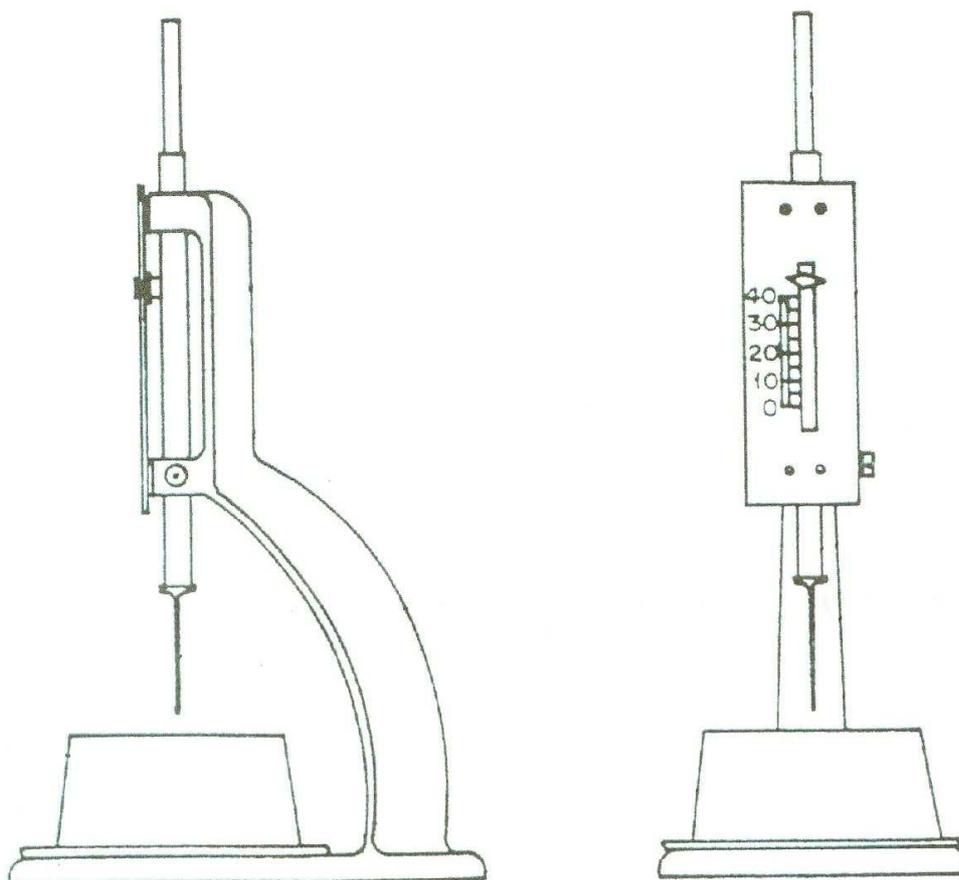
2.2.7.1.3 Tempo de pega

O fenômeno da pega do cimento compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta ao início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas e é conseqüente de um processo químico de hidratação. É um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Tal conceituação se estende, evidentemente, tanto à argamassa quanto aos concretos nos quais a pasta de cimento está presente e com missão aglutinadora dos agregados.

O tempo de pega é uma propriedade importante, uma vez que determinará o prazo para a aplicação de pastas, argamassas e concretos com plasticidade e trabalhabilidade adequados. Para controlar o tempo de pega, é adicionado o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) na moagem do cimento, cujo controle é feito através do teor de SO_3 .

Em alguns casos, a mistura em que o cimento está sendo empregado (pasta, argamassa ou concreto) pode perder a plasticidade com um tempo menor que o previsto, e com uma nova mistura na betoneira, sua plasticidade inicial é recuperada. Isso ocorre quando, na moagem do cimento, a temperatura ultrapassa 128°C, provocando uma dissociação do sulfato de cálcio do gesso, interferindo nas características do seu efeito retardador de pega.

A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos: o tempo de início e o tempo de fim de pega. Os ensaios são feitos com pasta de consistência normal, no aparelho de Vicat (figura 2.31).



Aparelho de Vicat e molde tronco cônico

Figura 2.31– Aparelho de Vicat e molde tronco cônico

O Aparelho de Vicat é composto por: parafuso/ara para ajuste da altura, haste, parafuso para ajuste da sonda, molde Ø80x40mm, agulha de Vicat, base, sonda de Tetmajer, molde cônico e escala.

2.2.7.1.4 Expansibilidade

A composição do cimento apresenta cal livre ou magnésia livre em teores elevados, esses compostos podem combinar-se com a água, produzindo Ca(OH)_2 e Mg(OH)_2 . Essas reações provocam fissuração excessiva no concreto devido ao aumento de volume.

2.2.7.1.5 Calor de hidratação

As reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade de calor gerado depende da composição química do cimento, quantidade e tipo de adições, finura, etc. Em algumas situações o calor de hidratação pode ser um problema, como por exemplo, em estruturas de concreto-massa; em outras pode ser um componente positivo, como é o caso de concretagens durante o inverno, quando a temperatura ambiente é baixa para fornecer energia de ativação para as reações de hidratação (DURANTE, 2001).

2.2.7.2 Propriedades do concreto

O concreto é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante (pasta), dentro do qual estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados.

As propriedades da pasta de cimento com agregados desenvolvem-se como resultado de reações químicas entre os compostos do cimento Portland e a água, uma vez que essas reações de hidratação são acompanhadas por trocas de matéria e energia (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Além das propriedades do cimento descritas anteriormente, as outras propriedades do concreto são:

2.2.7.2.1 Resistência

A resistência de um material é definida como sua capacidade de resistir à tensão sem que haja ruptura. A ruptura é algumas vezes identificada com o aparecimento de fissuras. Deve-se lembrar que, ao contrário da maioria dos materiais estruturais, o concreto contém microfissuras antes mesmo de ser submetido a tensões externas. No concreto, portanto, a resistência é relacionada com a tensão requerida para causar a fratura e é sinônimo do grau de ruptura no qual a tensão aplicada alcança seu valor máximo (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A resistência mecânica dos cimentos é determinada pela ruptura à compressão de corpos de prova. A forma do corpo de prova, suas dimensões, o traço do concreto, sua consistência e o tipo de agregado e água empregados são definidos nas especificações correspondentes.

2.2.7.2.2 Permeabilidade e absorção

A permeabilidade é um aspecto muito importante para a durabilidade das estruturas de concreto armado. A importância do seu conhecimento não deriva apenas da utilização em obras hidráulicas, mas também dos casos em que a durabilidade do material pode ser ameaçada pela ação de agentes agressivos.

Portanto, a permeabilidade se identifica como a passagem da água através do concreto. Já a absorção é o processo físico que o concreto possui em reter a água nos poros e capilares (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A permeabilidade do concreto pode ser obtida através do aparelho portátil Germanns Waterpermeability Test (GWT). Geralmente, os valores típicos da permeabilidade dos concretos variam de 92×10^{-4} a 30×10^{-10} cm/s, devido ao fator água/cimento e a quantidade de cimento utilizados nos mesmos.

Já o índice de absorção do concreto é facilmente determinado em função do peso seco e peso saturado de corpos de prova de concreto.

2.2.7.2.3 Módulo de elasticidade

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), a definição de módulo de elasticidade do concreto é a relação entre a tensão e a deformação elástica. O módulo de elasticidade do concreto na compressão varia de 14 a 40GPa.

O módulo de elasticidade estático para um material sob a tração ou a compressão uniaxial é dado pela inclinação da curva tensão-deformação. Como esta curva para o concreto não é linear, existem métodos para calcular o módulo, que são (MEHTA e MONTEIRO, 1994):

- módulo tangente é obtido pela inclinação de uma reta tangente à curva do gráfico tensão-deformação em qualquer ponto da curva;
- módulo secante é obtido pela inclinação de uma reta traçada da origem a um ponto da curva que corresponde a 40% da carga de ruptura;
- módulo da corda é obtido pela inclinação de uma reta traçada entre dois pontos na curva do tensão-deformação. Comparado com o módulo secante, em vez da origem, a linha é traçada de um ponto que representa uma deformação longitudinal de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ ao ponto que corresponde a 40% da carga de ruptura;

Já o módulo de elasticidade dinâmico correspondente a uma tensão instantânea muito pequena e é dado aproximadamente pelo o módulo tangente para uma reta traçada na origem. Seus valores quando comparados com o módulo de elasticidade estático são, geralmente, 20, 30 e 40% maiores para concretos de elevada, média, e baixa resistência, respectivamente (MEHTA e MONTEIRO, 1994). A determinação desse módulo pode ser feita por um teste sônico, por exemplo, o equipamento ERUDITE MKII que é apresentado na figura 2.32.



Figura 2.32– Foto do equipamento ERUDITE MKII para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

2.2.8 A importância do gesso no cimento

Em um processo industrial de fabricação de cimento, o uso de misturas é de 95% de escória e 5% gesso. O gesso entra na mistura, como dito anteriormente, para controlar o tempo de pega do cimento, inibindo a tendência de pega instantânea ocasionada pela grande reatividade do C_3A . No início da hidratação do cimento, ele forma uma barreira reduzindo a velocidade de hidratação do aluminato tricálcico. Essa formação dá origem a etringita, conforme reação 2.9, que depois se transforma em monossulfato (reação 2.10), que são formações benéficas ao cimento. Porém, se houver formação de etringita depois do endurecimento, conforme reação 2.12, essa ocasiona patologias na pasta de cimento e concreto, por ser a etringita muito expansiva.

O gesso além de controlar o tempo de pega do cimento pode provocar também, aumento no consumo de energia no processo de fabricação do cimento devido à utilização de diferentes tipos de gesso, segundo (IGLESIAS *et al.*, 1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O tema proposto nesta dissertação tem sido ainda pouco estudado, não sendo encontradas muitas referências bibliográficas. Para estimar a influência da utilização de agregados de resíduos contaminados por gesso, avaliou-se comparativamente o comportamento de concretos confeccionados com agregados naturais contaminados por diferentes teores de gesso. No estudo não foram utilizados agregados de resíduos para que se tivesse a certeza do grau de contaminação, uma vez que os resíduos podem estar contaminados. Optou-se pela utilização de microconcretos (concretos sem agregados graúdos) para diminuir o número de variáveis em análise.

Inicialmente, descrevem-se os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova e suas características. Em seguida são apresentados os procedimentos experimentais adotados para avaliar a influência da presença de gesso ou resíduo de gesso como contaminantes em agregados a serem utilizados para fabricação de microconcretos.

O trabalho experimental consistiu em submeter corpos de prova de microconcretos fabricados com e sem contaminação de gesso a ensaios de compressão, absorção de água e módulo de elasticidade. Também foram realizados ensaios de tempo de pega do cimento com e sem adições de gesso.

3.1 Materiais

Para a fabricação dos microconcretos estudados foram empregados os seguintes materiais: cimento, água, areia, gesso e resíduo de gesso.

O cimento utilizado foi o do tipo CP V Ari Plus – Ultra Rápido fornecido pela empresa HOLCIM do Brasil. Esse aglomerante foi escolhido por ser o que apresenta menores teores de adições e, dessa forma, diminuiu a complexidade do sistema estudado. Sua

caracterização e composição química são apresentadas nos quadros 3.1 e 3.2, a seguir.

Ensaio		PERÍODO	18.08.2007		15.09.2007		13.10.2007	
			11.09.2007	09.10.2007				
# 400 %	MÉDIA		2,3	2,7			2,9	
	DP		0,56	0,49			0,32	
	n		8	8			7	
Blaine m2/kg	MÉDIA		4688	4636			4669	
	DP		47	81			30	
	n		8	8			7	
Pega	Início Pega min	MÉDIA	149	145			152	
		DP	8	11			9	
		n	8	8			7	
	Fim pega min	MÉDIA	197	200			195	
		DP	12	14			10	
		n	8	8			7	
Resistência	R 1 dia MPa	MÉDIA	30,6	30,8			30,0	
		DP	1,27	1,45			1,28	
		n	8	8			6	
	R 3 dias MPa	MÉDIA	42,5	41,8			42,4	
		DP	0,89	0,93			1,00	
		n	8	8			6	
	R 7 dias MPa	MÉDIA	47,2	45,9			47,0	
		DP	1,64	0,80			0,92	
		n	8	8			5	
	R 28 dias MPa	MÉDIA	55,1	54,5				
		DP	1,43	1,07				
		n	8	7				

Quadro 3.1- Características físicas do cimento CP V ARI PLUS - Ultra Rápido fornecido pela HOLCIM no período de 18/08/2007 a 13/10/2007.

ENSAIOS DE CIMENTO			
TIPO/CLASSE: CP V ARI PLUS - Ultra Rápido			
Ensaio	COMPOSTOS	UNIDADE	VALOR ENCONTRADO
Análise Química	P.F.	%	3,25
	SiO ₂	%	18,92
	R.I.	%	0,43
	Al ₂ O ₃	%	5,04
	Fe ₂ O ₃	%	2,96
	CaO	%	63,90
	MgO	%	0,85
	SO ₃	%	2,72
	CO ₂	%	1,74
	K ₂ O	%	0,78
	P.F. 500°C	%	0,87
	CaSO ₄	%	5,90
	C ₃ A teórico	%	7,88

Quadro 3.2- Análise química do cimento CP V ARI PLUS - Ultra Rápido da HOLCIM.

A água utilizada para a confecção dos concretos foi a água potável disponibilizada pela COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais) no município de Pedro Leopoldo, onde foram executadas todas as moldagens dos corpos de prova, no período de setembro a dezembro de 2007. A composição da água no período dos experimentos segundo a empresa é a apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Propriedades físicas e químicas da água utilizada no trabalho e fornecida pela COPASA no período de 09/2007 a 12/2007 do município de Pedro Leopoldo.

Parâmetro	Unidade	Número de amostras		Valor Médio
		Mínimo	Analisados	
Cloro	Mg/L Cl	260	308	0,53
Coliformes totais	NMP/100mL	260	309	92,88%
Cor	UH	56	111	< 2,50
Escherichia Coli	NMP/100mL	0	22	-
Fluoreto	Mg/LF	28	69	0,76
Turbidez	UT	56	111	0,21
PH	-	56	111	8,37

A fim de se minimizar o número de variáveis do sistema, optou-se por utilizar a areia padrão fornecida pelo IPT. É uma areia isenta de impurezas e de material pulverulento e friável, fornecida em faixas granulométricas estreitas. Foram empregadas quatro granulometrias, distribuídas em cada traço de forma igualitária: 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm.

O gesso utilizado nos microconcretos foi de duas naturezas. O primeiro tipo, neste trabalho chamado apenas de gesso, corresponde ao gesso fornecido pelo fabricante, sem hidratação, ou seja, como matéria-prima para a confecção de pastas de gesso, utilizadas para revestimento de alvenarias. O segundo tipo refere-se aos resíduos de gesso provenientes da confecção desse revestimento, ou seja, gesso após hidratação. O gesso foi fornecido pela empresa INGENOR na forma em que se encontra no mercado. Suas principais características técnicas são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2- Características técnicas do gesso da INGENOR, utilizado na fabricação dos microconcretos, fornecidas pelo fabricante.

Parâmetro	Unidade	Valor Médio
Tempo de endurecimento	minutos	20 a 35 (lento)
Módulo de finura	-	1,10
Consistência	%	75 a 80
Resistência ao arrancamento	MPa	0,35
Resistência à compressão	MPa	8,5 a 9,0
Resistência à flexão	MPa	3,0 a 3,5
Absorção	%	35 a 40

O resíduo de gesso utilizado foi coletado em construções de unidades habitacionais do Programa Vila Viva do Aglomerado da Serra, executado em Belo Horizonte. O material coletado foi adequadamente, ensacado, transportado e separado em duas amostras. A primeira foi submetida à desfragmentação e ao peneiramento com a utilização de um martelo de náilon em bandeja de metal. O peneiramento foi feito em uma peneira com abertura de 0,59mm. Essa granulometria se refere ao menor tamanho de moagem possível com o sistema adotado que passaria imperceptível à análise macroscópica quando misturado ao concreto. O segundo grupo de amostras foi primeiramente submerso em água por 48 horas e posteriormente seco ao ar livre. Tal procedimento visou garantir a hidratação total das moléculas de gesso presentes nesse resíduo que, por ventura, não tenham sido totalmente hidratadas durante a execução do procedimento de revestimento. Depois disso, o resíduo de gesso foi submetido ao processo de fragmentação/peneiramento descrito anteriormente. As características do resíduo de gesso são apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3- Análise química do resíduo de gesso realizado de acordo com as prescrições da ABNT (NBR 12130 e NBR 13207).

Parâmetros Determinados	Unidade	Valor Encontrado
Água combinada	%	18,22
Cloretos (Cl ⁻)	%	0,035
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	%	0,031
Óxido de Cálcio (CaO)	%	85,96
Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	%	0,082
Óxido de Magnésio (MgO)	%	0,31
Óxido de Potássio (K ₂ O)	%	0,012
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	%	0,015
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	%	43,68
Umidade	%	14,66

3.2 Métodos

3.2.1 Confeção e cura dos corpos de prova

A fase experimental deste trabalho contou com a confecção, cura e ensaios laboratoriais de corpos de prova de microconcretos cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura, conforme figura 3.1.



Figura 3.1– Foto dos corpos de prova moldados com microconcretos.

Foram confeccionados diferentes traços de microconcretos, nos laboratórios da HOLCIM, sempre mantendo a mesma relação água/aglomerante. Optou-se pela fixação do fator água/aglomerante em 0,69 e o consumo de cimento variou de aproximadamente 408 a 480kg/m³. Tal escolha ocorreu visando manter a relação cimento/gesso adicionado nos valores pré-estabelecidos. O elevado valor de consumo de cimento foi estabelecido em função da ausência de agregados graúdos e da necessidade de manter o agregado miúdo em níveis que não comprometessem a trabalhabilidade do concreto.

Os traços foram confeccionados com e sem adição de gesso e resíduo de gesso à mistura. O gesso foi adicionado na forma semi-hidratado (traço com gesso) e di-hidratado (resíduo sem imersão e com imersão em água por 48h). Foram adicionados diferentes teores de gesso: 5, 10 e 15% do peso do cimento.

Foram elaborados dez traços experimentais, conforme quadro 3.3 e para cada um desses traços confeccionados vinte e um corpos de prova. A adição de gesso/resíduo se deu em substituição ao teor de cimento para que o fator água/aglomerante (a/agl) e a trabalhabilidade se mantivessem nos níveis estabelecidos. Considerando o teor de gesso no cimento e a massa específica do concreto (em torno de 1,94g/cm³), após cada adição os concretos fabricados estariam contaminados com 1,3, 2,5 e 3,8% de

gesso, valores acima do recomendado por AGOPYAN *et al.* (2005). Esses níveis de contaminação seriam valores imperceptíveis na análise comumente feita nas usinas de beneficiamento para rejeição ou não do entulho.

ITEM	ABREV.	TRAÇO
1	SG	Sem Adição de gesso
2	3,8G	Traço com contaminação de 3,8% de gesso
3	3,8RG	Traço com contaminação de 3,8% de resíduo de gesso
4	3,8RG48	Traço com contaminação de 3,8% de resíduo submerso por 48h
5	2,5G	Traço com contaminação de 2,5% de gesso
6	2,5RG	Traço com contaminação de 2,5% de resíduo de gesso
7	2,5RG48	Traço com contaminação de 2,5% de resíduo submerso por 48h
8	1,3G	Traço com contaminação de 1,3% de gesso
9	1,3RG	Traço com contaminação de 1,3% de resíduo de gesso
10	1,3RG48	Traço com contaminação de 1,3% de resíduo submerso por 48h

Quadro 3.3- Traços dos microconcretos utilizados nos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e absorção.

As proporções dos materiais que foram utilizados em todos os traços dos microconcretos estão especificadas no quadro 3.4.

Traços	Materiais						
	Areia (g)				Cimento (g)	Gesso/Resíduo (g)	Água (ml)
	1,2 mm	0,6 mm	0,3 mm	0,15 mm			
Sem Adição	625	625	625	625	955,00	-	660,00
Traço contaminado com 3,8% gesso	625	625	625	625	812,70	143,25	660,00
Traço contaminado com 3,8% resíduo	625	625	625	625	812,70	14325	660,00
Traço contaminado com 3,8% resíduo submerso por 48h	625	625	625	625	812,70	143,25	660,00
Traço contaminado com 2,5% gesso	625	625	625	625	859,50	95,50	660,00
Traço contaminado com 2,5% resíduo	625	625	625	625	859,50	95,50	660,00
Traço contaminado com 2,5% resíduo submerso por 48h	625	625	625	625	859,50	95,50	660,00
Traço contaminado com 1,3% gesso	625	625	625	625	907,20	47,75	660,00
Traço contaminado com 1,3% resíduo	625	625	625	625	907,20	47,75	660,00
Traço contaminado com 1,3% resíduo submerso por 48h	625	625	625	625	907,20	47,75	660,00

Quadro 3.4- Proporção dos materiais empregados nos traços dos microconcretos.

Para a confecção desses traços, todos os materiais utilizados (cimento, areia, resíduo e/ou gesso) foram pesados em balança eletrônica e a quantidade de água aferida por um Becker. Depois de pesados, os materiais foram colocados em um recipiente metálico, na seguinte ordem: em primeiro lugar a areia, depois o cimento, o gesso e/ou resíduo e por último a água, misturados num misturador mecânico (figura 3.2) durante 5 minutos. Ao término desse período, com esses microconcretos fabricados, moldaram-

se os vinte e um corpos de prova em duas camadas com 10 golpes de adensamento em cada.



Figura 3.2– Foto do misturador mecânico utilizado na confecção dos corpos de prova.

Em todos os traços, os corpos de prova moldados foram mantidos nos moldes durante as primeiras 24 horas, depois de desformados e imersos em água potável para cura até o sexto dia, onde foram retirados e estocados para a execução de todos os ensaios informados.

Visando prover e acelerar as reações perniciosas do gesso quando em contato com a umidade dentro do concreto (THOMAZ, 2003), três corpos de prova de cada traço, com mais de 150 dias de idade, foram imersos em água por 48h, sendo que durante 18h a água foi mantida à temperatura de 100°C.

3.2.2 Determinação da resistência à compressão

Para o rompimento dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica informatizada com controle automático de velocidade de aplicação de carga. Em todos os corpos de prova foram utilizados capeamentos de enxofre, para que houvesse uma regularização das superfícies e a mesma velocidade de aplicação de carga, diminuindo, assim, a possibilidade de variações não controladas. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados seguindo os procedimentos usuais (NBR 7215 (1996) – “Determinação da resistência à compressão do cimento”). Em cada traço foram ensaiados três exemplares nas idades de 7, 14, 21, 28 e 150 dias nos laboratórios da Escola de Engenharia da UFMG.

3.2.3 Determinação da permeabilidade

A permeabilidade foi avaliada pela capacidade de absorção de água do corpo de prova. Segundo SOUZA (2006), a água é um veículo de transporte dos íons agressivos ao concreto e/ou à armadura, por isso a grande importância em saber a permeabilidade, a porosidade e a absorção de água pelo concreto, propriedades essas que afetam a sua durabilidade. Pela estrutura de poros abertos interconectados (permeabilidade) penetram e percolam todos os agentes agressivos do meio ambiente. LEVY (2002) considera que a absorção por imersão caracteriza melhor a estrutura dos poros, uma vez que permite avaliar a quantidade total de água absorvida. Por isso, optou-se por executar esse ensaio.

Para a determinação da permeabilidade pelo ensaio de absorção foi considerada a variação de peso da amostra seca em estufa antes e após 24h de imersão em banho de água à temperatura de 25°C. Após a cura completa os corpos de prova foram colocados em uma estufa a 100°C, onde permaneceram pelo tempo necessário para que o peso de cada amostra se mantivesse constante após três medidas consecutivas, espaçadas de 1.800s. Ao serem retirados da estufa, os corpos de prova foram pesados e colocados submersos em água por 24h, e então novamente pesados. Foram ensaiados, três corpos de prova para cada traço proposto, na idade de 31 dias devido à

dificuldade de datas do laboratório da UFMG. O índice de absorção de água foi calculado através da fórmula abaixo, que é dada pela variação percentual do peso antes e após a imersão em água em consequência do valor médio de cada traço dos microconcretos.

$$A = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

A= porcentagem de absorção da amostra

Ph= peso úmido

Ps= peso seco.

3.2.4 Determinação da rigidez

Para a determinação do módulo de elasticidade de concretos existem dificuldades, pois o concreto é um material que não obedece à lei de Hooke tanto sob esforços de compressão como os de tração. Dessa forma, muitas vezes o termo é associado a uma dada resposta do material na curva tensão-defomação. Outras vezes o módulo é determinado de forma indireta através de fórmulas empíricas que relacionam a resistência à compressão e a massa específica. Neste trabalho, o módulo de Young foi estimado pela freqüência natural de vibração do material. Um método usual de determinação da freqüência fundamental é o de ressonância. O método de freqüência ressonante utiliza ondas geradas eletromecanicamente ou por impacto. Normalmente o módulo assim obtido é chamado módulo dinâmico, e é calculado a partir da freqüência fundamental de vibração, da massa, das dimensões, e da forma do corpo de prova (ASTM-C215, 2002).

A rigor esse método não poderia ser aplicado a materiais não homogêneos, como o concreto. No entanto, bons resultados têm sido obtidos desde que o corpo de prova tenha dimensões compatíveis com o tamanho dos agregados, e que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da

heterogeneidade do material. Como o ensaio não é destrutivo, inúmeras medidas podem ser feitas no mesmo corpo de prova. Também se pode avaliar de forma eficaz a evolução da propriedade com o passar do tempo, e correlacioná-la com a resistência mecânica, sem que os efeitos impostos pela moldagem afetem os resultados.

Neste trabalho, os ensaios para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram executados nos laboratórios da Escola de Engenharia da UFMG, nas idades de 7, 21 e 28 dias em três corpos de prova de cada amostra, através da determinação da frequência de vibração dos átomos utilizando ondas geradas eletromecanicamente. Foi utilizado um aparelho de frequência ressonante da marca *Elle International* (conforme figura 2.32). Os ensaios se basearam nas recomendações da norma *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society For Testing And Materials (ASTM-C215, 2002)*, para a determinação do módulo longitudinal.

Aos corpos de prova foram aplicadas vibrações com frequência na faixa de 5.000 a 20.000Hz. Foram feitas 10 medidas para cada corpo de prova, retirando a média e os maiores e menores valores de cada traço.

Para a determinação do módulo foi necessária a determinação da massa específica de cada corpo de prova. Sendo este um estudo comparativo, adotou-se o simples procedimento de verificação das massas dos corpos de prova cilíndricos depois de retirados do aparelho.

3.2.5 Determinação do tempo de pega

O tempo de pega, como já dito anteriormente, é um fenômeno artificialmente definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria para o trabalho.

Neste ensaio utilizou-se apenas o cimento com adições de gesso e resíduo, conforme quadro 3.5. Foram adicionados diferentes teores de gesso: 5, 10 e 15% do peso do

cimento, o que correspondem respectivamente às porcentagens de 1,3, 2,5 e 3,8% de contaminantes de gesso nos agregados para a fabricação de microconcretos.

ITEM	ABREV.	TRAÇO
1	SG	Sem Adição de gesso
2	15%G	Traço com 15% de gesso
3	15%RG	Traço com 15% de resíduo de gesso
4	15%RG48	Traço com 15% de resíduo submerso por 48h
5	10%G	Traço com 10% de gesso
6	10%RG	Traço com 10% de resíduo de gesso
7	10%RG48	Traço com 10% de resíduo submerso por 48h
8	5%G	Traço com 5% de gesso
9	5%RG	Traço com 5% de resíduo de gesso
10	5%RG48	Traço com 5% de resíduo submerso por 48h

Quadro 3.5- Traços dos cimentos com adição de gesso e resíduo para ensaio de tempo de pega.

Esses traços foram executados para verificar a influência do gesso quando presente como contaminante em agregado nos microconcretos estudados, uma vez que, para retardar o tempo de pega do cimento, que seria imediato devido à ação do C_3A , utiliza-se gesso em sua fabricação.

Para a execução deste ensaio foram utilizados o aparelho de Vicat e o molde tronco cônico, que são apresentados na figura 2.31. Em cada um desses traços especificados no quadro 3.5, pesou-se 500 gramas de cimento (já contaminado com as proporções indicadas) e 140 gramas de água, o que corresponde a um teor de 28%. Depois de pesado, colocou-se todo o cimento na cuba do misturador, adicionando água e aguardando por 30 segundo antes de iniciar a mistura, o misturador ficou ligado por um período de 30 segundos em velocidade baixa (sendo desligado por 15 segundos para

raspar as paredes do recipiente) e por mais 60 segundos em alta velocidade. Com o auxílio de uma espátula, a pasta foi transferida para o molde tronco cônico, sem compactação, fazendo o nivelamento do material. Em seguida, começou a medição do início de pega e do fim de pega com a utilização da sonda de Tetmajer. Este ensaio seguiu todas as prescrições da ABNT NBR NM 65 (2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos com os métodos descritos no item anterior são relatados e analisados neste capítulo. Os dados são apresentados em tabelas e gráficos, facilitando, assim, a sua visualização.

4.1 Ensaio de Resistência à Compressão.

Os resultados obtidos nos traços dos microconcretos são apresentados nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, para as idades de 7, 14, 21 e 28 dias, respectivamente. A identificação dos traços está apresentada no quadro 3.3.

Tabela 4.1- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 7 dias.

Traço	Abrev.	Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (MPa)			Média
		CP 1	CP 2	CP 3	
1	SG	34,00	35,00	42,00	37,00
2	3,8G	28,00	25,00	29,00	27,33
3	3,8RG	19,00	13,00	19,00	17,00
4	3,8RG48	21,00	15,00	18,00	18,00
5	2,5G	30,00	29,00	27,00	28,67
6	2,5RG	34,00	29,00	30,00	31,00
7	2,5RG48	32,00	32,00	23,00	29,00
8	1,3G	27,00	34,00	30,00	30,33
9	1,3RG	28,00	39,00	38,00	35,00
10	1,3RG48	22,00	35,00	29,00	28,67

Tabela 4.2- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 14 dias.

Traço	Abrev.	Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (MPa)			Média
		CP 1	CP 2	CP 3	
1	SG	43,00	45,00	34,00	40,67
2	3,8G	35,00	34,00	39,00	36,00
3	3,8RG	23,00	26,00	28,00	25,67
4	3,8RG48	25,00	26,00	26,00	25,67
5	2,5G	36,00	39,00	37,00	37,33
6	2,5RG	35,00	40,00	36,00	37,00
7	2,5RG48	34,00	31,00	36,00	33,67
8	1,3G	33,00	39,00	35,00	35,67
9	1,3RG	31,00	39,00	36,00	35,33
10	1,3RG48	37,00	42,00	34,00	37,67

Tabela 4.3- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 21 dias.

Traço	Abrev.	Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (MPa)			Média
		CP 1	CP 2	CP 3	
1	SG	47,00	47,00	43,00	45,67
2	3,8G	40,00	34,00	43,00	39,00
3	3,8RG	32,00	31,00	26,00	29,67
4	3,8RG48	32,00	27,00	30,00	29,67
5	2,5G	35,00	32,00	40,00	35,67
6	2,5RG	42,00	34,00	38,00	38,00
7	2,5RG48	40,00	46,00	34,00	40,00
8	1,3G	32,00	35,00	41,00	36,00
9	1,3RG	53,00	45,00	32,00	43,33
10	1,3RG48	40,00	34,00	42,00	38,67

Tabela 4.4- Valores de resistência à compressão das amostras para a idade de 28 dias.

Traço	Abrev.	Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (MPa)			Média
		CP 1	CP 2	CP 3	
1	SG	47,00	44,00	36,00	42,33
2	3,8G	41,00	44,00	42,00	42,33
3	3,8RG	27,00	34,00	26,00	29,00
4	3,8RG48	25,00	27,00	33,00	28,33
5	2,5G	38,00	42,00	36,00	38,67
6	2,5RG	33,00	40,00	38,00	37,00
7	2,5RG48	47,00	43,00	38,00	42,67
8	1,3G	42,00	37,00	35,00	38,00
9	1,3RG	50,00	40,00	34,00	41,33
10	1,3RG48	43,00	34,00	38,00	38,33

Os resultados dos traços em diferentes idades são apresentados nas figuras de 4.1 a 4.4, onde são comparados os valores de resistência em função da idade e das adições realizadas. Em cada figura e para cada idade são apresentados a média e os valores medidos (máximo e mínimo) referentes à resistência à compressão.

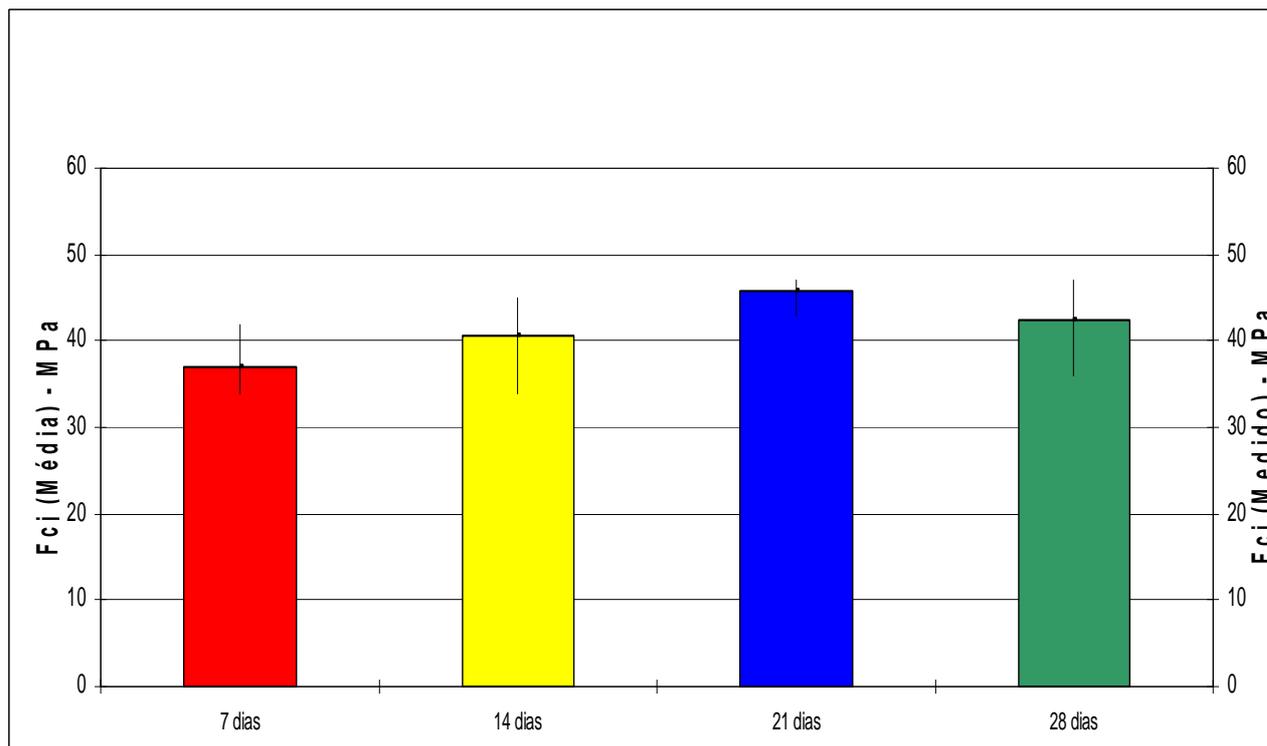


Figura 4.1- – Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos sem adição nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traço 1).

A figura 4.1 mostra que a resistência à compressão dos microconcretos do traço sem adição, após o sétimo dia, não apresentou aumento significativo dos valores, o que já era de se esperar, uma vez que, o cimento utilizado (CPV) tem como característica principal atingir sua resistência necessária com pouca idade, conforme mostrado na figura 2.30 (DURANTE, 2001).

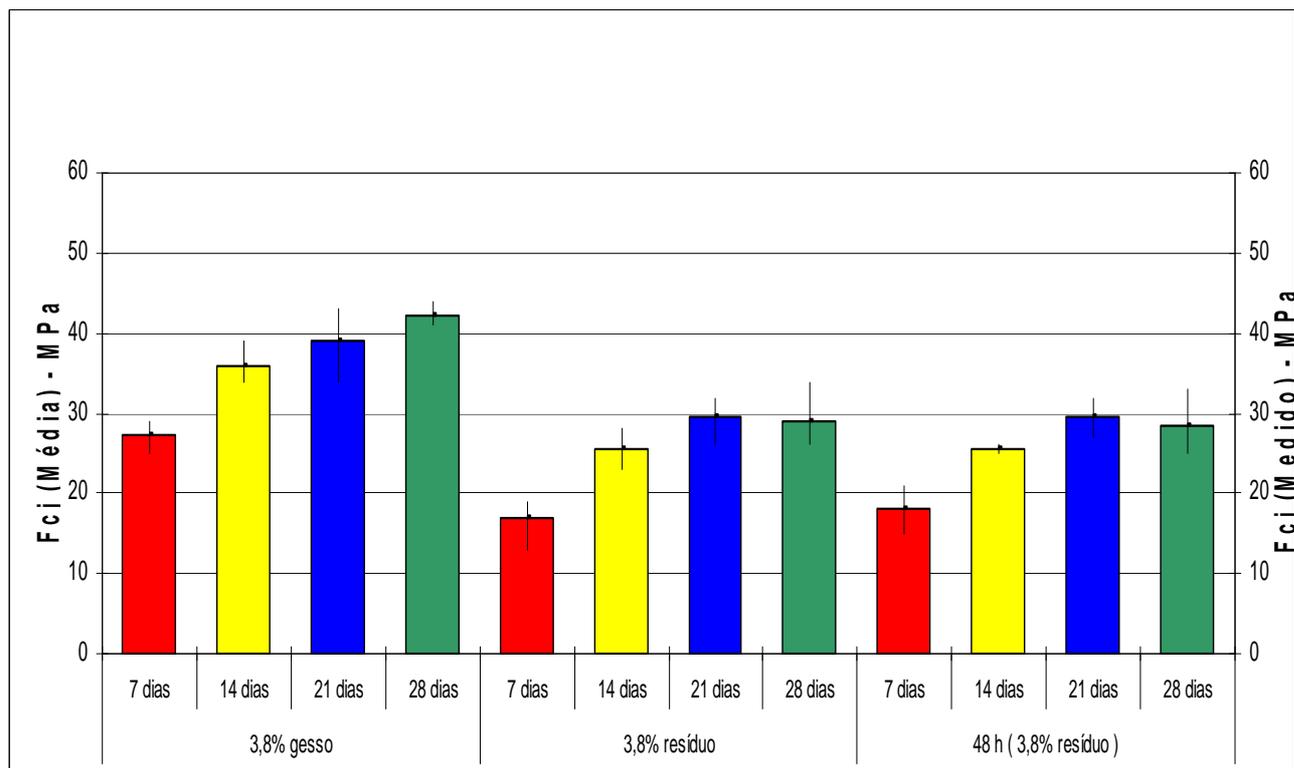


Figura 4.2– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 3,8% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 2, 3 e 4).

Analisando a figura 4.2, que apresenta um estudo comparativo em todas as idades dos traços com 3,8% de gesso, de resíduo e do resíduo que ficou hidratando por 48 horas, nota-se que em todos os traços houve um ganho de resistência no decorrer dos dias. Os resultados dos traços de 3,8% de resíduo e o de 48 horas mostraram o mesmo comportamento com valores muito próximos. Isso indicaria que o resíduo antes da imersão já se apresentava di-hidratado. O concreto com 3,8% de gesso apresentou valores de resistência muito maiores. Isso indica que o gesso quando introduzido no traço, se encontrava no estado de semi-hemidrato (não hidratado). O contato desse gesso com a água no concreto fresco levaria a uma hidratação instantânea, promovendo uma diminuição do fator a/c , o que geraria um ganho de resistência em todas as idades.

Quando comparados com os valores da figura 4.1 observa-se que os valores de resistência com adição de 3,8% foram inferiores aos do sem adição em todas as idades. Por outro lado a evolução da taxa de crescimento da resistência mecânica foi maior para os microconcretos com 3,8% de adição. Isso poderia estar relacionado às

variações do consumo de cimento em cada traço, visto que no traço com 3,8% de contaminante, esse consumo foi menor do que no traço sem adição.

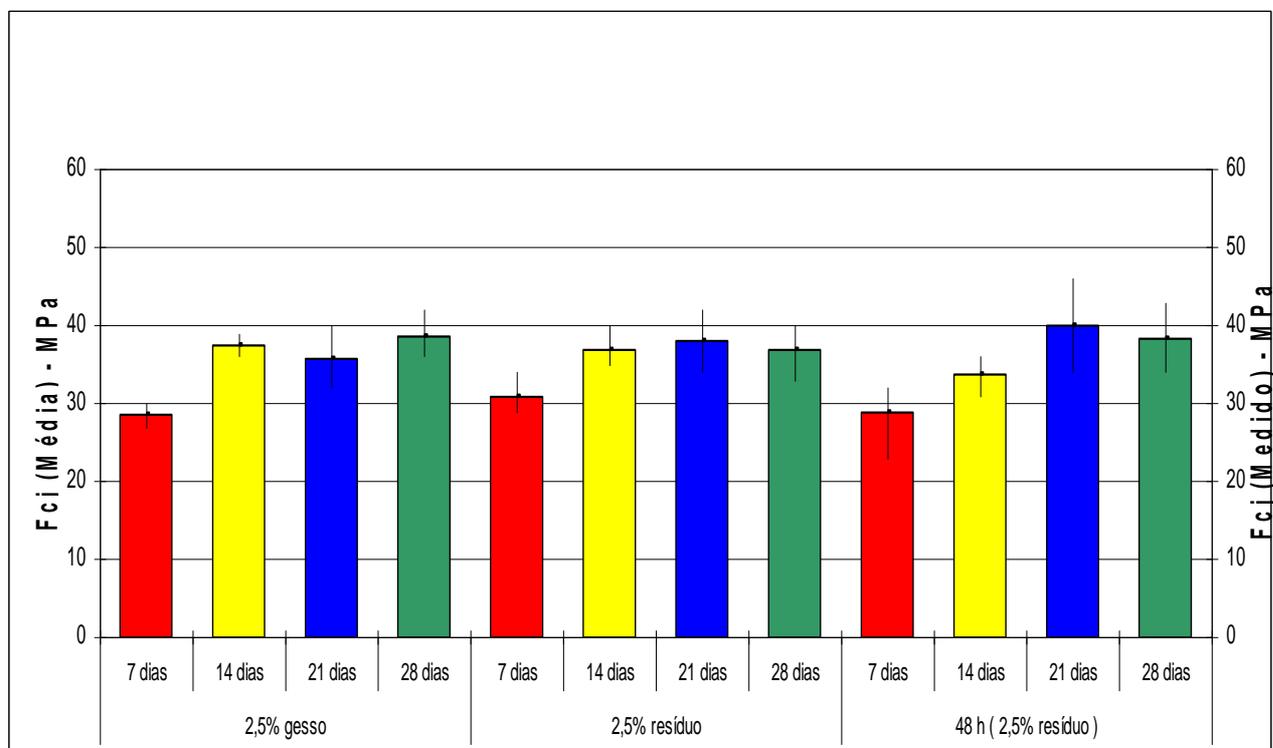


Figura 4.3– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 2,5% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 5, 6 e 7).

A figura 4.3 apresenta a comparação dos traços contaminados com 2,5% de gesso e de resíduo de gesso (não submerso e submerso por 48h). Os valores obtidos da resistência à compressão dos microconcretos quando comparados entre si, nas mesmas idades não apresentaram variações expressivas. Sendo assim, nessa proporção a utilização do resíduo ou do gesso não ocasiona diferenças de resistência. Quando comparados esses valores com os da figura 4.1, observa-se que o traço sem adição também apresentou valores superiores.

Já na correlação dos valores dessa figura com os da 4.2, nota-se que a taxa de crescimento com o avanço das idades foi menor, provavelmente devido ao consumo de cimento ser maior nesse caso.

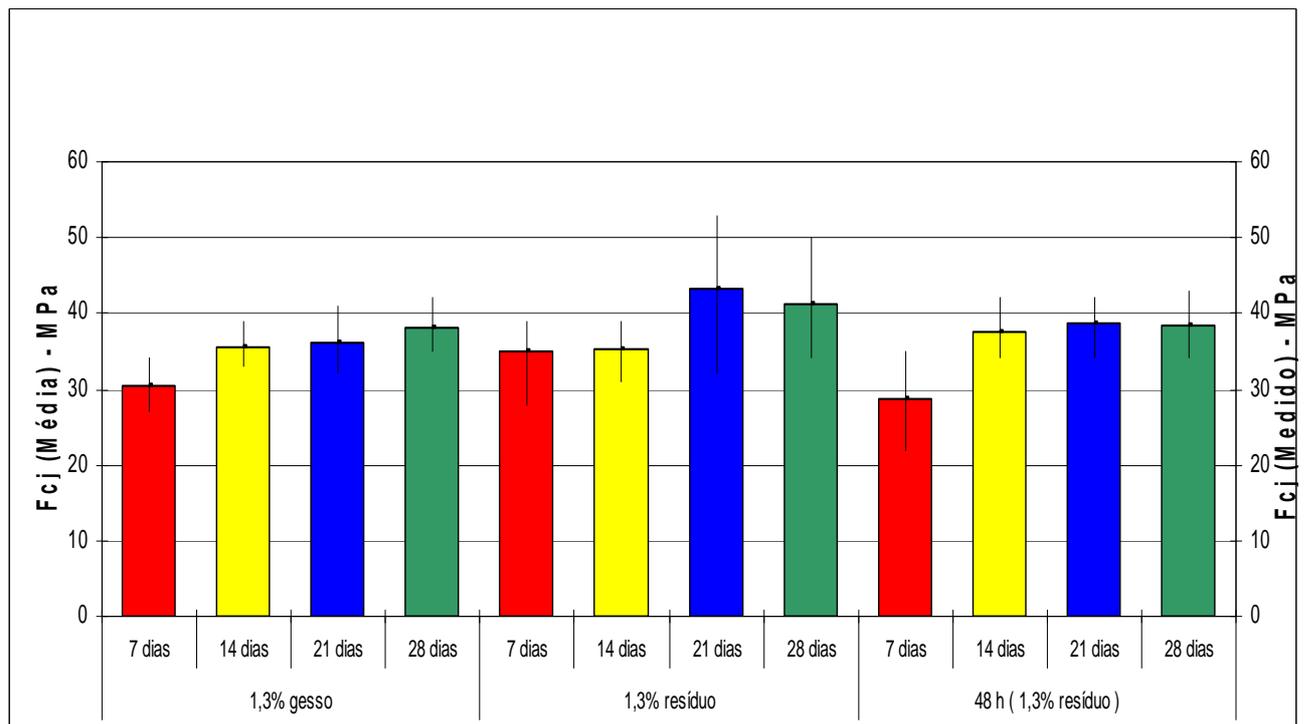


Figura 4.4– Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 1,3% nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias (traços 8, 9 e 10).

Nos traços analisados na figura 4.4, contaminados com 1,3% de gesso e resíduo (não submerso e submerso por 48h), nota-se que os resultados de resistência do traço com resíduo, aos 21 e 28 dias, apresentaram valores superiores aos demais. Porém, percebe-se que ocorreu algum problema nesses corpos de prova, pois as diferenças dos valores lidos (maior e menor valor) apresentaram grandes distorções. Logo, os resultados obtidos podem ser descartados. Analisando os demais traços (gesso e resíduo hidratado por 48h), em todas as idades, nota-se que não apresentaram discrepâncias entre si, sendo os valores e a evolução da resistência muito próximos no decorrer das idades.

Esses traços quando comparados com os outros com contaminantes de gesso, 3,8% e 2,5% (figuras 4.2 e 4.3), também apresentaram diferenças na evolução da taxa de crescimento. Porém, nesse caso, essa evolução é mais parecida com a dos microconcretos sem adição (figura 4.1). Isso se deve a dois fatores: o primeiro é que o índice de contaminação (1,3%) está muito próximo ao sugerido por AGOPYAN *et al.* (2005), por isso não ocorreram grandes alterações. O outro é que o consumo de cimento nesse traço é mais próximo do consumo do traço sem adição.

A tabela 4.5 e as figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos (valores médios e valores medidos) dos microconcretos no ensaio de resistência à compressão, na idade de 28 dias e após cura acelerada em água aos 150 dias. Devido a problemas experimentais, não foi possível determinar o valor da resistência para os microconcretos com 3,8% de resíduo hidratado por 48 horas na idade de 150 dias. A identificação dos traços está apresentada no quadro 3.3.

Tabela 4.5- Valores de resistência à compressão das amostras após cura acelerada aos 150 dias.

Traço	Abrev.	Resistência à Compressão dos Corpos de Prova (MPa)			Média
		CP 1	CP 2	CP 3	
1	SG	40,00	43,00	43,00	42,00
2	3,8G	39,00	36,00	30,00	35,00
3	3,8RG	21,00	22,00	18,00	20,33
4	3,8RG48	-	-	-	-
5	2,5G	30,00	33,00	38,00	33,67
6	2,5RG	25,00	29,00	25,00	26,33
7	2,5RG48	34,00	36,00	31,00	33,67
8	1,3G	36,00	28,00	37,00	33,67
9	1,3RG	40,00	30,00	44,00	38,00
10	1,3RG48	32,00	38,00	28,00	32,67

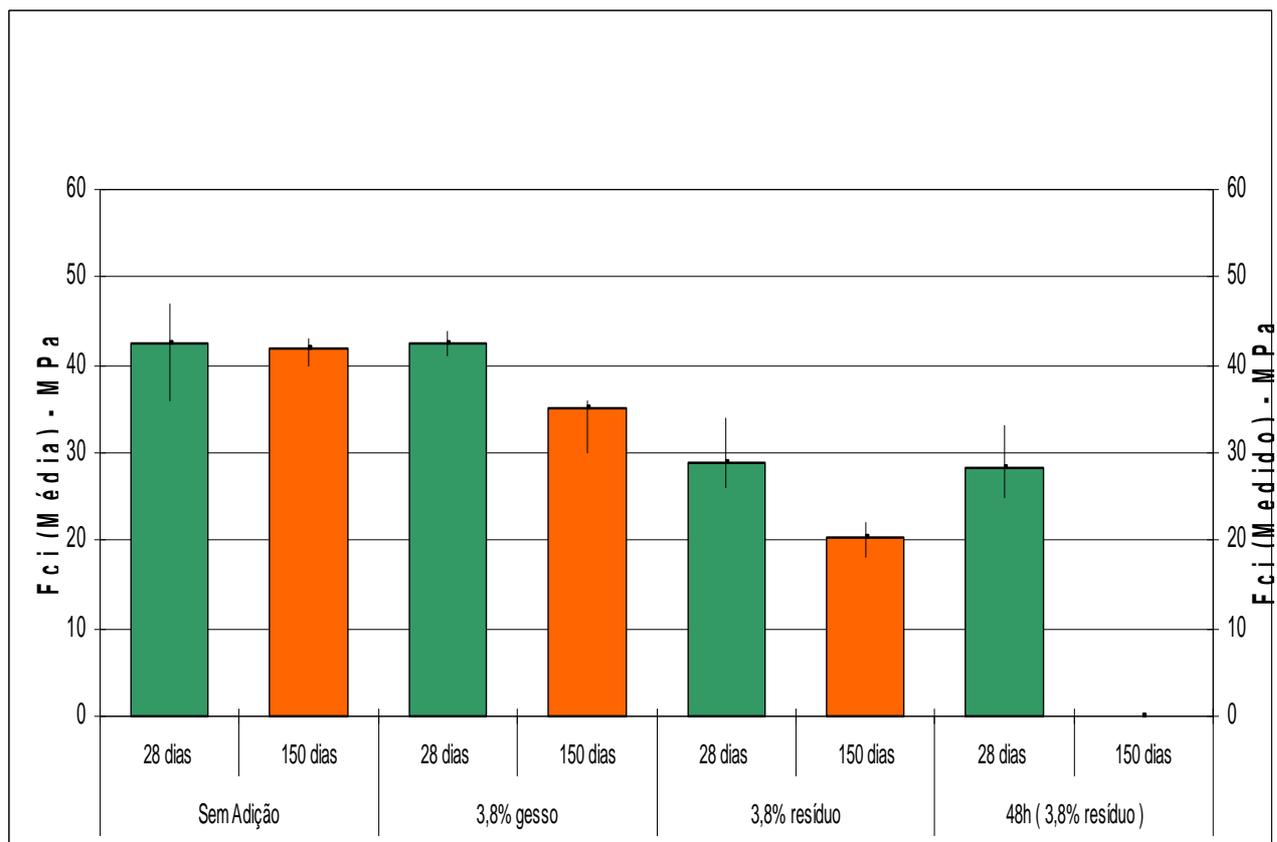


Figura 4.5- Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos sem adição e contaminados com 3,8% nas idades de 28 dias e após cura acelerada em água aos 150 dias (traços 1, 2, 3 e 4).

Na figura 4.5, nota-se que os microconcretos sem adição continuaram com os mesmos valores de resistência nas duas idades apresentadas, o que indica que o concreto não foi afetado pela presença da umidade. Além disso, esses dados são os esperados, em função do cimento utilizado na confecção dos corpos de prova ser do tipo CP V, que possui um crescimento de resistência conforme figura 2.30 (DURANTE, 2001). Porém, nos resultados dos traços produzidos com contaminantes observa-se uma sensível redução da resistência entre as idades comparadas (17 e 30%). Essa redução pode ser explicada devido ao fato dos microconcretos possuírem uma grande quantidade de sulfato presente como contaminante no agregado, que em contato com a umidade, reage com o aluminato de cálcio hidratado formando a etringita conforme equação 2.12. Segundo THOMAZ (2003), essa etringita tem como característica uma expansibilidade devido à quantidade de água necessária para sua cristalização, o que resulta numa perda de resistência devido à formação de pequenas fissuras na pasta endurecida de cimento ao redor da etringita.

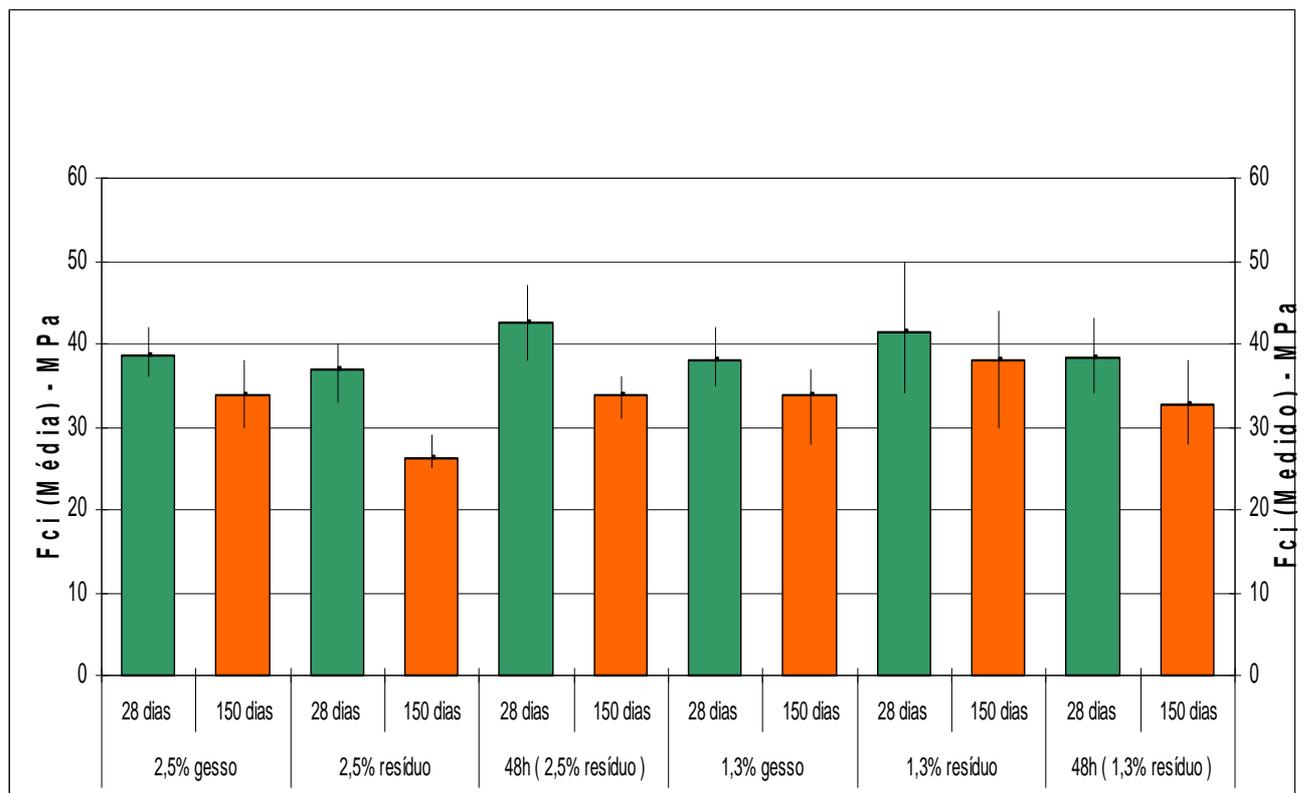


Figura 4.6- Comparação dos resultados de resistência à compressão para os microconcretos contaminados com 2,5% e 1,3% nas idades de 28 dias e após cura acelerada em água aos 150 dias (traços de 5 a 10).

Analisando a figura 4.6, pode-se concluir que os microconcretos analisados na idade de 150 dias, fabricados com contaminantes de gesso (1,3 e 2,5%), apresentaram redução dos valores de resistência para todos os traços (entre 8% a 29%). Esse fato é devido à formação de etringita, conforme explicado anteriormente, segundo THOMAZ (2003). Comparando os índices obtidos de redução de resistência à compressão do traço de 2,5% de gesso com 1,3% de gesso, nota-se que este último apresentou uma redução menor dos valores de resistência. Isso pode ser explicado pelo fato do índice de contaminante ser pequeno, próximo ao índice informado por AGOPYAN *et al.* (2005). A mesma análise pode ser feita nos traços de resíduo e de resíduo hidratado por 48h.

Os valores obtidos de resistência para esses traços (figura 4.6), quando comparados com os dos microconcretos com contaminantes com 3,8% de gesso (figura 4.5), também apresentaram reduções nos valores de resistência. Porém, as porcentagens dessas reduções foram maiores quando comparados com os índices de 2,5 e 1,3%.

4.2 Ensaio de Absorção

Os resultados dos trinta ensaios de absorção (três corpos de prova para cada um dos dez traços estudados), na idade de 31 dias são apresentados na tabela 4.6 e na figura 4.7. A identificação dos traços está apresentada no quadro 3.3.

Tabela 4.6- Resultados de absorção das amostras de microconcretos na idade de 31 dias (ABNT-NBR NM 65, 2003).

Traço	Abrev.	CP's	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Absorção (%)	Média
1	SG	1	377,20	418,00	10,82	10,24
		2	378,70	417,30	10,19	
		3	384,20	421,50	9,71	
2	3,8G	1	369,00	414,50	12,33	11,87
		2	376,50	418,60	11,18	
		3	370,50	415,30	12,09	
3	3,8RG	1	355,70	399,30	12,26	11,15
		2	360,00	399,00	10,83	
		3	356,00	392,90	10,37	
4	3,8RG48	1	364,10	415,00	13,98	12,52
		2	373,60	417,30	11,70	
		3	373,20	417,60	11,90	
5	2,5G	1	374,40	422,70	12,90	12,61
		2	373,00	421,60	13,03	
		3	380,00	425,20	11,89	
6	2,5RG	1	365,20	413,90	13,34	13,30
		2	362,40	412,00	13,69	
		3	364,80	411,80	12,88	

		1	369,40	418,40	13,26	
7	2,5RG48	2	364,40	407,70	11,88	12,40
		3	370,30	414,90	12,04	
		1	377,90	423,20	11,99	
8	1,3G	2	376,10	422,00	12,20	12,16
		3	375,20	421,30	12,29	
		1	376,00	417,80	11,12	
9	1,3RG	2	375,80	418,60	11,39	11,46
		3	369,90	413,80	11,87	
		1	376,90	418,40	11,01	
10	1,3RG48	2	370,30	413,70	11,72	11,76
		3	370,20	416,70	12,56	

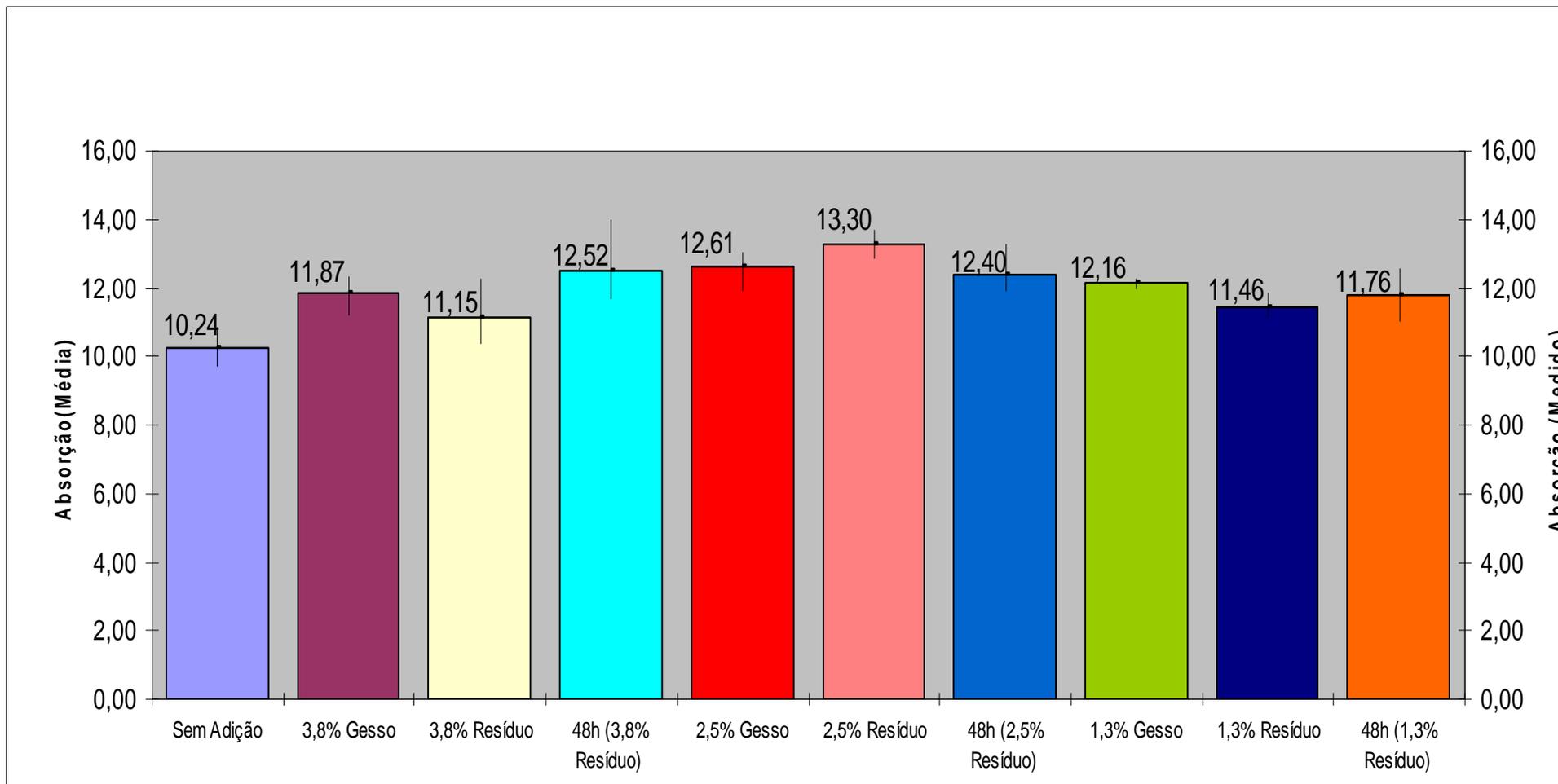


Figura 4.7– Resultados da absorção das amostras de microconcretos na idade de 31 dias.

Na figura 4.7, observa-se que todos os microconcretos apresentaram resultados de absorção menores que o mínimo estabelecido pela norma NBR NM 65 (15%). Como era de se esperar, a amostra sem adição apresentou um resultado melhor que os demais, visto que a quantidade de cimento, conforme quadro 3.4 é maior que as demais amostras. Os valores dos microconcretos com resíduo/gesso, obtiveram valores diferentes, variando conforme a quantidade de adição e o material, porém com diferenças muito pouco significativas. Também nota-se que nos traços que utilizaram o resíduo que foi submerso por 48 horas em água, não houve modificação substancial quando comparados com os traços com resíduo nas mesmas proporções. Em função da natureza do ensaio, os valores obtidos podem ser considerados próximos.

4.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, como já citado anteriormente, foi realizado nos dez traços aos 7, 14 e 28 dias. Em cada amostra foram ensaiados 3 corpos de prova, que passaram por 10 medições em cada uma dessas idades. A média dessas medições é apresentada nas tabelas e gráficos a seguir. Os valores obtidos para a idade de 7 dias estão apresentados na tabela 4.7. A identificação dos traços está apresentada no quadro 3.3.

Tabela 4.7- Resultados do módulo de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 7 dias.

Traço	Abrev.	E_d Média (GPa)	E_d Máximo (GPa)	E_d Mínimo (GPa)
1	SG	29,62	32,81	28,23
2	3,8G	26,18	29,87	18,16
3	3,8RG	18,12	19,12	17,46
4	3,8RG48	24,65	27,51	18,88
5	2,5G	25,47	27,04	20,04
6	2,5RG	23,65	24,65	23,06
7	2,5RG48	25,63	27,36	24,63
8	1,3G	26,11	26,79	24,62
9	1,3RG	27,96	28,19	26,44
10	1,3RG48	28,34	28,79	27,57

Nas tabelas 4.8 e 4.9 são apresentados os valores obtidos do módulo de elasticidade dinâmico dos microconcretos para as idades 14 e 28 dias, respectivamente. E nas figuras 4.8 a 4.11 estão apresentados os gráficos dos resultados das idades 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Tabela 4.8- Resultados dos módulos de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 14 dias.

Traço	Abrev.	E_d Média (GPa)	E_d Máximo (GPa)	E_d Mínimo (GPa)
1	SG	30,09	32,15	28,86
2	3,8G	27,82	30,13	26,17
3	3,8RG	19,68	18,13	18,13
4	3,8RG48	24,99	28,00	20,02
5	2,5G	25,98	27,10	24,74
6	2,5RG	24,39	24,93	23,72
7	2,5RG48	25,96	27,48	25,05
8	1,3G	26,36	26,97	25,54
9	1,3RG	27,93	28,30	27,61
10	1,3RG48	28,96	29,60	28,22

Tabela 4.9- Resultados dos módulos de elasticidade dinâmico das amostras para a idade de 28 dias.

Traço	Abrev.	E_d Média (GPa)	E_d Máximo (GPa)	E_d Mínimo (GPa)
1	SG	29,46	31,03	28,10
2	3,8G	27,50	30,03	25,99
3	3,8RG	20,13	20,90	19,34
4	3,8RG48	25,09	27,16	21,30
5	2,5G	26,02	30,45	23,92
6	2,5RG	24,23	24,61	23,59
7	2,5RG48	25,87	27,62	24,95
8	1,3G	25,64	26,19	25,17
9	1,3RG	27,31	27,57	27,01
10	1,3RG48	28,57	29,15	27,85

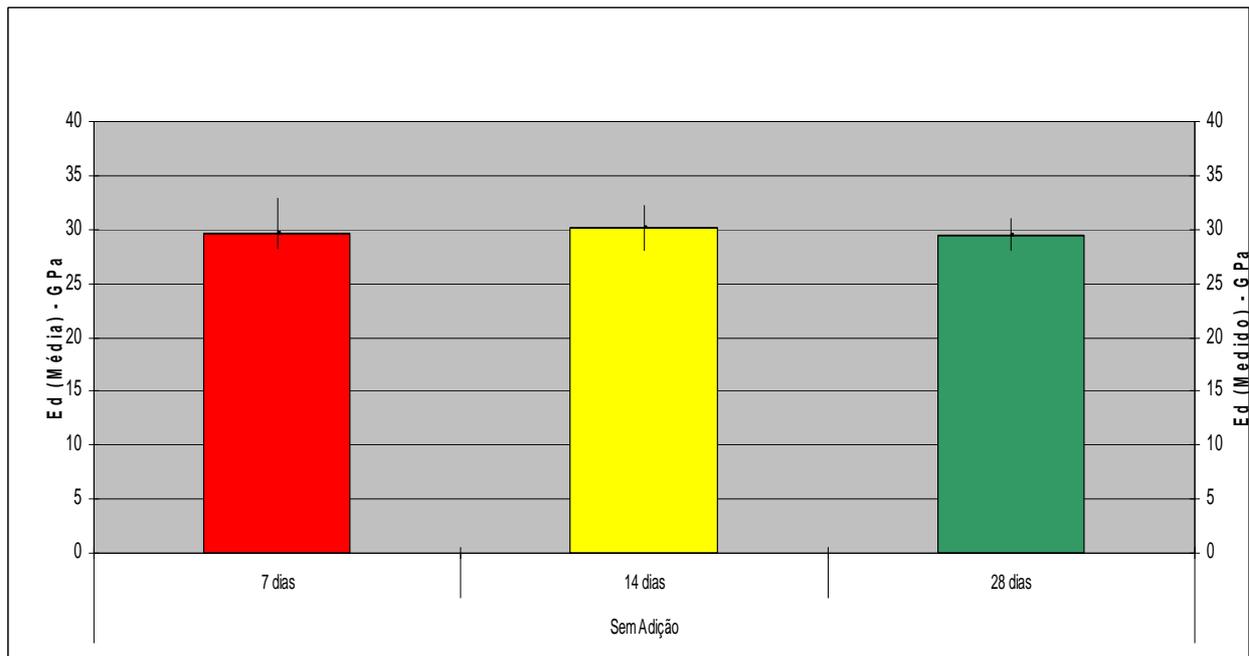


Figura 4.8– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos sem adição nas idades de 7, 14 e 28 dias (traço 1).

A figura 4.8 apresenta a comparação dos resultados do módulo de elasticidade para os microconcretos sem adição nas idades de 7, 14 e 28 dias. O traço apresentou nas três idades um módulo quase constante, o que também já era de se esperar pelo fato do cimento utilizado ser um CP V – Ultra Rápido, que atinge resistência desejada em um curto espaço de tempo.

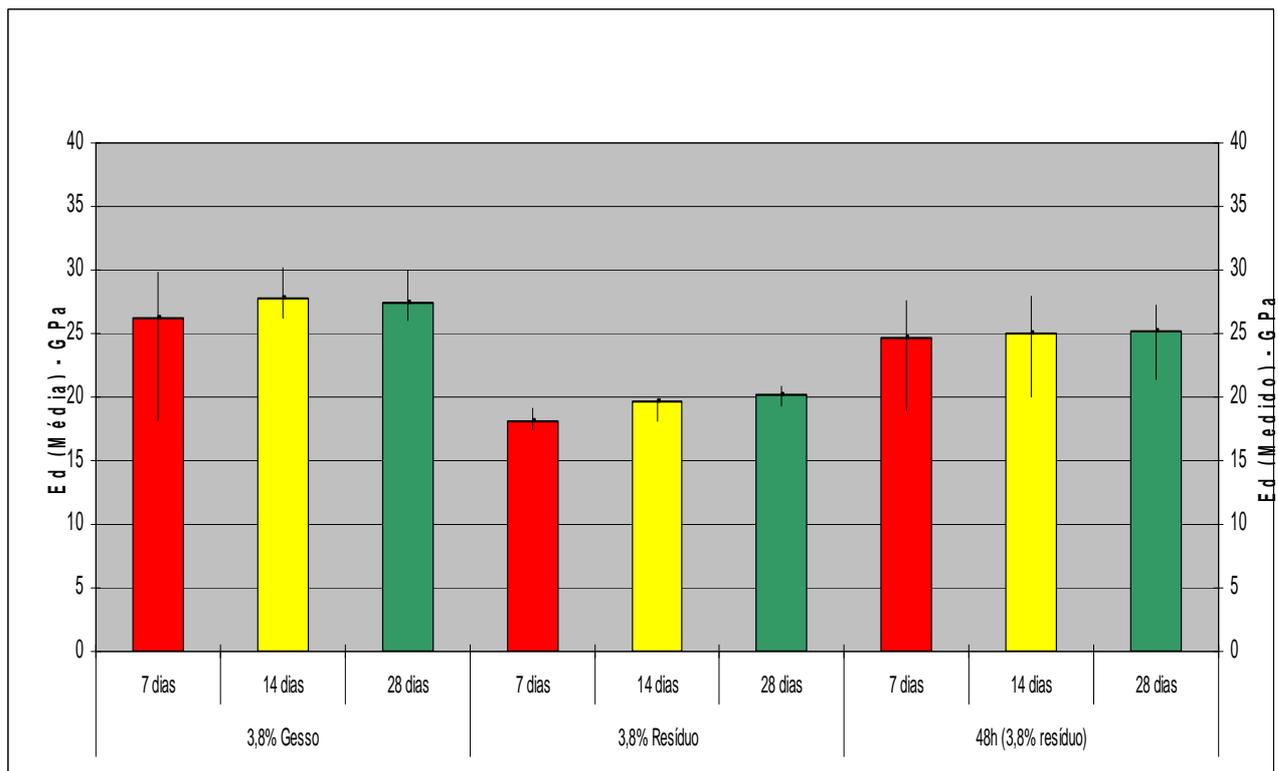


Figura 4.9– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 3,8% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 2, 3 e 4).

Os módulos de elasticidade dinâmico dos microconcretos com 3,8% de gesso ou resíduo (não submerso e submerso por 48h), que estão apresentados na figura 4.9 quando comparados entre si apresentaram diferenças. O traço com 3,8% de resíduo apresentou uma discrepância nos valores quando comparado com os demais. Em todos os autores consultados para a execução desta dissertação, não foi encontrada justificativa para tal fato. Seria interessante que os testes fossem refeitos, de modo a eliminar dúvidas referentes ao procedimento experimental. Já os resultados do módulo de elasticidade dinâmico dos microconcretos com 3,8% de gesso, comparados com os de resíduo submerso por 48 horas, apresentaram valores superiores em todas as idades. Isso poderia indicar que o gesso quando introduzido no traço se encontrava semi-hidratado (não hidratado). O contato desse gesso com a água do concreto fresco levaria a uma hidratação instantânea, ocasionando uma diminuição do fator a/agl , o que geraria, assim, um ganho nos valores do módulo de elasticidade dinâmico.

Quando comparados com os valores da figura 4.8 observa-se que os valores do módulo com adição de 3,8% foram inferiores aos do sem adição em todas as idades; isso poderia estar relacionado às variações do consumo de cimento em cada traço.

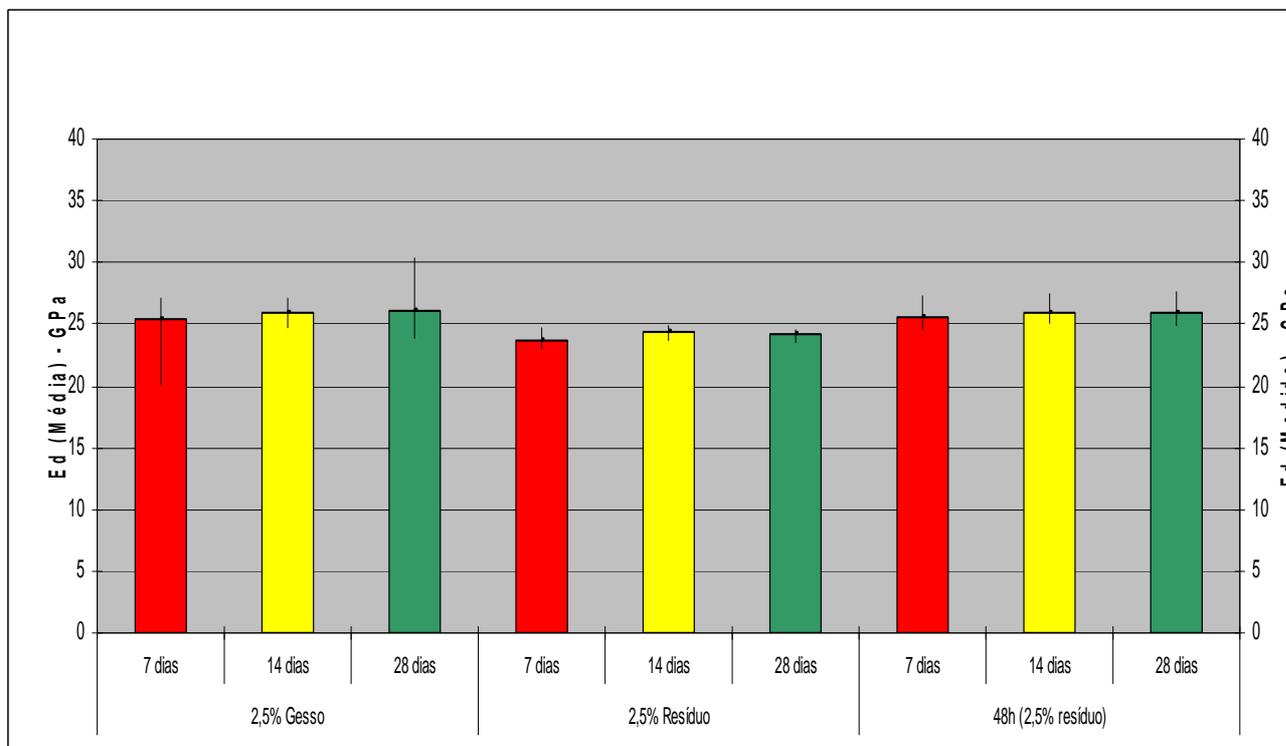


Figura 4.10– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 2,5% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 5, 6 e 7).

Estudando a comparação dos valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico dos microconcretos contaminados com 2,5% de gesso e resíduo (não submerso e submerso por 48h), figura 4.10, observa-se que os valores obtidos dos microconcretos quando comparados entre si, nas mesmas idades, não apresentaram variações expressivas. Sendo assim, nessa proporção a utilização do resíduo ou do gesso não ocasiona diferenças. Quando comparados esses valores com os da figura 4.8, observa-se que o traço sem adição também apresentou valores superiores, devido à maior quantidade de cimento e a falta de contaminantes no traço.

Correlacionando esta figura com a figura 4.9, nota-se que a taxa de crescimento com o avanço das idades foi menor, devido a um maior consumo de cimento e menor índice de contaminante.

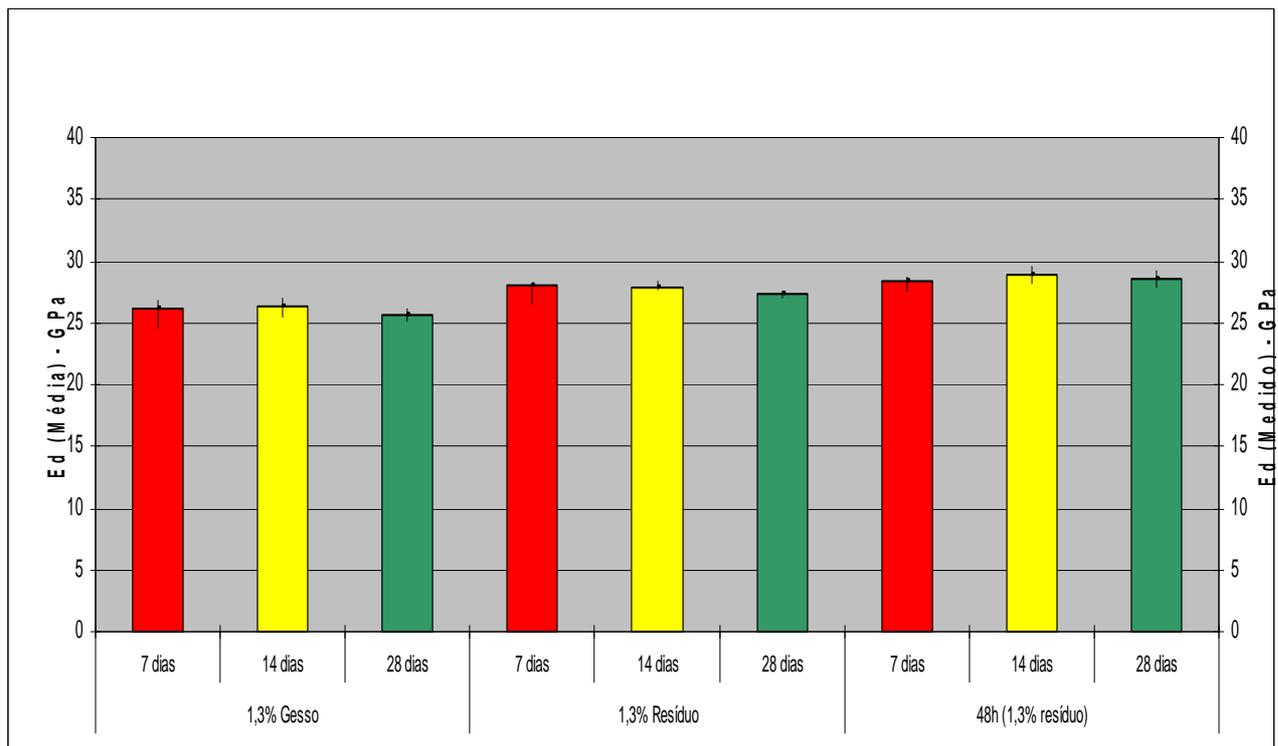


Figura 4.11– Comparação dos resultados do módulo de elasticidade dinâmico para os microconcretos contaminados com 1,3% de gesso/resíduo nas idades de 7, 14 e 28 dias (traços 8, 9 e 10).

Os traços da figura 4.11, contaminados com 1,3% de gesso e resíduo (não submerso e submerso por 48h), também não apresentaram variações expressivas na comparação entre si. Portanto, nessa proporção a utilização do resíduo ou do gesso não ocasiona diferenças substanciais nos valores dos módulos de elasticidade dinâmico. Esses traços quando comparados com os da figura 4.8, também não apresentaram grandes diferenças na taxa de crescimento e nem nos seus valores relativos. As justificativas para esses fatos são o baixo índice de contaminação, próximo ao sugerido por AGOPYAN *et al.* (2005) e o consumo de cimento ser próximo aos dos traços de microconcretos sem adições.

Quando comparados com os valores obtidos do módulo nos traços apresentados na figura 4.10, os microconcretos contaminados com 1,3% de gesso, resíduo de gesso e resíduo de gesso hidratado por 48h, apresentaram uma diferença pequena na evolução e nos valores, obtiveram desempenhos análogos. Já para os traços da figura 4.9, nota-se que a taxa de crescimento com o avanço das idades foi menor, também devido a um maior consumo de cimento e um menor índice de contaminante.

4.4 Ensaios de Tempo de Pega

Os ensaios de tempo de pega, com os valores de início e fim de pega, estão apresentados na tabela 4.10 e na figura 4.12 com os valores das dez amostras de microconcretos. Como dito no item 3.2.5, o procedimento foi executado com teores de 28% de água para todas as amostras, sendo este ensaio conforme a ABNT, NBR NM 65 (2003). A identificação dos traços está apresentada no quadro 3.5.

Tabela 4.10- Tempos de pega das dez amostras de microconcretos.

Traço	Abrev.	Tempo de Pega	
		Início (h)	Fim (h)
1	SG	02:35	03:13
2	15%G	00:35	01:26
3	15%RG	00:10	00:18
4	15%RG48	01:40	02:26
5	10%G	01:58	03:28
6	10%RG	01:56	03:11
7	10%RG48	01:44	02:06
8	5%G	02:00	02:35
9	5%RG	02:15	02:50
10	5%RG48	02:15	02:53

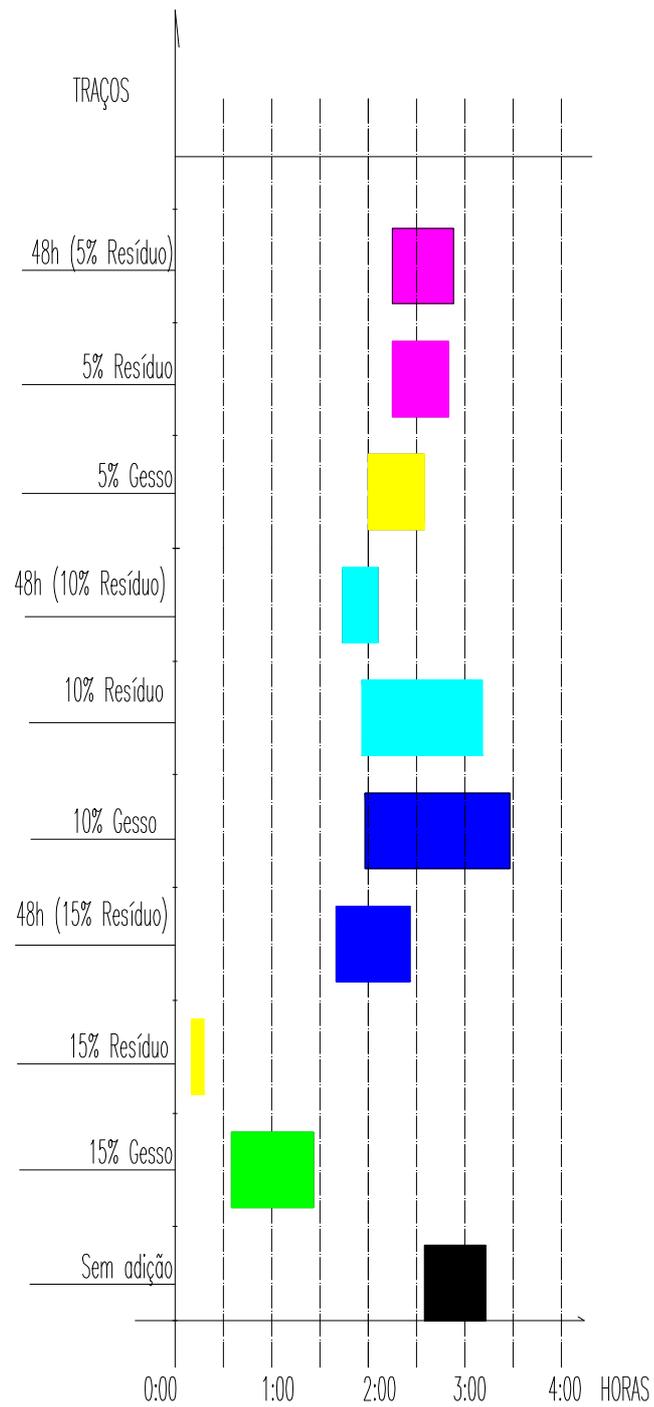


Figura 4.12– Resultados dos tempos de pega dos dez traços de microconcretos.

Segundo a literatura (BALTAR *et al.*, 2004; YOUNG *et al.*, 1998; MEHTA e MONTEIRO, 1994), o gesso entra na fabricação do cimento para retardar o tempo de pega. Contudo, analisando os resultados obtidos na figura 4.12, nota-se que em todas as amostras houve um aumento do início de pega. Isso pode ser explicado, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), quando um cimento possui uma maior quantidade de hemidrato em sua composição; a fase aquosa conterá uma baixa concentração de íons de aluminato, mas ficará rapidamente supersaturada com respeito aos íons cálcio e sulfato. Essa situação conduz a uma rápida formação de grandes cristais de gipsita com uma correspondente perda de consistência, sendo esse fenômeno denominado de falsa pega. Assim, o ensaio não contribuiu para a análise da influência da contaminação do gesso no tempo de pega dos microconcretos.

5 CONCLUSÕES

A análise dos resultados dos microconcretos indica que:

1- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água e tempo de pega dos microconcretos sem adição de gesso apresentaram valores e evoluções em todas as idades condizentes com os da literatura.

2- A contaminação com gesso (semi-hidratado) na proporção de 3,8%:

- promoveu a redução da resistência à compressão e mudança na evolução da resistência conforme os dias de ensaio quando comparado com a amostra sem adição;
- após a cura acelerada na idade de 150 dias, reduziu os valores de resistência, o que pode ser explicado pela formação da etringita, o que nessa idade é nociva ao concreto;
- levou à diminuição dos valores do módulo de elasticidade dinâmico;
- não influenciou na permeabilidade do concreto avaliado pelo ensaio de absorção de água.

3- As contaminações com resíduo de gesso hidratado na proporção de 3,8% e com essa mesma proporção submersa por 48 horas apresentaram resultados análogos:

- redução significativa dos valores de resistência à compressão, quando comparados com os valores obtidos com a mesma proporção de contaminantes de gesso e com o traço sem adição. Também ocorreu uma mudança da evolução da taxa de crescimento da resistência ao longo dos dias de ensaio, quando comparada com a amostra sem adição;
- após a cura acelerada na idade de 150 dias, os resultados apresentaram uma redução dos valores de resistência, o que pode ser explicado pela formação da etringita, que nessa idade é nociva ao concreto. Para o traço com resíduo hidratado não foi possível a realização desse ensaio;

- diminuição do valor do módulo de elasticidade dinâmico;
- quanto à permeabilidade, não houve influência nos resultados analisados pelo ensaio de absorção de água dos microconcretos.

4- Os traços com contaminação em índices de 2,5% de contaminantes de gesso, resíduo de gesso e do resíduo submerso durante 48 horas apresentaram os seguintes aspectos:

- redução dos valores e mudança da evolução da taxa de crescimento da resistência à compressão conforme os dias de ensaio, quando comparados à amostra sem adição;
- após a cura acelerada na idade de 150 dias, houve uma redução dos valores de resistência, o que pode ser explicado pela formação da etringita, nociva ao concreto nessa idade;
- diminuição do valor do módulo de elasticidade dinâmico;
- no que diz respeito à permeabilidade, essas contaminações não ocasionaram influência no ensaio de absorção de água.

5- A contaminação com índices de 1,3% de contaminantes de gesso, resíduo de gesso e do resíduo submerso durante 48 horas, acarretou em uma evolução na taxa de crescimento e em valores próximos aos resultados dos microconcretos sem adição, em todas as idades ensaiadas, tanto para a resistência à compressão, quanto para módulo de elasticidade dinâmico e absorção. Porém, na idade de 150 dias ocorreu uma redução de resistência, devido à formação de etringita, mesmo com contaminante em índice muito mais baixo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Como sugestões para trabalhos futuros, avaliando a utilização de microconcretos fabricados com agregados contaminados por resíduos de gesso, propõem-se:

- Avaliação microestrutural e mineralógica (MEV/EDS, DRX, FRX) de concretos fabricados com e sem adições de contaminantes de gesso;
- Análise quantitativa e química do índice de contaminantes presentes nos agregados reciclados (RCDs);
- Estudo de formas para reaproveitamento de resíduos de gesso na indústria da construção civil;
- Estudo de formas para a redução da geração de resíduos de gesso no processo de execução do serviço de revestimento de gesso.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, Anne K., PILEGGI, Rafael, SILVA, Valdineia dos S., JOHN, Vanderley M. Resíduos de Gesso - Desafios e Oportunidades. **Anais do Seminário Gestão e Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição - Avanços Recentes e Desafios Futuros**. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2005.

AGUIAR, G. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004. 310 p.

ALVES, Mary M. S., ROCHA, Marcus V. O., BORJA, Edilberto V. Processo Produtivo de Revestimento de Gesso: Análise e Estimativa de Geração de Resíduos. **I Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica (CONNEPI 2006)**. Natal, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) **C215** of 2002: *Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens*.

ANTUNES, Rubiane P. N., JOHN, Vanderley M., ANDRADE, Artemária C. Produtividade dos Revestimentos em Gesso: Influência das Propriedades do Material. **I Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade e Organização do Trabalho**, Recife, 1999.

ATECEL / ADENE- PE. **Relatório Final: Diagnostico Energético do Setor Industrial da Meso Região de Araripina**, junho de 2006. Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/2F6F3AECA42AE2558325735A006800FC/\\$File/NT000360FA.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/BDS.nsf/2F6F3AECA42AE2558325735A006800FC/$File/NT000360FA.pdf)>. Acesso em: 27 de dezembro de 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial- Elaboração**. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: *Cimento Portland Pozolânico*. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: *Informação e documentação – Referências - Elaboração*. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**: *Sumário*. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: *Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão*. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: *Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: *Apresentação de citações em documentos*. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: *Gesso para Construção – Determinação das propriedades mecânicas*. Rio de Janeiro, 1991c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12130**: *Gesso para Construção – Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico*. Rio de Janeiro, 1991d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: *Gesso para Construção Civil*. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13867**: *Revestimento Interno de Paredes e Tetos com Pasta de Gesso – Materiais, preparo, aplicação e acabamento*. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: *Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação*. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112**: *Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65**: *Cimento Portland – Determinação do tempo de pega*. Rio de Janeiro, 2003.

BALTAR, Carlos A. M., BASTOS, Flávia F., LUZ, Adão B. Diagnóstico do Pólo Gesseiro de Pernambuco (Brasil) com Ênfase na Produção de Gipsita para Fabricação de Cimento. **IV JORNADAS IBEROAMERICANAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**. Ponencias y Comunicaciones, Tegucigalpa: 2004. Pág. 01-10.

BALTAR, Carlos A. M.; BASTOS, Flávia F., LUZ, Adão B.. Gipsita. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). CT2005-122-00 - **Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações** - Pág. 449 a 470- Rio de Janeiro, 2005.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção 1**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A. 1994. 435 p.

CANUT, Mariana M. Cavalcanti. **Estudo de Viabilidade do Uso do Resíduo Fosfogesso como Material de Construção**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2006. 154 p.

CARVALHO, Adriano dos Guimarães. **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. Dissertação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE). 2002. 134 p.

CIÊNCIA QUÍMICA - Fabricação de Cimento. Disponível em: <<http://www.cienciaquimica.hpg.ig.com.br/interessante/cimento/cimento.htm>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2007.

CINCOTTO, M.A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M.C. **O gesso como material de construção – composição química (1ª parte)**. In: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Tecnologia das Edificações. São Paulo, 1985. Pág. 23-26.

CLIFTON, J. R. **Some aspects of the setting and hardening of gypsum plaster.** *NBS Technical Note 755*, 1973. *apud* ANTUNES, Rubiane P. N., JOHN, Vanderley M., ANDRADE, Artemária C.. **Produtividade dos Revestimentos em Gesso: Influência das Propriedades do Material. I Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade e Organização do Trabalho**, Recife, 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 01 de janeiro de 2007.

COUTINHO, Joana de Sousa. **Ciência de Materiais - Ligantes e Agregados.** Texto de apoio às aulas teóricas de Ciência de Materiais, 2002 da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto Portugal. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano1/CienciaDosMateriais/apontamentos/teorica_20022003/JSC_044a064.pdf>. Acesso em: 05 de janeiro de 2008.

DANA, J.D. **Manual de Mineralogia.** v.1. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1969. 642 p.

DNPM 2005 – Departamento Nacional da Produção Mineral. **Sumário Mineral – Gipsita**, 2005. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br//mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=536>. Acesso em: 03 de março de 2007.

DOMÍNGUEZ, L.V. e SANTOS, A.G. **Manual del Yeso.** Madrid: Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY), 267 p. 2001 *apud* BALTAR, Carlos A. M.; BASTOS, Flávia F., LUZ, Adão B.. **Gipsita. CETEM (Centro de Tecnología Mineral). CT2005-122-00 - Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações** - Pág. 449 a 470- Rio de Janeiro, 2005.

DURANTE, Rogério. **Notas de Aula – ST304 – Materiais de Construção 1-Aglomerantes.** CESET/UNICAMP, Limeira 2001. Disponível em: <<http://www.ceset.unicamp.br/ST304-%20Notas%20de%20Aula-AP03Rogerio%20Durante%20-%20Aglomerantes%20Ces.pdf>>. Acesso em: 25 de outubro de 2007.

ESTRADA, M., ALONSO, E., CHÁVEZ, L. E., CHÁVEZ, L., MARTÍNEZ, W., RUBIO, J. C., VELASCO, F. y ÁVALOS M. Hidratación del Cemento Pórtland, fase Etringita; Monosulfatos y Trisulfatos. **1º Foro Académico de la DES de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**. De 30 de noviembre a 2 de diciembre 2005. Morelia, Michoacán, México.

GUIANET. Disponível em: <<http://www.guianet.com.br/pe/mapape.htm>>. Acesso em: 01 de março de 2007.

HINCAPIÉ, A. M., OLIVEIRA, C. T. A., CINCOTTO, M. A., SELMO, S. M. *Revestimento de Gesso I*. **Téchne**, n. 21, mar/abr. Pág. 44-47, 1996a.

HINCAPIÉ, A. M., OLIVEIRA, C. T. A., CINCOTTO, M. A., SELMO, S. M. *Revestimento de Gesso II*. **Téchne**, n. 22, mai/jun. Pág. 49-52, 1996b.

IGLESIAS, J. Garcia, ÁLVAREZ, M. Mendez, RODRÍGUEZ, J. Egochega. Influence of gypsum's mineralogical characteristics on its grinding behaviour applied to cement fabricatio. **Cement and Concrete Research** 29 (1999). Artigo.

INGENOR. Disponível em: <<http://www.ingenor.com.br/>>. Acesso em: 27 de dezembro de 2007.

JOHN, Vanderley M., CINCOTTO, Maria Alba. **Alternativa de Gestão dos Resíduos de Gesso** - USP – Universidade de São Paulo: Escola Politécnica: Departamento de Engenharia de Construção Civil – PCC. 2003.

KAEFER, Luis Fernando. **Considerações sobre a microestrutura do concreto**, Sd. Disponível em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/people/lfk/download/pef5736.pdf>>. Acesso em: 15 de março de 2008.

LEVY, S. M., Helene, P. R. L. **Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. 2002.

LUZ, A.B., BALTAR, C.A.M., FREITAS, E.J.G. e SILVA, A.P. **Mineração São Jorge. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**. Sampaio, J.A.; Luz, A.B. e Lins, F.A.F. (Editores). Pág.241-249. 2001.

LYRA, Antônio Christino. **O Mercado de Gipsita e Gesso no Brasil**. 2002. Disponível em: <<http://www.prossiga.br/gesso/>>. Acesso em: 06 de março de 2007.

LYRA SOBRINHO, Antônio C.P., AMARAL, Antônio José Rodrigues, DANTAS, José O. C., DANTAS, José R. A. **Gipsita. – Balanço Mineral Brasileiro**, 2001.

MAEDA, Fanny M.; SOUZA, Ubiraci E. L.. Produtividade da Mão de Obra e Materiais na Execução de Revestimento em Pasta de Gesso Aplicado sobre Paredes Internas de Edificações. **VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC, 2000)**. Salvador.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 581 p.

MELO, Juliana O. **Desenvolvimento de Procedimentos de Controle e Acompanhamento de Sistemas Construtivos em Alvenaria de Blocos de Gesso, Forro Liso em Placas e Revestimento Manual**. Trabalho final da Disciplina de Estágio Supervisionado da Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, março de 2005.

MUNHOZ, Fabiana Costa; RENOFIO, Adilson. Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para a P+L – **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP 2007)**. Foz do Iguaçu: de 09 a 12 de outubro de 2007.

NIGLIO, Felipe e CAMARINI, Gladis. *Viabilização Técnica e Econômica da Reciclagem dos Resíduos de Gesso*. **XIII Congresso Interno de Iniciação Científica da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - FEC, UNICAMP**, 28 e 29 de setembro de 2005. Disponível em: <<http://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xiiicongresso/painéis/016046.pdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.

NITA, Clovis, PILEGGI, Rafael G., CINCOTTO, Maria Alba, JOHN, Vanderley M. Estudo da Reciclagem do Gesso de Construção. **I Conferência Latino-americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC 04)**. De 18 a 21 de julho 2004, São Paulo.

NOVO DE MIGUEL, Luciano. **El yeso en la construccion**. Barcelona: editora CEAC, Espanha, 1963. 174 p.

PERES, L.; BENACHOUR, M. e SANTOS, W.A. dos (2001). **O Gesso: Produção e Utilização na Construção Civil**. Edições Bagaço. Recife, 156p. *apud* BALTAR, Carlos A. M.; BASTOS, Flávia F., LUZ, Adão B.. Gipsita. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). CT2005-122-00 - **Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações** - Pág. 449 a 470- Rio de Janeiro, 2005.

PETRUCCI, Eladio G. R. **Materiais de Construção**. 4 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1979. 435 p.

PINTO, R.C.A., **The Effect of Curing Temperatures on the Development of Mechanical Properties of Fresh and Hardened High-strength Silica Fume Mixtures – A Maturity Approach**, Ph. D. dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, 1997. *apud* CARVALHO, Adriano dos Guimarães. **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem**. Dissertação (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE). 2002. 134 p.

REGUEIRO, M. y G-B e LOMBARDER, M.B (1997). **Innovaciones y avances en el sector de las rocas y minerales industriales**. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de Espanha, Madrid. p. 67-68 *apud* BALTAR, Carlos A. M.; BASTOS, Flávia F., LUZ, Adão B.. Gipsita. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). CT2005-122-00 - **Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Pág. 449 a 470. Rio de Janeiro, 2005.

ROQUE, J. A., LIMA, M. M. T. M., CAMARINI, G. Características Químicas e Propriedades Físicas e Mecânicas do Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 200° C. **49º Congresso Brasileiro de Cerâmica**. De 6 a 9 de julho de 2005, São Pedro, SP.

ROCHA, Janaíde Cavalcante; CHERIAF, Malik. *Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*. **Coletânea Habitare - vol 4**, 2004. Disponível em: <<http://www.infohab.com.br>>. Acesso em: 29 de março de 2005.

SABBATINI, Fernando H.; MERCIA, Luiz S. F.; BARROS, Maria S.B.; SOUZA, Ubiraci E. L. Aula 10: **Revestimentos de Parede e Teto: Gesso**. PCC-2436 – Tecnologia da Construção de Edifícios II. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo Departamento de Engenharia de Construção Civil. 2º semestre de 2006. Disponível em: <<http://pcc2436.pcc.usp.br/transp%20aulas/revest%20gesso/Aula%2010%20-%20Revestimentos%20Gesso%202006%20V2.pdf>>. Acesso em: 30 de novembro de 2007.

SILVA, Adriano P., STARLING, Cícero M.D., ARAÚJO, Pedro H. M. Estudo do Desempenho Físico e Mecânico em Gesso Aditivado para Acabamentos na Construção Civil. **VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – Qualidade no Processo Construtivo**. De 27 a 30 de abril de 1998 – Florianópolis – SC.

SOUZA, Carla Adriana. **Utilização de Resíduo de Concreto como Agregado Miúdo para Argamassa de Concretos Estruturais Convencionais 2006**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 101 p.

THOMAZ, Eduardo C. S. **Artigo com casos reais de fissuração de concreto armado e concreto protendido**. 2003. Disponível em: <<http://www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo116.pdf>>. Acesso em: 07 de abril de 2008.

YOUNG, J. Francis, MINDESS, Sidney, GRAY, Robert J., BENTUR, Arnon. **The Science and Technology of Civil Engineering Materials**. New Jersey, 1998. 384 p.