

ANA PAULA MILAGRES TROVÃO

PASTA DE GESSO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
GESSO E ADITIVO RETARDADOR DE PEGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora: Dr^a.Geilma Lima Vieira

Co-orientador: Dr.Fernando Avancini Tristão

VITÓRIA
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

T859p Trovão, Ana Paula Milagres, 1970-
Pasta de gesso com incorporação de resíduo de gesso e
aditivo retardador de pega / Ana Paula Milagres Trovão. – 2012.
158 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.
Coorientador: Fernando Avancini Tristão.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Gesso - Aditivos. 2. Gesso - Propriedades mecânicas. 3.
Gesso - Reaproveitamento. 4. Resíduos como material de
construção. 5. Microestrutura. I. Vieira, Geilma Lima. II. Tristão,
Fernando Avancini. III. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

Ana Paula Milagres Trovão

PASTA DE GESSO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE GESSO E ADITIVO RETARDADOR DE PEGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Aprovada em **10 de agosto de 2012** por:

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Doutor em Engenharia Civil
Co-orientador - UFES

Profa. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFRGS

Profa. Dra. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Examinadora Externa - UFES

Àqueles que me acompanharam, apoiaram e me ajudaram em mais essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Um elenco muito especial fez dos últimos dois anos, momentos inesquecíveis. Repleto de medos, anseios e receios, dúvidas e certezas, conquistas, sonhos, até que hoje se fez real. Obrigada!

Inicialmente a DEUS, que rege todos os meus passos.

À minha mãe que anos a fio financiou meus sonhos estudantis, e mesmo longe não teve um só dia sem me ligar e me desejar felicidade e me abençoar.

Inicialmente à minha sempre presente orientadora, amiga e mestre de todos os dias, Geilma, quem traçou meus primeiros passos e me fez acreditar em mim.

Ao modelo de dedicação, amor à profissão, por nunca ter dito um não, pela intensa participação no meu trabalho, e por muito mais, professor Avancini.

Ao professor Calmom, que me indicou a direção, me tornou maior com seus ensinamentos e confirmo hoje que “só sei que nada sei”.

À professora Georgia pela paciência e tranquilidade às explicações indagadas. À professora Jamilla pelas correções linguísticas.

A conceituadíssima Cris que com sua gama de conhecimento que traz à tona a divagação sustentável em seu amplo aspecto.

Ao professor Adelmo pela paciência em suas aulas de estatística.

Ao professor Honório pela disponibilidade da sua unidade e do técnico Thales, para caracterização química do meu material. Ao professor Marcus Tadeu, geólogo, pelo auxílio no entendimento do DRX. Aos professores Cherlio, Marcelo, Flávio, por sua disponibilidade. Ao Engenheiro Mecânico Yukio Nishida por tanta paciência na execução com o MEV.

Aos colaboradores do laboratório Carlos Izoton, Márcio Loss, Loriato, Jorge, Denise e Manoel. A querida Xuxa pelo carinho e cuidado.

À secretaria do mestrado, Sidney, Vinícius e Pedro, que sempre estiveram à disposição no que fosse por mim solicitado.

Aos meus colegas de turmas que tanto contribuíram para que o ambiente acadêmico se tornasse uma extensão do meu lar.

À empresa Gesso Amaral, pela atenção de seus funcionários, pelas doações e visitas. Ao grupo Dalla Bernardina, pela sempre disponibilidade.

À Léa por seu companheirismo, dedicação, paciência e incentivo.

Aos meus amigos pelo apoio e paciência, principalmente à Marling pela doação de seus conhecimentos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

Ana Paula Milagres Trouão

“Adquire a sabedoria, adquiere o entendimento, e não te esqueças das palavras da minha boca, nem delas te apartes. Não a desampares, e ela te guardará; ama-a, e ela te protegerá.”

Prov. 4:5-6

RESUMO

TROVÃO, A. P. M. **Pasta de gesso com incorporação de resíduo de gesso e aditivo retardador de pega.** 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

A utilização do gesso pela construção civil gera um grande volume de resíduos, no entanto é um material que apresenta propriedades que o torna altamente competitivo no mercado. A principal causa da geração desse resíduo é o rápido endurecimento das pastas. A incorporação de resíduo de gesso às pastas provoca a aceleração no processo de endurecimento, podendo aumentar ainda mais o volume de resíduos gerados. Essa dissertação teve como objetivo buscar a forma de incorporação do resíduo às pastas de gesso para revestimento de parede, sem comprometer suas propriedades mecânicas e principalmente não acelerar seu endurecimento. Foram realizados os ensaios de tempo de pega, consistência, consistência útil e leitura de temperatura nas pastas em seu estado fresco além dos ensaios de dureza e compressão axial destas no estado endurecido. Os ensaios apontaram a viabilidade da incorporação de 5% de resíduo de gesso em substituição do gesso quando associado ao aditivo retardador bórax, que promoveu ampliação do tempo de utilização da pasta e o aumento nas propriedades mecânicas ensaiadas.

Palavras-chave: Pasta de gesso, resíduo de gesso, microestrutura, consistência útil.

ABSTRACT

TROVÃO, A. P. M. **Gypsum plaster with gypsum residue incorporation and setting retardant additive.** 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

The use of plaster in civil construction generates a large amount of waste, but it is a material that possesses properties that makes it a highly competitive product. The main cause of the generation of this waste is the rapid hardening of the pastes. The incorporation of waste gypsum into the gypsum pastes results in an acceleration of the hardening process, which might increase the volume of residues generated. This dissertation aimed to develop procedure to incorporate the gypsum residue into plaster pastes without compromising the paste mechanical properties and, especially without accelerating its hardening process. Tests have been developed to evaluate the plaster pastes setting time, consistency, workability and temperature reading in the plaster pastes in the fresh state and evaluate the hardness and axial compressive strength in the hardened state. Tests results showed the viability of the incorporation of 5% gypsum waste in substitution of gypsum in the plaster paste when combined with borax retardant additive, which promoted extension of the workable time of the paste and an increase in the pastes mechanical properties.

Keywords: Plaster paste, plaster waste, microstructure, workability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Composição da cadeia produtiva da construção civil.....	28
Figura 3.1 MEV do DH sem aditivo	41
Figura 3.2 MEV do DH com ácido cítrico	41
Figura 3.3 MEV do DH com bórax.....	41
Figura 3.4 MEV do DH com caseína	41
Figura 3.5 Extração na lavra	42
Figura 3.6 Dimensão do minério extraído	42
Figura 3.7 Britagem.....	42
Figura 3.8 Silos de gipsita	42
Figura 3.9 Calcinação	43
Figura 3.10 Silos de estabilização.....	43
Figura 3.11 Ensacamento de 40Kg	43
Figura 3.12 Ensacamento em Bags	43
Figura 3.13 Moléculas de água em ligações de hidrogênio com camadas vizinhas .	44
Figura 3.14 Esquema da composição de um grão de gipsita calcinado.....	47
Figura 3.15 Arranjo da hidratação do gesso	48
Figura 3.16 Curva de calor de hidratação	50
Figura 3.17(a) Efeito dos aditivos na dureza	54
Figura 3.17(b) Efeito dos aditivos na dureza (continuação)	55
Figura 3.18(a) Efeito dos aditivos na resistência à compressão	55
Figura 3.18(b) Efeito dos aditivos na resistência à compressão (continuação).....	56
Figura 3.19 Ligações de hidrogênio entre moléculas de água	57
Figura 3.20 Adesão Inter cristalina.....	57
Figura 3.21 FTIR do gesso e do gesso reciclado	62
Figura 3.22(a) DRX do gesso.....	62
Figura 3.22(b) DRX do gesso reciclado	63
Figura 3.23 TG do gesso (a) e do gesso reciclado (b)	63
Figura 3.24 DSC do gesso (a) e do gesso reciclado (b).....	64
Figura 3.25 DRX do gesso e fosfogesso	65
Figura 3.26 DRX do gesso em pó	65
Figura 3.27(a) Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 1	67

Figura 3.27(b) Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 2	67
Figura 3.27(c) Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 3	68
Figura 3.27(d) Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 4	68
Figura 3.28(a) Curvas de calor de hidratação da pasta e argamassa feitas na obra 1	70
Figura 3.28(b) Curvas de calor de hidratação da pasta e argamassa feitas na obra 4	71
Figura 3.29 Calor de hidratação da pasta e das argamassas de gesso.....	72
Figura 4.1(a) Coleta do resíduo de gesso	79
Figura 4.1(b) Espalhamento e secagem	79
Figura 4.2(a) Beneficiamento manual	79
Figura 4.2(b) Moagem fina	79
Figura 4.3(a) Série de peneiras.....	81
Figura 4.3(b) Quarteamento.....	81
Figura 4.4(a) Superfície rasada.....	82
Figura 4.4(b) Aparelhagem	82
Figura 4.5 Identificação dos formatos e superfícies das amostras para o MEV	83
Figura 4.6(a) Ferramentas para preparo	84
Figura 4.6(b) Aparelho de Metalização	84
Figura 4.6(c) Processo de metalização.....	84
Figura 4.6(d) MEV	84
Figura 4.6(e) Amostras metalizadas no interior do MEV	85
Figura 4.7(a) Titulação	85
Figura 4.7(b) Filtração lenta	85
Figura 4.8(a) Amostra de gesso	86
Figura 4.8(b) Amostra do resíduo.....	86
Figura 4.9 Ensaio de determinação da consistência normal	88
Figura 4.10 Ensaio de tempo de pega	90
Figura 4.11 Ensaio de Consistência útil, Tempo de pega e Calorimetria	91
Figura 4.12(a) Partes do calorímetro.....	92
Figura 4.12(b) Calorímetro completo.....	92

Figura 4.13(a) Moldagem	93
Figura 4.13(b) Conferência de massa	93
Figura 4.13(c) Na mufla.....	93
Figura 4.13(d) No dessecador.....	93
Figura 4.14 Máquina universal de ensaio.....	94
Figura 4.15(a) Ensaio de dureza	95
Figura 4.15(b) Impressão no corpo de prova	95
Figura 4.16(a) Ruptura	96
Figura 4.16(b) Carga de ruptura.....	96
Figura 5.1(a) Curva de granulometria a laser do gesso	99
Figura 5.1(b) Curva de granulometria a laser do resíduo de gesso	100
Figura 5.2(a) DRX do gesso fino para revestimento	102
Figura 5.2(b) DRX do resíduo de gesso.....	102
Figura 5.3 MEV de um fragmento de gipsita com 60 X (a) e 2000X (b) de ampliação	103
Figura 5.4 MEV do gesso em pó com 500X(a) e 2000X(b) e 5000X(c) de ampliação	104
Figura 5.5 MEV do resíduo de gesso moído (pó) em 2000x (a) e 5000x (b).....	105
Figura 5.6 MEV da amostra M1 - 2000x (a) e 5000x (b)	106
Figura 5.7 MEV da amostra M2 - 2000x (a) e 5000x (b)	107
Figura 5.8 MEV da amostra M5 - 2000x (a) e 5000x (b)	108
Figura 5.8(c) Formação paralela no interior do conjunto de cristais.....	108
Figura 5.9 MEV da amostra M6 - 2000x (a) e 5000x (b)	109
Figura 5.10 MEV da amostra M9 - 2000x (a) e 5000x (b)	109
Figura 5.11 MEV da amostra M10 - 2000x (a) e 5000x (b)	110
Figura 5.12(a) EDS do gesso	112
Figura 5.12(b) EDS do resíduo de gesso	113
Figura 5.13(a) Gráfico de consistência útil - série 0%.....	115
Figura 5.13(b) Gráfico de consistência útil - série 5%	116
Figura 5.13(c) Gráfico de consistência útil - série 10%	117
Figura 5.13(d) Gráfico de consistência útil - série 20%.....	118
Figura 5.13(e) Efeito isolado do teor de resíduo sobre o intervalo de consistência útil	121

Figura 5.13(f) Efeito isolado do tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil	122
Figura 5.13(g) Efeito da interação entre o teor de resíduo e tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil.....	123
Figura 5.14(a) Gráfico da curva de calor M1 e M2 – série 5%	124
Figura 5.14(b) Gráfico da curva de calor M1 e M6 – série 5%	125
Figura 5.14(c) Gráfico da curva de calor M1 e M10 – série 5%	126
Figura 5.15(a) Gráfico da curva de calor M1 e M3 – série 10%	127
Figura 5.15(b) Gráfico da curva de calor M1 e M7 – série 10%	128
Figura 5.15(c) Gráfico da curva de calor M1 e M11 – série 10%	128
Figura 5.16(a) Gráfico da curva de calor M1 e M4 – série 20%	130
Figura 5.16(b) Gráfico da curva de calor M1 e M8 – série 20%	130
Figura 5.16(c) Gráfico da curva de calor M1 e M12 – série 20%	131
Figura 5.17(a) Gráfico dos ensaios de dureza – série sem resíduo	133
Figura 5.17(b) Gráfico dos ensaios de dureza – série com 5% resíduo	134
Figura 5.17(c) Gráfico dos ensaios de dureza – série com 10% resíduo	135
Figura 5.17(d) Gráfico dos ensaios de dureza – série com 20% resíduo	136
Figura 5.17(e) Efeito isolado do teor de resíduo sobre a dureza.....	138
Figura 5.17(f) Efeito da interação entre o teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a dureza	138
Figura 5.18(a) Gráfico de resistência à compressão– série com 0% resíduo	141
Figura 5.18(b) Gráfico de resistência à compressão– série com 5% resíduo	141
Figura 5.18(c) Gráfico de resistência à compressão– série com 10% resíduo.....	142
Figura 5.18(d) Gráfico de resistência à compressão– série com 20% resíduo	143
Figura 5.18(e) Efeito isolado do teor de resíduo sobre a resistência à compressão	145
Figura 5.18(f) Efeito isolado do tipo de aditivo sobre a resistência à compressão ..	145
Figura 5.18(g) Efeito da interação entre o teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a resistência à compressão.....	146

LISTA DE QUADROS

Quadra 3.1 Comparativo entre revestimento de gesso e argamassa de cimento e cal.....	37
Quadra 3.2 Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento.....	45
Quadra 4.1 Plano Experimental.....	76
Quadra 4.2 Matriz Experimental.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Panorama Brasileiro do Gesso.....	29
Tabela 3.1 Resultados dos ensaios de resistência à tração e compressão	59
Tabela 3.2 Resultado dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras GR5, GR6	59
Tabela 3.3 Resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras REF e GR e os limites solicitados pelas normas	60
Tabela 3.4 Resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras.....	61
Tabela 3.5 Caracterização química do gesso e dos resíduos das 4 obras	66
Tabela 3.6 Resultados dos ensaios mecânicos	69
Tabela 3.7 Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tempo útil	70
Tabela 4.1 Exigências físicas do pó	80
Tabela 4.2 Exigências químicas do gesso para construção civil.....	86
Tabela 4.3 Exigências do tempo de pega do gesso para construção civil	90
Tabela 4.4 Exigências mecânicas do gesso para construção civil	94
Tabela 5.1(a) Resultados da análise granulométrica do gesso	99
Tabela 5.1(b) Resultado da análise granulométrica do resíduo de gesso	100
Tabela 5.2 Módulo de finura e massa específica	100
Tabela 5.3 Massa unitária do gesso e do resíduo.....	101
Tabela 5.4 Resultado das determinações químicas do gesso e do resíduo.....	111
Tabela 5.5 Resultados FRX com Perda ao Fogo.....	112
Tabela 5.6 Concentração dos elementos por EDS	113
Tabela 5.7 PH das amostras de gesso e do resíduo de gesso.....	114
Tabela 5.8 Resultados dos ensaios de consistência normal	114
Tabela 5.9 Resultado dos tempos de pega	114
Tabela 5.10 Leituras do gráfico de consistência útil da série 0%.....	116
Tabela 5.11 Leituras do gráfico de consistência útil da série 5%.....	117
Tabela 5.12 Leituras do gráfico de consistência útil da série 10%.....	118
Tabela 5.13 Leituras do gráfico de consistência útil da série 20%.....	119
Tabela 5.14 Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil	120
Tabela 5.15 Leitura dos gráficos de calorimetria da série 5%	126

Tabela 5.16 Leitura dos gráficos de calorimetria da série 10%	129
Tabela 5.17 Leitura dos gráficos de calorimetria da série 20%	131
Tabela 5.18 Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a dureza	137
Tabela 5.19 Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a resistência à compressão	144

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Considerações iniciais.....	21
1.2 Justificativa.....	22
1.3 Objetivo	24
1.3.1Objetivos específicos	24
1.4 Estrutura da dissertação.....	25
2 PRECEDENTES CONTEXTUAIS	27
2.1 A indústria da construção civil no contexto nacional	27
2.2 Reciclagem.....	29
2.3 Classificação	30
2.3.1CONAMA	30
2.3.1Classificação da ABNT.....	31
2.4 Prescrições normativas	32
2.4.1Normas brasileiras	32
2.4.2Normas americanas	33
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
3.1 Gesso	36
3.1.1Principais utilizações do gesso	37
3.1.2Vantagens e desvantagens do uso do gesso para revestimento	37
3.1.3Composição	39
3.1.4Microestrutura	40
3.1.5Produção do gesso	42
3.2 Matéria-Prima (Gipsita)	44
3.2.1Microestrutura da gipsita.....	45
3.2.2Calcinação	45
3.3 Hidratação	48
3.3.1Fatores que influenciam na hidratação	51
3.3.2Ação dos aditivos retardadores de pega	53
3.4 Forças de adesão.....	56
3.5 Aplicações do resíduo de gesso.....	57

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	74
4.1 Programa experimental	74
4.2 Materiais.....	77
4.2.1Água.....	77
4.2.2Gesso.....	77
4.2.3Resíduo de gesso	78
4.2.4Aditivo retardador de pega	78
4.3 Métodos.....	78
4.3.1Coleta e preparo do resíduo.....	78
4.3.2Caracterização física.....	80
4.3.3Caracterização química.....	85
4.3.4Caracterização física da pasta	87
4.3.5Caracterização mecânica.....	92
4.3.6Tratamento estatístico.....	96
5 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES	98
5.1 Caracterização	98
5.1.1Caracterização física.....	99
5.1.2Caracterização mineralógica.....	101
5.1.3Caracterização microestrutural	103
5.1.4Caracterização química.....	111
5.1.5Caracterização física da pasta	114
5.2 Calorimetria	124
5.3 Dureza.....	132
5.4 Resistência à compressão	140
6 CONCLUSÕES	149
6.1 Sugestões para estudos futuros.....	121
7 REFERÊNCIAS.....	153

Capítulo 1

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico associado ao aumento populacional e sua demanda de consumo, vêm gerando a exploração desordenada de recursos não renováveis, o aumento do consumo de energia e produzindo um grande volume de resíduos urbanos e industriais. Este cenário tem se tornado tema frequente em todo o mundo e induz à abertura de um universo com novas leis, pesquisas e investimentos na tentativa de minimizar o impacto negativo que vem sendo causado ao meio ambiente.

A construção civil representa um universo de problemas e soluções nesse cenário. É agente impactante devido ao grande consumo de matérias primas e energia, e por ser um grande gerador de resíduos. Por outro lado, o setor apresenta um grande potencial de utilização de resíduos proveniente de diversos setores, além de sua importância sócio-econômica.

Segundo John (2000), o impacto ambiental da construção civil é proporcional à sua tarefa social. É através da reciclagem de resíduos que a construção civil destaca-se como uma grande recicladora da economia.

O setor tem grande perspectiva de crescimento no contexto da reciclagem, devido à imensa quantidade de materiais que consome e vasta diversidade na composição dos materiais que fabrica, e ainda, por permear por todas as regiões (JOHN, 2000).

Dentre os resíduos gerados pela indústria da construção civil, o gesso apresenta-se como um material cuja utilização gera uma grande quantidade de resíduo. Segundo Agopyan *et al.* (1998), Schmitz e Tavares (2009), a maior geração de resíduo de gesso acontece na fase da aplicação da pasta como revestimento de paredes e tetos e é devido a dois principais fatores: a mão de obra não qualificada e ao rápido endurecimento das pastas de revestimento. O aproveitamento desse resíduo é o foco desta pesquisa.

O resíduo de gesso estudado neste trabalho é proveniente da etapa de aplicação do revestimento em paredes de blocos de concreto. Sua incorporação à pasta de gesso é problemática, pois além de acelerar o endurecimento da pasta, colabora com a redução das propriedades mecânicas do produto final.

Visando contribuir para a ampliação do conhecimento sobre resíduo de gesso, foram testados diferentes percentuais de substituição do gesso por resíduo e utilizados dois aditivos retardadores de pega separadamente. Foram analisados estatisticamente os resultados dos ensaios das propriedades no estado fresco e endurecido e determinado um traço satisfatório.

1.1 Considerações iniciais

Para a construção civil, gesso é a denominação comercial do pó de sulfato de cálcio hemihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) obtido pela desidratação parcial da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (KANNO, 2009).

Nos países de língua inglesa o dihidrato de sulfato de cálcio (DH) é conhecido como “gypsum” e o hemidrato de sulfato de cálcio (HH) como “Plaster of Paris” (KANNO, 2009).

Neste trabalho é utilizada a nomenclatura de gipsita para o mineral, gesso para o pó de sulfato de cálcio hemidratado com abreviação HH, dihidrato de sulfato de cálcio, DH, para o gesso após hidratação e simplesmente resíduo para as sobras das pastas após endurecimento.

O processo de transformação do gesso (HH) em DH é obtido pela simples mistura do gesso em água. Esta em quantidade muito maior do que a necessária para a completa hidratação, porém necessário para sua trabalhabilidade. A hidratação acontece à medida que o HH reage com a água cujo processo é chamado de “dissolução-precipitação”.

A quantidade de água utilizada no preparo da pasta é determinante na obtenção da consistência ideal do material para sua aplicação. No entanto, é também responsável pela resistência do produto após secagem, pois lhe confere determinado grau de porosidade. A maior geração de resíduo acontece na fase de aplicação do revestimento, devido à rápida secagem da pasta. Visando ampliar o tempo de uso das pastas, são utilizados aditivos retardadores de pega.

A incorporação do resíduo tende a acelerar a secagem, uma vez que ele absorve água, mas não dissolve como o hemidrato para formar novos núcleos de cristais. Na elaboração de pasta feita com pó de resíduo pode ser constatado que eles não se unem, por não se dissolverem como o hemidrato e, portanto não há núcleo para crescer e conseqüentemente não ocorre o intertravamento entre os cristais.

Na busca pelo aproveitamento do resíduo foram testados diferentes percentuais de substituição do gesso associado a aditivos retardadores de pega, visando não comprometer as propriedades exigidas.

1.2 Justificativa

As justificativas para a utilização do resíduo de gesso permeiam no universo da sustentabilidade, envolvendo o meio ambiente e os geradores de resíduo. A construção civil apresenta-se triplamente envolvida, por um lado como fonte geradora de resíduos e como grande consumidor dos recursos naturais e por outro lado como uma possibilidade de reversão desse cenário através da incorporação do resíduo de gesso em sua própria cadeia produtiva, minimizando tanto o acúmulo de resíduo como a exploração das jazidas.

Segundo Sjöstrom (1996) *apud* John (2010), estima-se que o setor da construção civil consuma entre 20 e 50% dos recursos naturais.

Dentre o universo das matérias-primas utilizadas pela construção civil, a gipsita que dá origem ao gesso é um mineral extraído da natureza e utilizado em grande escala nas construções.

O gesso é obtido a partir do gipso, rocha sedimentar cuja composição básica é formada por anidrita, algumas impurezas e gipsita que é a matéria-prima para produção do gesso (HINCAPIÉ *et al.* 1996a *apud* ANTUNES, 1999).

O gesso é utilizado em grande volume na Europa, nos Estados Unidos e na Ásia, totalizando um volume de 80 milhões de toneladas por ano. Nestes, o volume de resíduo depositados em aterros é estimado em 15 milhões de toneladas por ano, cerca de 40 mil toneladas de resíduo por dia (GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL, 2011).

No Brasil, o consumo de gesso ainda é pequeno, estimado em 18 Kg/hab/ano enquanto nos Estados Unidos o consumo deste material é de 107Kg/hab/ano (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2010).

Segundo Souza *et al.*(1998), é estimado uma média de 45% de resíduo de gesso gerado por perdas nos canteiros de obra para o consumo médio de 9,77 Kg/m², podendo chegar a 120% de perdas.

A geração de resíduo de gesso de construção representa um problema econômico com graves consequências e impacto ecológico, pois é um material tóxico que libera íons Ca²⁺ e SO₄²⁻ alterando a alcalinidade do solo e contaminando os lençóis freáticos (NASCIMENTO e PIMENTEL, 2010). Por tais consequências, o resíduo de gesso deve ser destinado em conformidade com a legislação específica, para que seja evitada contaminação ao meio ambiente.

O acondicionamento irregular pode liberar gás sulfídrico (H₂S), que paralisa o sistema nervoso provocando asfixia. É inflamável quando concentrado acima de 8ppm, irritando os olhos e é letal quando apresenta concentrações acima de 500ppm (ENGESSUL, 2011).

Além do impacto ao meio ambiente, o custo com sua deposição reduz a lucratividade do setor.

No contexto geral de resíduos, a indústria da construção civil apresenta-se como, possivelmente, a maior oportunidade absorção de resíduos devido a tecnologia as inúmeras opções de reaproveitamento de resíduos gerados por seus próprios setores e ainda absorvendo resíduos de outras fontes geradoras.

1.3 Objetivo

Devido à grande quantidade de resíduo de gesso gerado pela construção civil, sua incorporação é de grande relevância tanto na esfera ambiental como para as empresas gesseiras que tem seus lucros reduzidos pelo desperdício.

Visando potencializar o uso do resíduo de gesso, esse trabalho busca uma formulação que incorpore o resíduo de gesso à pasta para revestimento, de forma que atenda aos requisitos normativos.

O objetivo deste trabalho é identificar o melhor percentual de resíduo de gesso a ser substituído e o tipo de aditivo, dentre os testados, que promova o melhor desempenho às propriedades das pastas de gesso no estado fresco e endurecido.

A partir da identificação da dosagem ideal visa-se iniciar uma transferência de tecnologia às empresas do ramo, para aplicação da técnica em seus canteiros de obra, além de agregar valor ao resíduo e disponibilizá-lo para comercialização. O trabalho poderá contribuir também, para uma futura mudança na destinação dos resíduos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e minimização dos impactos ambientais.

1.3.1 Objetivos específicos

- Analisar química e fisicamente os resíduos de gesso selecionados;
- Analisar os diferentes percentuais de incorporação de resíduo de gesso sobre as propriedades das pastas no estado fresco;
- Analisar os diferentes percentuais de incorporação de resíduo de gesso sobre as propriedades das pastas no estado endurecido;
- Analisar o efeito dos aditivos retardadores de pega nas misturas com incorporação de resíduos de gesso;
- Analisar a natureza microestrutural das pastas com incorporação de resíduo.

1.4 Estrutura da dissertação

Este trabalho é estruturado em 6 capítulos sendo este primeiro relativo a introdução, contemplando a justificativa e o objetivo do trabalho.

No capítulo 2 é apresentado o cenário que envolve a produção e aproveitamento de resíduos na indústria da construção civil incluindo a legislação pertinente.

O capítulo 3 refere-se a revisão bibliográfica em amplo aspecto, que vai desde a produção do gesso de construção aos experimentos que envolvem a reciclagem de resíduo.

No capítulo 4 são apresentados os materiais e as técnicas utilizadas para execução do projeto experimental.

O capítulo 5 corresponde aos resultados dos experimentos e discussões do estudo.

E, finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas neste estudo.

Capítulo 2

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles

2 PRECEDENTES CONTEXTUAIS

Neste capítulo é apresentado uma visão breve da importância da construção civil e também uma abordagem superficial sobre reciclagem e sobre a legislação que conduz o estudo do gesso e seu resíduo.

2.1 A indústria da construção civil no contexto nacional

O macrossetor da construção civil é um dos maiores da economia e que produz bens de maiores dimensões físicas e em maiores quantidades. Conseqüentemente, o setor é o maior consumidor dos recursos naturais e grande gerador de resíduos (JOHN, 2000).

Ao mesmo tempo em que a construção civil é a maior consumidora de materiais na economia, é o setor que oferece mais possibilidades para a reciclagem e reversão desse cenário (SJÖSTRÖM, 1996 *apud* JOHN, 2000).

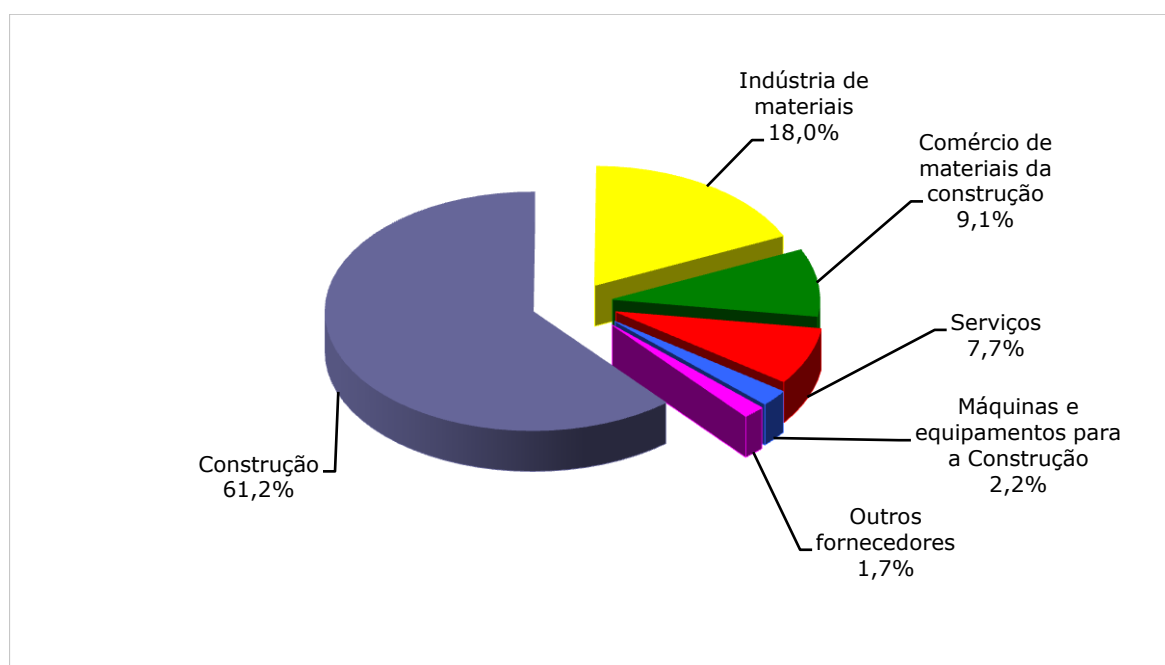
O papel sócio-econômico da indústria da construção civil pode ser compreendido a partir de índices de crescimento da economia nacional. A Câmara Brasileira da

Indústria da Construção (CBIC) relatou, em 2010, ser a indústria da construção civil a alavanca do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

O setor apresentou um crescimento de 13,6% no PIB dentre os 8,4% do PIB nacional (MARTELLO, 2010).

É considerada uma das maiores fontes geradoras de emprego, que em 2010 apresentou um crescimento de 15,10%, totalizando 2,604 milhões de empregos formais (AGENCIA ESTADO, 2010). A distribuição de empregos por setor pode ser observada na Figura 2.1.

Figura 2.1- Composição da cadeia produtiva da construção civil.



Fonte: CBIC (2010).

O mercado de materiais de construção evoluiu 13,39%. O consumo de cimento, apresentou uma elevação de 15,78%, equivalente aos 38,876 milhões de toneladas consumidos em 8 meses. O setor é responsável por 43% dos investimentos nacionais (CBIC, 2010).

Segundo o Anuário Estatístico (2010), alguns componentes da cadeia produtiva da construção civil como a indústria do gesso no Brasil colabora com um faturamento nacional na ordem de R\$ 1,2 bilhão. A partir do Pólo Gesseiro do Araripe são gerados 13.200 empregos diretos e 66.000 indiretos. A Tabela 2.1 apresenta o

panorama brasileiro do gesso segundo o sindicato do setor gesseiro, SINDUSGESSO.

Tabela 2.1 – Panorama Brasileiro do Gesso.

	2005	2006	2007	2008	2009
Faturamento (R\$ milhões)	920	954	1.000	1.013	1.200
Produção (10 ³ t)	1.650	2.000	2.450	3.060	3.500
Consumo Aparente	1.636	1.964	2.450	3.075	3.500
Consumo <i>per capita</i> (Kg / hab)	8,9	10,6	13,1	16,2	18,0
Nº de empregos diretos (mil)	n.d.	13,6	13,2	13,2	13,2
Produtividade (mil t/empregado/ano)	n.d.	141	186	232	265

Fonte: Anuário Estatístico do Setor de Transformação de não- metálicos, 2010.

A utilização do gesso no Brasil ainda é pequena, utilizando cerca de 18 kg/hab./ano, contra 30 kg/hab./ano na Argentina, 46 kg/hab./ano no Chile, 83 kg/hab./ano na Europa ocidental e 107 kg/hab./ano nos Estados Unidos (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2010).

A construção civil absorve entre 85 a 90% da produção, sendo o restante utilizado em outras áreas como, na medicina e odontologia com o “gesso alfa”, na agricultura, apesar da denominação “gesso agrícola”, o que é aplicado, na realidade, é o minério gipsita cominuído.

Na construção civil o gesso é utilizado para revestimento interno de paredes e tetos, placas, blocos, painéis, confecção de moldes para indústrias de cerâmica, metalúrgica e de plásticos entre outras aplicações (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2010).

2.2 Reciclagem

O potencial de utilização dos resíduos de diversos setores pela indústria da construção civil é uma oportunidade que tem sido cuidadosamente estudada com respaldo da ciência, por diversos pesquisadores.

Segundo John (2010), a reciclagem é uma oportunidade de transformação de uma fonte de despesa em uma fonte de faturamento. Podendo agregar valor ao resíduo ou contribuir para a redução de despesas com a sua deposição. Contribui também, com a preservação dos recursos naturais através da substituição da matéria prima pelo resíduo.

Na construção civil, diversos fatores favorecem a reciclagem. Por estar presente em todos os lugares, favorece geograficamente sem necessidade de transportes a longas distâncias. Pela gama de materiais consumidos oferece, por suas variadas composições, possibilidades de utilização de resíduo em suas composições. Pode também oferecer maior quantidade de produtos alternativos para uma mesma função e, possivelmente, oferecer produtos mais adequados a situações específicas (JOHN, 2000).

O material reciclável é classificado, segundo John (2010), conforme o setor que o origina e o setor que o utiliza. A reciclagem pode ser classificada como primária ou secundária.

A reciclagem é denominada primária quando, o mesmo processo é gerador e consumidor do próprio resíduo, e secundária quando o resíduo é reciclado em processo produtivo diferente do que o gerou, como o caso das escórias absorvidas pela construção civil.

É na reciclagem primária que este estudo traça suas diretrizes, visando à incorporação do resíduo gerado não só no setor, mas principalmente na própria atividade que o gerou.

2.3 Classificação

2.3.1 CONAMA

A Resolução CONAMA nº 307/2002 classifica, no artigo 3º, os resíduos da construção civil em classes de “A” à “D”, de acordo com a potencialidade de reutilização.

A partir da Resolução CONAMA n° 431/2011 o gesso passa enquadrar a lista da Classe B – que são resíduos recicláveis para outras destinações, juntamente com plásticos, papel, papelão, metais, vidros e madeiras.

2.3.2 Classificação da ABNT

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos são classificados de acordo os riscos potenciais de danos ao meio ambiente e à saúde humana, conforme discriminados a seguir:

- a) **Resíduo Classe I - Perigosos:** são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas podem:
 - apresentar riscos à saúde pública, provocando ou contribuindo, de forma significativa para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças;
 - apresentar riscos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
 - ser inflamáveis, corrosivos, reativos, tóxicos ou patogênicos, conforme definido na norma NBR 10004 (ABNT, 2004);
- b) **Resíduo Classe II - Não perigosos:** são aqueles que não se enquadram na classificação de Resíduo Classe I – Perigosos; alguns dos resíduos desta classe encontram-se listados no Anexo H da NBR 10.004(ABNT, 2004).
- c) **Resíduo Classe II A - Não Inertes:** são aqueles que não se enquadram como resíduos Classe I - Perigosos ou resíduo classe II B – inertes. Os não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Possuem constituintes que são solubilizados em concentrações superiores aos listados no anexo G.
- d) **Resíduo Classe II B - Inertes:** são aqueles que quando amostrados segundo a NBR 10.007 (ABNT, 2004) e outros testes não tiveram seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

Segundo os parâmetros da NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos de gesso pertencem à classe II – A, no qual “II” representa “não perigoso” e “A”, não inerte,

pois apesar de não apresentarem na sua composição concentrações de substâncias relacionadas no anexo G, possuem a propriedade específica de biodegradabilidade e/ou solubilidade em água.

2.4 Prescrições normativas

O gesso brasileiro, por ser extraído de várias jazidas, é submetido a diferentes métodos de beneficiamento. O método de beneficiamento e a espécie mineral resulta em gesso com diferentes características e propriedades.

2.4.1 Normas brasileiras

Segundo a NBR 13207 (ABNT, 1994), o gesso de construção é definido como:

“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”.

A utilização do gesso na construção civil no Brasil é regulamentada pela NBR 13207 (ABNT,1994): Gesso para Construção Civil. Determina as exigências químicas, físicas e mecânicas para os gessos de construção civil e indica as normas pertinentes aos métodos de ensaio.

Os métodos de ensaio para o atendimento das exigências físicas do pó (Granulometria, Massa unitária e Módulo de finura) estão descritos na:

- NBR 12127 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio;

Para atender as exigências físicas da pasta (Consistência normal e Tempo de pega), os métodos de ensaio estão descritos na:

- NBR 12128 – Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta – Método de ensaio;

As propriedades mecânicas (Dureza e Resistência à compressão) devem ser ensaiadas segundo:

- NBR 12129 – Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas – Método de ensaio;

Para atender às exigências químicas (teor de água livre, água de cristalização, óxidos de cálcio e anidrido sulfúrico) os métodos de ensaios estão prescritos na:

- NBR 12130 – Gesso para construção - Determinação de água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidro sulfúrico – Método de ensaio.

2.4.2 Normas Americanas

O exame detalhado das normas Americanas, e em especial a ASTM (American Society for Testing and Materials) relativas às prescrições e exigências físico-mecânicas aplicáveis ao gesso utilizado na construção, permite concluir que são em maior quantidade e contém exigências muito mais detalhadas do que as normas em vigor no Brasil.

Dentre as normas americanas, destacam-se:

- 1) ASTM C 28 - *Standard specification for gypsum plasters* (ASTM, 2005b) que define a existência de quatro diferentes tipos de gesso para se utilizar no revestimento de tetos e paredes, a saber: gesso moído; gesso com fibras de madeira; gesso fino e gesso especial. Esta norma referencia as principais propriedades que o gesso a ser utilizado em revestimentos deve possuir:
 - a) pelo menos 66% de $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ (bassanita);
 - b) passar totalmente na peneira ASTM nº 14 (abertura da malha de 1,41mm) e pelo menos 60% na peneira ASTM nº 100 (abertura da malha de 0,149 mm);
 - c) resistência à compressão igual ou superior a 84 kgf/cm² (8,4 MPa);
 - d) início de pega entre 20 a 40 minutos, quando não adicionado o retardador.
- 2) ASTM C 471M - *Test methods for chemical analysis of gypsum and gypsum products* (ASTM, 2001), especifica como deve ser realizada a análise química do gesso;
- 3) ASTM C 1396 - *Specification for gypsum board* (ASTM, 2004a) que contempla exigências para o uso do gesso em placas de vedação.

A seguir, são apresentadas outras prescrições normativas propostas pela ASTM e que fazem referência a outras importantes propriedades do gesso a ser utilizado como material de construção, e que curiosamente são pouco utilizadas e consultadas no Brasil, a saber:

- 4) ASTM C 35 - *Specification for inorganic aggregates for use in gypsum plaster* (ASTM, 2005c);
- 5) ASTM C 11 - *Terminology relating to gypsum and related building materials and systems* (ASTM, 2005a);
- 6) ASTM C 842 - *Specification for application of interior gypsum plaster* (ASTM, 2005d);
- 7) ASTM E11 - *Specification for wire cloth and sieves for testing purposes* (ASTM, 2004c);
- 8) ASTM C 472 - *Test methods for physical testing of gypsum, gypsum plasters, and gypsum concrete* (ASTM, 2004b).

Pela revisão bibliográfica realizada pode-se observar que a normalização e os requisitos de qualidade impostos ao gesso pelas normas em uso no Estados Unidos é mais completo, abrangente e zeloso, em relação às normas brasileiras propostas pela ABNT.

Capítulo 3

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma ampla revisão que agrega os conhecimentos sobre o gesso desde sua obtenção até as tentativas de utilização de seu resíduo. Aborda aspectos químicos, microestruturais e retrata as ligações entre os cristais. Respalda a hidratação do gesso através da teoria da cristalização de Le Châtelier e a influência de diversos fatores nesse processo além de apresentar uma seleção de estudos científicos sobre a utilização de resíduo de gesso.

3.1 Gesso

Gesso é a denominação comercial atribuída ao pó de sulfato de cálcio hemihidratado, utilizado em grande escala na indústria da construção civil e em muitas outras áreas como medicina, odontologia entre outras.

Pertence à família dos aglomerantes, constituídos basicamente de sulfatos mais ou menos hidratados e anidros de cálcio que são obtidos pela calcinação da gipsita natural, constituída de sulfato dihidratado de cálcio geralmente acompanhado de certa proporção de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio (VIEIRA, 2008). É um aglomerante aéreo por sua hidratação e por não resistir satisfatoriamente à exposição à água.

3.1.1 Principais utilizações do gesso na construção civil

Na construção civil o gesso é utilizado em larga escala:

- Confecção de elementos para isolamento acústico;
- Fabricação placas, blocos, elementos decorativos e painéis;
- Moldes para indústria cerâmica, metalúrgica e de plásticos;
- Confecção de portas corta-fogo;
- Revestimento de paredes e tetos.

3.1.2 Vantagens e desvantagens do uso do gesso para revestimento

Com objetivo de atender às solicitações de proteção, estética e conforto, o gesso, como material de revestimento interno, apresenta uma série de vantagens perante os revestimentos argamassados convencionais.

Segundo Hincapié e Cincotto (1997a), as vantagens do uso de revestimento de gesso vão desde a etapa de aplicação até as solicitações mecânicas dos revestimentos finalizados. O Quadro 3.1 exibe a comparação entre revestimento de gesso e revestimento argamassado.

Quadro 3.1 – Comparativo entre revestimento de gesso e argamassa de cimento e cal.

	Revestimento em Gesso	Revestimento em Argamassas de cimento e cal
Etapas de aplicação	1	3
Produtividade	maior	menor
Custo	1/3	1
Aderência	maior	menor
Superfície pronta para pintura	7 dias	40 dias
Retração	menor	maior
Massa específica	menor	maior
Acabamento superficial (lisura e brancura)	maior	menor
Conforto térmico e acústico	maior	menor
Comportamento frente ao fogo	maior	menor

Fonte: Hincapié e Cincotto (1997a).

Quanto às etapas de aplicação para os revestimentos argamassados são utilizadas as etapas de chapisco, emboço e reboco, elevando o custo e o tempo da obra. Enquanto o gesso é aplicado em apenas uma camada.

Mesmo com a utilização da argamassa de camada única seu custo é elevado e requer acabamento de lisura e brancura.

A produtividade dos revestimentos de gesso é maior devido à necessidade de aplicação rápida que é facilitada pela boa trabalhabilidade do material.

O custo para os revestimentos de gesso são baixo devido à alta produtividade e baixo valor do material.

Segundo John *et al.* (1994) *apud* Hincapié e Cincotto (1997a) o revestimento de gesso apresenta elevada aderência aos diversos tipos de substratos como cerâmica, concreto, sílico-calcários, argamassa de cimento, madeira entre outros, chegando a valores de tensão de arrancamento de 1,5MPa. A tensão de arrancamento dos revestimentos de gesso apresenta-se muito superior ao solicitado às argamassas pela NBR 13749 (ABNT, 1996) que é 0,2MPa para revestimentos de paredes e tetos internas cujo acabamento é a pintura.

Segundo Hincapié *et al.* (1996) *apud* Hincapié e Cincotto (1997a) a pintura pode ser realizado aos 7 dias após sua aplicação, enquanto para as superfícies argamassadas são necessários 40 dias para aplicação do acabamento.

Segundo Cincotto *et al.* (1995) *apud* Hincapié e Cincotto (1997a) a retração é insignificante no gesso em relação às argamassas de cimento e cal mal dosadas, o que gera fissuras, podendo causar até descolamento do revestimento.

Os revestimentos de gesso apresentam massa específica menor que as argamassas e pequena espessura de recobrimento o que contribui para redução de cargas na edificação.

O acabamento de lisura e brancura do gesso é apresentado ao final de sua aplicação dispensando a massa corrida solicitada pelos revestimentos argamassados.

A alta porosidade do revestimento em gesso promove isolamento térmico e acústico e a baixa condutividade térmica do material e sua incombustibilidade confere-lhe a vantagem da resistência ao fogo.

Os revestimentos de gesso apresentam pontos negativos que demandam cuidados como:

- A deterioração de produtos de cimento Portland pela ação de sulfatos ocorre por processos destrutivos a partir da formação de etringita tardia dentro dos poros de concretos, argamassas ou pastas, que ocasionam aumento de volume e tensões, fissurando-os (AGUIAR e SELMO, 2004).
- São bastante suscetíveis ao desenvolvimento de bolor, principalmente em ambientes pouco ventilados e úmidos, os quais causam deterioração progressiva ao revestimento, podendo ocasionar seu descolamento;
- O gesso propicia a corrosão de componentes de aço-carbono comum, sendo necessária a proteção com pinturas anticorrosivas (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997);
- Não suporta deformação, acarretando em deslocamento e fissuração do revestimento;
- O volume de resíduo gerado na etapa de aplicação é em média 45% (SOUZA et al., 1998).

3.1.3 Composição

Os gessos brasileiros apresentam uma composição típica formada por água livre, água combinada, anidrido sulfúrico (SO_3), óxido de cálcio (CaO) e também anidrido carbônico (CO_2), resíduo Insolúvel (RI) + anidrido silícico (SiO_2), óxidos de ferro e Alumínio ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e óxido de magnésio (MgO) em baixos teores (JOHN e CINCOTTO, 2007).

Os minerais de sulfato de cálcio, segundo Baltar *et al.* (2005) *apud* Vieira (2008), 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: $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$).

Segundo John e Cincotto (2007), os minerais ou impurezas exercem influência em algumas propriedades do gesso como:

- Minerais insolúveis como calcário, dolomito, anidrita, argilo-minerais desidratados e minerais silicosos – reduzem as resistências mecânicas do gesso hidratado;
- Minerais solúveis em água como halita e silvita – afetam a temperatura de calcinação e as propriedades da pasta fresca (consistência e tempo de pega);

Minerais hidratados como outros sais de sulfato e montmorilonita quando desidratados juntamente com a gipsita – promovem instabilidade após o endurecimento, pois absorve água. O gesso é constituído essencialmente de sulfatos de cálcio – hemidrato, anidritas solúvel e insolúvel – e gipsita, procedente da matéria prima (JOHN e CINCOTTO, 2007). A fase mais comum do gesso de construção é representada basicamente pelo hemidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,66\text{H}_2\text{O}$.

3.1.4 Microestrutura

Segundo Murat *et al.* (1979) *apud* Antunes (1999), os cristais crescem a partir de núcleos de cristalização e a quantidade desses núcleos influencia na taxa de crescimento da microestrutura e no tamanho dos cristais.

Segundo Murat *et al.* (1975) *apud* Hincapié e Cincotto (1997), são 2 os tipos de crescimento dos cristais, com poucos núcleos que originam cristais grandes ou muitos núcleos resultando em numerosos cristais pequenos. Quando a velocidade de crescimento é rápida formam-se cristais pequenos, bem definidos e numerosos. Quando o crescimento é mais lento formam-se cristais grossos, maiores e menos numerosos, de estrutura organizada e mais perfeita.

No arranjo cristalino formado por numerosos cristais pequenos imbricados, a incidência de poros é reduzida, acarretando em maiores resistências mecânica.

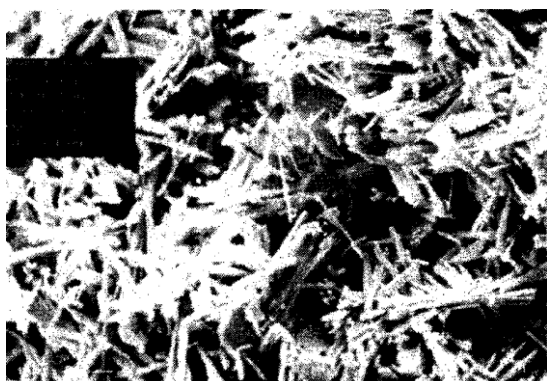
Segundo Murat *et al.* (1975) *apud* Hincapié e Cincotto (1997), as microestruturas formadas por cristais grandes são mais porosas e apresentam menos resistência.

A velocidade da reação pode ser alterada com o uso de aditivos ou presença de impurezas que acarretarão na formação final dos cristais. No crescimento, a velocidade atua na formação do hábito dos cristais, originando agulhas ou placas (KANNO, 2009).

A Figura 3.1 mostra a microestrutura do dihidrato sem aditivo. Observam-se agulhas imbricadas sem orientação tridimensional, médias e algumas placas devido a rápida reação. Na Figura 3.2, com aditivo ácido cítrico, observa-se além dos cristais aciculares e bem definidos, de tamanho médio, há presença de pacotes de agulhas em diferentes orientações. A Figura 3.3 mostra a microestrutura do dihidrato com bórax, há formação de cristais de forma hexagonal, mais curtos e mais largos, também cristais irregulares, lâminas e algumas agulhas. Há pouco embricamento porém os cristais pequenos preenchem a estrutura, reduzindo a porosidade.

Na Figura 3.4 é mostrada a microestrutura do dihidrato com a caseína que apresenta cristais aciculares de comprimentos menores e larguras maiores. Também apresenta maior quantidade de placas de menor tamanho, estrutura densa com cristais na maioria entrelaçados e outros apenas em contato.

Figura 3.1 – MEV do DH sem aditivo.



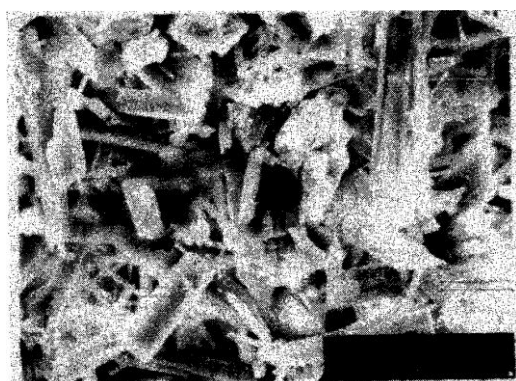
Fonte: Hincapié e Cincotto (1997).

Figura 3.2 – MEV do DH com ácido cítrico.



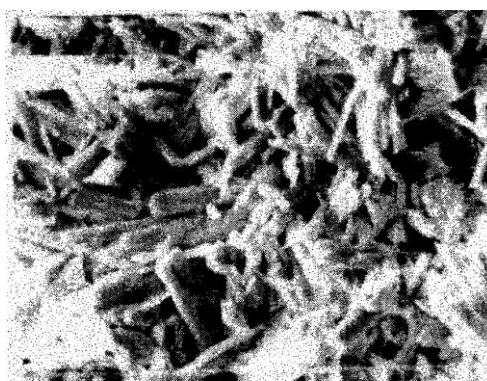
Fonte: Hincapié e Cincotto (1997).

Figura 3.3 – MEV do DH com bórax.



Fonte: Hincapié e Cincotto (1997).

Figura 3.4 – MEV do DH com caseína.



Fonte: Hincapié e Cincotto (1997).

3.1.5 Produção do gesso

A produção do gesso ocorre a partir da extração da gipsita que é transportada da lavra para o setor industrial em tamanhos médios de 45 a 50 cm conforme as Figuras 3.5 e 3.6.

Figura 3.5 – Extração na lavra.



Fonte:Lima (2011).

Figura 3.6 – Dimensão do minério extraído.



Fonte: Estação Turismo (2009).

Na indústria, o minério passa por britagens, moagem e peneiramento e segue para silos de estocagem conforme Figuras 3.7 e 3.8.

Figura 3.7 – Britagem.



Fonte: Estação turismo (2009).

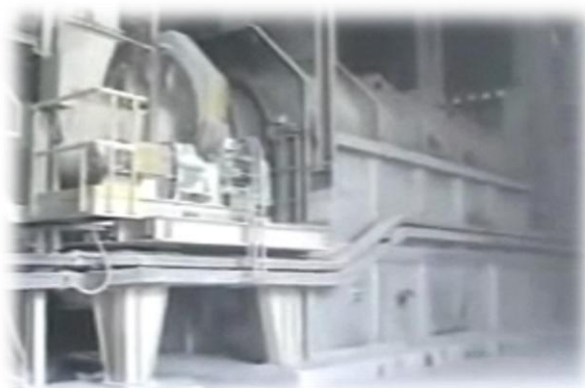
Figura 3.8 – Silos de gipsita.



Fonte: Estação turismo (2009).

Após a estocagem, é feita a calcinação, seguida da moagem e ensilagem para estabilização conforme as Figuras 3.9 e 3.10.

Figura 3.9 – Calcinação.



Fonte: Estação turismo (2009).

Figura 3.10 – Silos de estabilização.



Fonte: Estação turismo (2009).

O gesso já estabilizado segue para ser ensacado em embalagens de 40 Kg ou em *Bags* de 1400 Kg de acordo sua utilização conforme as Figuras 3.11 e 3.12.

Figura 3.11 – Ensacamento de 40 Kg.



Fonte: Estação turismo (2009).

Figura 3.12 – Ensacamento em *Bags*.

Fonte: Estação turismo (2009).

A maior concentração da reserva brasileira de gipsita é na Bahia (43%); Pará (30%) e Pernambuco (25%). Porém, na Bacia do Araripe-PE (fronteira com Piauí, Ceará e Pernambuco) estão localizadas as jazidas com melhores condições de aproveitamento econômico.

O maior produtor de gesso do país é o estado de Pernambuco. Outros produtores são o Maranhão (3%); Ceará (1,5%) e Tocantins 0,3%.

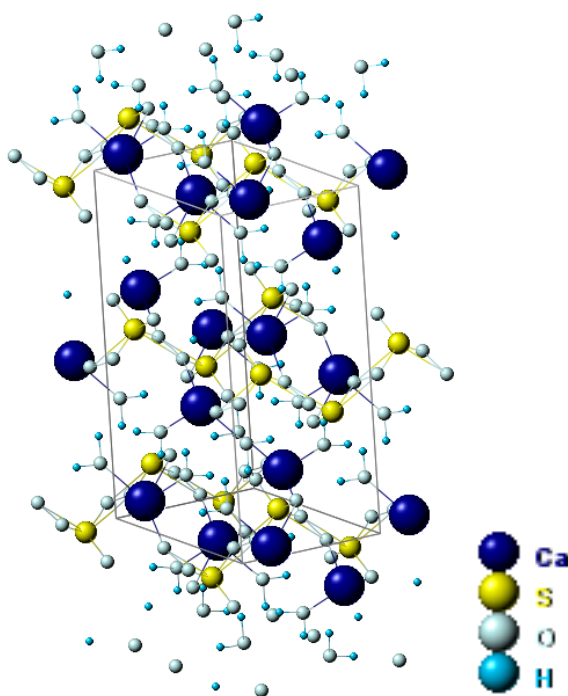
Em 2009, a produção brasileira de gesso foi da ordem de 3,5 Mt, com o Pólo Gesseiro de Araripe respondendo por 95% da produção (ANUÁRIO ESTATÍSTICO, 2010).

3.2 Matéria-Prima (Gipsita)

A matéria-prima do gesso é a gipsita, um mineral constituído basicamente de sulfato de cálcio dihidratado sob a fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Apresenta uma estrutura cristalina prismática monoclínica, dureza média de 2 na escala de Mohs, coloração branca ou transparente, índice de refração 1,53 e peso específico $2,32\text{g/cm}^3$. É composto esquiométricamente por 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O . Sua estrutura é formada por camadas de sulfato de cálcio que se conectam por ligações de hidrogênio (KANNO, 2009). A Figura 3.13 ilustra as ligações de hidrogênio.

Figura 3.13 – Moléculas de água em ligações de hidrogênio com camadas vizinhas.



Fonte : Gypsum Mineral Data (acesso em 2012).

3.2.1 Microestrutura da gipsita

O termo microestrutura é utilizado para descrever as características estruturais dos materiais. As microestruturas podem ser caracterizadas pelo tipo, proporção e composição das fases presentes, e pela forma, tamanho, distribuição e orientação dos grãos (BRAGANÇA e BERGMANN, 2004).

A microestrutura da gipsita é constituída de cristais geminados em sistema monoclinico (DANA, 1969 *apud* CANUT, 2006).

A estrutura da gipsita pode ser modificada tanto pela forma de beneficiamento como pela temperatura aplicada (CANUT, 2006). O Quadro 3.2 demonstra os sistemas cristalinos dos minerais formados a partir de diferentes temperaturas de calcinação.

Quadro 3.2 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento.

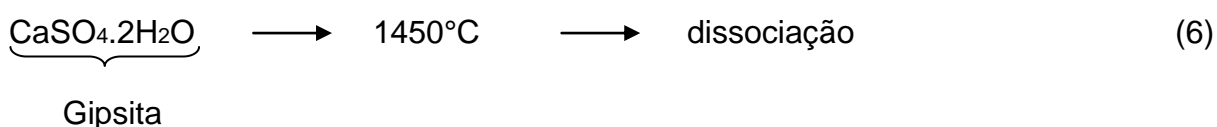
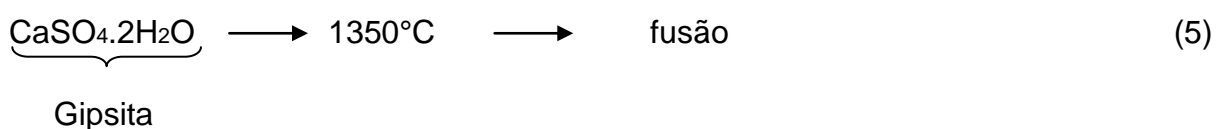
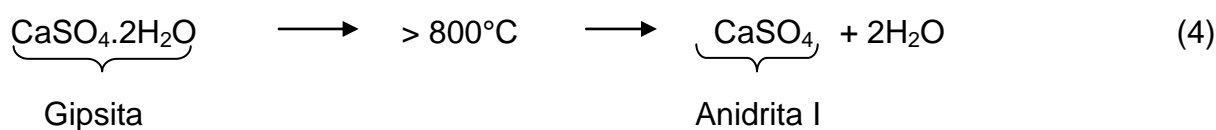
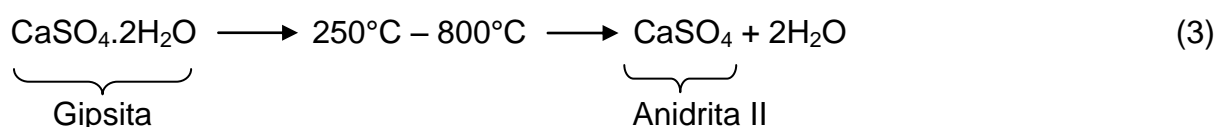
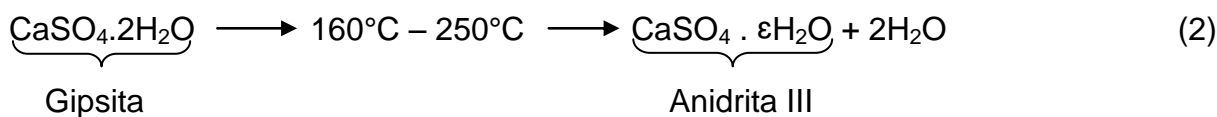
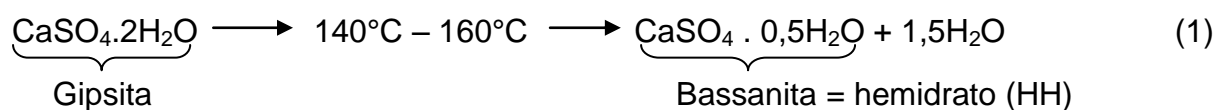
Fórmula	Sistema cristalino	Mineral
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclínico	Gipsita
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal	Hemidrato
$\text{CaSO}_4 \cdot \text{EH}_2\text{O}$	Hexagonal	Anidrita III
CaSO_4	Ortorrômbica	Anidrita II
CaSO_4	Cúbica	Anidrita I

Fonte: Dana, 1969 *apud* Canut, 2006.

O processo de calcinação da gipsita determina as características físicas como formato, tamanho e estrutura do cristal de HH. As características físicas do HH são responsáveis pelas características do processo de hidratação e do produto final (KANNO, 2009).

3.2.2 Calcinação

Segundo Canut (2006) a calcinação pode ser elaborada em temperaturas distintas conforme o produto almejado. As equações de 1 a 6 demonstram as diferentes temperaturas e o produto obtido.



O hemidrato é o produto da calcinação da gipsita a temperaturas entre 125°C e 160°C (KANNO, 2009). Segundo Canut (2006) e John e Cincotto (2007), a obtenção do hemidrato acontece entre 140°C e 160°C.

O hemidrato *beta* (gesso de construção) requer água em excesso para sua utilização, gerando características menos favoráveis nas propriedades do produto final.

As anidritas são apresentadas em três fases de acordo com o grau de solubilização.

A anidrita III é a fase mais reativa. É chamada de anidrita solúvel e age como acelerador de pega (JOHN e CINCOTTO, 2007). É a fase mais aproximada do hemidrato. Durante a permanência nos silos de estabilização, grande parcela torna-se hemidrato por absorção de umidade.

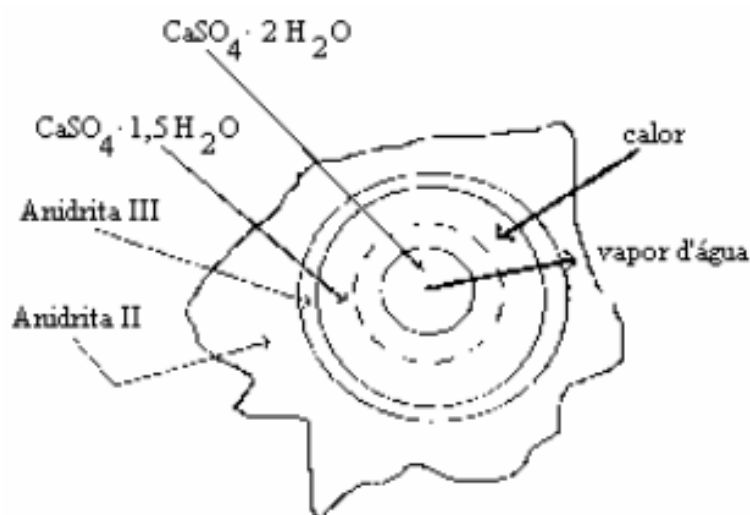
A anidrita II (insolúvel) reage lentamente com a água. Consome 2 moléculas de água para sua hidratação e tem como característica a redução da porosidade do

gesso e o consequente aumento de resistências mecânicas e dureza (JOHN e CINCOTTO, 2007).

A anidrita I (CaSO_4) compõe os gessos produzidos com alta temperatura de calcinação, que varia entre 1100°C e 1200°C , apresentam pega e endurecimento lentos, gerando uma massa dura e tenaz (JOHN e CINCOTTO, 2007).

Segundo Monção Júnior (2008) a Figura 3.14 ilustra a forma do produto obtido em uma calcinação sem controle de tamanho da partícula e temperatura do gás, nas quais estão presentes em camadas os 4 tipos de sulfato de cálcio.

Figura 3.14 – Esquema da composição de um grão de gipsita calcinado.



Fonte: Monção Júnior, 2008.

A presença do dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gipsita) na composição do gesso de construção ocorre pela calcinação insuficiente ou por moagem grossa. A gipsita atua como acelerador da reação de hidratação agindo como núcleos de cristalização da gipsita e é dosado na formulação do gesso para ajustar o efeito dos retardadores de pega (JOHN e CINCOTTO, 2007).

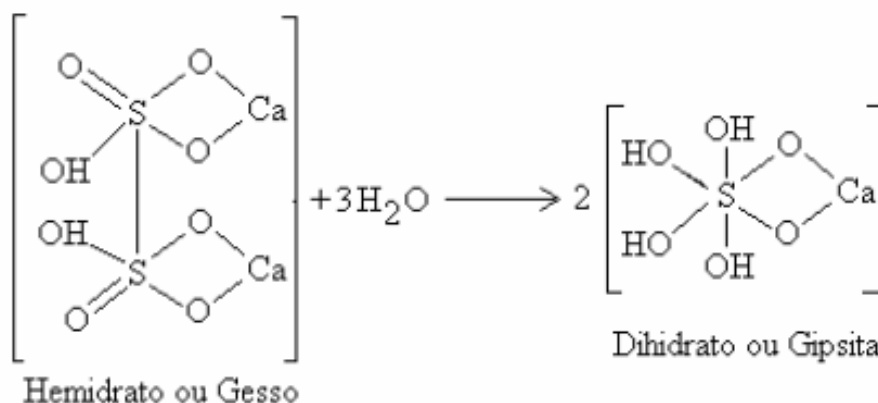
A mesma atuação ocorre com o resíduo de gesso, que após a hidratação do gesso retoma a composição da gipsita, atuando como acelerador de pega se utilizado nas pastas de gesso. Porém, para utilização do resíduo é necessário sua moagem, que conforme a finura obtida será determinada a velocidade em que atuará como acelerador de pega.

Segundo Kanno (2009), acredita-se que as forças de adesão entre as superfícies dos cristais sejam iguais as forças que unem as camadas de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ligações de hidrogênio. Também as finíssimas camadas de água existentes entre as superfícies dos cristais colaboram com a adesão assumindo comportamento vítreo, denominada água confinada. Assim, durante a calcinação da gipsita, quando a água é parcialmente eliminada, os cristais se desintegram com facilidade principalmente pela ausência dessas forças. Nas secagens em temperaturas superiores a 63°C , ocorre a desidratação com perda de água estrutural e desintegração do cristal.

3.3 Hidratação

A hidratação do gesso apresenta a equação inversa da calcinação, na qual a água é devolvida ao sistema e retorna a estrutura de gipsita. A Figura 3.15 ilustra o arranjo dos compósitos com a adição de água.

Figura 3.15 – Arranjo da hidratação do gesso.



Fonte: Monção Júnior (2008).

Segundo Hincapié e Cincotto (1997) a hidratação do gesso teve seus primeiros estudos científicos relatadas por Lavoisier (1798) e Le Châtelier (1887), por meio da teoria da cristalização. Segundo a Teoria da Cristalização, o hemidrato é misturado à água, dissolve-se e forma uma solução supersaturada de íons de SO_4^{2-} e Ca^{2+} , que sequencialmente precipitam cristais de dihidrato em forma de agulhas e entrelaçados. A hidratação é caracterizada em três etapas, hidratação (fenômeno químico) quando ocorre a dissolução do hemidrato, cristalização (fenômeno físico) e a teoria da cristalização (fenômeno mecânico de endurecimento).

Segundo Iserhard (2000), a teoria da cristalização de Le Châtelier, diz que em uma solução saturada não é possível obter-se cristalização. No entanto, no momento que ocorra uma alteração das condições de equilíbrio da solução gerando uma supersaturação momentânea, o equilíbrio será restabelecido por cristalização. Esse equilíbrio pode ser gerado por evaporação do diluente, mudança de temperatura ou indução de alguma fase que reaja com o diluente.

Le Châtelier concluiu que a cristalização depende da diferença entre o grau de solubilidade dos compostos. Os compostos anidros ou parcialmente hidratados apresentam maior solubilidade do que os compostos hidratados. Forma-se uma solução supersaturada, com cristais muito pequenos que se precipitam. O endurecimento depende da coesão e aderência entre os cristais (ISERHARD, 2000).

Segundo Karni e Karni (1995) *apud* Antunes (1999), as etapas da hidratação são:

1. **Dissolução** do hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) na água formando uma solução saturada de íons de Ca^{2+} e SO_4^{2-} (fenômeno químico);
2. Com a supersaturação os novos cristais de dihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) **precipitam** em forma de agulhas (fenômeno físico da cristalização);
3. Com o aumento da concentração dos cristais, ocorre o **endurecimento** da pasta (fenômeno mecânico do endurecimento).

Esse mecanismo explica o fato do resíduo de gesso, que é um gesso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quando adicionado às pastas, acelerarem o endurecimento. Em contato com a água ele precipita imediatamente, somando-se aos novos cristais, endurecendo a massa enquanto ainda está ocorrendo muitas nucleações.

Por ser o dihidrato menos solúvel em água que o hemidrato, sua solução será sempre supersaturada em relação ao hemidrato (KANNO, 2009).

Segundo Magnan (1973) *apud* John e Cincotto (2007), a hidratação do gesso ocorre em quatro etapas:

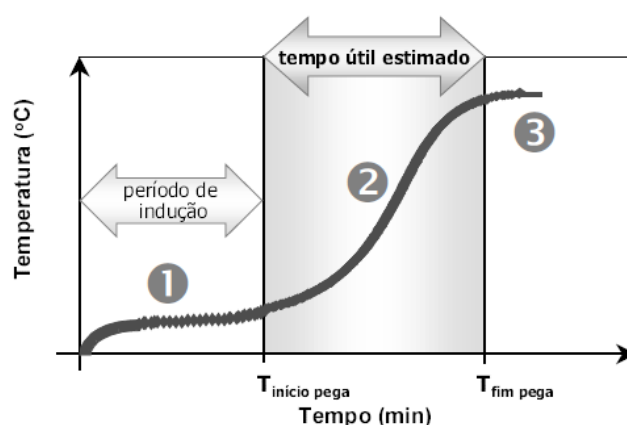
1. A primeira etapa é a **dissolução**;
2. A segunda é o período de indução, quando ocorre a estabilização química e física dos hidratos que se organizam formando **núcleos de cristalização** até a saturação;

3. A terceira é o fim da indução e o início de pega, quando ocorre um grande aumento de temperatura devido o aumento de velocidade da reação, ocorre a supersaturação da solução e as agulhas **precipitam** formando cristais que se agrupam;
4. Na quarta etapa a velocidade é reduzida, até o fim da hidratação e é quando ocorre o **crescimento** dos cristais (até 3 dias), influenciando nas propriedades mecânicas.

Para que ocorra a hidratação completa do gesso são necessários 18,6g de água para cada 100g de gesso, solicitando assim uma relação entre a massa de água e a de gesso (a/g) de 0,186. Porém, para obter-se uma massa trabalhável são utilizadas a/g entre 0,6 e 1,0. A água excedente não reage com o HH, mas ocupa volume durante a conformação e evapora após a cura, gerando porosidade no material (JOHN E CINCOTTO, 2007; KANNO, 2009). Assim, quanto mais elevada a relação a/g, maior a porosidade, menor contato entre os cristais e maior comprometimento da resistência mecânica do produto final.

O processo de hidratação do hemidrato ocorre em diferentes etapas que pode ser observada através da curva de calor de hidratação de Clifton (1973) *apud* Antunes (1999) conforme Figura 3.16.

Figura 3.16 – Curva de calor de hidratação.



Fonte: Antunes (1999).

A etapa 1, da Figura 3.16 mostra o período de indução, a etapa 2, a grande hidratação e a etapa 3, a conclusão da hidratação. O Tempo de pega registrado corresponde ao intervalo entre o início da variação da temperatura de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e a

temperatura máxima atingida, e esse intervalo é apontado como o período em que a pasta apresentar-se-ia trabalhável. No entanto, é sabido hoje que o início de pega corresponde ao fim da trabalhabilidade da pasta como comprovado nos ensaios apresentados neste estudo.

3.3.1 Fatores que influenciam na hidratação

a) Características físicas do hemidrato (HH)

As características físicas do HH como estrutura cristalina, formato e tamanho do cristal determinam as características do processo de hidratação como velocidade de dissolução, crescimento do cristal e o hábito do cristal (KANNO, 2009).

A calcinação realizada à pressão atmosférica sob temperatura de 125°C à 160°C resulta em cristais de HH mal formados, porosos e heterogêneos.

O gesso utilizado pela construção civil é um gesso β , que apresenta uma granulometria fina, cristais porosos e pequenos, logo apresenta elevada área superficial específica, o que acarreta na necessidade de água em excesso para seu uso. A elevada área específica também promove a rápida dissolução do HH, provocando o crescimento rápido e desordenado de numerosos cristais de DH (KANNO, 2009).

b) relação água/gesso (a/g)

O fator de maior influência no processo de hidratação é o teor de água de amassamento. Quanto maior a relação a/g, maiores os tempos das etapas da reação.

Segundo Yu e Brouwers (2011), que investigaram a influência do teor de água nos tempos das etapas do processo de hidratação e propriedades mecânicas das pastas, a velocidade de hidratação é reduzida conforme há o aumento da quantidade de água, pois quanto maior a relação a/g, maior a distância entre as moléculas, aumentando o tempo de indução de 1,5 min da relação a/g de 0,65 para 7 min da relação a/g de 1,25. Isso acontece porque é necessário maior tempo para ocorrer a supersaturação da solução, devido as moléculas se apresentarem muito

dispersas. Constatou também que o período de precipitação passou de 7 min (a/g 0,65) para 18 min (a/g 1,25) e a microestrutura são alteradas como também são prejudicadas as propriedades mecânicas dos produtos com maior relação a/g.

c) impurezas

A quantidade e o tipo de impureza podem interferir na reação de hidratação (SCHMITZ e TAVARES, 2009).

As diferentes fases do sulfato quando presentes na pasta, tidos como impurezas proporcionam mudança durante a reação, como o caso da presença de gipisita, que acelera a reação, pois age como núcleo de cristalização e a anidrita II que age inversamente, como retardador da reação (JOHN E CINCOTTO, 2007).

Desta forma, o resíduo de gesso que é um sulfato de cálcio hidratado, também age como acelerador da reação, como núcleos de cristalização extras.

d) aditivos

Os aditivos, utilizados com intuito específicos de retardar o endurecimento da pasta, podem influenciar em determinada fase da reação e ainda alterar os arranjos dos cristais como o uso do ácido cítrico, ou como modificações do tamanho, forma e arranjo espacial dos cristais com o uso do bórax (HINCAPIÉ e CINCOTTO, 1997a).

e) energia de mistura

A forma da mistura também exerce influência na reação, pois quanto maior a energia despendida para a mistura, mais rápida é a dissolução, antecipando também a supersaturação.

Segundo Magnan (1973) *apud* Antunes (1999) o incremento na energia de mistura facilita a dispersão do pó na água de amassamento e possibilita a formação de núcleos de cristalização extras.

f) finura do pó

A granulometria do pó também interfere na reação, pois quanto menor o módulo de finura, maior sua área específica, requerendo maior quantidade de água para sua hidratação.

g) temperatura da água de amassamento

A temperatura da água até 45°C exerce influência na solubilidade do gesso acelerando a reação, no entanto temperaturas superiores retardam a reação (CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999).

3.3.2 Ação dos aditivos retardadores de pega

Segundo Hincapié (1997) *apud* Antunes (1999), os retardadores de pega são divididos em 2 grupos básicos: os que ampliam o período de indução e os que interferem na cinética da formação da microestrutura do dihidrato.

Segundo John e Cincotto (2007) os aditivos retardadores dividem-se em 3 categorias:

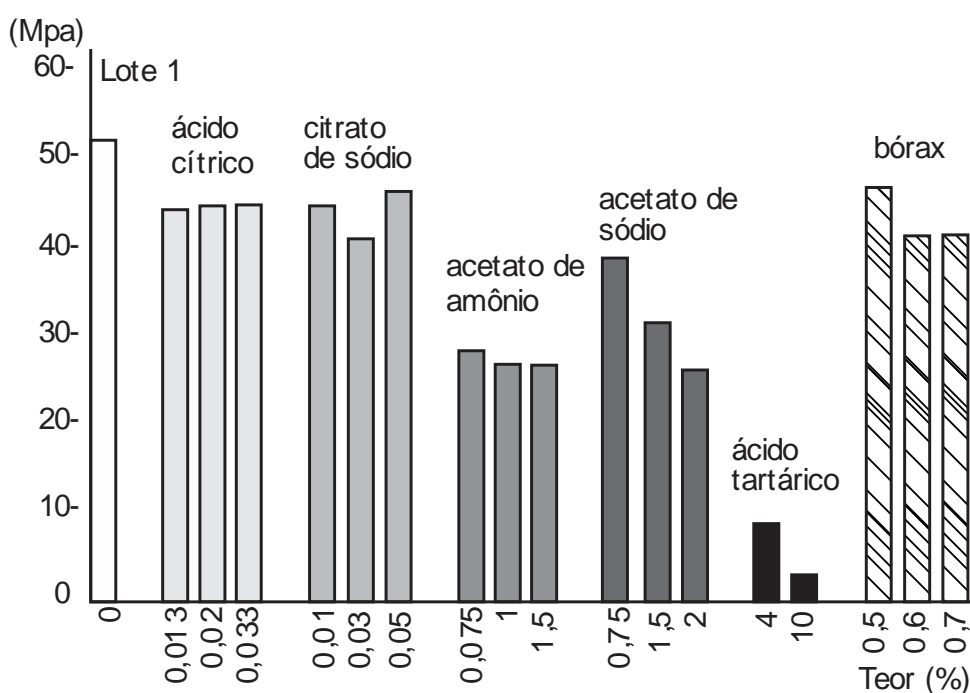
- No primeiro grupo estão as espécies químicas que **reduzem a velocidade de dissolução** do hemidrato por introduzirem íons na solução. Retardam a saturação, com isso prolongam a indução. As espécies químicas são ácidos fracos como ácidos cítrico, fórmico, acético, láctico, e seus sais alcalinos, como citratos, acetatos e lactatos. Também o ácido bórico e fosfórico, glicerina, álcool, éter, acetona e açúcar.
- No segundo grupo estão as espécies químicas que adicionadas promovem reações complexas, resultando produtos pouco solúveis ou insolúveis em torno dos cristais, e **retardam o crescimento** dos cristais para posterior precipitação. São eles os boratos, fosfatos, carbonatos e silicatos alcalinos.
- No terceiro grupo estão os produtos orgânicos, como proteínas degradadas e alguns colóides, formando um gel em torno do grão de hemidrato, impermeabilizando-o temporariamente, **retardando a solubilização e a cristalização** do hemidrato. São eles a queratina, caseína, goma arábica,

gelatina, pepsina, peptona, albumina, alginatos, proteínas hidrolisadas, aminoácidos e formaldeídos condensados.

Hincapié e Cincotto (1997a) testaram 12 aditivos retardadores de pega e selecionaram os 3 aditivos que obtiveram melhor desempenho, o ácido cítrico, o bórax e a caseína. A pasta com caseína apresentou valores, de dureza e resistência à compressão, superiores ao gesso sem aditivo enquanto o ácido cítrico e o bórax tiveram queda de aproximadamente 15%. Os teores de aditivo para retardo de 1 hora foram 0,030% para o ácido cítrico, 0,7% para o bórax e 10% para a caseína.

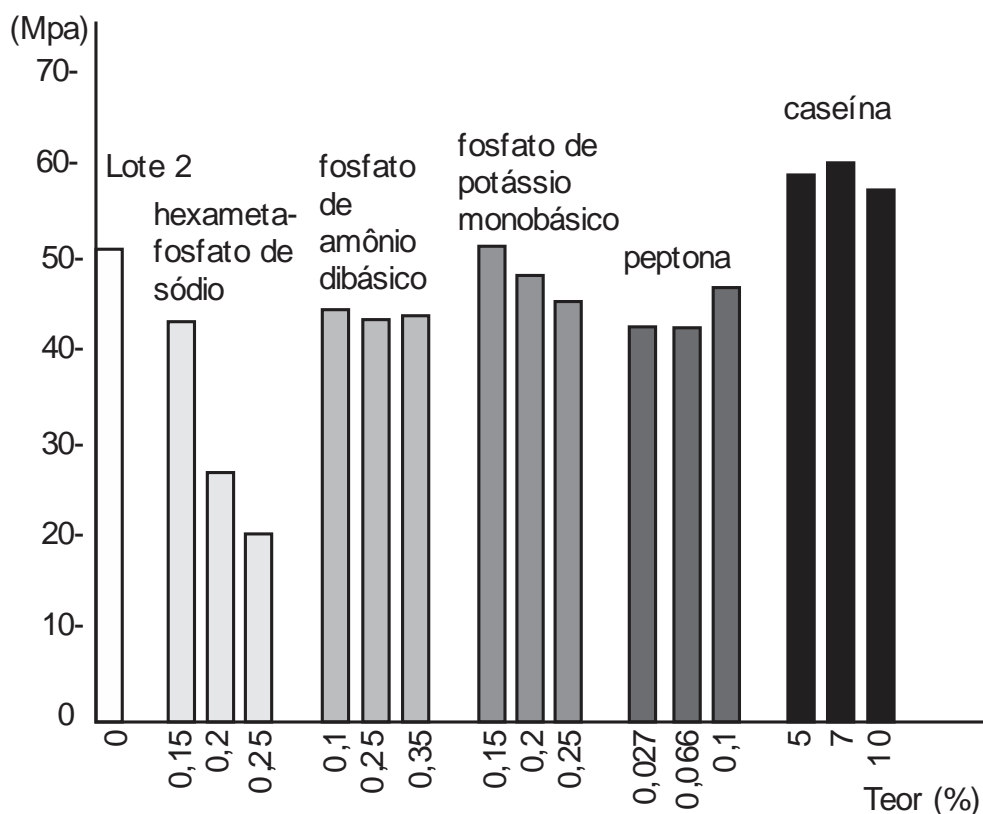
Os gráficos da Figura 3.17 (a) e (b) demonstram os efeitos dos aditivos nos resultados de dureza e a Figura 3.18 (a) e (b), os resultados de resistência à compressão.

Figuras 3.17(a) – Efeito dos aditivos na dureza.



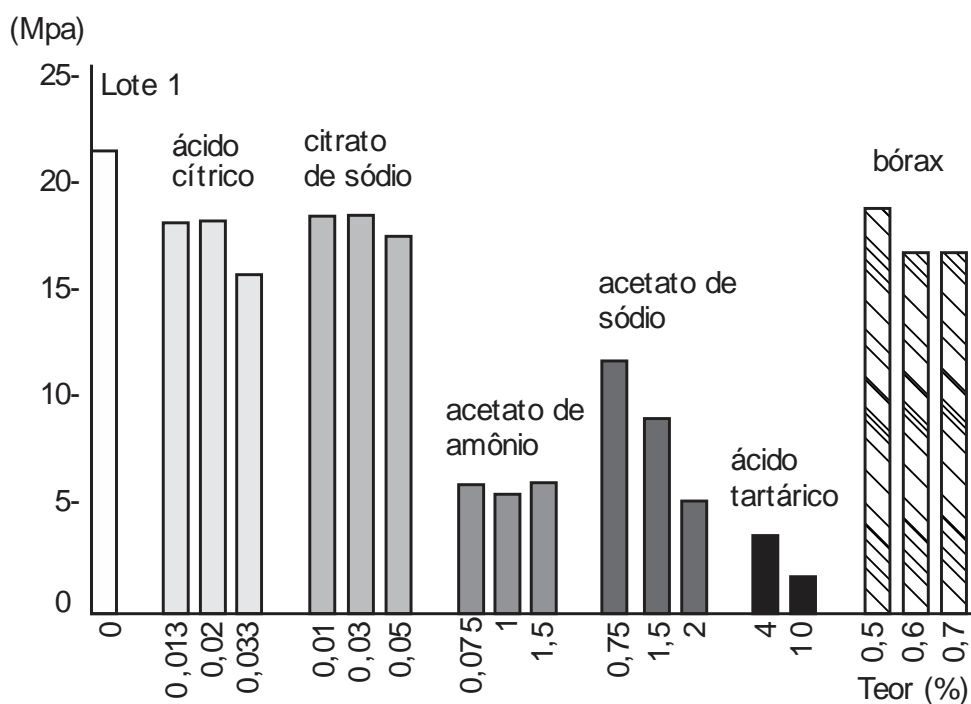
Fonte: Hincapié e Cincotto (1997a).

Figuras 3.17(b) – Efeito dos aditivos na dureza (continuação).



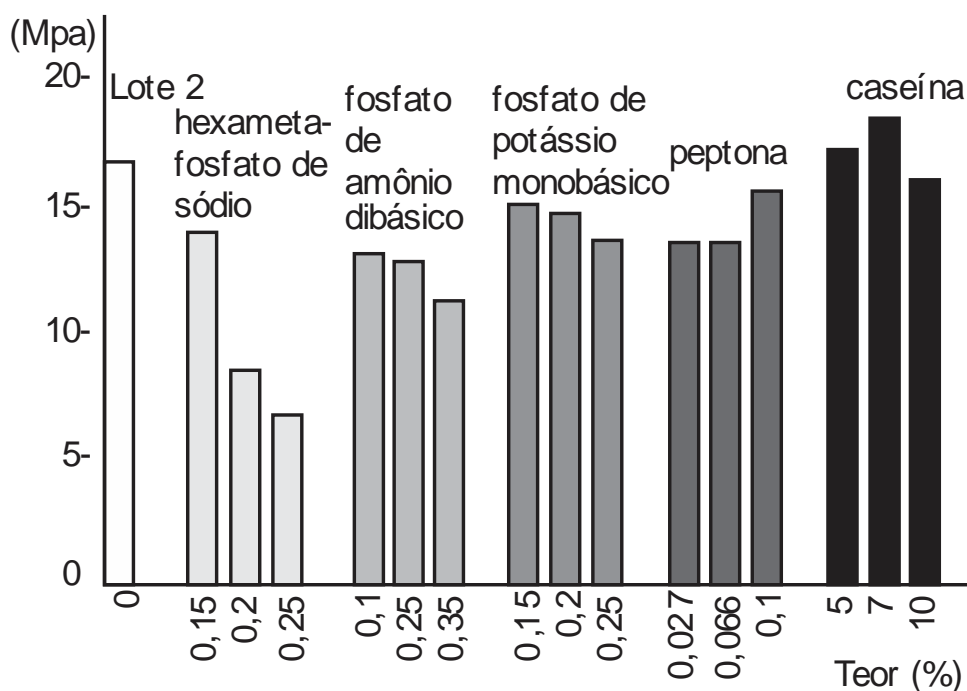
Fonte: Hincapié e Cincotto (1997a).

Figura 3.18(a) – Efeito dos aditivos na resistência à compressão.



Fonte: Hincapié e Cincotto (1997a).

Figura 3.18(b) – Efeito dos aditivos na resistência à compressão (continuação).



Fonte: Hincapié e Cincotto (1997a).

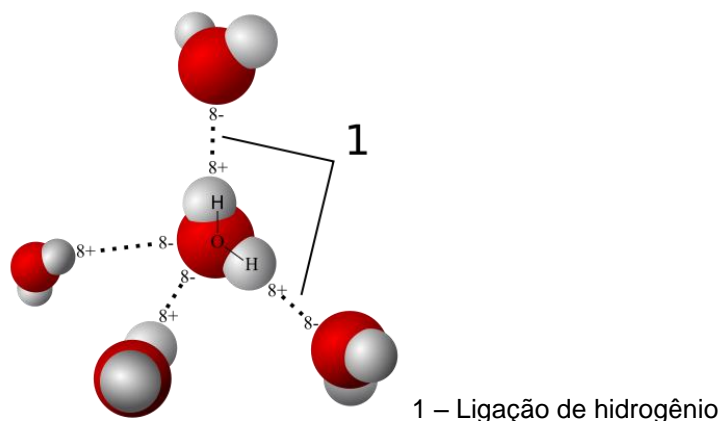
3.4 Forças de adesão

Segundo Kanno (2009), as forças que conferem resistência mecânica ao gesso após sua hidratação são forças de interação intercrystalina. São elas a força de “Van der Waals” de natureza elétrica cuja intensidade é reduzida pela presença de moléculas de água e as ligações de hidrogênio.

Segundo Kanno (2009), devido à natureza hidrofílica dos cristais de DH, as ligações entre suas superfícies são do mesmo tipo que unem as camadas de sulfato de cálcio dihidratado que formam os cristais de DH, ligações de hidrogênio.

A Figura 3.19 representa as ligações de Hidrogênio entre as moléculas de água, nas quais cada molécula de água pode se ligar a outras quatro moléculas vizinhas.

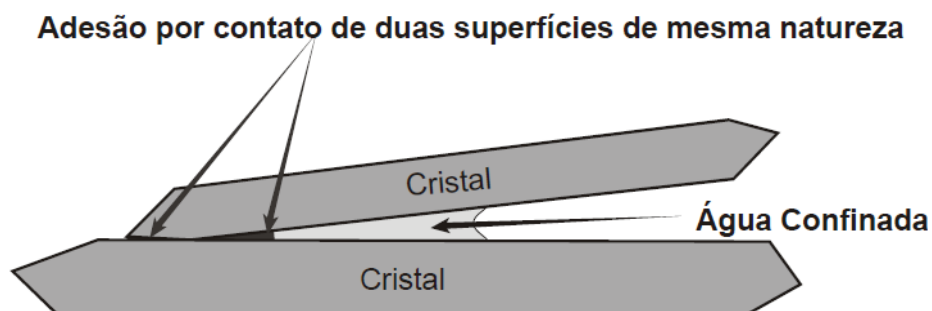
Figura 3.19 – Ligações de hidrogênio entre moléculas de água.



Fonte: Wikipedia (acesso em 2012).

Além das forças intercrystalinas, a existência de finíssimas camadas de água entre superfícies dos cristais, diferente da água livre, contribui com um comportamento vítreo para a adesão entre as superfícies (KANNO, 2009). A Figura 3.20 representa a adesão por contato de duas superfícies hidrófilas que propicia a existência de água confinada.

Figura 3.20 – Adesão Intercristalina.



Fonte: Kanno (2009).

3.5 Aplicações do resíduo de gesso

Devido ao grande volume de resíduo de gesso gerado, muitos pesquisadores vêm buscando formas de promover seu reaproveitamento.

A geração do resíduo de gesso tem sua principal fonte a atividade de revestimento de paredes e tetos, cujo desperdício apresenta-se em média de 45% do volume preparado para utilização (AGOPYAN *et al.*, 1998).

O baixo custo do produto atrelado a rapidez de execução e ao bom acabamento oferecido pelo produto finalizado, cada vez mais torna o gesso uma boa opção para as construtoras.

Porém, a falta de especialização (mão de obra e tecnologia) no setor juntamente com a propriedade de endurecimento rápido da pasta, gera grande volume de resíduo não inerte, cuja deposição final é problemática.

Na busca por minimizar o volume de resíduo gerado muitos pesquisadores têm direcionado seus estudos para a utilização deste resíduo.

Empresas e autores indicam alternativas para a utilização do resíduo de gesso, em diferentes setores.

Segundo Marvin (2000), algumas possíveis alternativas de aplicação do resíduo são, a fabricação de gesso acartonado, a correção de acidez do solo, como aditivo para compostagem, como forração para animais, para redução da impermeabilização dos solos compactados, para a produção de cimento, para a redução de odores, para tratamento de águas turvas acelerando a precipitação de partículas de argila em suspensão e para absorção de óleo.

Conforme relato da empresa *Gypsum Recycling International*, os resíduos de gesso e gesso acartonado são 100% recicláveis e utilizados na fabricação de gesso acartonado no percentual de 25% em substituição do gesso de construção.

Chandara *et al.*(2009), que testaram o resíduo de gesso moído na fabricação do cimento no lugar da gipsita que é misturada ao clínquer, obtiveram resultados superiores aos apresentados pelo cimento convencional.

A Tabela 3.1 mostra os resultados do ensaio de tração e resistência à compressão em 3 amostras elaboradas com cimento feito com gipsita (CMNG) e outras 3 com cimento feito com resíduo de gesso (CMWG) ensaiados aos 28 dias.

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de resistência à tração e compressão.

Amostras	Resistência à tração (MPa) (28 dias)	Resistência à compressão (MPa) (28 dias)
CM97NG	6,30	49,20
CN96NG	7,07	52,82
CN95NG	7,81	50,7
CN97WG	7,51	53,25
CN96WG	7,16	51,75
CN95WG	7,79	51,77

CM – Cimento, NG – Gipsita, WG – Resíduo de gesso, 95% clínquer e 5% de NG ou WG, 96% clínquer e 4% de NG ou WG, 97% clínquer e 3% de NG ou WG.

Fonte: Tabela adaptada de Chandara *et al.* (2009).

O principal problema da utilização do resíduo de gesso nas pastas que o originam é o fato de que o resíduo acelera ainda mais o endurecimento gerando mais resíduo.

Alguns autores testaram a utilização do resíduo calcinado na tentativa de remontar a composição original de hemidrato. Segundo Harada e Pimentel (2009), que testaram a viabilidade da reciclagem do resíduo de gesso de obra através da moagem e requieima do resíduo, apontaram a viabilidade de utilização do resíduo como gesso para fundição. O resíduo moído por 8 horas foi passado na peneira de abertura 0,6 mm e posteriormente, foi mantido por 24 horas em estufa. Foram testadas as temperaturas de 160°C na amostra (GR5), 180°C na amostra (GR7) e 200°C na amostra (GR6) e hidratadas com relação água/gesso igual a 0,6. Observando as tabelas apresentadas, nenhuma das amostras atenderam na íntegra à todos os requisitos solicitados pela NBR13207 (ABNT, 1994).

A Tabela 3.2 apresenta os resultados dos ensaios físicos e mecânicos elaborados por Harada e Pimentel (2009).

Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras GR5, GR6 e GR7.

Gesso Reciclado	Módulo de Finura	Massa Unitária (g/cm ³)	Início de Pega (min'seg'')	Fim de Pega (min'seg'')	Dureza (N/mm ²)	Resistência à Compressão (MPa)
GR5(160°)	0,66	0,58	5'12''	16'49''	38,80	6,41
GR6(200°)	0,69	0,62	2'27''	12'20''	41,77	4,96
GR7(180°)	0,72	0,53	14'06''	34'36''	39,31	6,22

Fonte: Tabela adaptada de Harada e Pimentel (2009).

Conforme os resultados exposto pelos autores, a amostra com queima à 180°C (GR7) apresentou os melhores resultados apontando a viabilidade da utilização do gesso reciclado para moldagem. Os limites solicitados pela NBR 13207 (ABNT,1994) de 8,40MPa para o ensaio de resistência compressão não foi alcançado sendo satisfatório apenas os limites de dureza que se apresentaram superiores a 30 N/mm².

Segundo Roque, Lima e Camarini (2005), a reciclagem do resíduo de gesso (elaborado em laboratório) após moagem e calcinação a 200°C (GR6) por 24 horas apresentou propriedades semelhantes ao gesso da amostra referente, porém também não atendeu aos limites de resistência à compressão da NBR 13207 (ABNT, 1994). A Tabela 3.3 foi adaptada, apresentando os resultados dos ensaios de Tempo de pega, com leitura de início de pega (IP), fim de pega (FP), dureza (D) e Resistência à compressão (RC), tanto da amostra referencial (REF) quanto da amostra do gesso reciclado (GR) de relação água/ gesso 0,7 e os valores solicitados pelas normas.

Tabela 3.3 - Resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras REF e GR e os limites solicitados pelas normas.

Amostra	IP	IP-NBR	FP	FP - NBR	D (N/mm ²)	D - NBR	RC (MPa)	RC - NBR
REF	16'	>10	30'	>45	12,6	>30,00	3,9	>8,40
GR	36'		48'		14,1		4,0	

Fonte: Tabela adaptada de Roque, Lima e Camarini (2005).

A viabilidade do uso do gesso reciclado é apontada pelos autores apenas pela semelhança dos resultados obtidos entre as amostras e não por atendimento à norma.

Nascimento e Pimentel (2010) testaram a reciclagem do resíduo de gesso comercial produzido em laboratório com relação água /gesso 0,8, moído por 5 horas, passado na peneira de abertura 0,6mm e calcinados às temperaturas de 160°C, 180°C e 200°C por 6 horas. O produto não atendeu às solicitações da NBR 13207 (ABNT,1994).

A Tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios físicos e mecânicos das amostras de gesso comercial puro, gessos reciclados (Rec) 160°C, 180°C e 200°C. Quanto aos valores de dureza apresentados não condizem com a unidade (N/mm²) indicado pela norma.

Tabela 3.4 - Resultados dos ensaios físicos e mecânicos realizados nas amostras.

Tipo de gesso	a/g	Módulo de Finura	Massa Unitária (Kg/m ³)	Início de Pega (min'seg'')	Fim de Pega (min'seg'')	Dureza (N/mm ²)	Resistência à Compressão (MPa)
Puro	NI	0,2346	1119,78	NI	NI	701,20	2,23
Rec 160°C	0,48	0,2378	1033,00	17'25''	50'33''	570,52	2,33
Rec 180°C	0,46	0,1532	1133,81	30'28''	53'41''	399,43	2,51
Rec 200°C	0,47	0,2664	1109,73	26'13''	57'31''	272,66	2,43

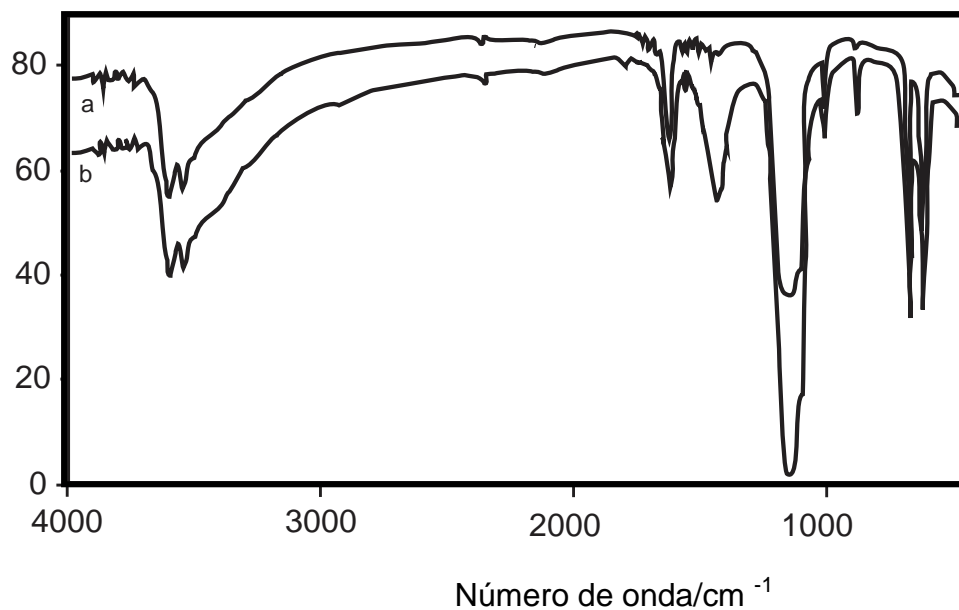
Fonte: Tabela adaptada de Nascimento e Pimentel (2010).

Os resultados apresentados não atendem às solicitações da NBR13207 (ABNT,1994) quanto as propriedades mecânicas de dureza e resistência à compressão, apesar dos autores apontarem a viabilidade de utilização do gesso reciclado para moldagem.

Carvalho, Leles e Tubino (2008) investigaram as características físicas, químicas e mecânicas do gesso reciclado. O gesso reciclado foi produzido por calcinação a 100°C até atingir massa constante e moído por 16 minutos.

Foram feitas análises de Difração de Raio-X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho (FTIR), Termogravimetria (TG) e Calorimetria diferencial exploratória (DSC) do gesso de construção e do gesso reciclado em pó. Os resultados apresentaram semelhança entre as amostras para todos os ensaios. A Figura 3.21 mostra a FTIR do gesso (a) e do gesso reciclado (b).

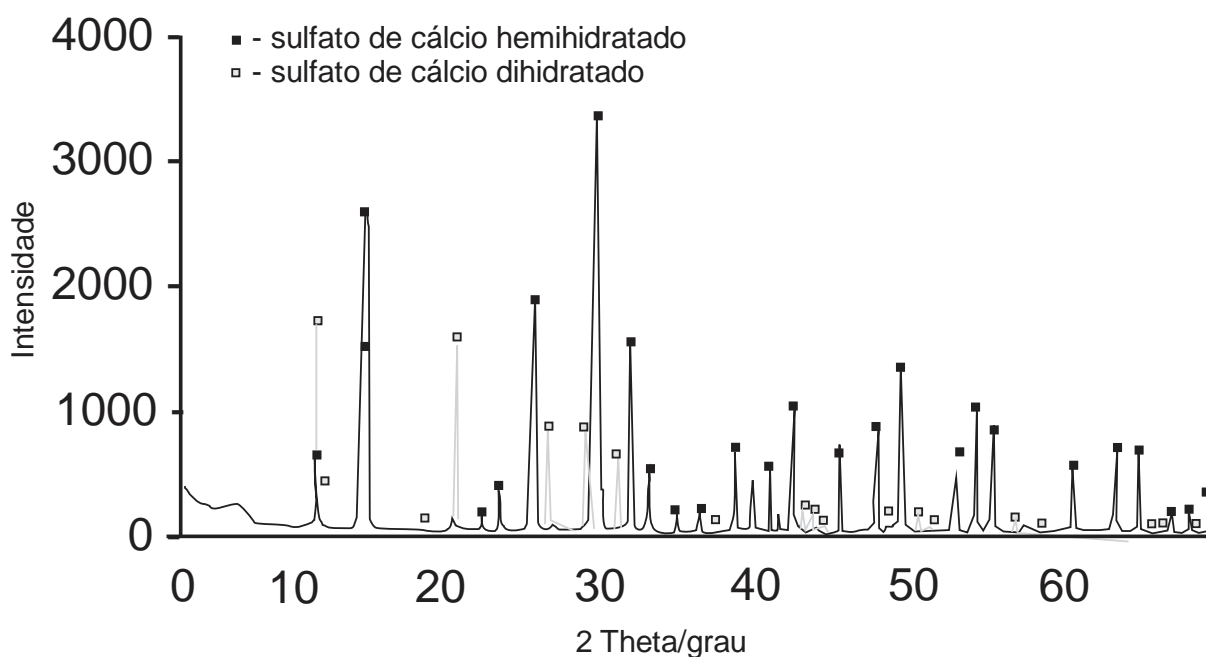
Figura 3.21 – FTIR do gesso e do gesso reciclado.



Fonte: Carvalho, Leles e Tubino (2008).

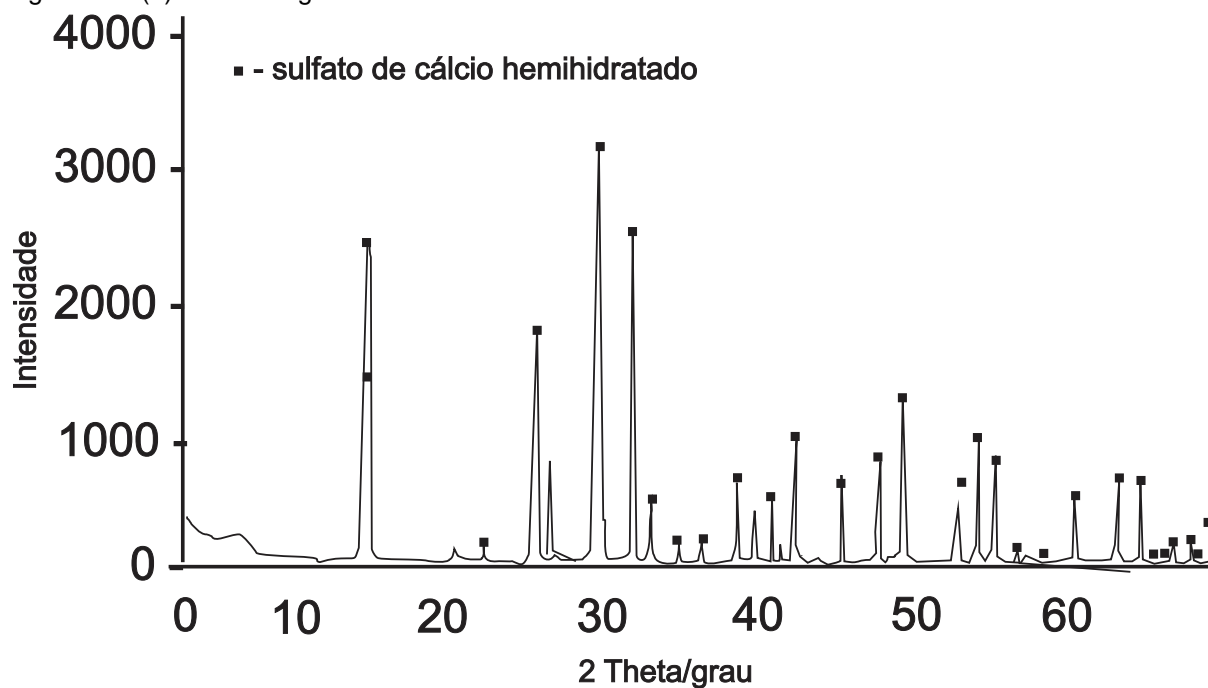
A Figura 3.22 (a) exibe a difração de Raio-x feito nas amostras de gesso e (b) na amostra de gesso reciclado em que foi identificado a presença de hemidrato em ambas e de dihidrato em menor teor presente apenas no gesso.

Figura 3.22(a) – DRX do gesso.



Fonte: Carvalho, Leles e Tubino (2008).

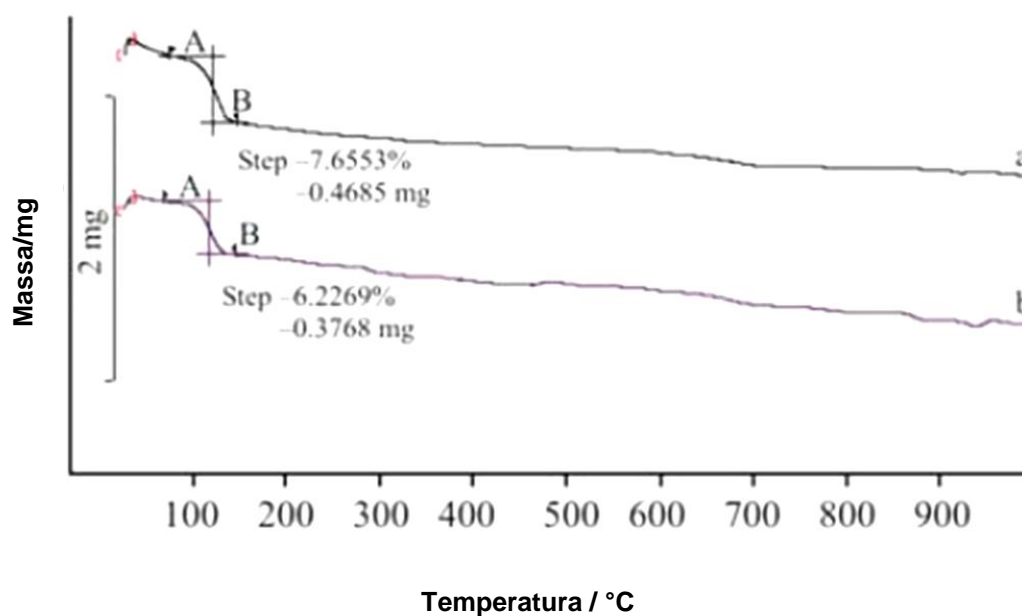
Figura 3.22(b) - DRX do gesso reciclado.



Fonte: Carvalho, Leles e Tubino (2008).

A Figura 3.23 mostra a análise por termogravimetria realizada nas duas amostras, na qual pode ser observada a reação endotérmica coincidente a 150°C para as duas amostras, que corresponde à formação da anidrita solúvel.

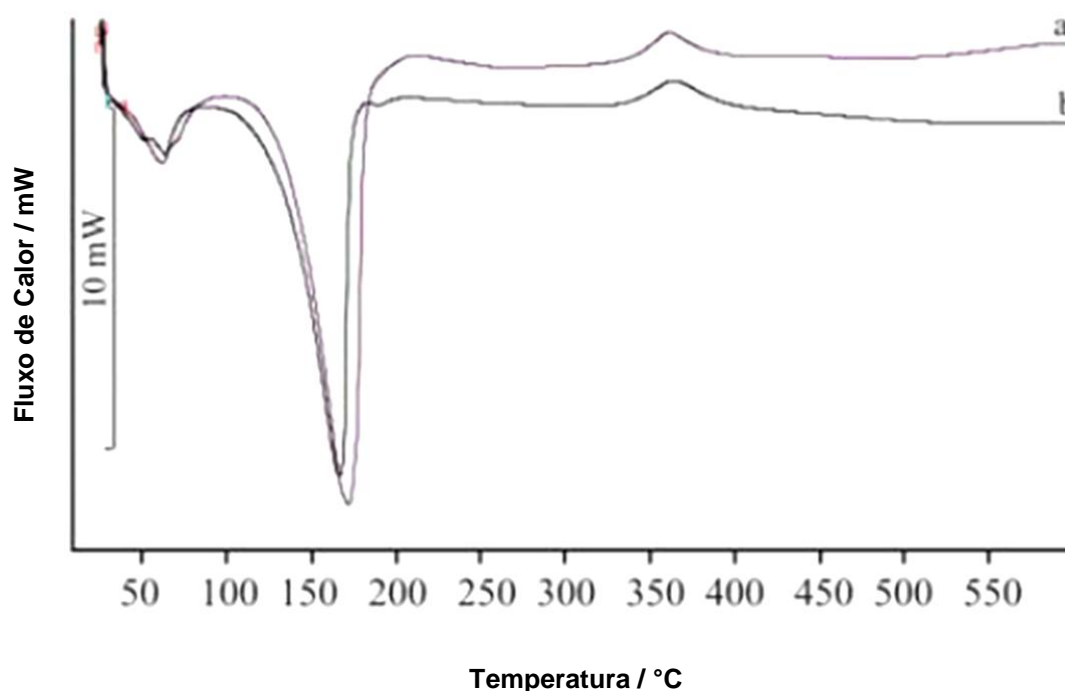
Figura 3.23 – TG do gesso (a) e do gesso reciclado (b).



Fonte: Carvalho, Leles e Tubino (2008).

A Figura 3.24 mostra o resultado da análise efetuada por calorimetria diferencial de varredura onde as curvas exibem semelhança entre as amostras as quais apresentam picos endotérmicos e exotérmicos (fluxo de calor) em temperaturas semelhantes.

Figura 3.24 – DSC do gesso (a) e do gesso reciclado (b).

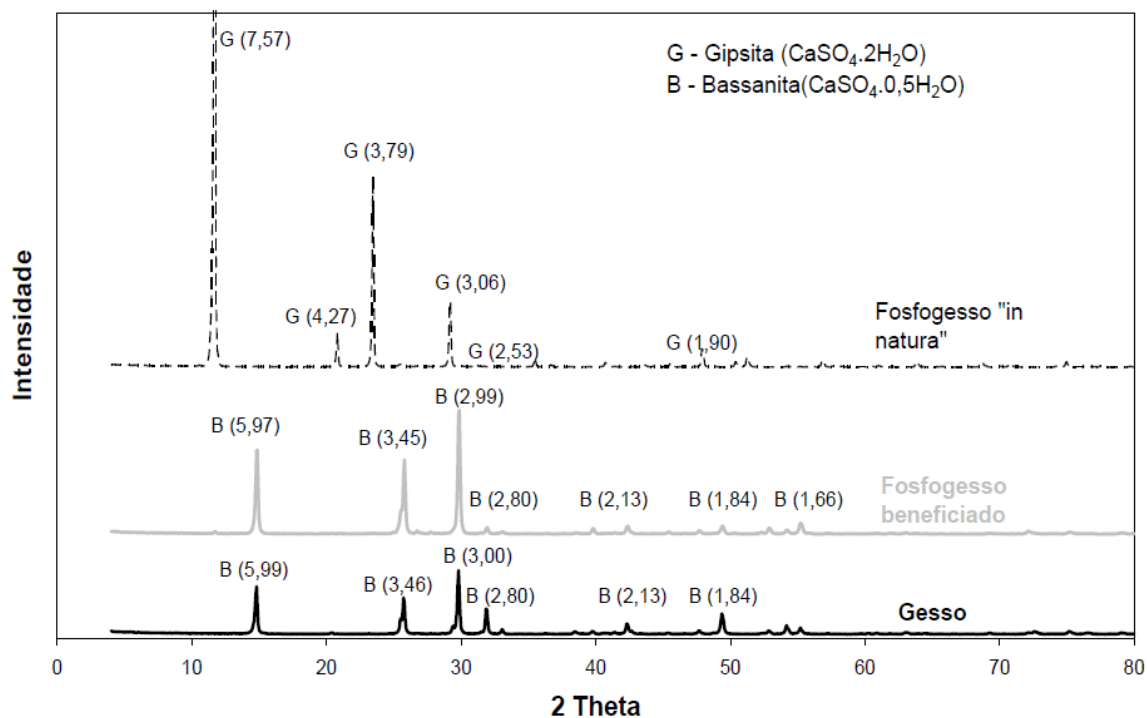


Fonte: Carvalho, Leles e Tubino (2008).

De acordo com os resultados apresentados, apesar dos autores apontarem a viabilidade de utilização do gesso reciclado, há a necessidade de ensaios como tempo de pega, dureza e resistência à compressão para confirmação da viabilidade.

Canut (2006) observou, a partir de espectros de difratometria de raio-x em amostra de gesso e fosfogesso beneficiado, que a microestrutura caracteriza-se pela presença de fases cristalinas, que originaram picos bem definidos dos minerais bassanita (B), conforme Figura 3.25.

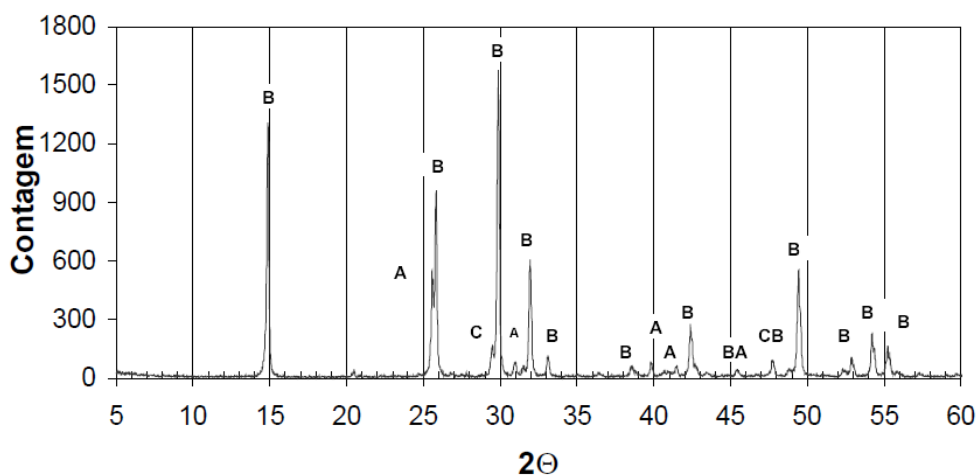
Figura 3.25 – DRX do gesso e fosfogesso.



Fonte: Canut 2006.

Segundo Antunes (1999), o difratograma do gesso demonstrou o predomínio de hemidrato, pelos picos característicos de bassanita B ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Também foi identificado a presença de anidrita A (CaSO_4) e de calcita C (CaCO_3) em menores intensidades conforme a Figura 3.26.

Figura 3.26 – DRX do gesso em pó.



Fonte: Antunes (1999).

Tavares *et al.* (2010) estudaram o desempenho das pastas de gesso e das pastas de gesso com resíduo (argamassas de gesso) em adições de 5% e 10% de resíduo coletados em 4 diferentes obras. O resíduo foi triturado e passado na peneira 0,6 mm. A caracterização química do gesso e dos 4 resíduos esta apresentada na Tabela 3.5.

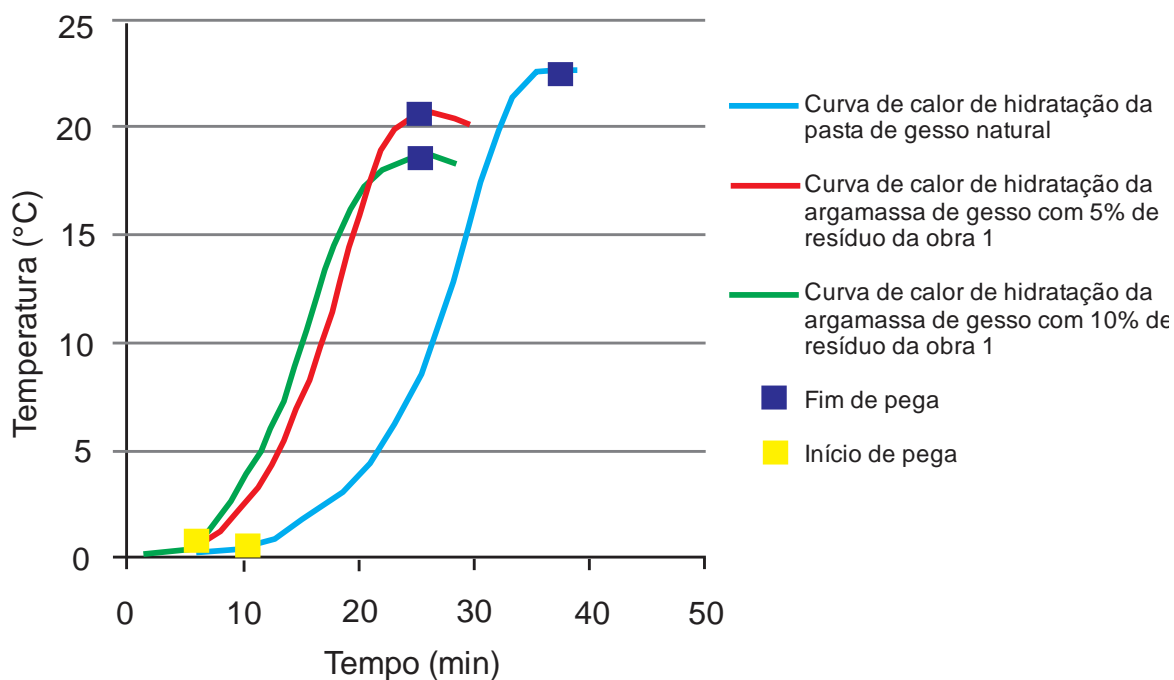
Tabela 3.5 – Caracterização química do gesso e dos resíduos das 4 obras.

Determinações	Resultados (%)				
	Gesso	R. Obra 1	R. Obra 2	R. Obra 3	R. Obra 4
Água Livre	0,64	14,91	9,22	0,15	0,44
Anidrido Sulfúrio (SO ₃)	53,79	44,91	44,38	46,18	38,00
Óxido Cálcio (CaO)	38,16	32,12	32,05	32,87	27,91
Resíduos insolúveis	0,93	2,10	0,46	0,92	17,70

Fonte: Tavares *et.al* (2010).

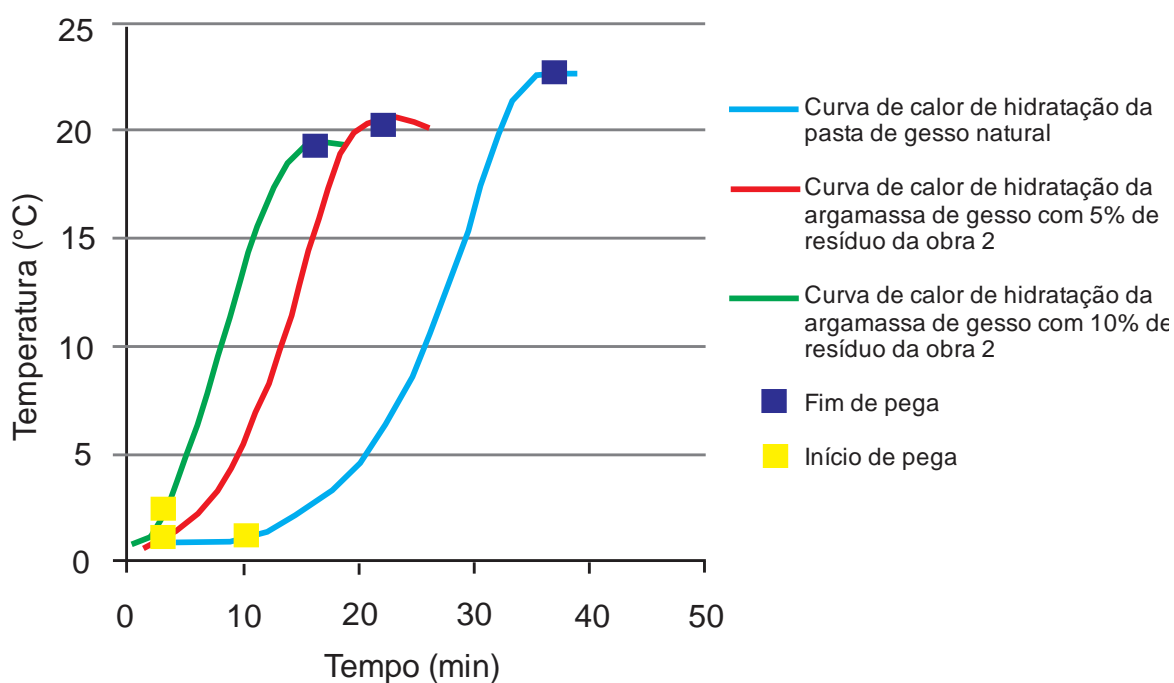
Em laboratório foi utilizada a relação água/gesso igual 0,6 e teores de resíduo de 0% para pasta, 5% e 10% para as argamassas. Na metodologia não consta em que momento o resíduo foi adicionado. Os resultados obtidos nos ensaios de calor de hidratação demonstram a influência do resíduo na antecipação dos tempos de pega das argamassas, que tiveram o início de pega coincidentes independente do teor adicionado, variando apenas pelo tipo de resíduo. As Figuras 3.27 (a), (b), (c) e (d) exibem as curvas de calor de hidratação das misturas com 0%, 5% e 10% de resíduo das 4 obras, em que é possível observar que os tempos de início de pega foram inferiores a 5 minutos, com exceção do resíduo da obra 1 que apresentou início de pega pouco superior a 5 minutos. Os tempos de fim de pega aconteceram no intervalo de 10 a 20 minutos, sendo que para a argamassa com resíduo da obra 1, esse tempo aproximou-se de 25 minutos.

Figura 3.27 (a) – Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 1.



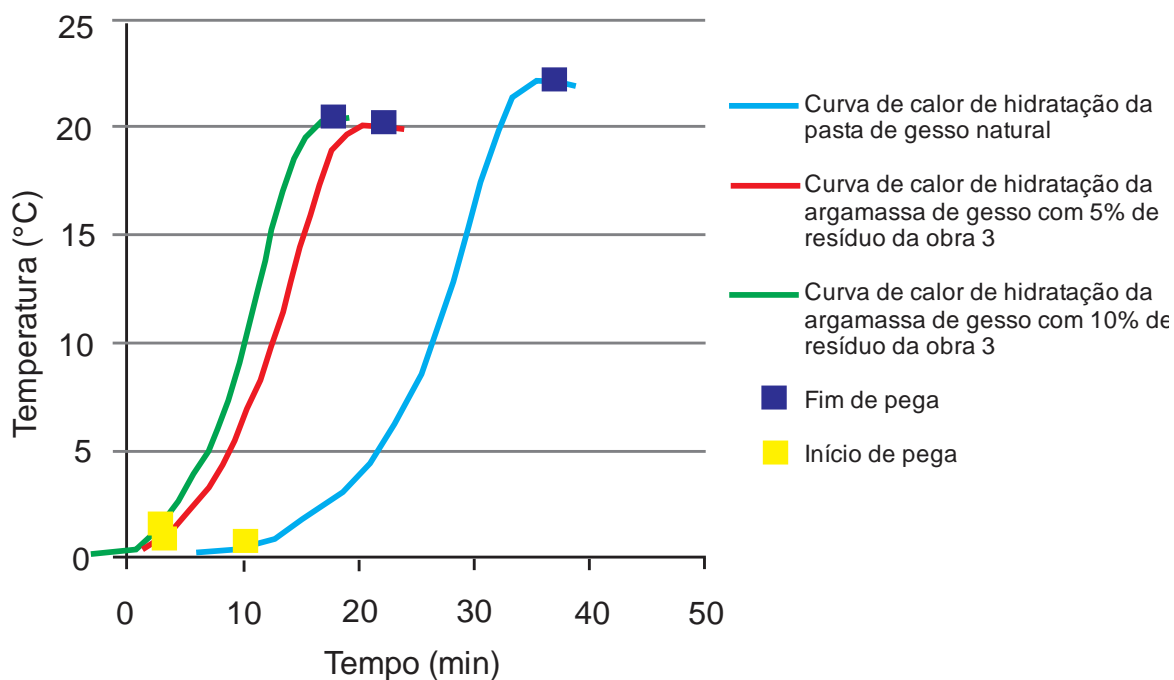
Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Figura 3.27 (b) – Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 2.



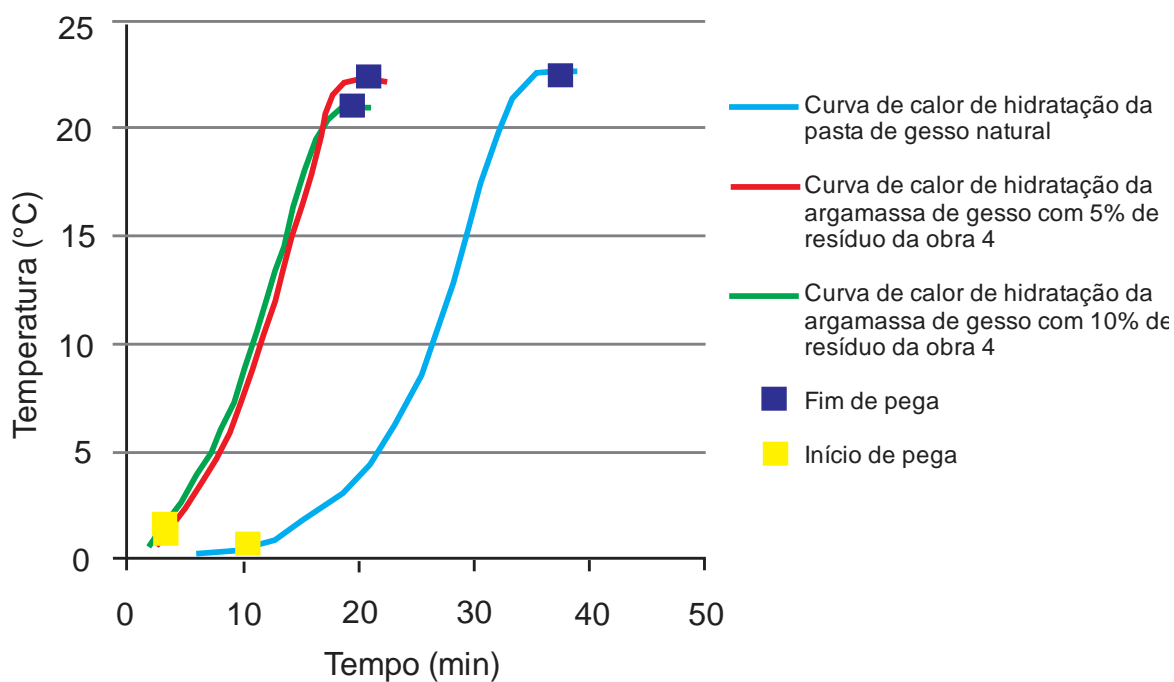
Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Figura 3.27 (c) – Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 3.



Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Figura 3.27 (d) – Curvas de calor de hidratação da pasta e das argamassas com 5% e 10% do resíduo da obra 4.



Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Com esses resultados é possível concluir que o tempo útil das pastas e argamassas elaboradas em laboratório segundo as especificações da NBR 12129 (ABNT, 1991), foi reduzido podendo gerar mais resíduos do que a pasta convencional, uma vez que apresentaram tempo de início de pega próximo à 5 minutos.

A Tabela 3.6 mostra os resultados dos ensaios mecânicos cujos valores apresentados são superiores aos valores solicitados pela norma, porém a unidade de medida utilizada para expressar a dureza foi “u.s.c.”, que após conversão apresentam valores inferiores à exigência da norma.

Tabela 3.6 – Resultados dos ensaios mecânicos.

Mistura de gesso	Teor de resíduo	Resistência à compressão (MPa)	Dureza (u.s.c.)	Dureza (N/mm ²)
Pasta	0%	12,88	85,3	23,89
Argamassa Obra 1	5%	11,71	84,7	23,73
	10%	10,53	81,3	22,77
Argamassa Obra 2	5%	11,61	83,6	23,42
	10%	9,82	82,6	23,14
Argamassa Obra 3	5%	11,59	84,7	24,62
	10%	10,42	81,4	23,66
Argamassa Obra 4	5%	11,60	82,2	23,03
	10%	10,74	81,3	22,77

Fonte: Tavares *et.al* (2010).

A unidade informada é denominada Unidade Strong-Cobb (u.s.c.), que equivale a aproximadamente 7N ou 0,714Kgf, cuja conversão para Kgf/cm² está expressa na equação 7 cujo denominador é igual a área de aplicação da força. A equação 8 exhibe a conversão de Kgf/cm² pra N/mm².

$$0,714 \text{ Kgf} \cdot 85,3 \text{ usc} / 25 \text{ cm}^2 = 2,43 \text{ Kgf/cm}^2 \quad (7)$$

$$2,43 \text{ Kgf/cm}^2 \cdot 9,81 = 23,89 \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

Assim, pode-se concluir que o maior valor relativo a dureza não atingiu a solicitação mínima da norma, que é 30N/mm².

Também foram moldados corpos de prova diretamente nas obras 1 e 4, que utilizaram a relação água/gesso superior a 0,75 e o resíduo beneficiado e passado na peneira com abertura de 1 cm. 10% do resíduo foi adicionado a 1/3 da masseira

no momento de iniciar a aplicação, tendo sido parte retirada para moldagem dos corpos de prova. Ao término dessa quantidade, foram adicionados outros 10% a mais 1/3 da masseira e o último 1/3 da masseira foi utilizada sem resíduo. Os resultados do ensaio de resistência à compressão e os tempos de utilização das argamassas executadas nas Obra 1 e Obra 4 estão descritos na Tabela 3.7.

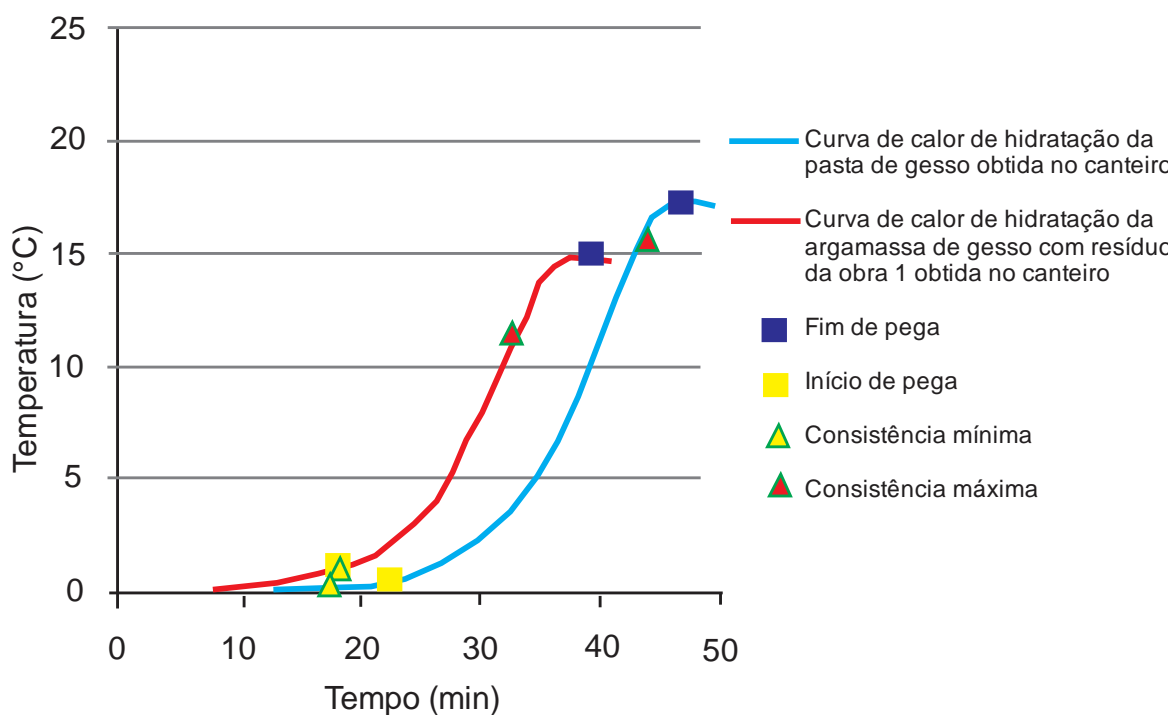
Tabela 3.7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão e tempo útil.

Mistura de gesso	Teor de resíduo	Resistência à compressão (MPa)	Tempo Útil
Pasta pura	0%	8,12	27,20
Argamassa Obra 1	10%	6,39	13,25
Argamassa Obra 4	10%	7,56	22,40

Fonte: Tavares *et.al* (2010).

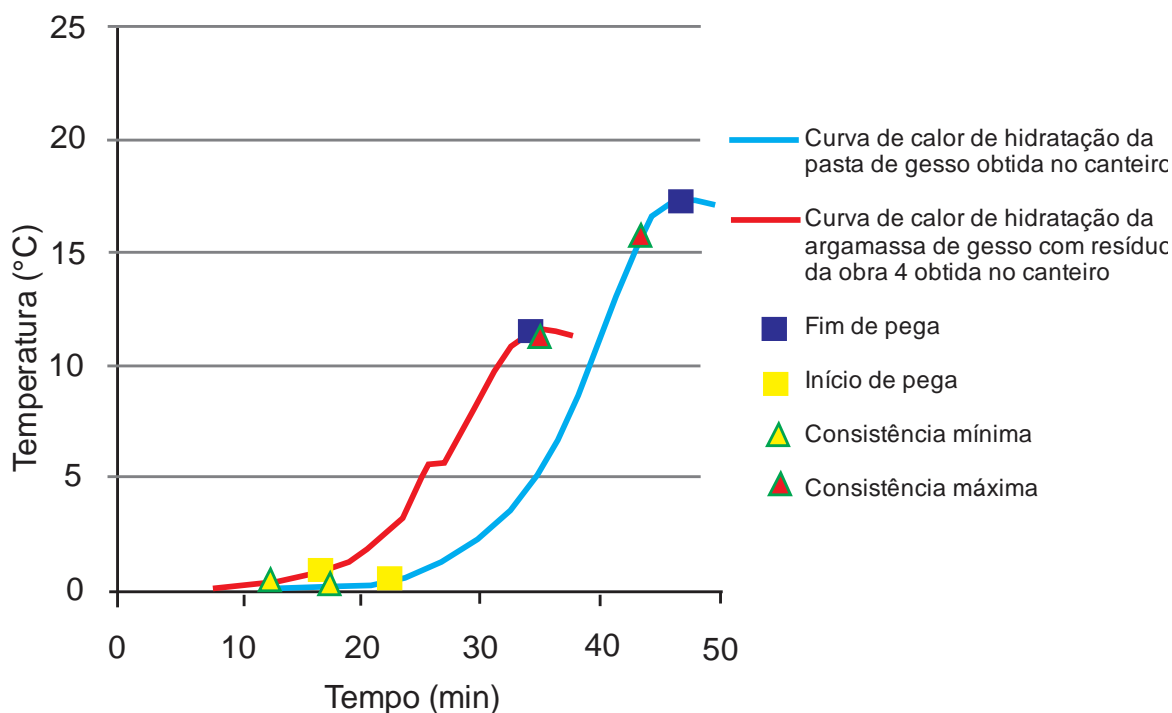
As argamassas das obras 1 e 4 apresentaram tempo de início de pega coincidente ao tempo de consistência mínima e o tempo de consistência máxima próximo do tempo de fim de pega conforme a Figuras 3.28a e 3.28b.

Figura 3.28(a) – Curvas de calor de hidratação da pasta e argamassa feitas na obra 1.



Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Figura 3.28(b) – Curvas de calor de hidratação da pasta e argamassa feitas na obra 4.



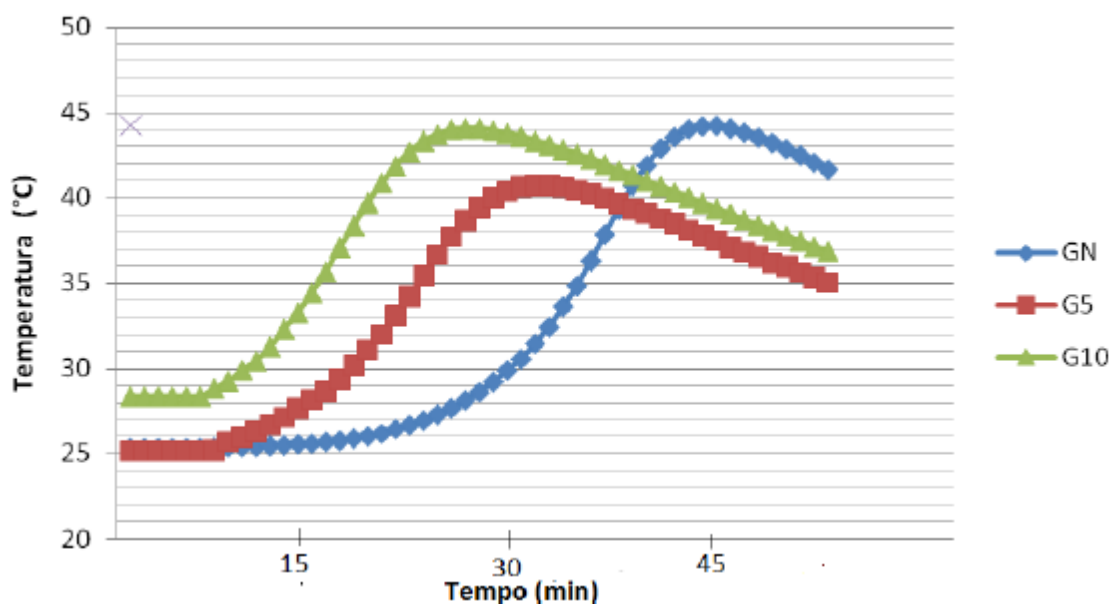
Fonte: Tavares *et.al* (2010).

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram maiores para os corpos de prova moldados em laboratório, possivelmente devido à menor relação água/ gesso utilizada.

De acordo com os resultados apresentados, apesar dos autores apontarem a viabilidade de utilização do resíduo por atender as propriedades mecânicas, o tempo útil deve ser controlado por retardadores, tempo de inserção do resíduo ou outro mecanismo que não permita sua redução.

Bernhoeft, Gusmão e Tavares (2011) investigaram a influência da adição de 5% e 10% de resíduo de gesso nas pastas de revestimento através do calor de hidratação. Utilizaram a relação água/gesso 0,66 e obtiveram a diminuição do tempo de pega proporcional ao incremento da adição. A Figura 3.29 mostra as curvas de hidratação da pasta de gesso e das argamassas com 5%(G5) e 10% (G10) de resíduo, em que pode ser observado a semelhança entre G5 e G10. Os tempos de início de pega situaram-se próximos de um mesmo patamar e o fim de pega, para G5 e G10 foram antecipados proporcionalmente ao teor de resíduo adicionado.

Figura 3.29 – Calor de hidratação da pasta e das argamassas de gesso.



Fonte: Bernhoeft, Gusmão e Tavares (2011).

Os tempos de pega citados no trabalho são referentes às leituras feitas nos ensaios de calorimetria, porém não foram confirmados pelo ensaio de determinação do tempo de pega através do aparelho de Vicat, conforme a NBR 12128 (ABNT, 1991).

Os autores apontam a viabilidade do uso de 5% de resíduo por reduzir o tempo improdutivo sem comprometer o intervalo entre início e fim de pega. Porém a confirmação do intervalo de tempo útil deve ser verificada a partir de ensaios de consistência.

Capítulo 4

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Visando a incorporação de resíduos às pastas de gesso, esse trabalho propõe um programa experimental utilizando o resíduo de gesso em substituição do gesso de construção nos teores de 5% e 10% em relação à massa de gesso. Contemplando o tempo útil das pastas de gesso, foram incorporados ao programa experimental 2 aditivos retardadores de pega e elaborados ensaios voltados a avaliação da consistência. Para verificar a eficiência mecânica das pastas, foram efetuados ensaios de resistência à compressão e dureza, conforme a indicação da norma.

4.1 Programa experimental

Para atingir o objetivo desse trabalho, foi estabelecido um programa experimental dividido em 3 etapas:

1ª Etapa – Caracterização dos materiais – química, física e mineralógica;

2ª Etapa – Ensaio das propriedades físicas e mecânicas;

3ª Etapa – Análise dos resultados.

Para execução do programa experimental foi elaborado um plano onde constam as etapas 1 e 2, com a relação dos ensaios realizados, seus respectivos métodos, números de repetições e os objetos dos ensaios. Os elementos dos ensaios são: o gesso, o resíduo de gesso e suas misturas. Foram planejadas 12 misturas, que incluem a substituição parcial do gesso pelo resíduo nos teores de 0%, 5% e 10%, sendo 3 misturas contendo o retardador de pega, ácido cítrico e outras 3 com o bórax. Foi adotada uma relação água/gesso de 0,7 estabelecida pelo ensaio de consistência normal segundo a NBR 12128 (ABNT,1991). A Tabela 4.1 exibe o planejamento experimental proposto.

Quadro 4.1 – Plano Experimental.

Estado	Objetivo	Ensaio	Método	Repetição	Material	
Pó	Caracterização química	Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxidos de cálcio e anidrido sulfúrico.	NBR 12130 ABNT1991	1	Gesso e Resíduo	
		PH	EMBRAPA (1997)	1		
		Determinação qualitativa e semi-quantitativa de elementos	EDS	1		
		Identificação de óxidos	FRX (PF)	1		
	Caracterização física	Massa unitária			2	Gesso e Resíduo
		Módulo de finura		NBR 12127	2	
		Granulometria		ABNT 1991	2	
		Granulometria à laser		Dispersão à laser	2	
		Mineralógico		DRX	1	
		Microestrutural		MEV	1	
Fresco	Caracterização física	Determinação da Consistência Normal (a/g)	NBR 12128 ABNT 1991	3	Pasta piloto	
		Tempos de pega	NBR 12128 ABNT 1991	1	Pastas 1-12	
		Consistência Útil - Adaptação	NBR 12128 ABNT 1991	1	Pastas 1-12	
		Calorimetria	Pseudo adiabático	1		
Endurecido	Caracterização mecânica	Dureza	NBR 12129 ABNT 1991	3	Blocos 1-12	
		Resistência à compressão	NBR 12129 ABNT 1991	3	Blocos 1-12	
	Caracterização Microestrutural	Microestrutura	MEV	1	Amostras 1-2, 5-6 e 9-10	

Fonte: Acervo próprio.

Foi elaborada uma matriz experimental definindo os traços de cada mistura para a realização dos ensaios de calorimetria, tempo de pega, consistência útil, resistência à compressão e dureza. A Tabela 4.2 exibe a matriz experimental utilizada para os

ensaios das propriedades físicas da pasta e propriedades mecânicas dos corpos de prova.

Quadro 4.2 – Matriz experimental.

	Misturas	Gesso (%)	Resíduo (%)	A/G	Aditivo (%)	Ensaio	Métodos
G1	M1	100	0	0,7	-	Calorimetria	Pseudo-adiabática
	M2	95	5	0,7	-		
	M3	90	10	0,7	-		
	M4	80	20	0,7	-	Tempos de Pega	NBR 12128
G2	M5	100	0	0,7	AC 0,03	Consistência Útil	Adap.NBR 12128
	M6	95	5	0,7	AC 0,03		
	M7	90	10	0,7	AC 0,03		
	M8	80	20	0,7	AC 0,03	Dureza	NBR 12129
G3	M9	100	0	0,7	B 0,7	Resistência à Compressão	NBR 12129
	M10	95	5	0,7	B 0,7		
	M11	90	10	0,7	B 0,7		
	M12	80	20	0,7	B 0,7		

Fonte: Acervo próprio.

4.2 Materiais

Os materiais objeto de estudo deste trabalho foram, água, gesso fino para revestimento, resíduo de gesso proveniente da utilização de revestimentos de paredes e tetos e aditivos retardadores de pega, ácido cítrico e bórax.

4.2.1 Água

Toda a água utilizada para elaboração das pastas, limpeza dos equipamentos, dispositivos ou outras finalidades foi de fornecimento da concessionária local, considerada potável, com exceção dos ensaios pilotos cujas normas solicitaram a utilização de água destilada.

4.2.2 Gesso

O gesso utilizado no programa experimental foi o gesso lento para revestimento, conforme as condições específicas da NBR 13867 (ABNT,1997). De acordo com as informações das empresas prestadoras de serviço, ele é o mais utilizado na cidade

de Vitória-ES e entorno. Foi fornecido pela empresa Gesso Amaral e caracterizado conforme exposto no item 4.3.

4.2.3 Resíduo de gesso

O resíduo de gesso utilizado é proveniente da atividade de revestimento de paredes e tetos e foi coletado em 2 obras da mesma empresa aplicadora. Trata-se de um dihidrato que apresenta em sua composição óxidos de cálcio e anidrido sulfúrico em percentuais semelhantes à gipsita, matéria-prima do gesso. Em sua composição, diferencia-se do gesso pela quantidade de moléculas de água adquirida no processo de hidratação.

4.2.4 Aditivo retardador de pega

Os aditivos utilizados foram ácido cítrico ($C_6H_8O_7$), comumente usados pelas empresas gesseiras, e o bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), citado por Hincapié e Cincotto (1997a), devido ao seu desempenho satisfatório em pastas de gesso. Ambos foram adquiridos no mercado local.

4.3 Métodos

Aqui são relatados todos os ensaios descritos no programa experimental, desde a caracterização dos materiais (gesso e resíduo) até a determinação das propriedades dos corpos de prova, para a comprovação científica da proposta deste trabalho.

4.3.1 Coleta e preparo do resíduo

O resíduo foi coletado em canteiro de obra da cidade de Vitória-ES no momento do término da execução do serviço de revestimento de parede. Antecedendo a coleta foi feito um cobrimento do piso com lona no perímetro a ser utilizado para evitar contaminação com outros resíduos e após coletados foram acondicionados em sacos plásticos até seu tratamento no laboratório, conforme orientação da NBR 10007 (ABNT, 2004). A Figura 4.1a mostra o tratamento em obra para a coleta do resíduo. No laboratório de ensaio de materiais de construção (LEMAC) da UFES, o

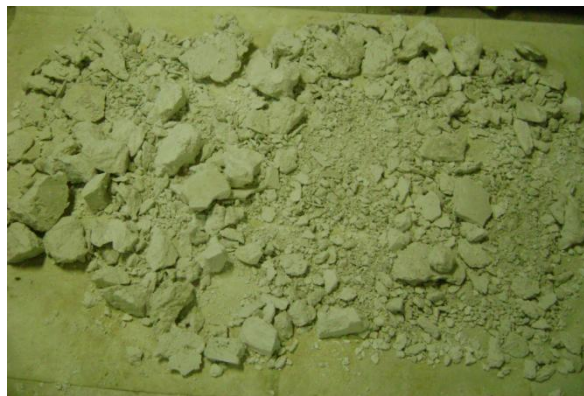
resíduo foi espalhado sobre uma lona para secagem natural por um período de 2 semanas, mostrado na Figura 4.1b.

Figura 4.1(a) – Coleta do resíduo de gesso.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.1(b) – Espalhamento e secagem.



Fonte: Acervo próprio.

Com o resíduo aparentemente seco, foi triturado com marreta de ferro para redução do seu diâmetro, conforme Figura 4.2a e posteriormente passado no britador de mandíbula (BM1280), no britador Viatest (BB100 – mangan), e finalizado a moagem no Pulverizador de argolas para a obtenção do pó, Figura 4.2b.

Figura 4.2(a) – Beneficiamento manual.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.2(b) – Moagem fina.



Fonte: Acervo próprio.

4.3.2 Caracterização física

Findada a moagem do resíduo, foram executados os ensaios para a determinação da granulometria, módulo de finura e massa unitária, do resíduo e do gesso conforme a NBR12127 (ABNT,1991). Como complementação a caracterização física, foi elaborado a granulometria a laser, o DRX para análise mineralógica e MEV com EDS para visualização da microestrutura e identificação da composição mineralógica. A Tabela 4.1 indica as exigências físicas da NBR 13207 (ABNT,1994) para o pó de gesso de construção civil.

Tabela 4.1 – Exigências físicas do pó.

Classificação do gesso	Módulo de finura (NBR 12127)	Massa unitária (NBR 12127)
Gesso fino para revestimento	<1,10	>700,00 Kg/m ³
Gesso grosso para revestimento	>1,10	
Gesso fino para fundição	<1,10	
Gesso grosso para fundição	>1,10	

Fonte: Adaptada da NBR 13207 (ABNT,1994).

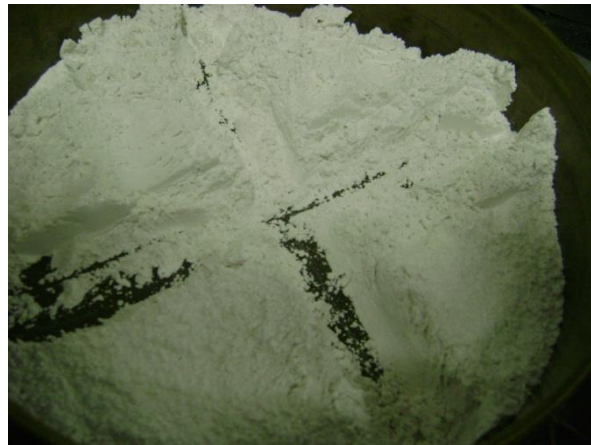
Para determinação granulométrica manual das amostras, foram executadas 2 determinações. Foi utilizada a série de peneiras padrão 0,840 mm, 0,420 mm, 0,210 mm e 0,105 mm, e o procedimento descrito pela NBR 12127 (ABNT,1991). A Figura 4.3a mostra a série de peneiras utilizadas na determinação manual e a Figura 4.3b, o quarteamento da amostra homogeneizada, seca em estufa até massa constante e esfriada em dessecador. Os resultados classificam a amostra como finos ou grossos e permite a determinação do módulo de finura.

Figura 4.3(a) – Série de peneiras.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.3(b) – Quarteamento.



Fonte: Acervo próprio.

Com o término do ensaio de granulometria, foi calculado o módulo de finura através do somatório do percentual retido acumulado em cada peneira da série-normal.

Com objetivo de complementar e conferir os resultados, foi elaborado uma granulometria a laser nas amostras. O equipamento utilizado foi o granulômetro a laser da marca Sympatech do LEMAC - UFES.

Para execução desse ensaio foi necessário conhecer a massa específica das amostras para a calibração do equipamento.

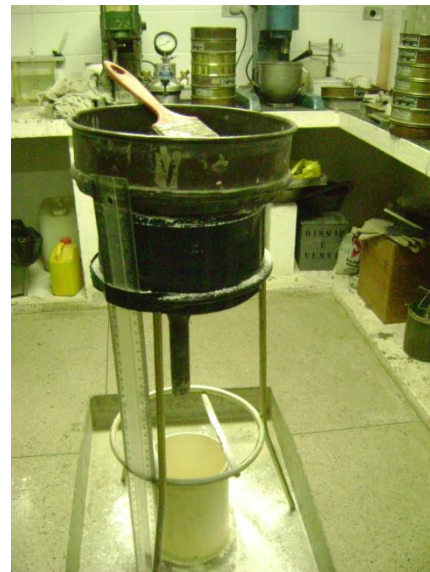
A massa unitária é a relação entre a massa não compactada de material e o volume do recipiente. Para a determinação da massa unitária foi utilizado o material e método descrito pela NBR 12127 (ABNT,1991). A Figura 4.4a mostra a superfície do recipiente sendo rasada e a Figura 4.4b apresenta a aparelhagem que foi utilizada para a realização do ensaio nas amostras.

Figura 4.4(a) - Superfície rasada.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.4(b) – Aparelhagem.



Fonte: Acervo próprio.

Com o intuito de ampliar o conhecimento sobre as amostras foram realizadas análises de DRX para caracterizá-las mineralogicamente. A técnica de difração de raios X permite a identificação dos minerais presentes. As amostras foram passadas na peneira 200 mesh (74 μ m) e acondicionados em porta amostra para a análise em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A amostra foi analisada sob voltagem 40 KV e amperagem de 30 mA, em sistema $\theta/2\theta$, com velocidade de varredura de 0,02 $^\circ$ /seg, de 3 $^\circ$ a 70 $^\circ$ 2 θ . A fonte de energia é um filamento de tungstênio (catodo) e o tubo de raios-X é de cobre (anodo), cujos comprimentos de onda (λ) são: $K\alpha$ 1,5418 Å e $K\beta_1$ 1,3922 Å. As interpretações foram realizadas em computador, acoplado ao difratômetro, utilizando-se software para captura de dados. Para a interpretação de dados foi acessado o banco de dados JCPDS.

A principal aplicação da difração de raios X refere-se à identificação de compostos cristalinos, sejam eles inorgânicos ou orgânicos.

Os planos de difração e suas respectivas distâncias interplanares, bem como as densidades dos átomos (elétrons) ao longo de cada plano cristalino, são características específicas e únicas de cada substância cristalina, da mesma forma que o padrão difratométrico por ela gerado (equivalente a uma impressão digital) (SOUZA, 2012).

Para complementar a caracterização física foram realizadas imagens por microscópio eletrônico de varredura (MEV) nas amostras do pó de gesso e resíduo, além de verificar possíveis mudanças representativas nas estruturas das amostras com a substituição pelo resíduo e uso dos aditivos.

As amostras em pó do gesso e do resíduo foram submetidas à temperatura de 40°C em estufa para redução da umidade e mantidas em dessecador até o momento da metalização. Em cada porta-amostra foi colada uma fita metálica na qual foi fixado o pó, retirado o excesso e metalizado com ouro. Com as superfícies metalizadas, as amostras foram inseridas no MEV.

Para a microscopia também foram selecionadas as amostras do ensaio de resistência à compressão que apresentaram as maiores resistências no ensaio. As amostras foram extraídas da parte interna dos blocos, sendo mantida a superfície de fratura e identificadas juntamente com as amostras do fragmento do resíduo e de gipsita conforme a Figura 4.5.

Figura 4.5- Identificação dos formatos e superfícies das amostras para o MEV.

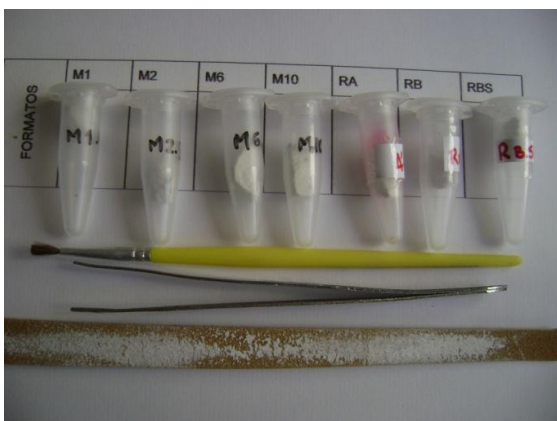
	M1	M2	M5	M6	M9	M10	RB	GY
FORMATOS								
M1 – água e gesso; M2 – água, gesso e 5% de resíduo; M5 – água, gesso, ácido cítrico; M6 – água, gesso, 5% de resíduo e ácido cítrico; M9 – água, gesso, bórax; M10 – água, gesso, 5% de resíduo e bórax; RB – resíduo britado e GY – gipsita.								

Fonte – Acervo próprio.

Para o preparo das amostras, foi utilizada uma pinça longa, um pincel de cerdas macia e uma fixa fina, conforme a Figura 4.6a. Cada amostra foi limpa com pincel de cerdas macias para remoção de fragmentos soltos objetivando a visualização limpa da superfície fraturada. A face oposta de cada amostra foi submetida à ação de lixa para torná-las paralelas à superfície a ser analisada e produzir melhor aderência à fita metálica que se faz necessário devido a baixa condutividade das amostras. Após

a fixação das amostras, foi feita a metalização em ouro no aparelho Emitech modelo K550x, conforme Figuras 4.6b e 4.6c, que exhibe as amostras durante o processo de metalização. Na seqüência, as amostras foram levadas para o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo EVO 40 da Carl Zeiss SMT de acordo com a Figura 4.6d e Figura 4.6e que mostra as amostras no interior do MEV. Todo esse processo foi realizado no laboratório de Caracterização superficial de Materiais da UFES sob operação do Engenheiro Mecânico Yukio Nishida.

Figura 4.6(a) – Ferramentas para preparo.



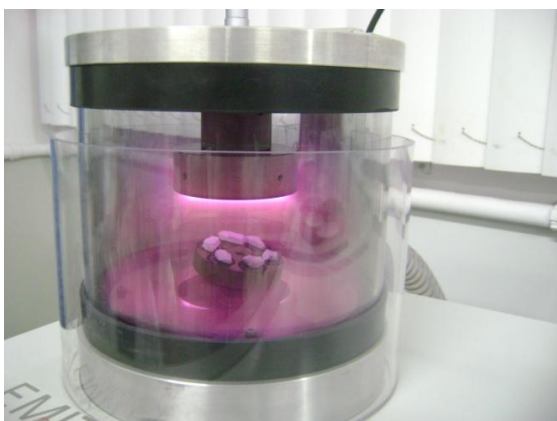
Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.6(b) – Aparelho de Metalização.



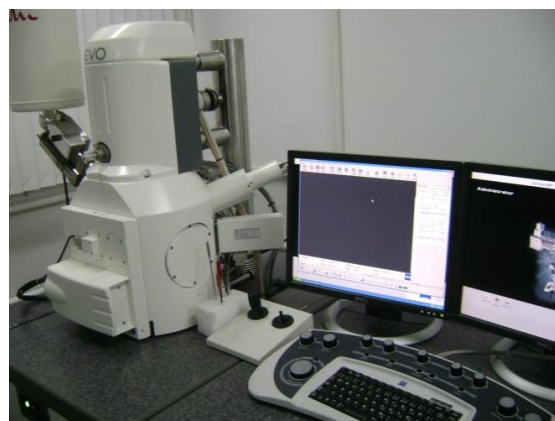
Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.6(c) – Processo de metalização.



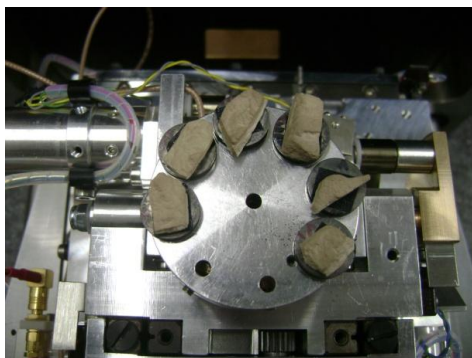
Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.6(d) – MEV.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.6(e) – Amostras metalizadas no interior do MEV.



Fonte: Acervo próprio.

4.3.3 Caracterização química

A caracterização química tem por objetivo a identificação do material por sua composição específica.

Os ensaios de determinação de água livre e de cristalização e de teores de óxidos de cálcio e anidrido sulfúrico foram executados conforme a NBR 12130 (ABNT, 1991), no Laboratório de Química Analítica DQUI - UFES. A Figura 4.7a mostra a titulação que é parte do ensaio para determinação do óxido de cálcio e a Figura 4.7b mostra a filtração lenta para eliminação de cloretos de diferentes gessos, tal procedimento é parte do ensaio para determinação do anidrido sulfúrico.

Figura 4.7(a) – Titulação.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.7(b) – Filtração lenta.



Fonte: Acervo próprio.

A Tabela 4.2 apresenta os limites químicos exigidos pela NBR 13207 (1994) para o gesso de construção.

Tabela 4.2 – Exigências químicas do gesso para construção civil.

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre	Máx. 1,3
Água de cristalização	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	Mín. 38,0
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	Mín. 53,0

Fonte: NBR 13207 (ABNT, 1994).

Com o objetivo de verificar os resultados dos ensaios realizados segundo a NBR 12130 (ABNT, 1991) foi executadas as Análise Química Semiquantitativa por Fluorescência de Raio-X (FRX) com Perda ao Fogo (PF) para as amostras de gesso e de resíduo, no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, na Unidade de Pesquisa aplicada e Transferência de Tecnologia – UNPA em Natal- RN.

O material foi prensado em prensa manual em forma de pastilha, com diâmetro de cerca de 15 mm. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material foi submetido à secagem em estufa por 24 h em temperatura de 110°C e posteriormente foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

A Figura 4.8a apresenta a amostra de gesso utilizada na análise e a figura 4.8b, a amostra do resíduo de gesso.

Figura 4.8(a) – Amostra de gesso.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.8(b) – Amostra do resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

Os resultados da análise química foi apresentado em % de peso em óxido com valor de perda ao fogo.

Objetivando a complementação às análises químicas, foram realizadas análises por EDS que determina a composição qualitativa e semi-quantitativa das amostras de gesso e resíduo na forma de pó, foram feitas análises pelo Sistema de Energia Dispersiva (EDS), no Laboratório de Caracterização Superficial de Materiais da UFES.

Nesse ensaio foi possível verificar os elementos constituintes das amostras e seus teores.

Para obter uma caracterização química mais abrangente foi feita a análise do pH das amostras, no Laboratório de Caracterização Ambiental - LACAR da UFES, segundo o procedimento estabelecido pela EMBRAPA (1997).

4.3.4 Caracterização física da pasta

Para a determinação das propriedades do gesso no estado fresco, foram feitos os ensaios de determinação de consistência normal e tempo de pega segundo a NBR 12128 (ABNT, 1991), e ensaios de consistência útil, adaptado da NBR 12128 (ABNT, 1991) e calorimetria pseudo-adiabática adaptado do proposto por MURAT e JEANDOT (1973) *apud* HINCAPIÉ e CINCOTTO (1997b).

As pastas de todos os ensaios foram elaboradas iniciando pelo povilhamento do gesso sobre a água, por 1 minuto e seguido por mistura circular por 1 minuto. Então transferida para os respectivos recipientes dos ensaios. O cronômetro foi acionado ao início do povilhamento do gesso.

Para a determinação da consistência normal foram seguidos os procedimentos descritos na NBR 12128 (ABNT, 1991). Para elaboração do ensaio, foi tomada uma amostra de 3000 g totalmente passada na peneira de 2,00 mm com auxílio de pincel e não houve retenção. Foram ensaiadas 3 diferentes proporções em que foi fixada a quantidade de água em 150g contendo 10 ml da solução de citrato de sódio e variadas as massas de gesso em 250g, 210g e 185g. Estabelecendo assim a relação água/ gesso adotado neste trabalho. A Figura 4.9 apresenta a fotografia de

uma das tentativas para a determinação da consistência normal utilizando-se o aparelho de Vicat modificado.

Figura 4.9 – Ensaio de determinação da consistência normal.



Fonte: Acervo próprio.

A consistência é considerada normal quando é obtida uma penetração da sonda na pasta entre 28mm e 32mm.

Para a verificação dos tempos de pega segundo a NBR 12128 (ABNT, 1991), foi utilizada a relação a/g 0,7 estabelecida no ensaio de consistência normal, com isso, foi descartada a proporção sugerida pelo fabricante do gesso utilizado nesta pesquisa de a/g igual 0,8. O ensaio foi executado para as 12 misturas propostas no projeto experimental concomitante aos ensaios de consistência útil e calorimetria. O objetivo da realização em conjunto dos 3 diferentes ensaios foi verificar o tempo em que a pasta permanece em condições trabalháveis e confirmar que o tempo de início e fim de pega não tem relação com os tempos de uso das pastas.

Segundo Ridge (1959) *apud* Antunes (1999), o tempo de início de pega é estabelecido no instante que a temperatura apresenta variação de 0,1°C/min e o fim de pega, segundo Thole (1994) *apud* Antunes (1999), é o instante em que a

temperatura máxima é atingida. Os ensaios elaborados nesta pesquisa apontam distorções dos tempos de pega em relação à temperatura e a consistência útil das pastas.

Segundo Antunes (1999), a reação de hidratação é iniciada no instante de contato do pó com a água e a consistência de pasta inicia-se pouco antes do final do período de indução, isto é, antes do início de pega, e segue até o endurecimento completo.

A forma de mensuração dos tempos de pega segundo a NBR 12128 (ABNT, 19991) em comparação com o método proposto pela norma alemã DIN 1168 (1975), apresenta um desvio de volume de dihidrato precipitado de 10%. Isto é, segundo Stav e Bentur (1995) *apud* Antunes (1999), no início de pega registrado pela agulha de Vicat há cerca de 10% de dihidrato já formado.

Se o início de pega é caracterizado pela variação de temperatura de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com a incorporação de resíduo, o ensaio no aparelho de Vicat não funciona, pois a variação de temperatura ocorre imediatamente ao contato com a água e a leitura de 1mm da base ocorre minutos depois, o que pode ser verificado no capítulo 5.

Com a utilização de resíduo de gesso (dihidrato) nas pastas, que precipitam-se instantaneamente dando consistência pastosa a mistura, a elevação de temperatura também ocorre imediatamente, registrando variação $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Os tempos de pega estão relacionados à qualidade do gesso conforme o seu destino. Segundo a NBR 13867 (ABNT, 1997) a pasta de gesso deve ter sua aplicação terminada antes que ocorra o início da pega, pois com o início da pega a pasta não mais apresenta trabalhabilidade. O fim de pega, segundo Thole (1994) *apud* Antunes (1999), é caracterizado quando a reação atinge a temperatura máxima. Também neste aspecto, o fim de pega registrado pelo aparelho de Vicat, não corresponde à temperatura máxima da reação. Após o registro do fim de pega, quando a agulha não mais penetra na pasta, a temperatura ainda se eleva por um determinado período, variando conforme os componentes da pasta.

A Tabela 4.3 mostra os valores exigidos pela NBR 13207 (ABNT, 1994) para os tempos de início e fim de pega dos gessos para revestimentos e para fundição.

Tabela 4.3 – Exigências do tempo de pega do gesso para construção civil.

Classificação do gesso	Tempo de Pega (min.) - (NBR 12128)	
	Início	Fim
Gesso fino para revestimento	>10	>45
Gesso grosso para revestimento	>10	>45
Gesso fino para fundição	4 - 10	20 - 45
Gesso grosso para fundição	4 - 10	20 - 45

Fonte: Adaptado da NBR 13207 (ABNT,1994).

A Figura 4.10 mostra o ensaio de Vicat sendo executado, momento em que a agulha atinge o início de pega, registrando a distância de 1 mm da base, conforme leitura feita na escala decrescente do lado esquerdo.

Figura 4.10 – Ensaio de tempo de pega.



Fonte: Acervo próprio.

O ensaio de consistência útil foi elaborado semelhantemente ao realizado por Antunes (1999) em obra, com sucessivas leituras entre o início de uso da pasta e o seu fim de uso. O conceito de faixa de consistência útil proposto por Antunes (1999) define como o intervalo entre a consistência mínima e máxima em que a pasta pode ser utilizada.

Os ensaios foram cronometrados e realizados ao mesmo tempo com os ensaios de tempo de pega e calorimetria. A água utilizada foi a fornecida pela concessionária local em temperatura de 23°C, oscilando 2°C. A adaptação ao ensaio de Vicat modificado da NBR 12128 (ABNT, 1991) deu-se devido a não utilização da solução de citrato de sódio, pelo uso de água de reservatório e pela sequência de leituras, em que são relatadas as consistências a partir da penetração de 32 mm até atingir 0 mm. No capítulo 5, podem ser observados os intervalos de consistência útil para todas as misturas e também a constatação que o tempo final de utilização da pasta antecede tanto a temperatura máxima da reação como ao tempo de final de pega. A Figura 4.11 mostra os 3 ensaios sendo realizados ao mesmo tempo.

Figura 4.11 – Ensaio de Consistência útil, Tempo de pega e Calorimetria.



Fonte: Acervo próprio.

Os ensaios de calorimetria tiveram como objetivo registrar a elevação da temperatura através do tempo.

Segundo Antunes (1999), através da calorimetria obtém-se as curvas de calor de hidratação em função do tempo, que por meio adiabático é possível verificar a variação da temperatura em relação ao tempo.

Com esse ensaio foi possível medir as temperaturas do início e fim de pega, e registrar a variação de temperatura de todo intervalo em que a pasta apresenta-se trabalhável, obtendo-se, assim, a temperatura de início e fim de consistência útil.

Foi utilizado um calorímetro pseudo-adiabático semelhante ao proposto por Murat e Jendot (1973) *apud* Antunes (1999).

O calorímetro pseudo-adiabático foi formado por um recipiente de isopor com tampa, um copo plástico descartável para deposição da amostra, fechado também com tampa de isopor com uma rolha no meio para centralizar o fio do termopar na pasta. Foi utilizado um termo-higrômetro e um cronômetro para leituras. A pasta de cada mistura é exatamente a mesma utilizada para os ensaios de consistência útil e tempo de pega, uma vez que foram realizados concomitantemente a esses ensaios. A Figura 4.12a, mostra o copo com a rolha e o termopar utilizados no interior do recipiente de isopor e Figura 4.12b, mostra o recipiente de isopor completo para o ensaio.

Figura 4.12(a) – Partes do calorímetro.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.12(b) – Calorímetro completo.



Fonte: Acervo próprio.

4.3.5 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica dos corpos de prova foi feita através dos resultados dos ensaios de resistência à compressão e dureza. A preparação dos corpos de prova e procedimento do ensaio foram seguidas as orientações da NBR 12129 (ABNT, 1991). As amostras de gesso e do resíduo, para todas as misturas em que foram utilizadas, foram passadas através da peneira 2,0 mm com auxílio de pincel. Não houve retenções como torrões ou impurezas. Para todas as pastas foi utilizada a relação a/g 0,7. Para cada mistura foram moldados três corpos de prova cúbicos de 50,0 mm de aresta simultaneamente em molde impermeável, não reativo ao sulfato de cálcio e rígido. Após a desmoldagem, todos os corpos de prova tiveram suas arestas medidas, confirmando não ter havido retração e identificados na face rasada. A Figura 4.13a mostra o molde utilizado para moldagem dos corpos de prova e a Figura 4.13b mostra a conferência de massa por pesagem até atingir a massa constante. Para secagem foram mantidos sob temperatura controlada de 35°C em mufla até atingirem a massa constante, o que levou aproximadamente 7 dias. Após secos, foram mantidos em dessecador até o momento dos ensaios. A Figura 4.13c mostra os corpos de prova no interior da mufla mantidos a temperatura constante de 35°C e Figura 4.13d mostra os corpos de prova no dessecador.

Figura 4.13(a) – Moldagem.

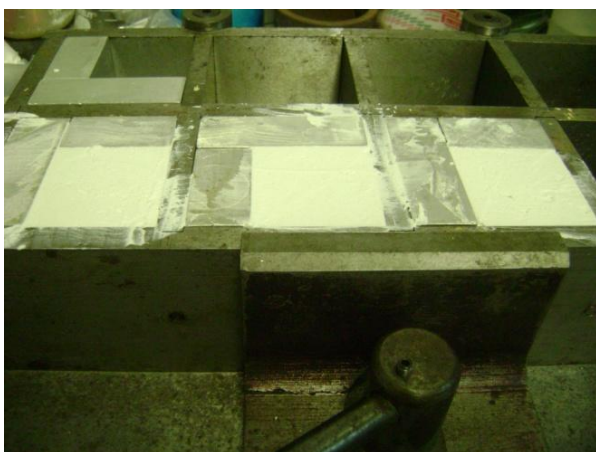


Figura 4.13(b) – Conferência de massa.



Fontes: Acervo próprio.

Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.13(c) – Na mufla.



Figura 4.13(d) – No dessecador.

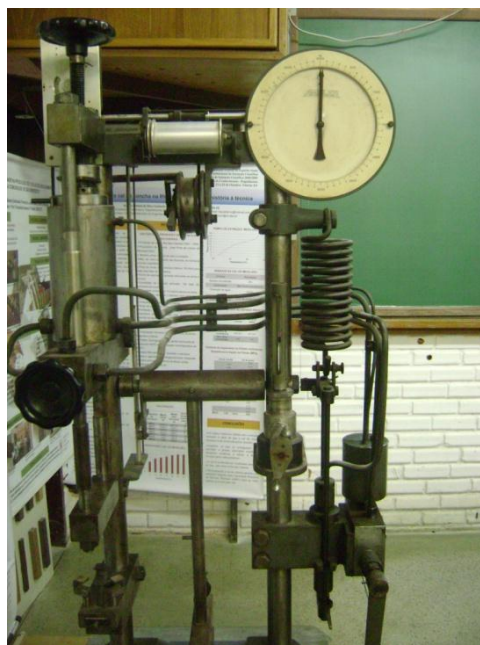


Fonte: Acervo próprio.

Fonte: Acervo próprio.

Os ensaios de resistência à compressão e dureza que foram executados na máquina universal de ensaio AMSLER de 6000 Kgf para ensaios de madeira, escala de sensibilidade para 6000 Kg e 600 Kg, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.14 – Máquina universal de ensaio.



Fonte: Acervo próprio.

As exigências mecânicas do gesso para construção civil segundo a NBR 13207 (ABNT, 1994) estão expressas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Exigências mecânicas do gesso para construção civil.

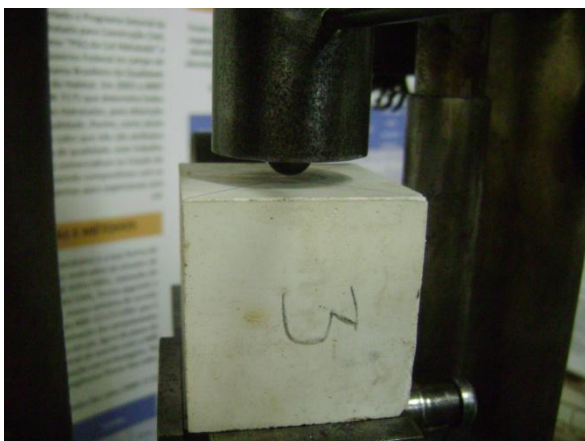
Determinações físicas e mecânicas	Unidade	Limites
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	>8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	>30,00

Fonte: NBR 13207 (ABNT, 1994).

O procedimento para o ensaio de dureza realizados nos corpos de prova foi o indicado pela NBR 12129 (ABNT, 1991). Foram selecionadas a face inferior e duas outras laterais opostas para esse ensaio. A Figura 4.15a mostra a realização do ensaio. Primeiramente foi aplicada uma carga de 50N, elevada para 500N em dois segundos e mantida por 15 segundos. Após a realização do ensaio nas 3 faces selecionadas, foi feito a leitura com paquímetro das profundidades deixada pela impressão da esfera nas três faces dos três corpos de prova e calculada a dureza em Newtons por milímetro quadrado a partir da média da profundidade das 3 séries.

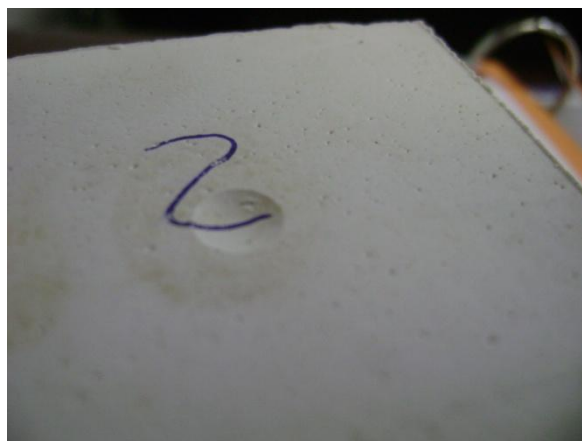
A Figura 4.15b mostra a impressão deixada pela esfera em uma das faces do corpo de prova.

Figura 4.15(a) – Ensaio de dureza.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.15(b) – Impressão no corpo de prova.

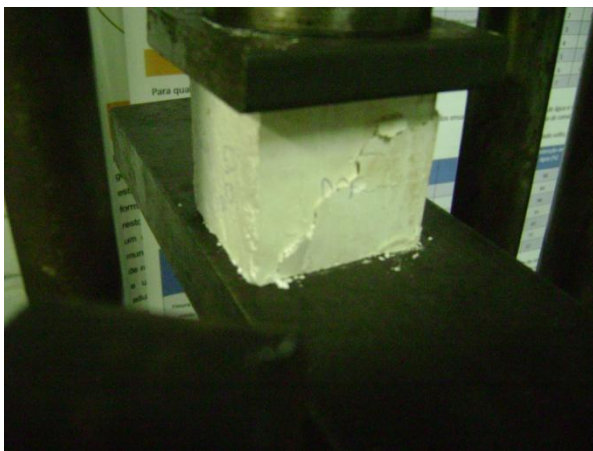


Fonte: Acervo próprio.

Com a conclusão do ensaio de dureza e com todas as leituras realizadas, foi executado o ensaio de resistência à compressão.

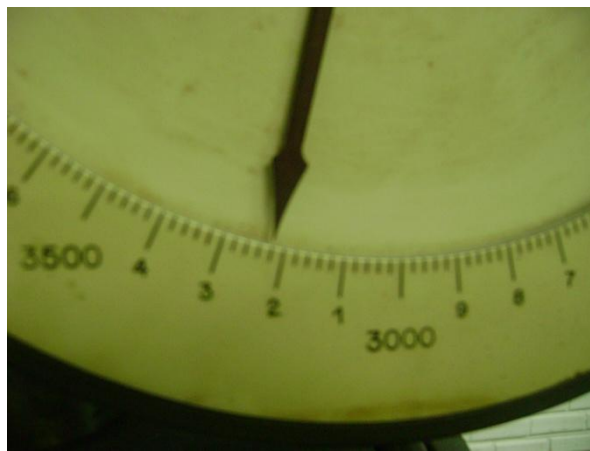
O ensaio de resistência à compressão segundo a NBR 12129 (ABNT, 1991), consiste em uma aplicação de carga contínua até que ocorra a ruptura do corpo de prova numa razão de 250N/s a 750N/s. Foi realizado no mesmo equipamento citado para o ensaio de dureza, sendo trocados o leitor de cargas e substituído a placa com a esfera por uma placa plana. Para a realização do ensaio foi selecionado a face lateral que não houve impressão da esfera. A figura 4.16a mostra o rompimento de um corpo de prova e a figura 4.16b, o registro da carga de ruptura.

Figura 4.16(a) – Ruptura.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 4.16(b) – Carga de ruptura.



Fonte: Acervo próprio.

Anotadas todas as cargas de rupturas de uma mesma série, foi calculada a resistência à compressão, através da razão entre a média das cargas e a área da seção transversal de aplicação da carga, e expressa em MPa.

4.3.6 Tratamento estatístico

Para os resultados dos ensaios mecânicos e de consistência útil foi realizadas análises estatísticas utilizando a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA) desenvolvida através do software *STATISTICA* versão 7.

Capítulo 5

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles.

5 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Este capítulo é destinado à apresentação dos resultados e discussões dos ensaios realizados nas amostras e nas 12 misturas propostas na matriz experimental.

5.1 Caracterização

As amostras foram caracterizadas física, mineralógica, microestrutural e quimicamente.

Para o processo de caracterização física foram executados ensaios de granulometria a laser, granulometria manual, massa específica e massa unitária.

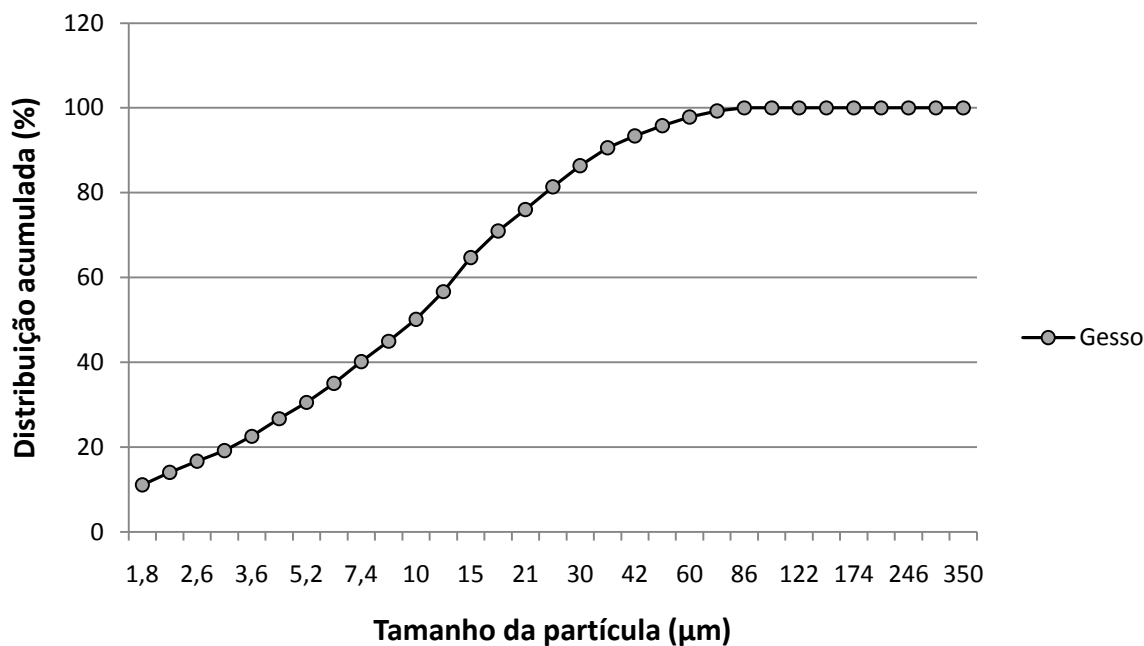
A caracterização mineralógica foi efetuada por difração de raio-x e a caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura.

A caracterização química contemplou os ensaios determinados pela NBR 12130 (ABNT,1991), os ensaios de análise química semiquantitativa por fluorescência de raio-x com perda ao fogo, as análises pelo sistema de energia dispersiva e análises de PH.

5.1.1 Caracterização física do gesso e do resíduo

A média da granulometria a laser elaborado em 10 amostras de gesso está apresentada na Figura 5.1a através da curva obtida no ensaio, cujos resultados do ensaio estão expressos na Tabela 5.1.

Figura 5.1(a) – Curva de granulometria a laser do gesso.



Fonte: Acervo próprio.

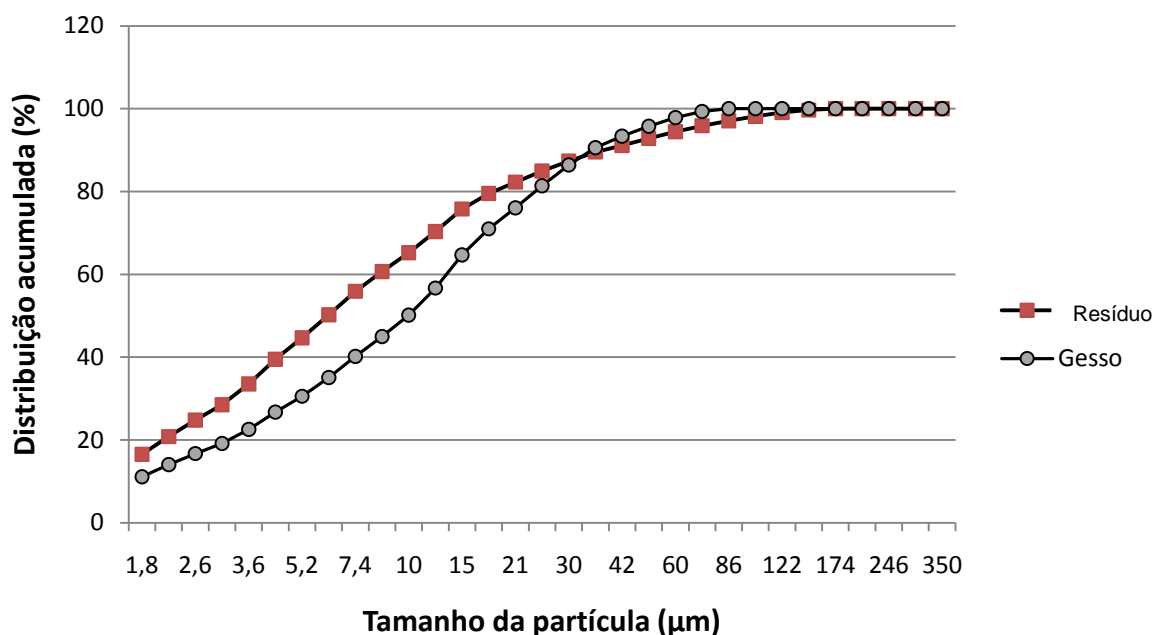
Tabela 5.1(a) – Resultados da análise granulométrica do gesso.

Análise Granulométrica – Material: Gesso					
(%)passante	(µm)abertura	(%)passante	(µm)abertura	(%)passante	(µm)abertura
10	1,67	50	9,96	90	35,13
16	2,49	84	27,61	99	69,50

Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.1b exibe a curva granulométrica do resíduo de gesso e a Tabela 5.1b, os resultados dos ensaios.

Figura 5.1(b) – Curva de granulometria a laser do resíduo de gesso.



Fonte: Acervo próprio.

Tabela 5.1(b) – Resultado da análise granulométrica do resíduo de gesso.

Análise Granulométrica – Material: Resíduo de gesso					
(%)passante	(µm)abertura	(%)passante	(µm)abertura	(%)passante	(µm)abertura
10	1,29	50	6,16	90	37,75
16	1,76	84	23,58	99	120,73

Fonte: Acervo próprio.

Os resultados dos ensaios de massa específica estão expostos na Tabela 5.2, juntamente com os resultados de módulo de finura.

Tabela 5.2 – Módulo de finura e massa específica.

	Gesso	Resíduo de gesso	NBR 13207
Módulo de finura	0,85	0,44	< 1,10
Massa específica (g/cm ³)	2,59	2,30	-

Fonte: Acervo próprio.

A execução do ensaio para a determinação da granulometria executado pelo método manual, por sua demora, favorece a absorção de umidade pelo hemidrato. A

absorção de umidade facilita as ligações entre as partículas, que unem-se formando partículas maiores, conferindo aos resultados do módulo de finura, valores superiores aos reais. O ensaio a laser, por sua brevidade, permite a avaliação mais precisa. Tais fatos podem ser comprovados com os resultados do ensaio a laser feito no gesso (hemidrato) e no resíduo (dihidrato).

Segundo a análise da granulometria a laser, 99% da amostra de GESSO é menor que 69,5 μm , significando que 100% da amostra passaria completamente por toda série padrão de peneiras determinada pela NBR 12127 (ABNT, 1991) e que 99% da amostra de RESÍDUO DE GESSO é menor que 120 μm . Assim, conclui-se que o resíduo segundo a análise a laser, apresenta partículas maiores que o gesso, contrariando os resultados do módulo de finura.

Os resultados dos ensaios para determinação da massa unitária das amostras de gesso e do resíduo estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Massa unitária do gesso e do resíduo.

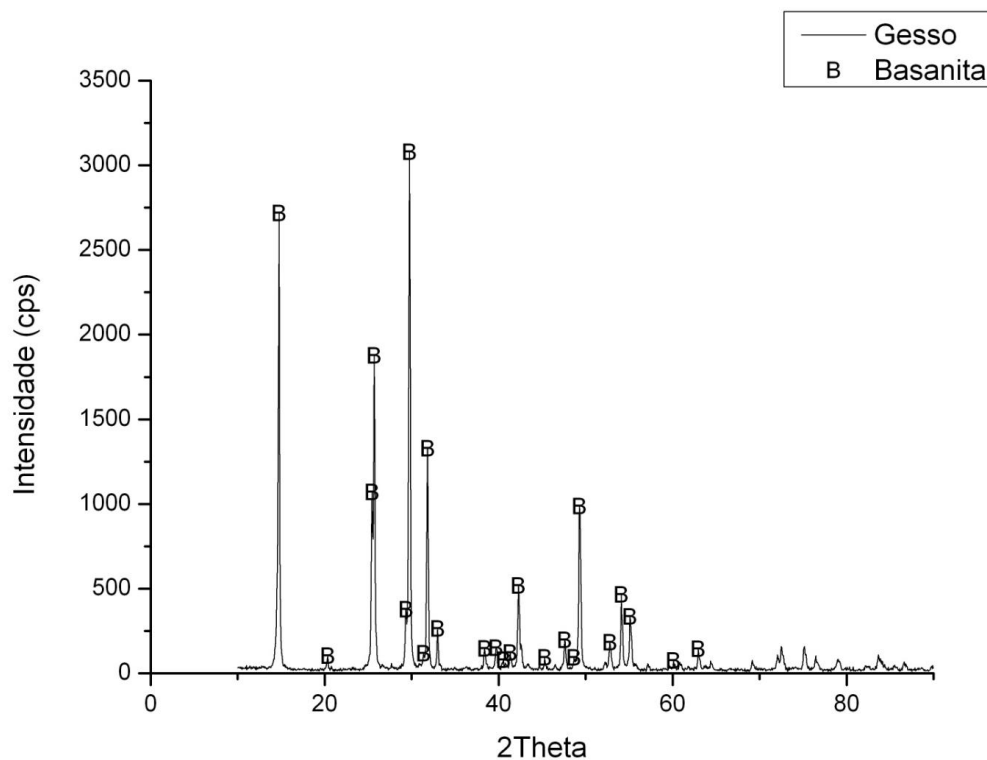
	Gesso	Resíduo de gesso	NBR 12127
Massa unitária (Kg/m^3)	604,11	520,38	> 700,00

Fonte: Acervo próprio.

5.1.2 Caracterização mineralógica do gesso e do resíduo

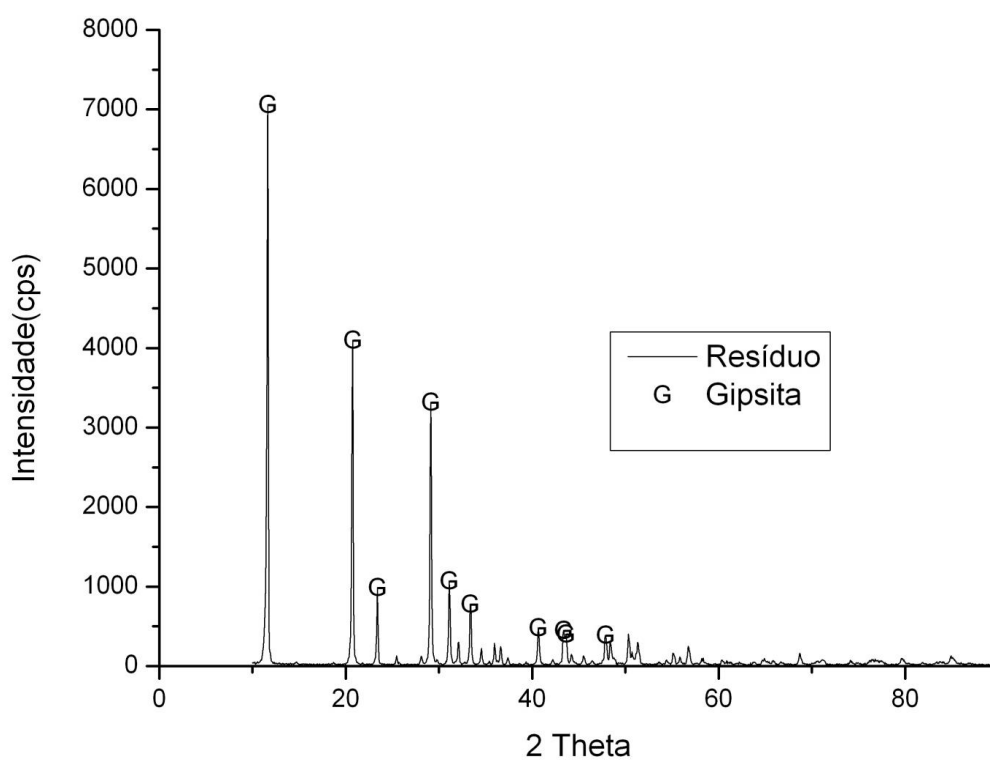
A caracterização mineralógica feita através da difração de raio-x está expressa na Figura 5.2a e mostra a análise de DRX realizada nas amostras de gesso e a Figura 5.2b, a análise de DRX do resíduo utilizado nesta pesquisa.

Figura 5.2(a) – DRX do gesso fino para revestimento.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 5.2(b) – DRX do resíduo de gesso.



Fonte: Acervo próprio.

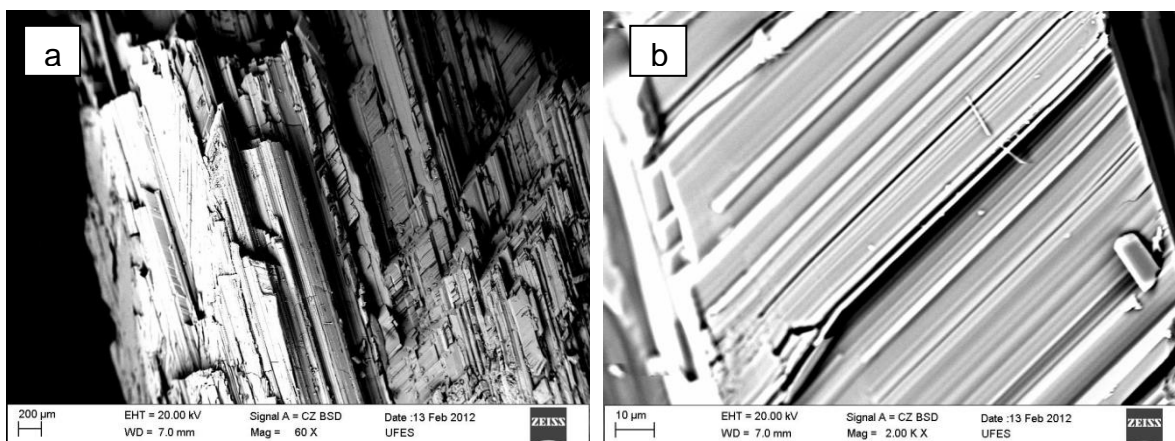
Segundo as análises realizadas, na amostra de gesso foram identificados pelos picos de maior intensidade a presença predominante de Bassanita, hemidrato de fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ e na amostra do resíduo de gesso foram identificados pelos picos de maior intensidade a presença predominante de Gipsita (dihidrato), de fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, forma hidratada do hemidrato.

5.1.3 Caracterização microestrutural do gesso e do resíduo

A caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura foi realizada nas amostras de gipsita, de gesso em pó, de resíduo em pó e em fragmentos dos blocos rompidos.

Foi possível observar a estrutura cristalina de um fragmento de gipsita conforme a Figura 5.3.

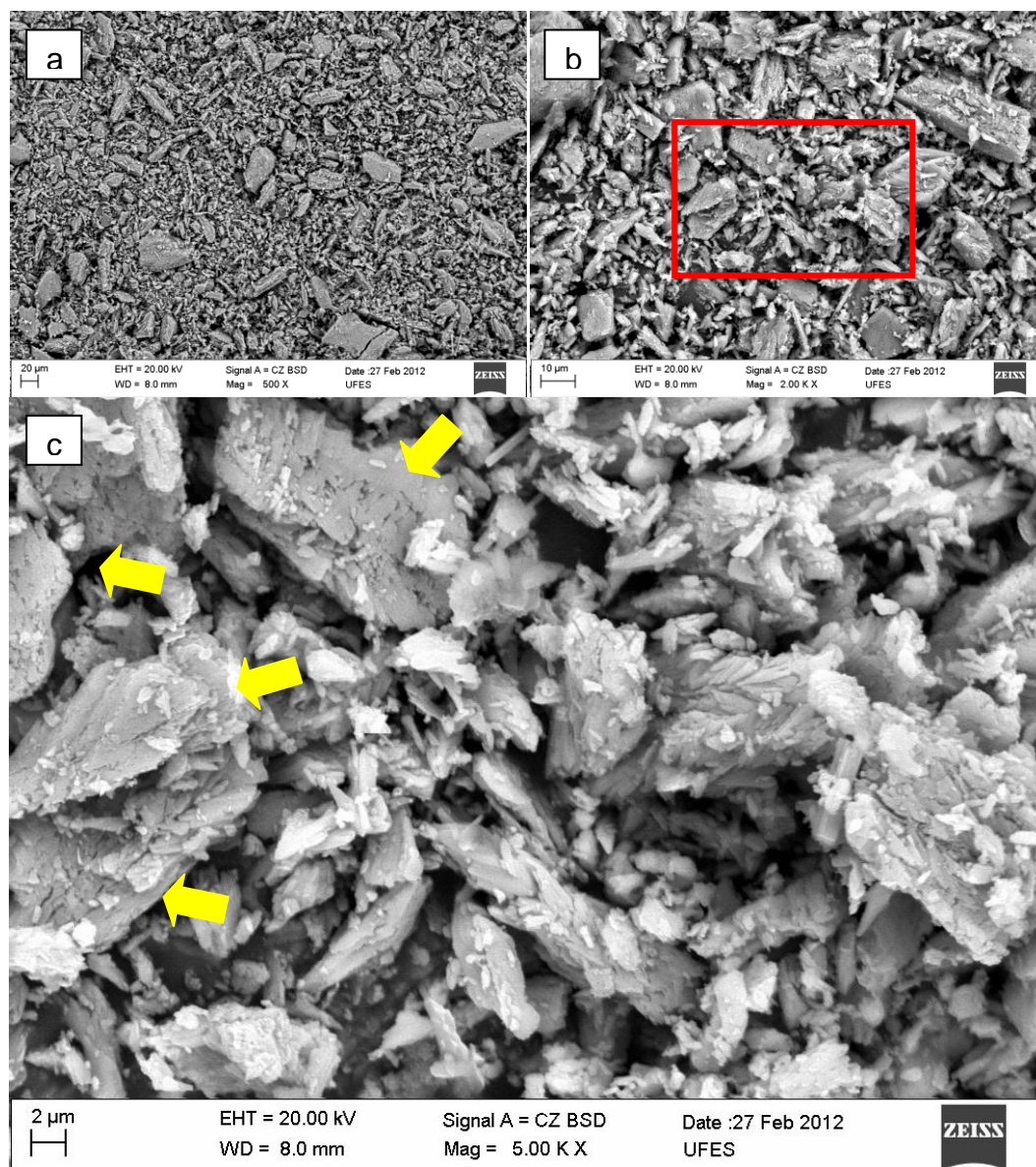
Figura 5.3 – MEV de um fragmento de gipsita com 60 X (a) e 2000X (b) de ampliação.



Fonte: Acervo próprio.

Na Figura 5.4 pode ser observada a imagem da MEV do pó de gesso, constituído basicamente por hemidrato.

Figura 5.4 – MEV do pó de gesso - 500X(a) e 2000X(b) e 5000X(c) de ampliação.

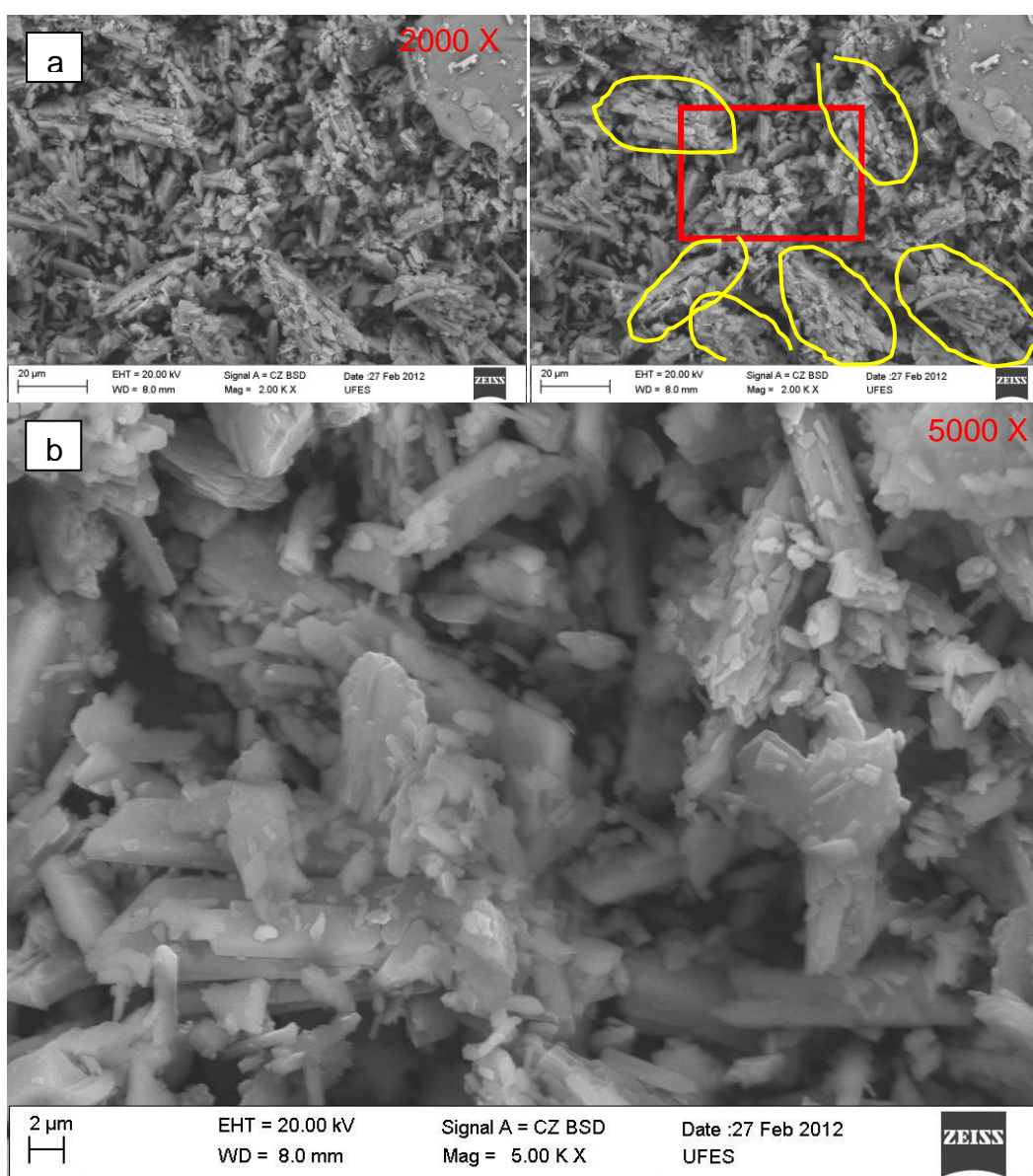


Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.4 (a), que apresenta ampliação de 500 vezes, mostra a heterogeneidade de formas no pó de gesso. A Figura 5.4 (b), com ampliação de 2000 vezes, apresenta marcado uma delimitação da área que foi analisada sob ampliação de 5000 vezes conforme a Figura 5.4 (c), na qual é possível observar fragmentos de cristais quase totalmente desidratados pela calcinação, provavelmente apresentando apenas $\frac{1}{2}$ molécula de água, que constituem os hemidratos. Com a eliminação parcial da água durante o beneficiamento, os cristais tornam-se mais porosos e as ligações entre eles, mais frágeis.

As imagens do MEV foram geradas predominantemente por detector de elétrons retro-espalhados (*backscatter electrons detector* - BSD). Segundo Castro (2007), esse tipo de detector apresenta os níveis de cinza proporcionais ao peso atômico médio dos elementos excitados pelo feixe de elétrons durante a varredura, sendo, portanto, imagens composicionais com os tons mais claros representando as fases de peso atômico médio mais elevado e as com tons mais escuros, as de peso atômico médio menos elevado. A Figura 5.5 (a) mostra as imagens do MEV do resíduo de gesso moído com ampliação de 2000 vezes e a marcação em vermelho da área delimitada para a ampliação em 5000 vezes apresentada na Figura 5.5 (b).

Figura 5.5 – MEV do resíduo de gesso moído (pó) em 2000x (a) e 5000x (b).



Fonte: Acervo próprio.

A imagem do pó do resíduo apresentado na Figura 5.5 (a) mostra a existência de conjuntos cristalinos através do agrupamento dos cristais marcados na imagem pelos contornos em amarelo. Aparenta existir maior ligação entre os cristais, mantendo as ligações adquiridas na hidratação, apesar da moagem sofrida. Tais ligações são mantidas pela água de cristalização.

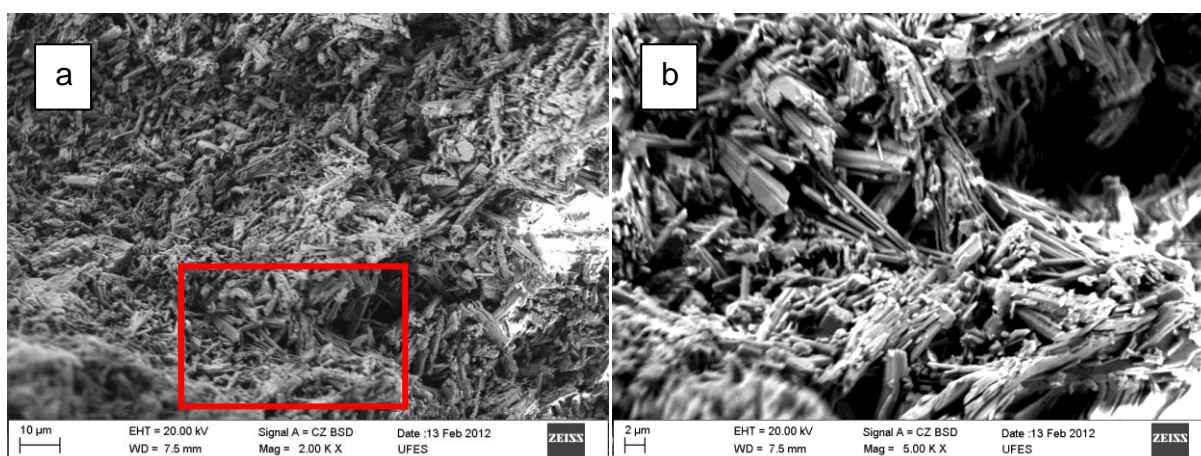
Na Figura 5.5 (b) é possível observar que a textura dos cristais é mais lisa permitindo-nos verificar a diferença entre as partículas do gesso da Figura 5.4, que apresentam elevada porosidade.

No processo de secagem natural do gesso após hidratação, a perda de água apresentada é apenas a água livre enquanto no processo de calcinação há a perda de água estrutural.

Segundo Kanno (2009), em secagens nas temperaturas superiores a 63°C, ocorre a desidratação em que há a perda de água estrutural e desintegração do cristal, facilitando a moagem com a fragilidade do cristal.

A Figura 5.6 apresenta a imagem do MEV da amostra do corpo de prova rompido relativo à mistura piloto M1, gesso e água.

Figura 5.6 – MEV da amostra M1 - 2000x (a) e 5000x (b).



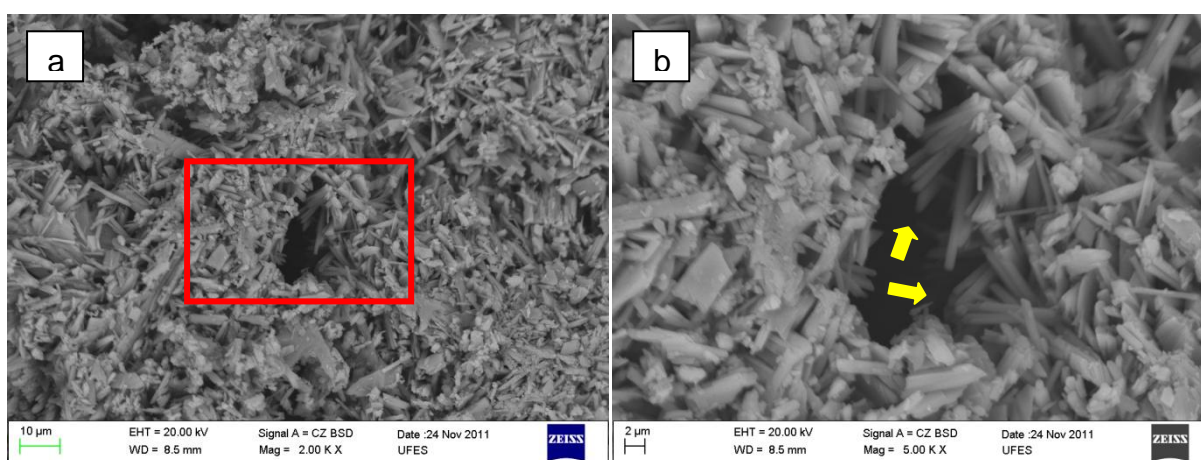
Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.6 (a) apresenta a superfície analisada com ampliação em 2000 vezes. Esta superfície apresenta desníveis originários do rompimento sofrido no ensaio de resistência à compressão. Apresenta a área delimitada para ampliação de 5000

vezes que inclui a seção de um poro. Na Figura 5.6 (b) é possível observar a estrutura formada pela presença de cristais em formas de agulhas imbricadas entrelaçadas em diversas orientações tridimensionais. A porosidade é evidenciada nas ligações entre os conjuntos de cristais devido à evaporação da água de amassamento durante a secagem.

A Figura 5.7 apresenta a imagem do MEV da amostra do corpo de prova rompido relativo à mistura M2, gesso (95%), resíduo (5%) e água.

Figura 5.7 – MEV da amostra M2 - 2000x (a) e 5000x (b).

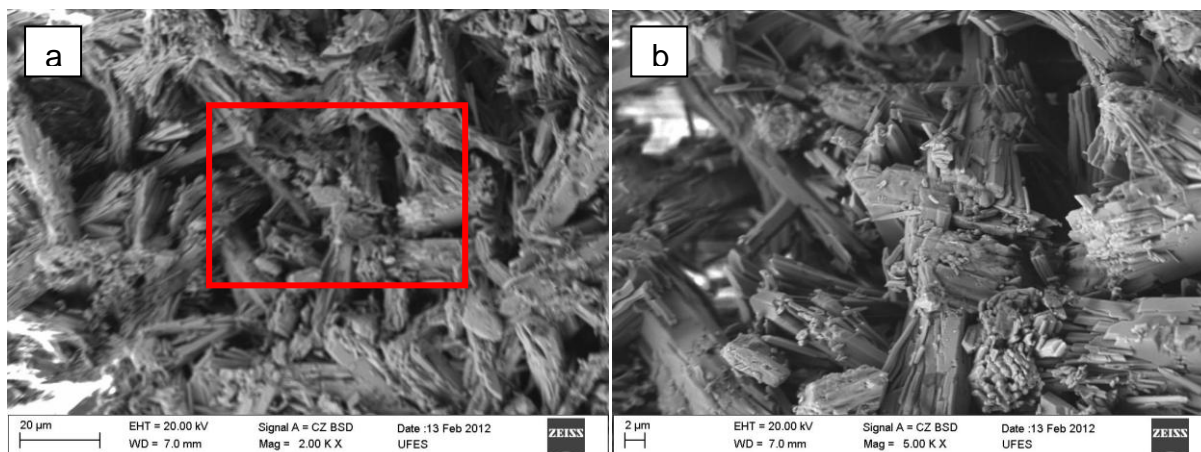


Fonte: Acervo próprio.

Na Figura 5.7 (a) está delimitada a área no entorno de um poro evidenciado na ampliação em 5000 vezes. Na Figura 5.7 (b) verifica-se a formação cristalina no limite do poro, onde é possível visualizar a forma agulha dos cristais e seu embricamento. A presença do resíduo é visível, pois colabora com o adensamento da pasta. Os cristais em geral, apresentam diâmetro médio de 1 μm e comprimento médio de 6 μm . Com a incorporação do resíduo à pasta, é reduzida a presença de cristais em formato agulha e imbricados, possivelmente devido ao espaço ocupado pelos cristais de resíduos já formados.

A Figura 5.8 apresenta a imagem do MEV do fragmento de bloco rompido relativo à mistura M5, gesso, água e aditivo ácido cítrico.

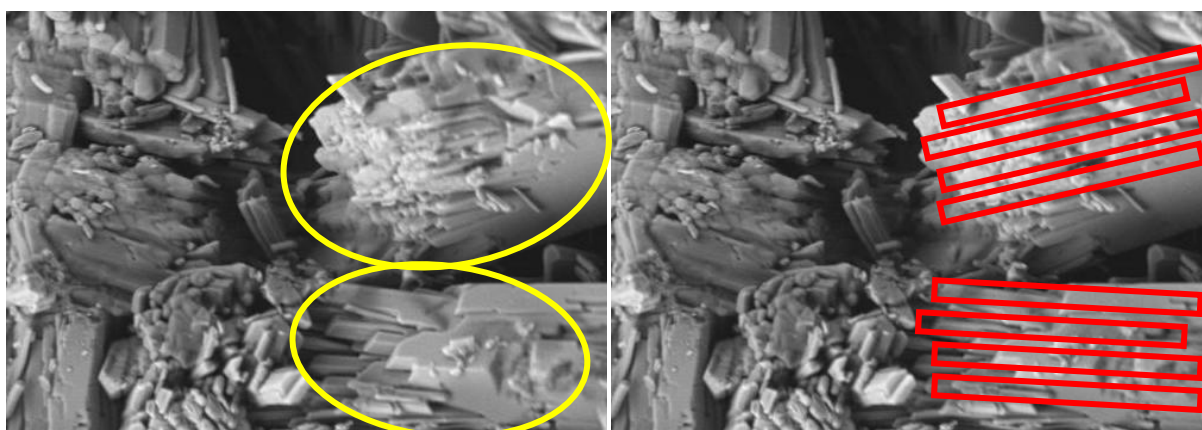
Figura 5.8 – MEV da amostra M5 - 2000x (a) e 5000x (b).



Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.8 (a) apresenta muitos arranjos cristalinos formados por conjuntos de cristais aciculares em diferentes orientações, semelhante à micrografia apresentada por Hincapié e Cincotto (1997b). Na Figura 5.8 (b) os conjuntos de cristais aparentam uma formação paralela como acoplados, que possivelmente reduzem as ligações de aderência entre os conjuntos, porém a ligação dos cristais em um mesmo conjunto aparenta ser forte, semelhante à imagem obtida da gipsita apresentada na Figura 5.3(a). A Figura 5.8 (c) destaca a formação paralela dos conjuntos de cristais.

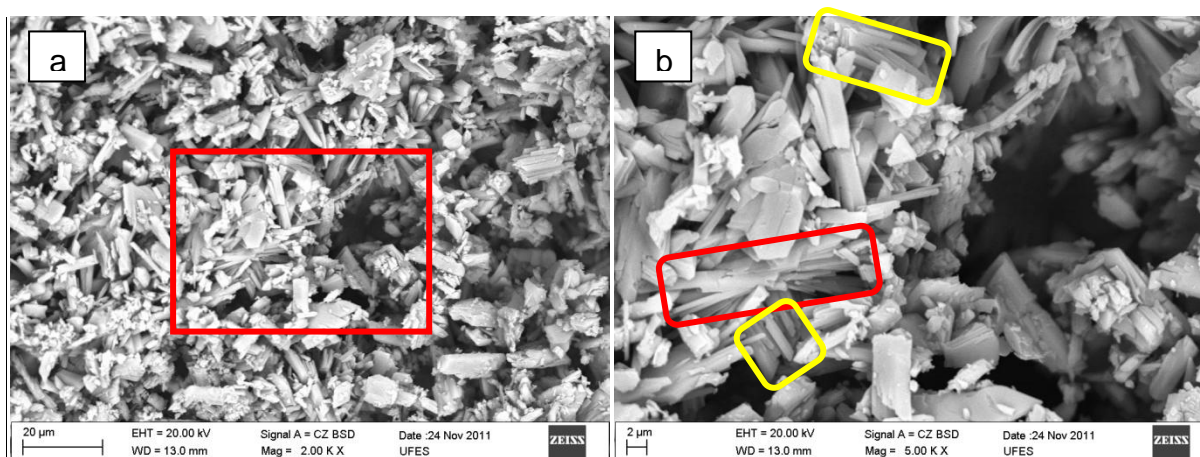
Figura 5.8(c) – Formação paralela no interior do conjunto de cristais.



Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.9 apresenta a imagem do MEV da amostra do corpo de prova rompido relativo à mistura M6, gesso (95%), resíduo (5%), água e ácido cítrico.

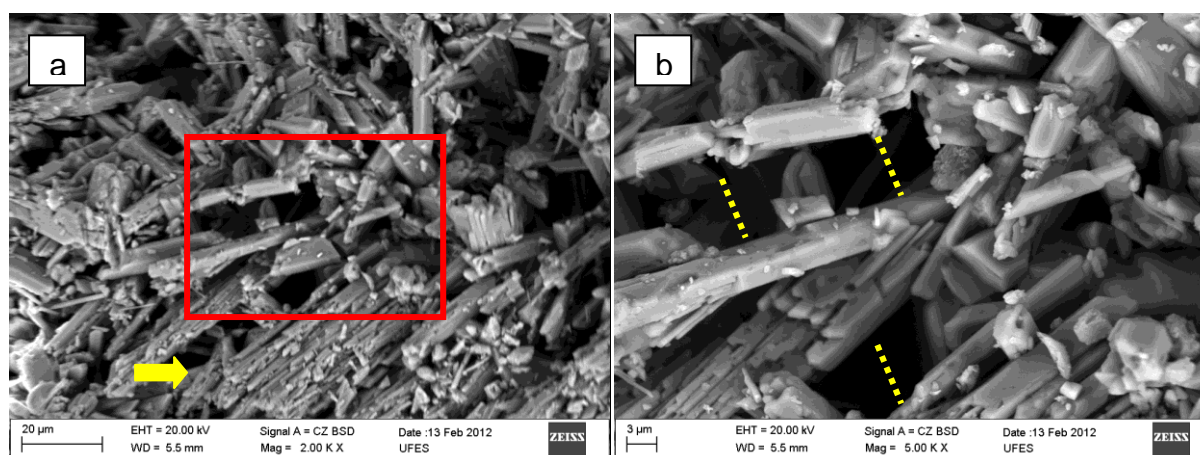
Figura 5.9 - MEV da amostra M6 - 2000x (a) e 5000x (b).



Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.9 (a) mostra o adensamento da pasta provocada pela presença do resíduo, e uma formação cristalina com poucos cristais imbricados em forma de agulhas (aciculares) e muitos cristais de forma hexagonal. Na Figura 5.9 (b) é possível visualizar a forma hexagonal dos cristais com diâmetros superiores a $2\ \mu\text{m}$, comprimentos médios de $6\ \mu\text{m}$, não porosos que compõe predominantemente a estrutura. Há o embricamento de alguns conjuntos de cristais em formato de agulhas (circundado em vermelho) comum aos cristais de gesso e a presença de conjuntos de cristais acoplados (circundado em amarelo) possivelmente pela presença do ácido cítrico. A Figura 5.10 apresenta a imagem do MEV da amostra do corpo de prova rompido relativo à mistura M9, gesso, água e aditivo bórax.

Figura 5.10 – MEV da amostra M9 - 2000x (a) e 5000x (b).

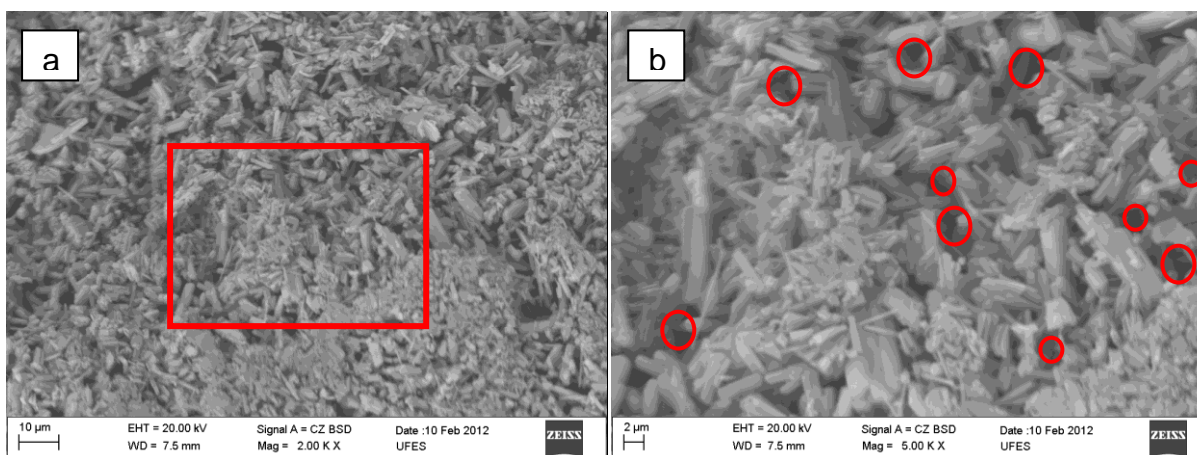


Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.10 (a) mostra a formação acoplada dos conjuntos cristalinos e a presença de cristais hexagonais isolados. A Figura 5.10 (b) mostra cristais com diâmetro médio de 2 μm , aspecto liso, não porosos e com comprimento superior a 10 μm com formatos hexagonal isolados, outros irregulares e alguns conjuntos de cristais aciculares acoplados em uma mesma direção. A amostra apresenta poros com diâmetro médio de 5 μm que prejudicam a resistência mecânica da amostra. Segundo Hincapié e Cincotto (1997b), outro problema é a falta de imbricamento e entrelaçamento dos cristais que também geram quedas nas propriedades mecânicas. Por outro lado, o fato dos cristais serem não porosos os tornam mais fortes, podendo favorecer as propriedades mecânicas.

A Figura 5.11 apresenta a imagem do MEV da amostra do corpo de prova rompido no ensaio de resistência à compressão, relativo à mistura M10, gesso (95%), resíduo (5%), água e aditivo bórax.

Figura 5.11 – MEV da amostra M10 - 2000x (a) e 5000x (b).



Fonte: Acervo próprio.

A Figura 5.11 (a) mostra a superfície adensada da amostra com a área delimitada para análise com ampliação de 5000 vezes. A Figura 5.11 (b) mostra cristais hexagonais de diâmetro médio de 1,5 μm e comprimento médio de 6 μm individualizados e algumas formações aciculares imbricadas formando um entrelaçamento adensado. Os cristais apresentam textura lisa, não porosa e estão dispostos entrelaçados entre si. Os poros têm diâmetro médio de 2 μm , pequenos em relação as demais pastas apresentadas que têm diâmetro médio de 5 μm . A

textura não porosa dos cristais, o baixo diâmetro dos poros da pasta endurecida e o entrelaçamento e adensamento proporcionado pelos cristais pequenos que ajudam a preencher os vazios, justificam o aumento da resistência mecânica da amostra.

5.1.4 Caracterização química do gesso e do resíduo

Para a caracterização química do material, foram feitos ensaios químicos segundo a NBR 12130 (ABNT,1991), análise semiquantitativa por fluorescência de raio-x e EDS.

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização química das amostras segundo NBR 12130 (ABNT, 1991) estão expressos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultado das determinações químicas do gesso e do resíduo.

Determinações químicas	Gesso (%)	Resíduo (%)	Limites (%) NBR 13207
Água livre	0,94	0,11	Máx. 1,3
Água de cristalização	5,85	19,70	4,2 a 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	39,89	38,57	Mín. 38,0
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	55,59	53,83	Mín. 53,0

Fonte: Acervo próprio.

Como pode ser observado na Tabela 5.4, tanto o gesso quanto o resíduo atendem aos percentuais de óxido de cálcio, anidrido sulfúrico e água livre exigidos pela norma. O percentual de água de cristalização está associado a fase de hidratação, pois o gesso na fase de hemidrato (1/2 molécula de água) deve apresentar um limite de 6,2% e o resíduo, por ser um dihidrato (2 moléculas de água), deve apresentar um percentual 4 vezes maior, conferindo com o percentual encontrado de 19,70%.

Os resultados da análise química semiquantitativa por fluorescência de raio-x (FRX) com perda ao fogo (PF) do resíduo de gesso e do gesso está expresso em percentual de óxidos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados FRX com Perda ao Fogo.

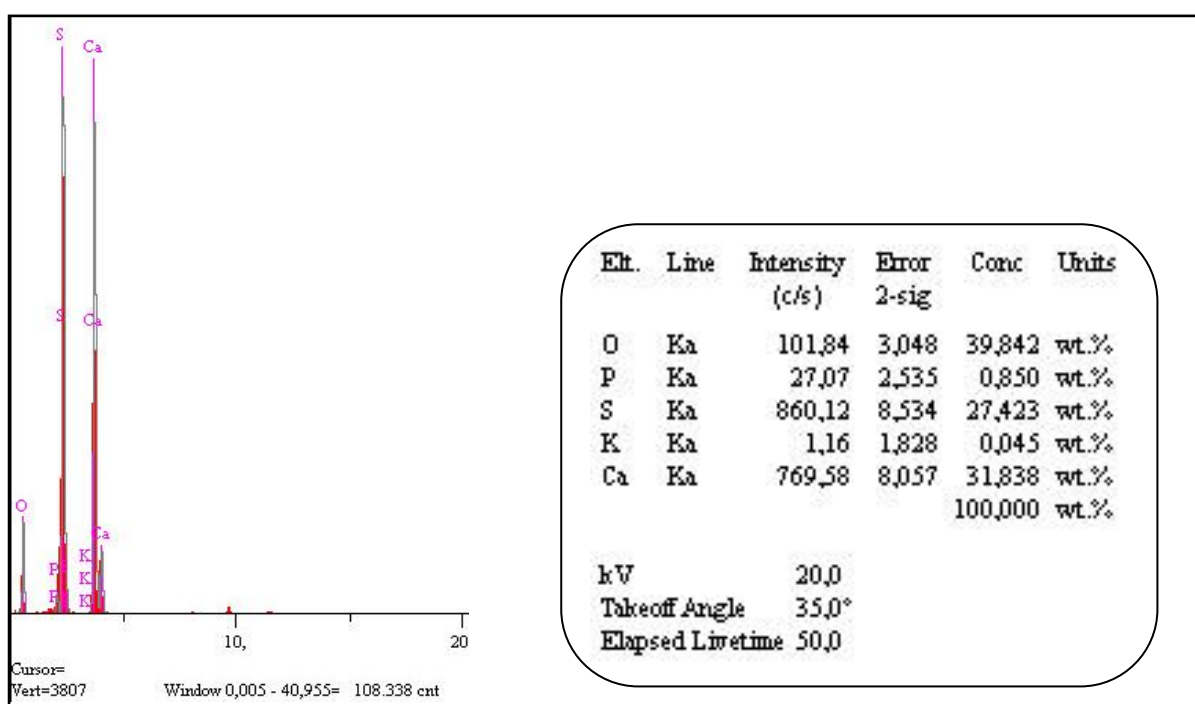
Óxidos	Gesso (%)	Resíduo de Gesso (%)	Parâmetros NBR 13207 (ABNT,1994)
CaO	61,51	62,76	mín. 38,0
SO ₃	36,02	35,15	mín. 53,0
P ₂ O ₅	0,38	0,65	-
SrO	0,13	0,10	-
ZrO ₂	0,03	-	-
Fe ₂ O ₃	-	0,09	-
P.F.	1,93	1,14	-

Fonte: Acervo próprio.

Segundo a análise realizada, as amostras de gesso e do resíduo apresentam o teor de CaO acima do solicitado que é 38% e apresentam o teor de SO₃ abaixo do valor mínimo de 53% solicitado pela NBR 13207 (ABNT,1994). O resultado sugere a impureza do produto.

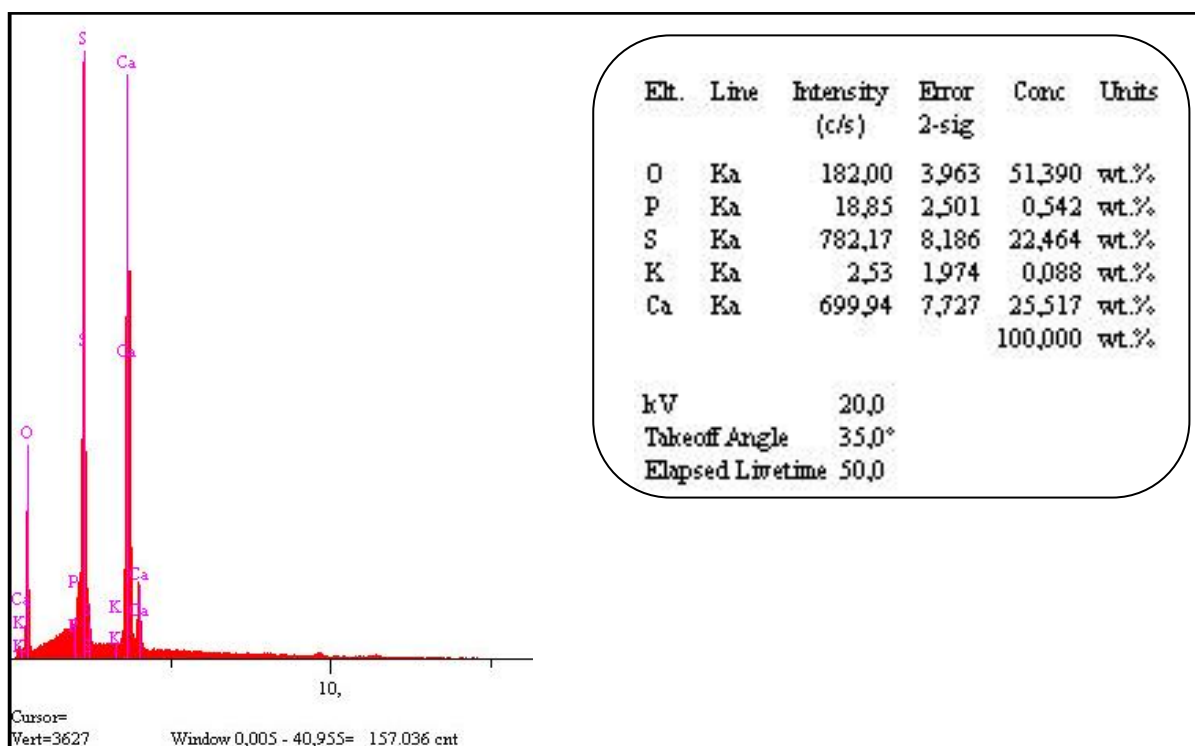
Com o resultado da análise realizada pelo sistema de Energia Dispersiva (EDS) foi possível identificar os elementos constituintes das amostras e seus teores, conforme as Figuras 5. 12 (a) do gesso e 5.12 (b) do resíduo.

Figura 5.12(a) – EDS do gesso.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 5.12(b) – EDS do resíduo de gesso.



Fonte: Acervo próprio.

A Tabela 5.6 exibe os elementos e percentuais de concentração analisados pelo EDS nas amostras de gesso e resíduo.

Tabela 5.6 – Concentração dos elementos por EDS.

Concentração	Gesso (%)	Resíduo (%)
O	39,84	51,39
P	0,85	0,54
S	27,42	22,46
K	0,04	0,08
Ca	31,83	25,51

Fonte: Acervo próprio.

Em complementação à caracterização química do gesso e do resíduo, a Tabela 5.7 mostra os resultados obtidos no ensaio de determinação do PH elaborados nas amostras.

Tabela 5.7 – PH das amostras de gesso e do resíduo de gesso.

Amostras	Gesso	Resíduo
PH	6,69	8,26

Fonte: Acervo próprio.

5.1.5 Caracterização física da pasta

O resultado do ensaio de determinação da consistência normal está apresentado na Tabela 5.8 com a indicação das massas do gesso e da quantidade de água utilizada assim como também as leituras efetuadas para cada penetração, bem como as relações água/gesso obtidas.

Tabela 5.8 – Resultados dos ensaios de consistência normal.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Água+solução NaCl (g)	150	150	150
Gesso (g)	250	210	185
Penetração (mm)	21,5	28,0	29,0
Relação a/g	0,6	0,71	0,81

Fonte: Acervo próprio.

A relação água/gesso adotada foi de 0,7, proporção que confirmou a leitura da penetração mínima solicitada por norma que é de 28 mm. A justificativa para a utilização dessa relação é minimizar os efeitos negativos sobre as propriedades mecânicas, pois como já citado no capítulo 3, quanto maior o teor de água, maior a porosidade e menor a dureza e resistência à compressão dos corpos de prova.

Para o ensaio de tempos de pega segundo a NBR 12128 (ABNT, 1991), a Tabela 5.9 exhibe os resultados obtidos através da pasta piloto M1 e tempos exigidos pela NBR 13207 (ABNT, 1994).

Tabela 5.9 – Resultado dos tempos de pega.

Amostra M1	Tempo de pega (min.)		NBR 13207 (ABNT, 1994)	
	Início	Fim	Início	Fim
Gesso para revestimento	12,15	26,45	>10	>45

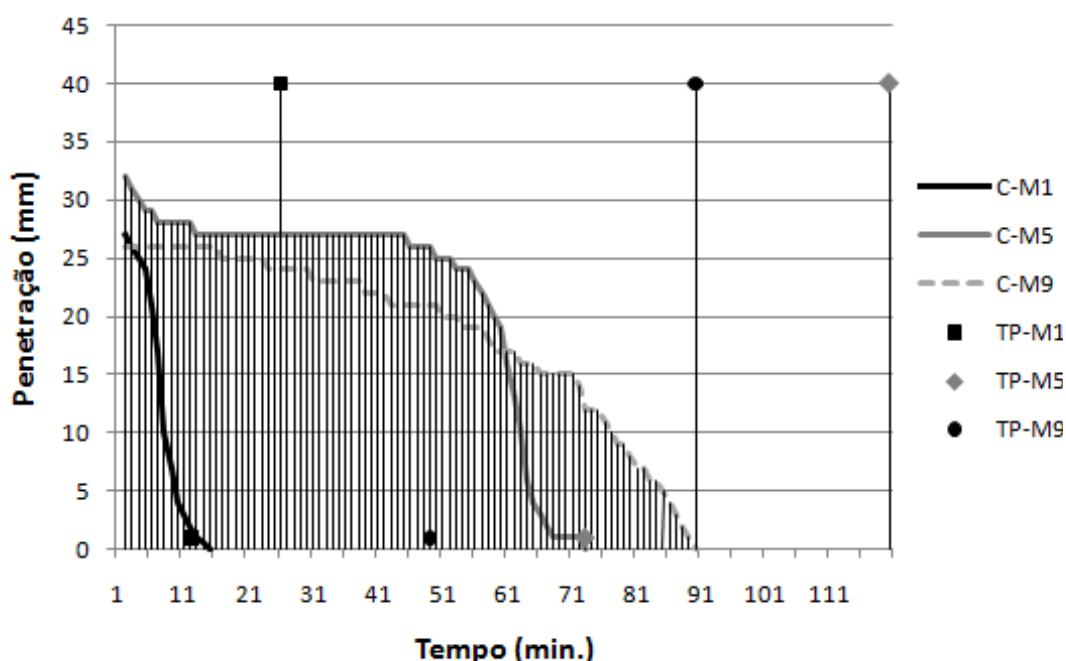
Fonte: Acervo próprio.

O gesso ensaiado não atingiu o tempo de fim de pega solicitado pela NBR 13207 (ABNT, 1994), porém como a utilização da pasta deve terminar antes do início de pega, conforme NBR 13867 (ABNT, 1997), foi admitido o seu uso após sucessivas repetições de ensaio.

Segundo Antunes (1999), os tempos de pega são usados para controle do processo de fabricação do gesso e é de pouca utilidade para o construtor.

A consistência útil neste trabalho foi definida como o intervalo de tempo em que o cone do aparelho de Vicat modificado penetra entre 32mm e 0 mm. As Figuras 5.13 (a), 5.13 (b), 5.13 (c) e 5.13 (d), nesta ordem, apresentam os gráficos de consistência útil para as séries com 0% de resíduo, 5% de resíduo, 10% de resíduo e 20% de resíduo, todos com inclusão da mistura piloto M1 (gesso e água). Tanto para o ensaio de consistência útil (intervalo de penetração 32mm a 0mm) quanto para o ensaio de tempo de pega (1mm de penetração da base a 40 mm) foram mensuradas com registro de tempo. Foram utilizadas as siglas M1 a M12 para identificar o tipo de mistura, “TP” para indicar o intervalo do Tempo de Pega das misturas e “C” para o intervalo de Consistência útil.

Figura 5.13(a) – Gráfico de consistência útil - série 0%.



Fonte: Acervo próprio.

Para a série de ensaios com a utilização de 0% de resíduo em substituição ao gesso, o gráfico da Figura 5.13(a) apresenta os resultados dos ensaios de consistência útil e tempo de pega nas misturas M1 (gesso + água), M5 (gesso + água + ácido cítrico) e M9 (gesso + água + aditivo bórax). O resultado das leituras do gráfico da Figura 5.13 (a) está relatado na Tabela 5.10.

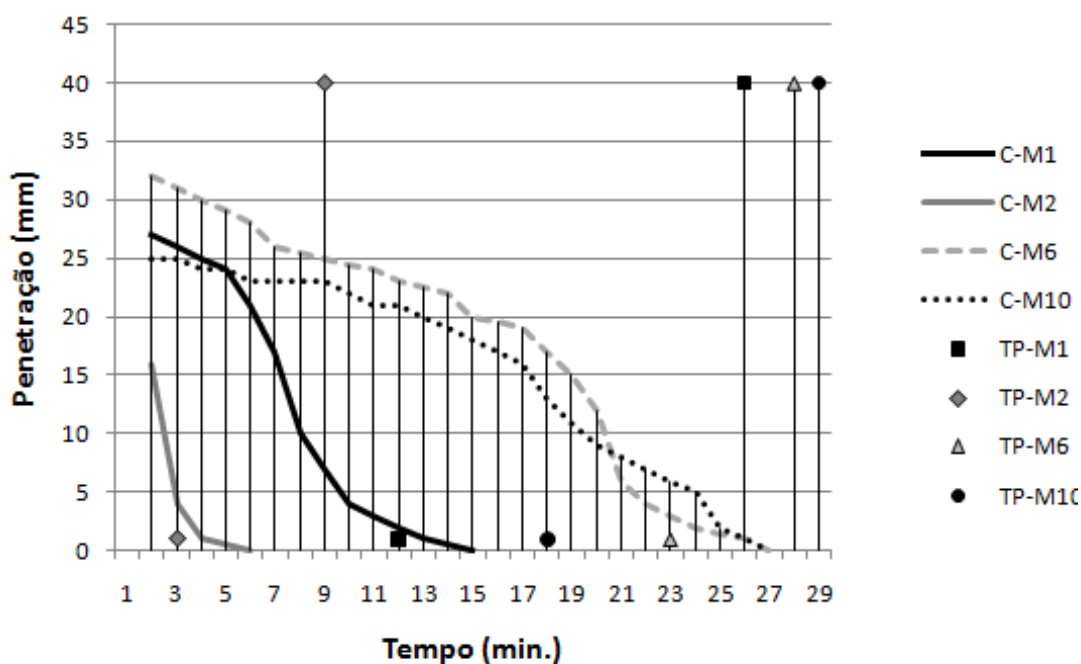
Tabela 5.10 – Leituras do gráfico de consistência útil da série 0%.

Misturas	Tempo de pega (min.)		Intervalo TP (min.)	Tempo de consistência útil (min.)
	Início	Fim		
M1	12:00	26:00	14	13
M5	73:00	120:00	47	71
M9	49:00	90:00	41	87
Ref.NBR13207	>10:00	>45:00	-	-

Fonte: Acervo próprio.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.10, a mistura M5 apresentou 58 minutos de consistência útil a mais do que a pasta M1(piloto), representando uma ampliação do tempo de consistência útil em 81,69% e a pasta M9 apresentou 74 minutos a mais, uma ampliação de 85,06% na consistência útil em relação à pasta referência M1, comprovando a eficácia dos aditivos nas amostras.

Figura 5.13(b) – Gráfico de consistência útil - série 5%.



Fonte: Acervo próprio.

Para a série de ensaios com a utilização de 5% de resíduo em substituição ao gesso, o gráfico da Figura 5.13 (b) apresenta os resultados dos ensaios de consistência útil e tempo de pega nas misturas M1 (gesso + água), M2 (gesso + 5% resíduo + água), M6 (gesso + 5% resíduo + água + aditivo ácido cítrico) e M10 (gesso + 5% resíduo + água + aditivo bórax). Os resultados das leituras do gráfico da Figura 5.13 (b) estão relatado na Tabela 5.11.

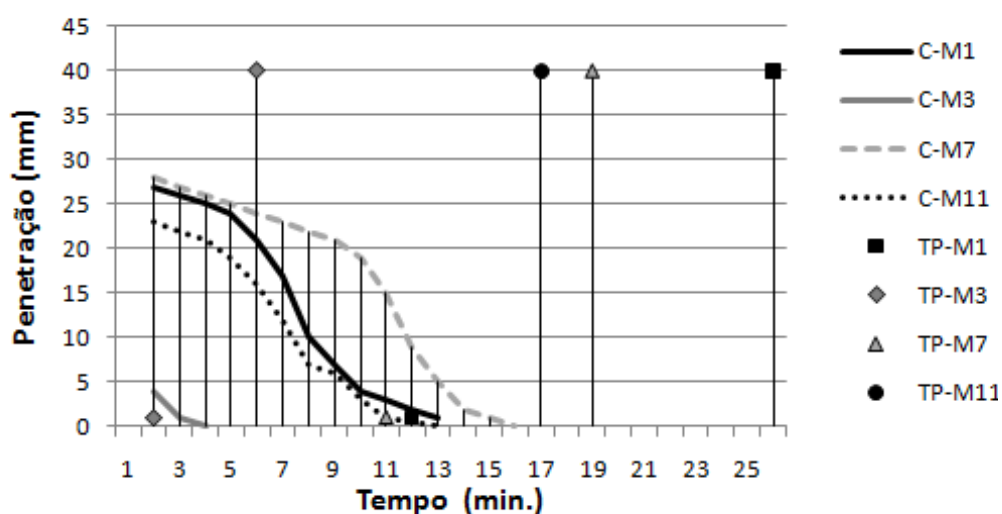
Tabela 5.11 – Leituras do gráfico de consistência útil da série 5%.

Misturas	Tempo de pega (min.)		Intervalo TP (min.)	Tempo de consistência útil (min.)
	Início	Fim		
M1	12:00	26:00	14	13
M2	3:00	9:00	6	4
M6	23:00	28:00	5	25
M10	18:00	28:00	10	25
Ref.NBR 13207	>10:0	>45:00	-	-

Fonte: Acervo próprio.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.11, tanto M6 como M10 apresentaram 12 minutos de consistência útil a mais do que a pasta M1(referência), representando uma ampliação do tempo de consistência útil em 48%, enquanto a pasta M2, sem aditivo e incorporação de 5% de resíduo, apresentou uma redução de 69,23% na consistência útil em relação à pasta referência M1.

Figura 5.13(c) – Gráfico de consistência útil - série 10%.



Fonte: Acervo próprio.

Para a série de ensaios com a utilização de 10% de resíduo em substituição ao gesso, o gráfico da figura 5.13 (c) apresenta os resultados dos ensaios de consistência útil e tempo de pega nas misturas M1 (gesso + água), M3 (gesso + 10% resíduo + água), M7 (gesso + 10% resíduo + água + aditivo ácido cítrico) e M11 (gesso + 10% resíduo + água + aditivo bórax). A Tabela 5.12 apresenta os resultados das leituras do gráfico da Figura 5.13 (c).

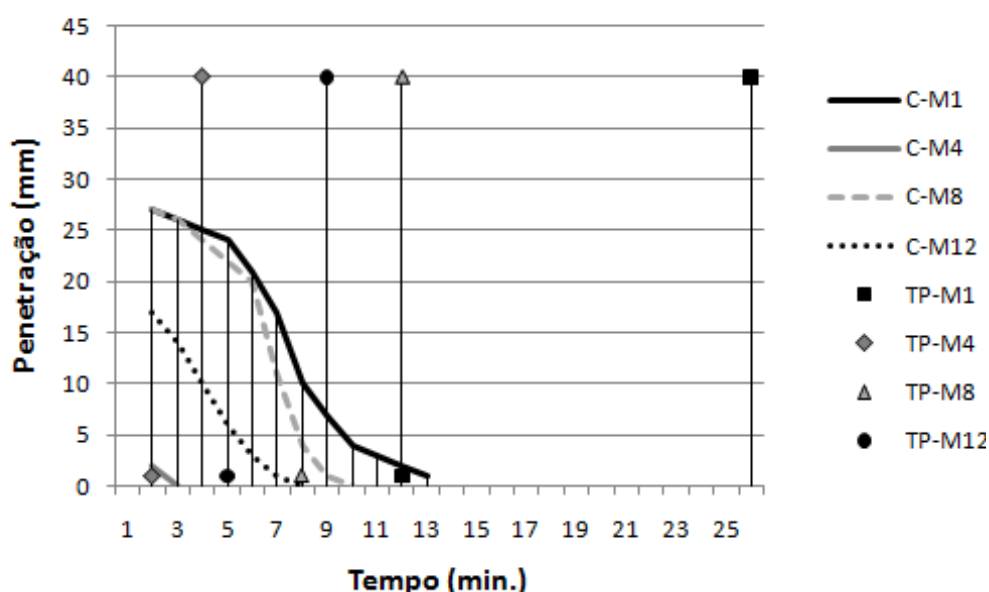
Tabela 5.12 – Leituras do gráfico de consistência útil da série 10%.

Misturas	Tempo de pega (min.)		Intervalo TP (min.)	Tempo de consistência útil (min.)
	Início	Fim		
M1	12:00	26:00	14	13
M3	2:00	6:00	4	2
M7	11:00	19:00	8	14
M11	12:00	17:00	5	11
Ref.NBR13207	>10:00	>45:00	-	-

Fonte: Acervo próprio.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 5.12, a mistura M7 apresentou um 1 minuto de consistência útil a mais que a pasta M1(referência), não sendo considerado representativo tal aumento, fazendo parte da margem de erro. Entretanto, para as misturas M7 e M11, foi possível obter tempos de consistência útil similares da mistura de referência. A pasta M3 teve o intervalo de consistência útil comprometido devido à aceleração provocada pela incorporação do resíduo.

Figura 5.13(d) – Gráfico de Consistência útil - série 20%.



Fonte: Acervo próprio.

Para a série de ensaios com a utilização de 20% de resíduo em substituição ao gesso, o gráfico da Figura 5.13 (d) apresenta os resultados dos ensaios de consistência útil e tempo de pega nas misturas M1 (gesso + água), M4 (gesso + 20% resíduo + água), M8 (gesso + 20% resíduo + água + aditivo ácido cítrico) e M12 (gesso + 20% resíduo + água + aditivo bórax). A Tabela 5.13 apresenta os resultados das leituras do gráfico da Figura 5.13 (d).

Tabela 5.13 – Leituras do gráfico de consistência útil da série 20%.

Misturas	Tempo de pega (min.)		Intervalo TP (min.)	Tempo de consistência útil (min.)
	Início	Fim		
M1	12:00	26:00	14	13
M4	2:00	4:00	2	3
M8	8:00	12:00	4	8
M12	5:00	9:00	4	6
Ref.NBR13207	>10:00	>45:00	-	-

Fonte: Acervo próprio.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 5.13 nenhuma das misturas apresentou tempo de consistência útil maior que a pasta referência devido à aceleração provocada pela incorporação do resíduo.

Como pode ser observado, as misturas com incorporação de resíduo de gesso e sem o uso de aditivos (M2, M3 e M4) tiveram seus tempos de início e fim de pega bastante reduzidos em relação à mistura de referência (M1). Esse intervalo foi aumentado apenas quando era incorporado aditivos retardadores de pega às misturas. Mesmo assim, para misturas com substituição de 10% e 20% do gesso pelo resíduo, e com aditivos, os tempos de consistência útil foram menores ou situaram-se na mesma faixa que os valores de referência.

Este comportamento evidencia uma influência do percentual de substituição do gesso pelo resíduo. Pode-se verificar que quando o percentual de substituição do resíduo é aumentado, os tempos de pega e de consistência útil são reduzidos.

Não é possível, contudo, concluir a respeito dessa tendência com base nas informações pontuais de cada intervalo para as misturas produzidas. Com base nesta afirmativa, foi realizada uma análise estatística com o objetivo de analisar a

influência das variáveis estudadas (percentual de resíduo e aditivo) sobre a variável de resposta (tempo de consistência útil). A partir da análise de variância será possível quantificar o efeito que cada fator exerce sobre a variável de resposta.

Para os ensaios de consistência útil foi realizada uma análise estatística utilizando a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA) desenvolvida através do programa computacional STATISTICA®.

Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F _{cal}	p-valor	Significância
%Resíduo	5028,250	3	1676,083	5,97002	0,031131	S
Aditivo	1732,167	2	866,083	3,08489	0,119841	NS
Erro	1684,500	6	280,750			-

S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo; SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F_{cal} – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Acervo próprio.

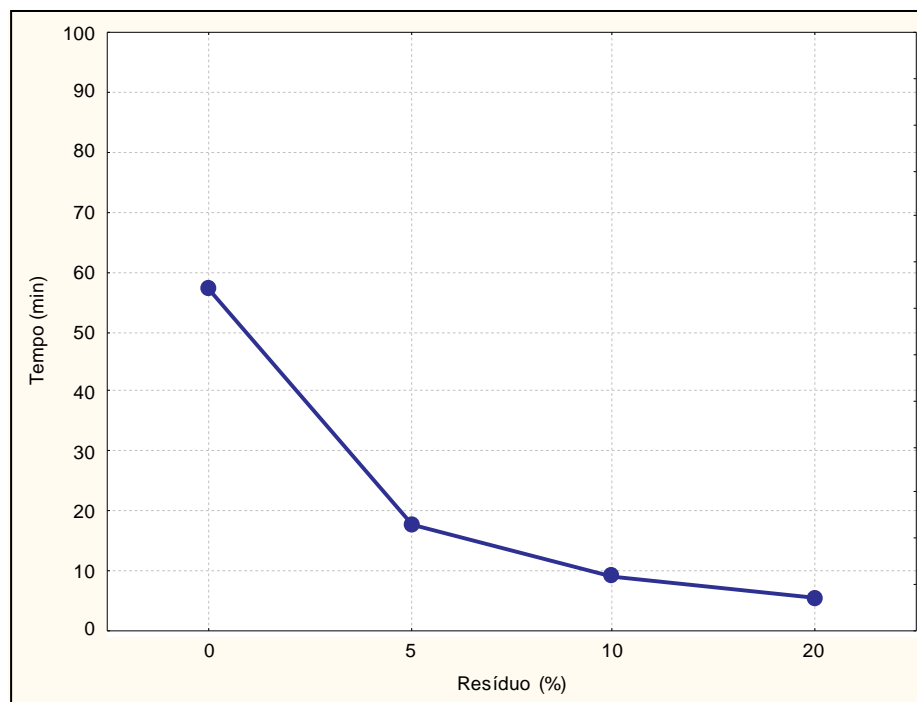
A Tabela 5.14 explica a análise de variância do intervalo de consistência útil dos diferentes tipos de misturas, ou seja, diferentes misturas obtidas pela variação do teor de resíduo e tipo de aditivo e analisa quantitativamente a influência de cada variável.

A análise de variância tem por objetivo verificar o grau de diferença entre os 12 diferentes tipos de misturas sobre a variável resposta (intervalo de consistência útil). Este tipo de análise leva em conta uma distribuição próxima da normal de probabilidade estatística. Os parâmetros analisados são: soma dos quadrados, médias quadradas, graus de liberdade para os fatores controláveis trabalhados e um nível de confiança de 95%. Para a análise de variância (ANOVA) dos fatores controláveis (subgrupo) analisados o valor de “p” deverá ser menor que 0,05 (5%) para que seja considerada “significativa”.

De acordo com a Tabela 5.14, o teor de resíduo apresentou-se significativo enquanto o tipo de aditivo não mostrou significância, pois apesar da presença do aditivo ser de grande influência nesta propriedade, a variação do seu tipo não

influenciou significativamente, apresentando resultados semelhantes. A Figura 5.13 (e) apresenta o gráfico de distribuição estatística do intervalo de consistência útil em função do teor de resíduo.

Figura 5.13(e) – Efeito isolado do teor de resíduo sobre o intervalo de consistência útil.



Fonte: Acervo próprio.

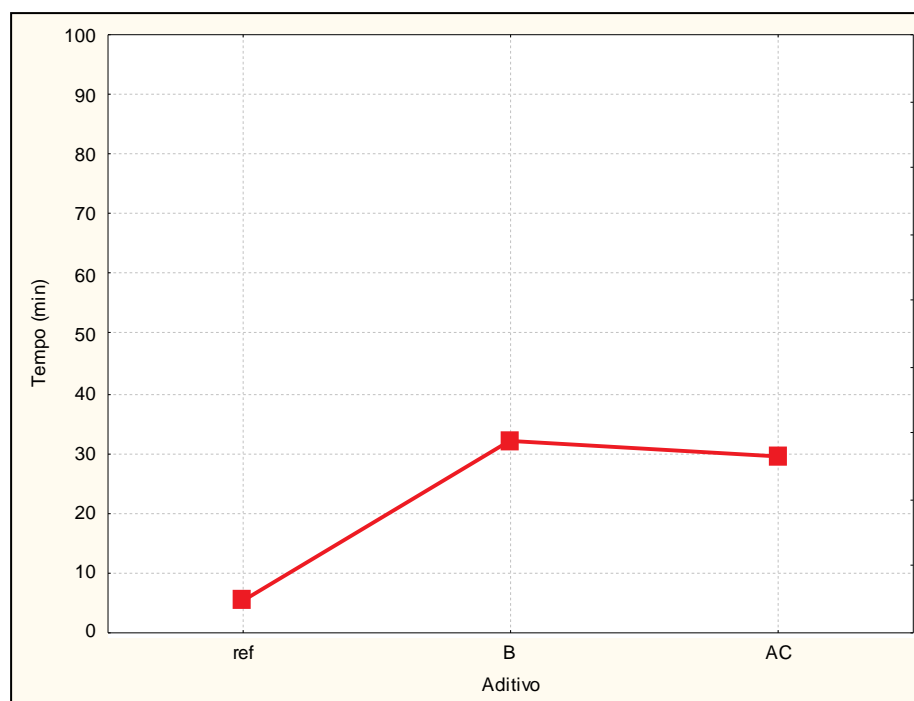
De acordo com o gráfico da Figura 5.13 (e) pode-se verificar que os intervalos de consistência útil variam em função do teor de resíduo, decrescendo à medida que aumenta o teor de resíduo, sendo significativo segundo a análise estatística.

Segundo John e Cincotto (2007) a presença do dihidrato (gipsita) atua como acelerador da reação de hidratação, agindo como núcleos de cristalização.

Da mesma forma acontece com a incorporação de resíduo de gesso, que é um dihidrato tal qual a gipsita. O resíduo acelera o processo de endurecimento das pastas por funcionar como núcleos de cristalização. Com a utilização de 20% de resíduo, a mistura sem aditivo não apresentou tempo suficiente para moldagem. Com a utilização dos aditivos foi possível proceder a moldagem, pois o tempo de consistência útil foi ampliado. Porém não houve resposta positiva com o teor de aditivo utilizado com relação à pasta piloto.

A Figura 5.13 (f) apresenta o gráfico de distribuição estatística do intervalo de consistência útil em função do tipo de aditivo.

Figura 5.13(f) - Efeito isolado do tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil.



Fonte: Acervo próprio.

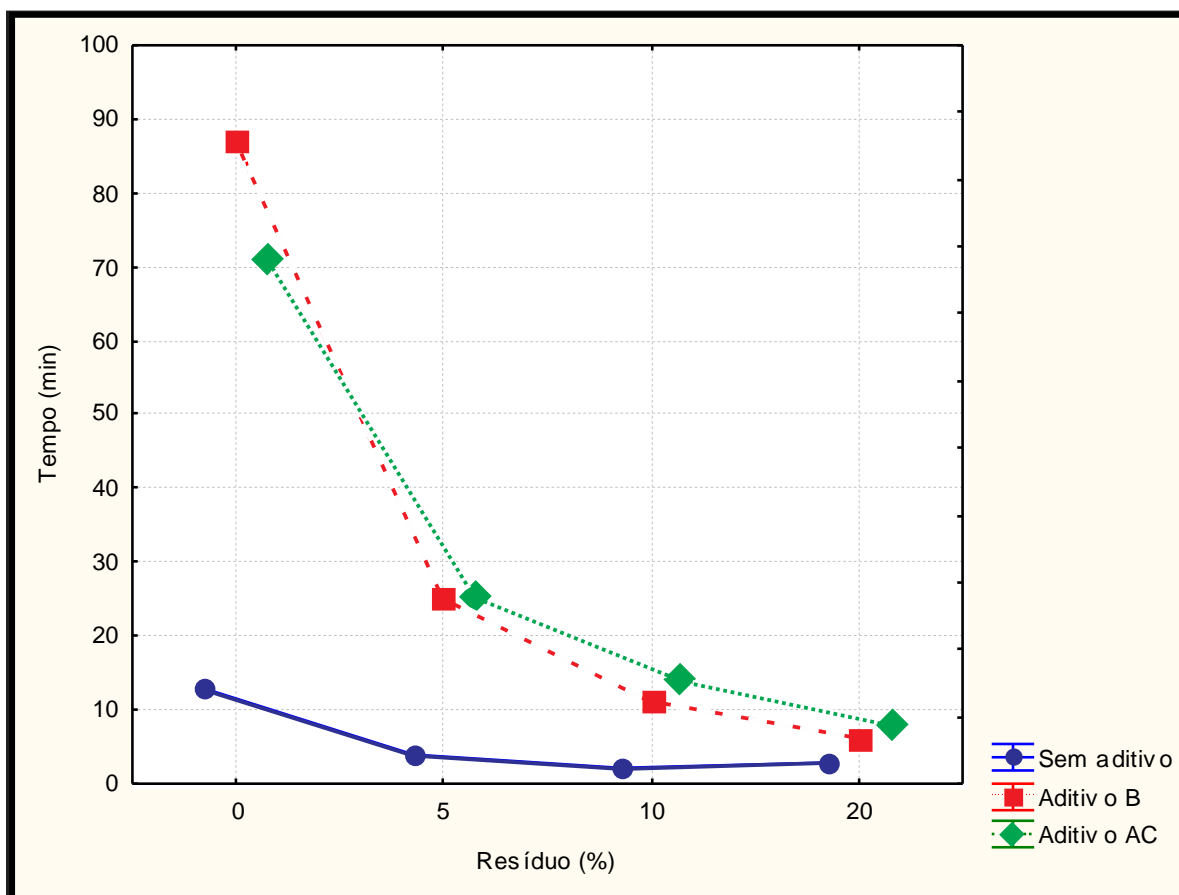
De acordo com o gráfico da Figura 5.13 (f) pode-se verificar a variação do intervalo de consistência útil em função da presença e tipo de aditivo. Apesar dos resultados estatísticos obtidos não terem sido significativos quanto ao tipo de aditivo, é possível observar que houve um aumento no intervalo de consistência útil em relação à presença dos aditivos.

Segundo Hincapié e Cincotto (1997a), o uso do ácido cítrico e do bórax, nos teores 0,03% e 0,7%, retarda a hidratação das pastas de gesso em 1 hora. Foi observado que nas pastas com incorporação de 5% de resíduo de gesso, o uso dos aditivos ampliou o tempo de hidratação em aproximadamente 30 minutos, 50% do tempo obtido nas pastas sem resíduo testadas por Hincapié e Cincotto.

A Figura 5.13 (g) apresenta o gráfico de distribuição estatística do intervalo de consistência útil em função do teor de resíduo e do tipo de aditivo. Apesar do efeito

do aditivo não ter sido significativo, vale observar a tendência de comportamento das misturas.

Figura 5.13 (g) – Efeito da interação entre o teor de resíduo e tipo de aditivo sobre o intervalo de consistência útil.



Fonte: Acervo próprio.

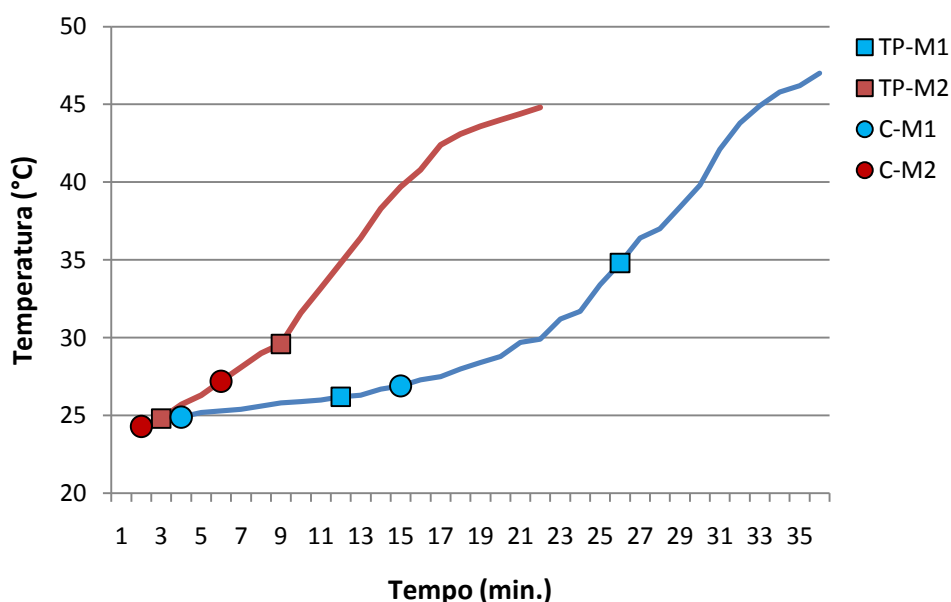
De acordo com o gráfico da figura 5.13 (g) pode-se verificar a variação do intervalo de tempo de consistência útil em função do teor de resíduo e do tipo de aditivo. Observa-se que ocorre uma ligeira ampliação do tempo de consistência útil quando utilizado os aditivos e que a incorporação do resíduo reduz o tempo de consistência útil à medida que seu teor é aumentado. Na análise estatística, ao relacionar as variáveis, observa-se que a presença do aditivo exerce influência no tempo de consistência útil, mas, independe do tipo utilizado. O tipo de aditivo utilizado não foi significativo, mas a presença deles sim, principalmente para teores de 5% de substituição do resíduo.

5.2 Calorimetria

O ensaio de calorimetria foi realizado para identificar as etapas da reação de hidratação, verificando-se a leitura da temperatura, o tempo de pega através do aparelho de Vicat e a consistência através do aparelho de Vicat modificado.

A Figura 5.14(a) apresenta o gráfico de calorimetria, relacionando a variação de temperatura no tempo para as séries com 5% de resíduo, com inclusão da mistura piloto M1 (gesso e água). Foram utilizadas as siglas M2 (gesso 95%, resíduo 5% e água), “TP” para indicar o intervalo do Tempo de Pega das misturas e “C” para o intervalo de Consistência útil.

Figura 5.14(a) – Gráfico da curva de calor M1 e M2 – série 5%.



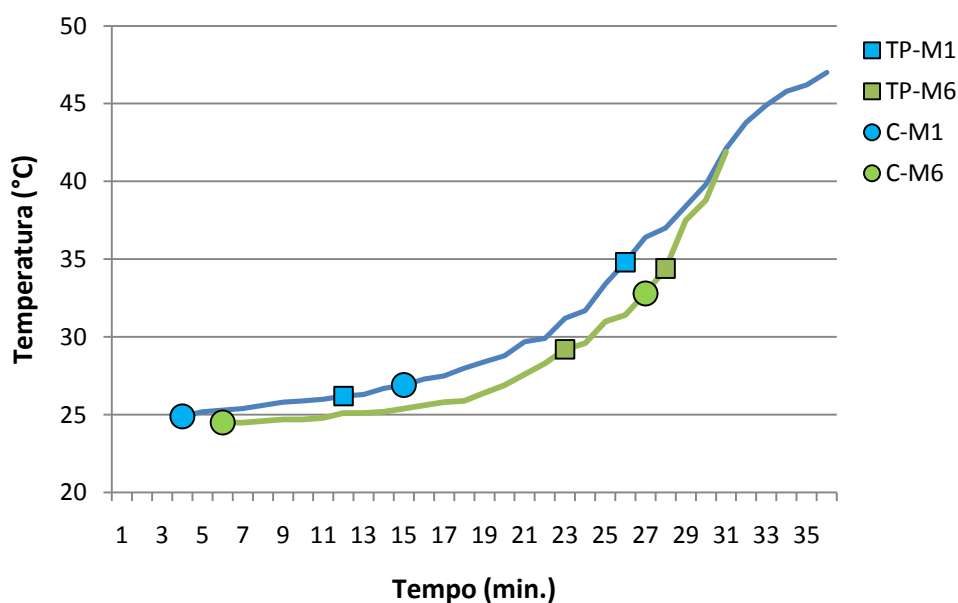
Fonte: Acervo próprio.

O gráfico da Figura 5.14 (a) apresenta a variação da temperatura da reação de hidratação ao longo do tempo de duas misturas, M1 (piloto) e M2 (5% de resíduo). É possível observar que a temperatura de reação da mistura M1 apresenta temperatura máxima de 47°C em 36 minutos, o tempo de início de pega em 12 minutos à 26,2°C, o tempo de fim de pega em 26 minutos à 34°C e o fim da consistência em 15 minutos à 26,9°C. A mistura M2 teve seus tempos de reação

inferiores à 10 minutos devido a incorporação de 5% de resíduo e apresentou uma temperatura máxima de 44,8°C aos 22 minutos.

A Figura 5.14(b) apresenta o gráfico da curva de calor da série com 5% de resíduo composto pela mistura piloto M1 (gesso e água) e M6 (gesso 95% + resíduo 5%+ ácido cítrico + água).

Figura 5.14b - Gráfico da curva de calor M1 e M6 – série 5%.

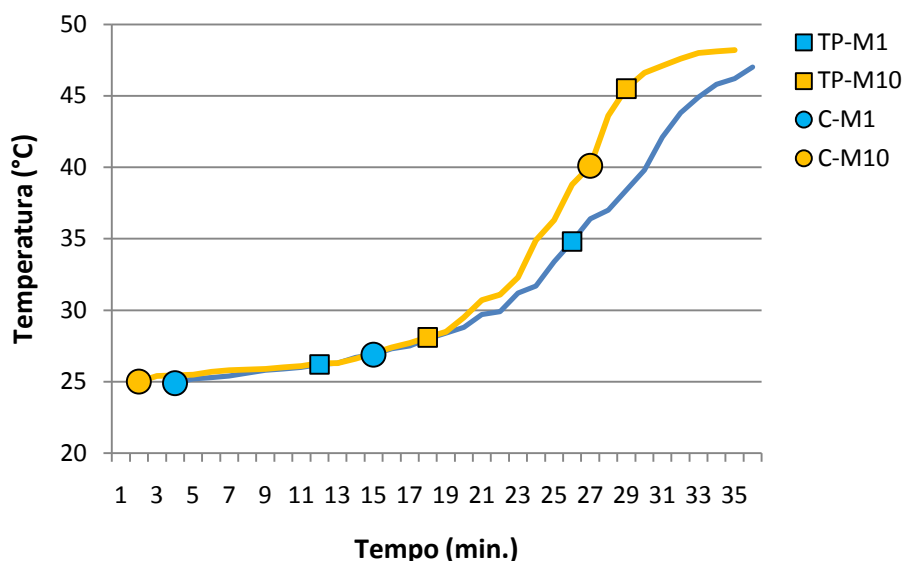


Fonte: Acervo próprio.

A mistura M6, devido à ação do ácido cítrico, apresentou um prolongamento no tempo de consistência útil e um deslocamento retardado do tempo de pega, apesar da semelhança com a curva M1. A influência do ácido cítrico mostrou-se satisfatória para o teor de 5% do resíduo.

A Figura 5.14 (c) apresenta o gráfico de calorimetria da série com 5% de resíduo composto pelas misturas M1 e M10 (95% gesso+5% de resíduo + bórax+ água).

Figura 5.14(c) - Gráfico da curva de calor M1 e M10 – série 5%.



Fonte: Acervo próprio.

A ação do aditivo bórax na mistura M10 foi satisfatória por ampliar o tempo de consistência útil e retardar os tempos de pega da mistura. A Tabela 5.15 apresenta o resultado da leitura dos gráficos de calorimetria da série com 5% de resíduo.

Tabela 5.15 - Leitura dos gráficos de calorimetria da série 5%.

Misturas	Tempo de Pega				Consistência Útil			Hidratação
	TI (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min)	Temperatura (°C)
M1	12	26,2	26	34,8	15	26,9	37	47
M2	3	24,8	9	29,6	6	27,2	22:3	44,8
M6	23	29,2	28	34,4	27	32,8	31	41,9
M10	18	28,8	29	45,5	27	40,1	35:3	48,2

TI – Tempo Inicial TF – Tempo Final

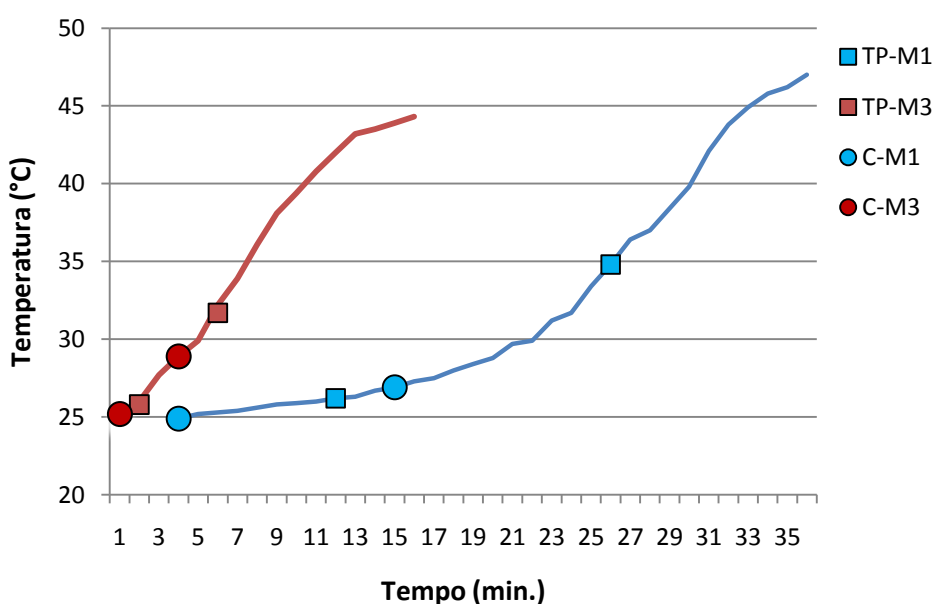
Fonte: Acervo próprio.

Com a utilização dos aditivos foi possível a manutenção da variação das temperaturas no tempo compatível com a curva de calor da pasta piloto. O intervalo da consistência útil da pasta M10 foi superior em 14 minutos em relação à pasta M1 e 23 minutos em relação à pasta M2, com o mesmo teor de resíduo, porém sem aditivo. A pasta M6 apresentou elevação do intervalo do tempo de consistência útil em 10 minutos em relação à M1 e 17 minutos em relação à M2. Os tempos de pega

das pastas com resíduo e aditivo foram prolongados. A elevação da temperatura apresentou comportamento semelhante entre as pastas com aditivo e a pasta piloto. A pasta M2 apresentou elevação rápida da temperatura encerrando a reação de hidratação em torno de 20 minutos, quando atinge a temperatura máxima próxima de 45°C.

As Figuras 5.15 (a), 5.15 (b) e 5.15 (c), nesta ordem, apresentam os gráficos de calorimetria, relacionando a variação de temperatura no tempo para as séries com 10% de resíduo, todos com inclusão da mistura piloto M1 (gesso e água). Foram utilizadas as siglas M1 (gesso e água), M3 (gesso 90%, resíduo 10% e água), M7 (gesso 90%, resíduo 10%, ácido cítrico e água), M11 (gesso 90%, resíduo 10%, bórax e água) para identificar o tipo de mistura, “TP” para indicar o intervalo do Tempo de Pega das misturas e “C” para o intervalo de Consistência útil.

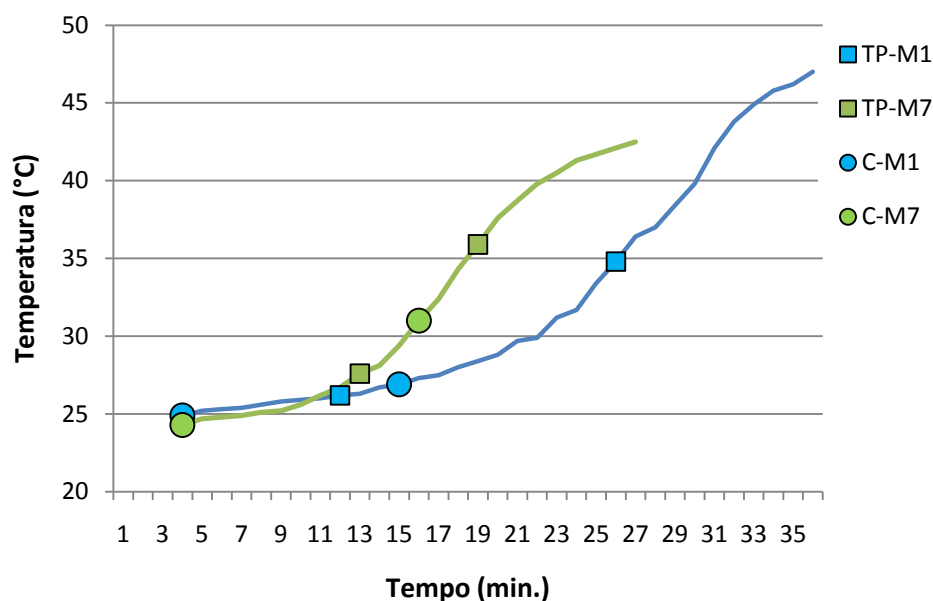
Figura 5.15(a) - Gráfico da curva de calor M1 e M3 – série 10%.



Fonte: Acervo próprio.

A mistura M3 teve seus tempos de reação inferiores à 6 minutos, acelerada pela incorporação de 10% de resíduo e apresentou uma temperatura máxima de 44,3°C aos 16 minutos com o fim da reação.

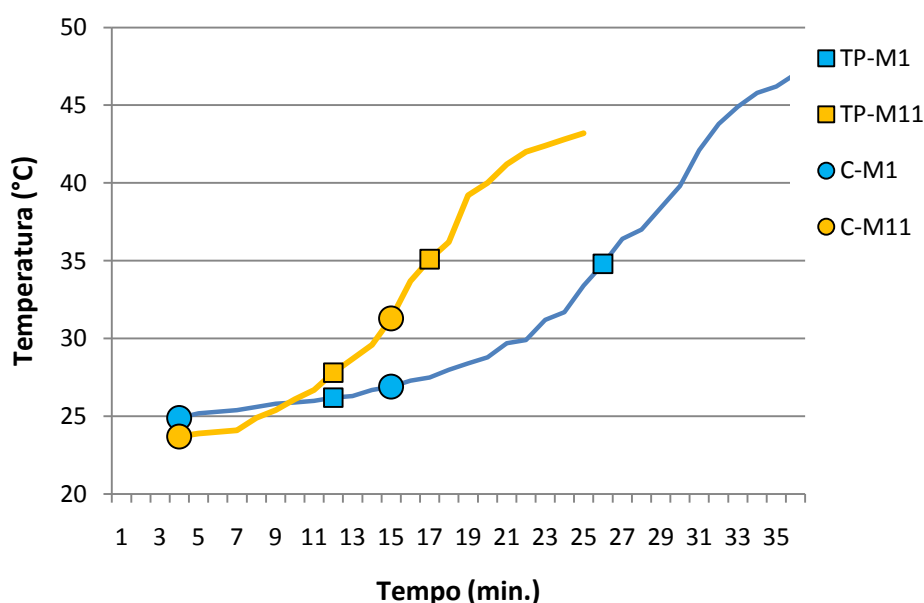
Figura 5.15(b) - Gráfico da curva de calor M1 e M7 – série 10%.



Fonte: Acervo próprio.

A mistura M7 apresentou o intervalo maior que a pasta piloto, porém os tempos de pega foram antecipados tal como o fim da reação. A variação da temperatura também foi acelerada. Em comparação à M6 (5%) houve uma redução de 9 minutos no intervalo de consistência útil, explicitando que o aditivo ácido cítrico no teor utilizado teve sua eficiência reduzida para a incorporação de 10% do resíduo.

Figura 5.15(c) - Gráfico da curva de calor M1 e M11 – série 10%.



Fonte: Acervo próprio.

A ação do bórax na mistura M11 apresentou uma atuação semelhante ao resultado da mistura M7, que teve sua reação de hidratação acelerada, terminando em 25 minutos. Apesar da aceleração o intervalo de consistência útil foi maior na mistura M11 do que na mistura piloto M1. Em comparação à M10 (5%) houve uma redução de 14 minutos no intervalo de consistência útil, explicitando que o aditivo bórax, no teor utilizado, teve sua eficiência reduzida para a incorporação de 10% do resíduo.

A Tabela 5.16 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de calorimetria da série com 10% de resíduo.

Tabela 5.16 - Leitura dos gráficos de calorimetria da série 10%.

Misturas	Tempo de Pega				Consistência Útil			Hidratação
	TI (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min)	Temperatura (°C)
M1	12	26,2	26	34,8	15	26,9	37	47
M3	2	25,8	6	31,7	4	28,9	16	44,3
M7	13	27,6	19	36,8	16	31	27	42,5
M11	12	27,8	17	35,1	15	31,3	25	43,2

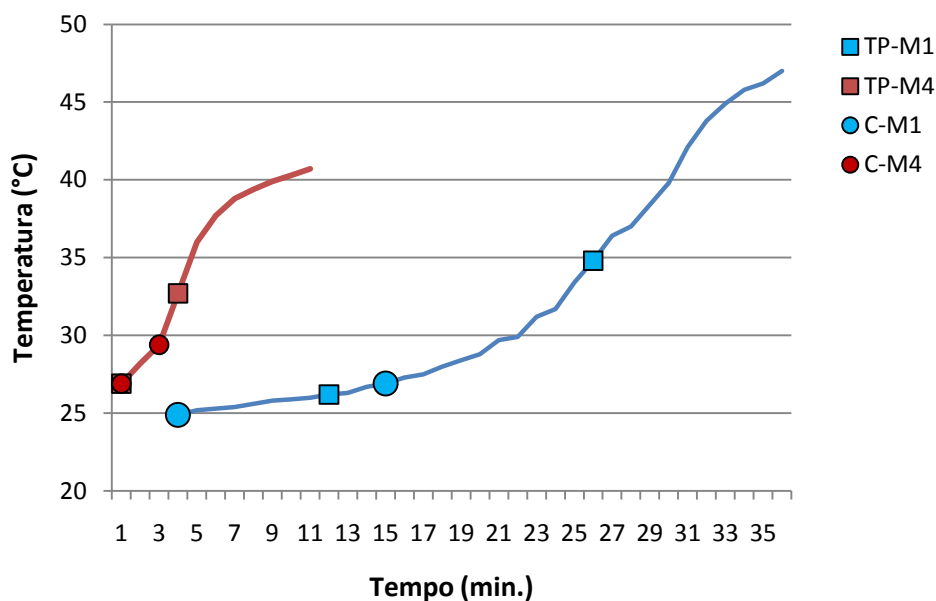
TI – Tempo Inicial TF – Tempo Final

Fonte: Acervo próprio.

Apesar do uso de aditivos, as temperaturas elevaram-se rapidamente a partir de 10 minutos, sendo que para a pasta piloto, a variação de temperatura foi mais lenta. A velocidade de variação da temperatura não interferiu no tempo de consistência útil das pastas com resíduo e aditivo quando comparada com a pasta piloto. Os tempos de fim de pega foram antecipados para as pastas com resíduo e aditivo, apesar de apresentarem temperaturas similares.

As Figuras 5.16 (a), 5.16 (b) e 5.16 (c), nesta ordem, apresentam os gráficos de calorimetria, relacionando a variação de temperatura no tempo para as séries com 20% de resíduo, todos com inclusão da mistura piloto M1 (gesso e água). Foram utilizadas as siglas M1 (gesso e água), M4 (gesso 80%, resíduo 20% e água), M8 (gesso 80%, resíduo 20%, ácido cítrico e água), M12 (gesso 80%, resíduo 20%, bórax e água) para identificar o tipo de mistura, “TP” para indicar o intervalo do Tempo de Pega das misturas e “C” para o intervalo de Consistência útil.

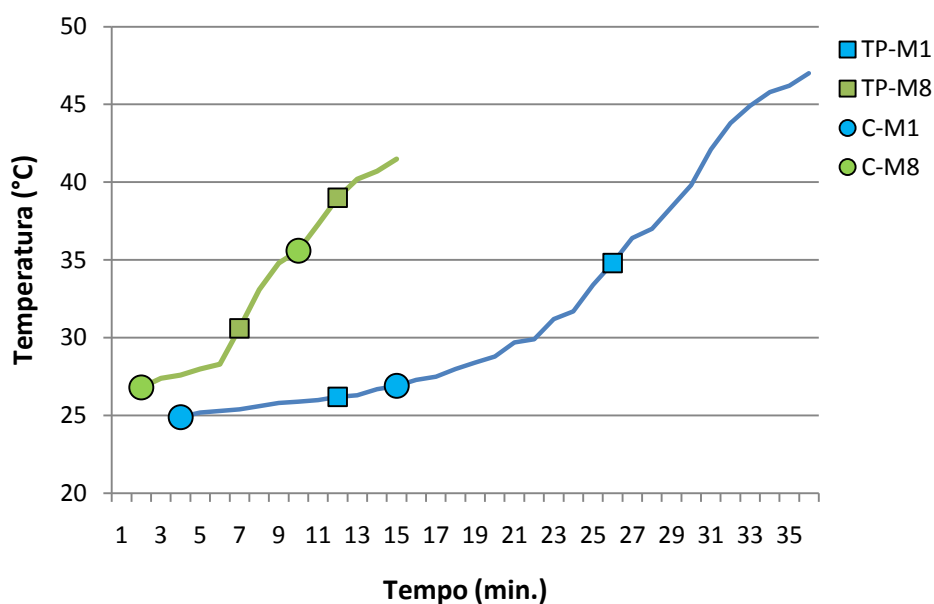
Figura 5.16(a) - Gráfico da curva de calor M1 e M4 – série 20%.



Fonte: Acervo próprio.

Com a incorporação de 20% de resíduo de gesso à pasta, foi verificada uma rápida velocidade de endurecimento e conclusão da reação de hidratação. A aceleração proporcionada pelo teor de resíduo acarretou em um curto intervalo de consistência útil, não sendo eficiente ao uso.

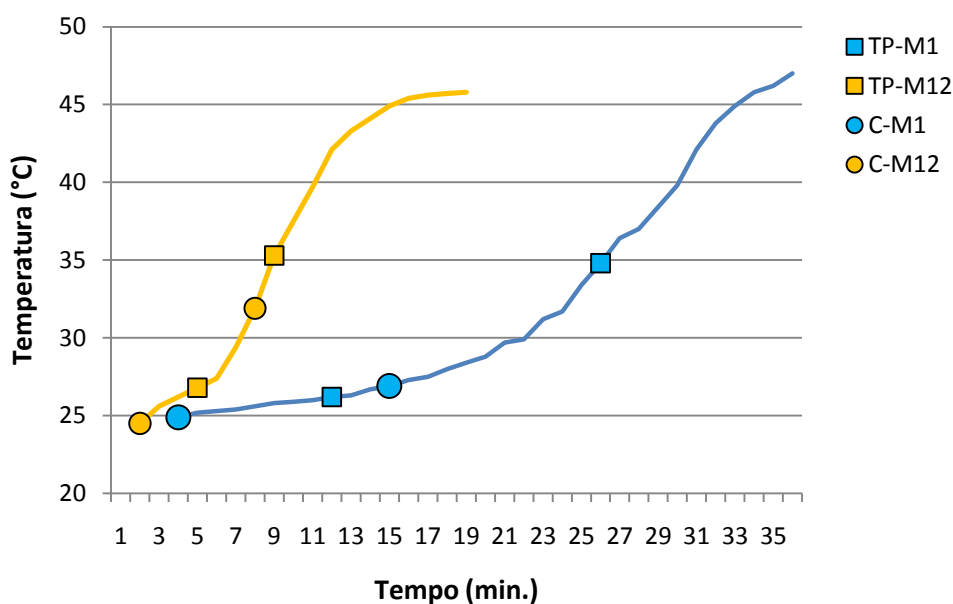
Figura 5.16(b) - Gráfico da curva de calor M1 e M8 – série 20%.



Fonte: Acervo próprio.

Com o uso do ácido cítrico a mistura M8 apresentou um retardo nos tempos de consistência útil e de pega em relação a mistura M3 com o mesmo teor de resíduo. Em comparação com a pasta piloto M1, a reação foi acelerada, apresentando tempos reduzidos de consistência útil e de pega inadequados ao uso.

Figura 5.16(c) - Gráfico da curva de calor M1 e M12 – série 20%.



Fonte: Acervo próprio.

A mistura M12 apresentou comportamento semelhante à mistura M8, tendo seus tempos reduzidos em função do teor do resíduo.

A tabela 5.17 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de calorimetria da série com 20% de resíduo.

Tabela 5.17 - Leitura dos gráficos de calorimetria da série 20%.

Misturas	Tempo de Pega				Consistência Útil			Hidratação
	TI (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min.)	Temperatura (°C)	TF (min)	Temperatura (°C)
M1	12	26,2	26	34,8	15	26,9	37	47
M4	1	26,9	4	32,7	3	29,4	11	40,7
M8	7	30,6	12	39	10	35,6	15	41,5
M12	5	26,8	9	35,3	8	31,9	19	45,8

TI – Tempo Inicial TF – Tempo Final

TI – Tempo inicial; TF – Tempo final.

Fonte: Acervo próprio.

O uso de aditivos nas pastas com incorporação de 20% de resíduo não favoreceu aos tempos de pega e consistência útil, que apresentaram variação rápida de temperatura, em comparação com a pasta piloto. As temperaturas de final de pega foram similares, porém antecipadas. É possível que maiores teores de aditivos possam controlar a ação de teores mais elevados de resíduo, porém devem ser verificadas as propriedades mecânicas do produto.

Através da calorimetria buscou-se a identificação das etapas da reação de hidratação das misturas. Ao analisar a curva de calor da pasta referência (M1) foi observado que a variação de temperatura de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. justificada por Ridge (1959) como o início da pega, não corresponde ao início de pega registrado pelo aparelho de Vicat. A pasta referência M1 apresentou a variação de temperatura de $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. tão logo o gesso entrou em contato com a água em 4 minutos com temperatura $24,9^{\circ}\text{C}$ e seu início de pega foi registrado aos 12,15 minutos sob temperatura de $26,2^{\circ}\text{C}$. Também o tempo de fim de pega registrado pela leitura do aparelho de Vicat não aconteceu no momento em que a temperatura máxima foi atingida, conforme afirmado por Thole (1994).

Através da calorimetria pôde ser observado que as pastas sem aditivos (M1, M2, M3 e M4) à medida que o teor de resíduo foi aumentado, as temperaturas dos tempos de pega e do final do intervalo de consistência útil também são elevadas e em relação às temperaturas finais das reações, quanto maior o teor de resíduo, menor a temperatura final de reação.

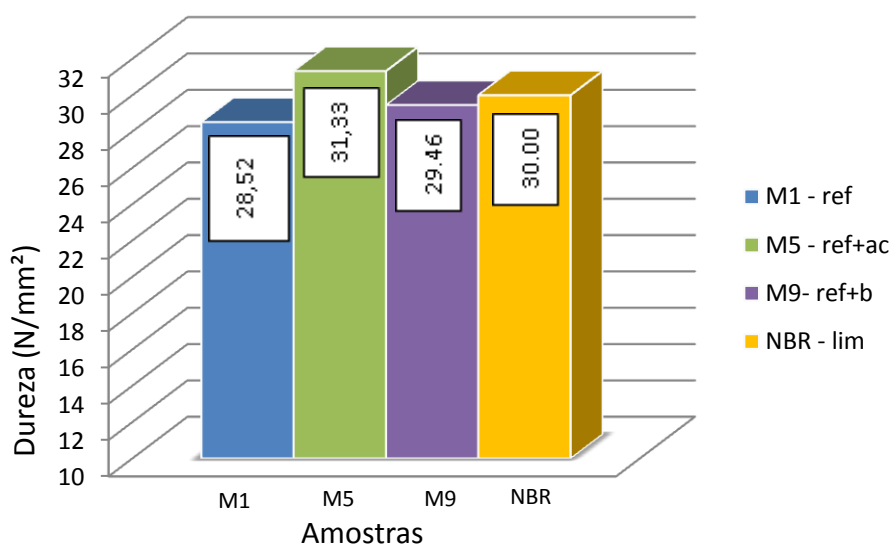
Com os resultados dos ensaios da calorimetria não foi possível fazer a identificação das etapas da reação segundo os parâmetros de Ridge (1959) e Thole (1994), pois mesmo sem a adição do resíduo, a variação da temperatura das pastas iniciou a partir de momento do contato do gesso com a água, não apresentando período de indução.

5.3 Dureza

O ensaio de dureza tem por objetivo calcular a profundidade de impressão de uma esfera, sob ação de uma carga fixa mantida por 15 segundos em corpo de prova. O valor mínimo exigido pela NBR 13207 (ABNT, 1994) para a dureza é de $30\text{N}/\text{mm}^2$.

A Figura 5.17 (a) apresenta o gráfico dos ensaios de dureza para as séries com 0% de resíduo.

Figura 5.17(a) – Gráfico dos ensaios de dureza – série sem resíduo.



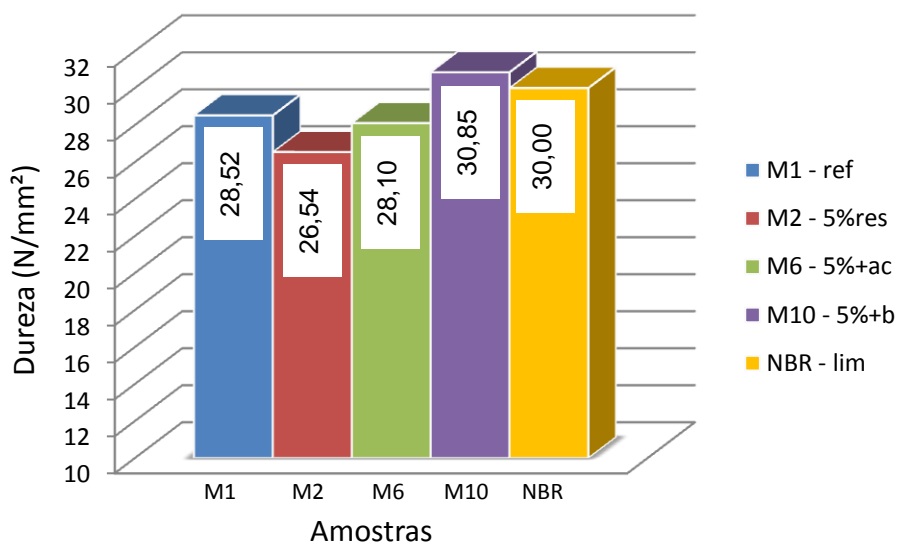
Fonte: Arcevo próprio.

A utilização do aditivo ácido cítrico, na pasta M5 (sem resíduo), elevou a dureza em 8,96% em relação à pasta referência M1. A imagem por microscopia (Figura 5.8-c) permite visualizar os conjuntos de cristais formados como pacotes de agulhas que favorece o preenchimento de vazios, diminuindo a porosidade do material, o que justificaria o aumento da dureza superficial do material.

A ação do bórax, na pasta M9, promoveu um aumento de 3,19% em relação a M1. A ação desse aditivo na elevação da propriedade possivelmente é atribuída às características dos cristais, por serem mais grossos e com menos defeitos e não porosos.

A Figura 5.17(b) apresenta o gráfico com os resultados dos ensaios de dureza da série com 5% de resíduo e a inclusão da mistura referencial M1 (gesso e água).

Figura 5.17(b) - Gráfico dos ensaios de dureza – série com 5% resíduo.



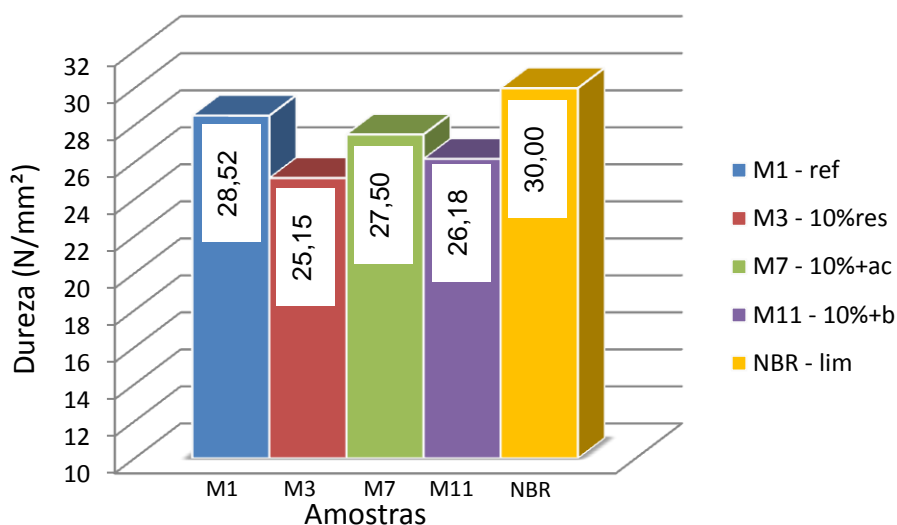
Fonte: Arcevo próprio.

Com a incorporação de 5% de resíduo a pasta sem aditivo M2 apresentou redução de 6,94% em relação à pasta referência M1. A pasta com ácido cítrico, M6, apresentou uma redução na dureza de 1,47% enquanto a pasta com o bórax, M10, promoveu um aumento de 7,55% em relação a M1 e 13,97% em relação à mistura com 5% de resíduo e sem aditivo, M2.

O resultado da dureza superficial obtido pela pasta M10 possivelmente pode ser atribuído à incorporação de 5% do resíduo que tornou a pasta mais densa, reduzindo a porosidade total da amostra e à ação do bórax que proporcionou cristais aparentemente não porosos e precipitações concomitantes para os núcleos de gesso e os cristais de resíduo.

A Figura 5.17(c) apresenta o gráfico com os resultados dos ensaios de dureza da série com 10% de resíduo e a inclusão da mistura referência M1 (gesso e água).

Figura 5.17(c) - Gráfico dos ensaios de dureza – série com 10% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

Com a incorporação de 10% de resíduo, a pasta sem aditivo M3, apresentou redução de 11,81% em relação à pasta referencial M1.

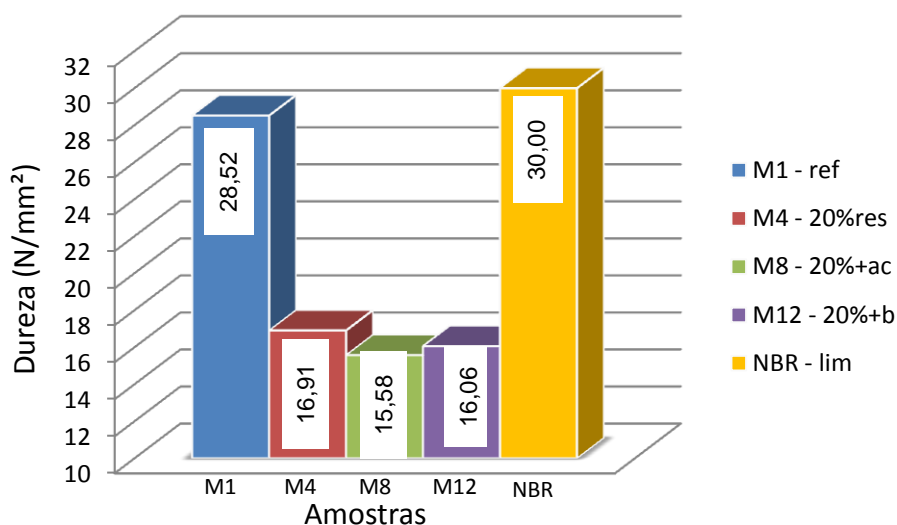
A pasta M7 com ácido cítrico apresentou uma redução na dureza de 3,57% em relação a M1, e aumento de 8,54% em relação a M2.

A pasta M11 com bórax promoveu uma redução de 8,20% em relação a M1 e 3,93% em relação à mistura com 10% de resíduo e sem aditivo, M3. Nenhuma mistura atingiu o valor mínimo exigido para gesso de construção pela NBR 13207 (ABNT, 1994).

Os aditivos não apresentaram eficiência com a incorporação de 10 % de resíduo quando comparado à pasta referência M1. Possivelmente a ação do resíduo como acelerador de pega foi parcialmente inibida pelos aditivos o que promoveu resultados de dureza semelhantes.

A Figura 5.17(d) apresenta o gráfico com os resultados dos ensaios de dureza da série com 20% de resíduo e a inclusão da mistura referencial M1 (gesso e água).

Figura 5.17(d) - Gráfico dos ensaios de dureza – série com 20% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

Com a incorporação de 20% de resíduo, a pasta sem aditivo M4, apresentou redução de 40,71% em relação à pasta referencial M1.

A pasta M8 com ácido cítrico apresentou uma redução na dureza de 45,37% em relação a M1 e a pasta M12 com bórax promoveu uma redução de 43,69% em relação a M1. Pela similaridade dos resultados referente às pastas com 20% de resíduo, conclui-se que a ação dos aditivos, nesses teores não teve relevância. Nenhuma mistura atingiu o valor mínimo exigido para gesso de construção pela NBR 13207 (ABNT, 1994).

Na avaliação dos resultados de dureza, apenas a mistura M10 atendeu a exigência da norma apresentado valor acima de 30 N/mm², mostrando eficaz a ação do aditivo retardador de pega bórax no teor de 0,7% para incorporação de 5% de resíduo. Esse resultado deve ser cruzado com a informação do tempo de consistência útil, para a definição da melhor mistura a ser utilizada e que não se tenha maiores perdas.

No entanto, não é possível concluir a respeito do efeito que o percentual de resíduo causa na propriedade de dureza quando associado ao aditivo uma vez que a própria pasta de referência “M1” não atendeu ao limite da NBR13207(ABNT, 1994).

Para melhor entender a influência dessas variáveis foi realizada uma análise estatística de variância em que foi verificado o grau de significância em que as variáveis (percentual de resíduo e aditivo) exercem sobre a dureza.

Os resultados dos ensaios de dureza foram submetidos à análise estatística de variância (ANOVA) desenvolvida através do programa computacional STATISTICA® para verificar a influência das variáveis teor de resíduo e tipo de aditivo sobre esta propriedade. Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a dureza.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F _{cal}	p-valor	Significância
% Resíduo	342,633	3	114,211	55,172	0,000092	S
Aditivo	4,878	2	2,439	1,178	0,370150	NS
Erro	12,421	6	2,070			

S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo; SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F_{cal} – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

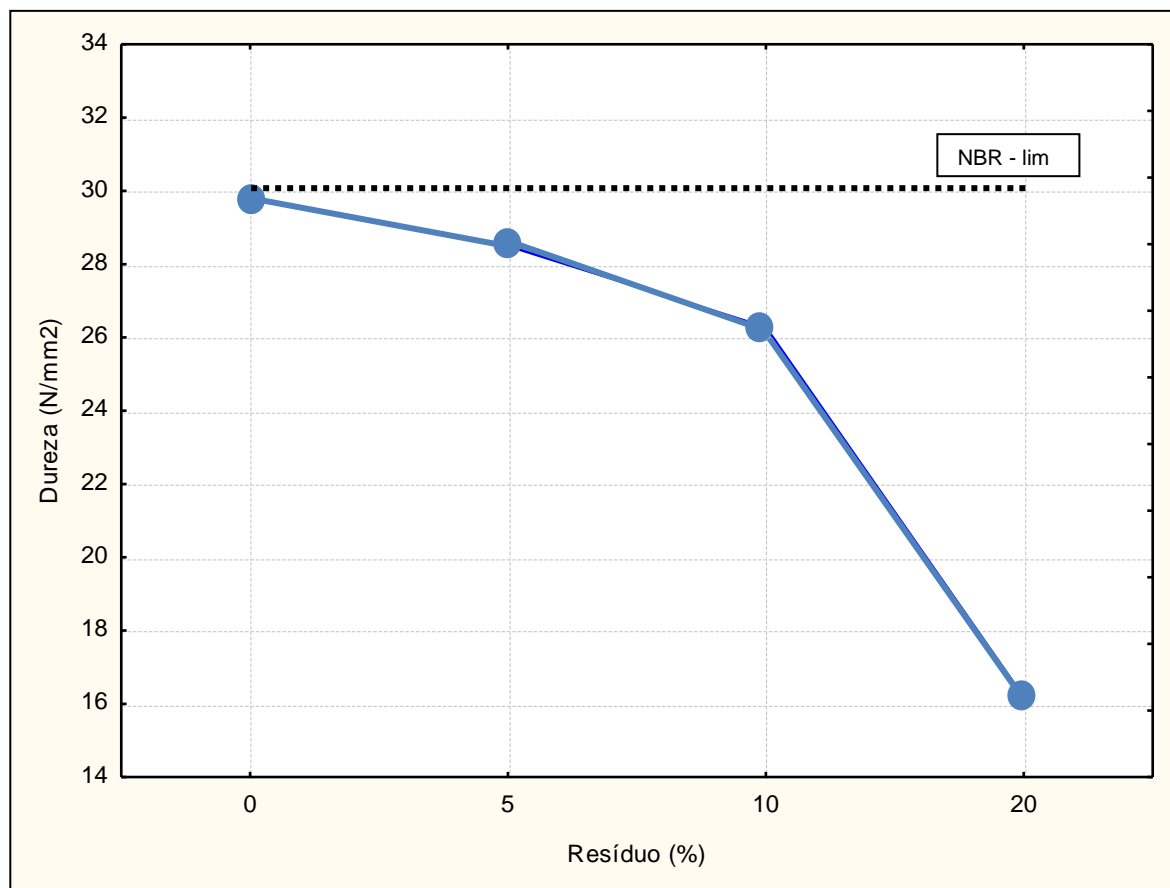
Fonte: Acervo próprio.

A Tabela 5.18 explica a análise de variância dos resultados obtidos nos ensaios de dureza cujas variáveis foram o teor de resíduo e o tipo de aditivo. A análise de variância tem por objetivo verificar o grau de diferença entre os 12 diferentes tipos de misturas sobre a variável resposta (dureza).

De acordo com a tabela 5.18, o teor de resíduo apresentou uma influência na propriedade estudada. Para a análise de variância (ANOVA) dos fatores controláveis analisados, o p-valor do efeito do teor de resíduo foi 0,000092 considerado “significativo” pois encontra-se inferior a 0,05 (5%). O efeito do tipo de aditivo revelou não ser significativo para a análise utilizada.

Os gráficos de distribuição estatística da dureza em função das variáveis isoladas, teor de resíduo e do tipo de aditivo, estão expressas nas Figuras 5.17 (e) e 5.17 (f).

Figura 5.17(e) – Efeito isolado do teor de resíduo sobre a dureza superficial.

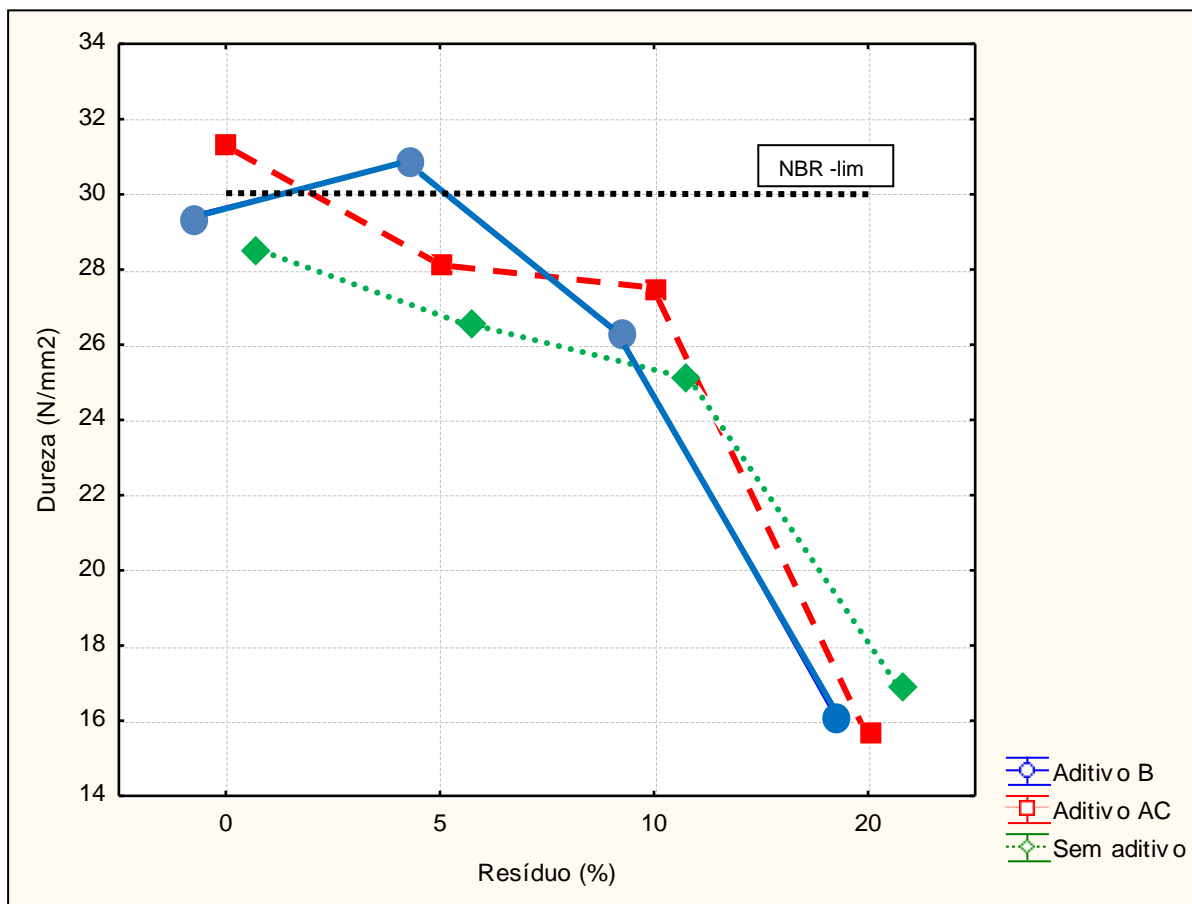


Fonte: Acervo próprio.

De acordo com o gráfico da Figura 5.17 (e) pode-se verificar que a dureza varia em função do teor de resíduo, decrescendo à medida que o teor é aumentado. Esse resultado está associado ao fato da moldagem ficar prejudicada devido à ausência de aditivos e a presença do resíduo nas pastas gerando uma aceleração do processo de hidratação, não permitindo um acabamento superficial adequado aos corpos de prova com incorporação de resíduo e sem aditivo.

A Figura 5.17 (f) apresenta o gráfico de distribuição estatística da dureza em função do cruzamento do teor de resíduo e do tipo de aditivo.

Figura 5.17(f) – Efeito da interação entre o teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a dureza superficial.



Fonte: Acervo próprio.

Ao analisar a atuação do aditivo, independente do tipo utilizado, verifica-se um aumento no resultado de dureza, sendo mais expressivo para o ácido cítrico quando utilizado sem resíduo de gesso e para o bórax, quando incorporado 5% de resíduo. Com o resultado apresentado no gráfico da Figura 5.17(f), a presença de qualquer dos dois aditivos estudados colaboram com a elevação da propriedade mecânica avaliada até os 10% de incorporação de resíduo.

De acordo com o gráfico da Figura 5.17 (f) pode-se verificar que os resultados de dureza variam em função do teor de resíduo, decrescendo à medida que é aumentado o percentual de substituição do resíduo, sendo significativo segundo a análise estatística. Para o teor de resíduo de 5%, quando associado ao aditivo retardador bórax, ocorre uma elevação no resultado do ensaio de dureza, ultrapassando o resultado obtido pela mistura de referência.

Na análise estatística, ao relacionar as variáveis, apenas a incorporação de 5% de resíduo de gesso apresentou dureza maior que o referencial de 0% de resíduo quando utilizado o aditivo retardador de pega bórax, apesar da variável “tipo de aditivo” não ter sido significativo na análise estatística.

Segundo a teoria da cristalização, em uma solução formada por água e gesso, primeiramente ocorre a dissolução do hemidrato que forma uma solução supersaturada e em seguida os dihidratos se precipitam para começar o crescimento e conseqüentemente o endurecimento da pasta.

A incorporação de resíduo de gesso às pastas acelera as reações, pois promove a supersaturação da solução no instante em que o resíduo entra em contato com a água, inicializando a formação dos cristais. Essa aceleração prejudica a trabalhabilidade, no caso de ensaios laboratoriais, a moldagem é prejudicada comprometendo a qualidade dos corpos de prova, apresentando falhas em forma de vazios.

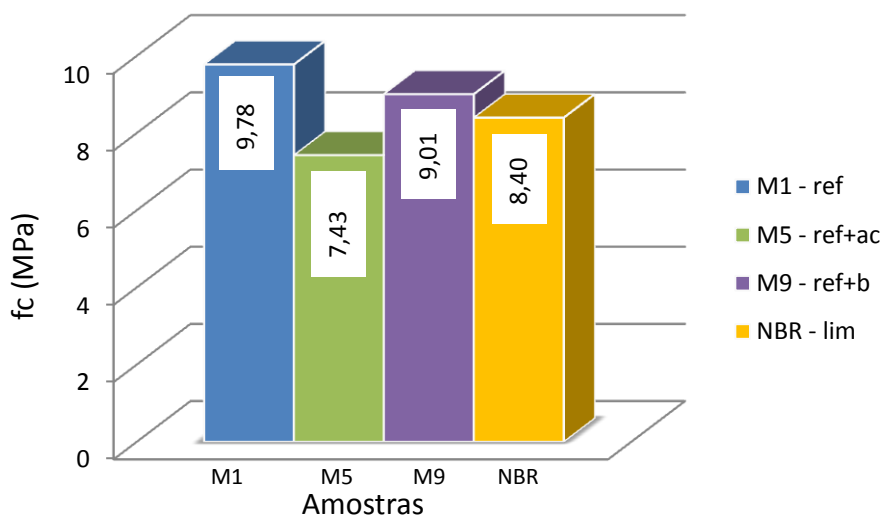
O resíduo, ao entrar em contato com a água, se precipita por ser um dihidrato (cristais formados), enquanto que o gesso passará pela dissolução, formará núcleos de cristais que se precipitarão para iniciar o crescimento no entorno dos cristais do resíduo, envolvendo-os. As pastas com resíduo são densas, com poucos e pequenos vazios devido aos pequenos cristais do resíduo. Com a adição de aditivo os resíduos são mantidos na solução por mais tempo, sendo retardada a sua precipitação. Então os novos núcleos de cristais de gesso são formados e se precipitam junto com os cristais do resíduo, formando uma pasta mais homogênea em que a maioria dos cristais de resíduo estará em contato com os cristais de gesso. Esse efeito foi conseguido com a substituição de 5% e uso de aditivo. Formando um material com uma dureza maior que a pasta referência e boa trabalhabilidade.

5.4 Resistência à compressão

O objetivo do ensaio de resistência à compressão é calcular a carga limite que os corpos de prova suportam. O valor mínimo exigido pela NBR 13207 (ABNT, 1994) para essa propriedade é de 8,40MPa. As Figuras 5.18 (a), 5.18 (b), 5.18 (c) e 5.18 (d), nesta ordem, apresentam os gráficos dos ensaios de resistência à compressão

para as séries com 0% de resíduo, 5% de resíduo, 10% de resíduo e 20% de resíduo, todos com inclusão da mistura referência M1 (gesso e água).

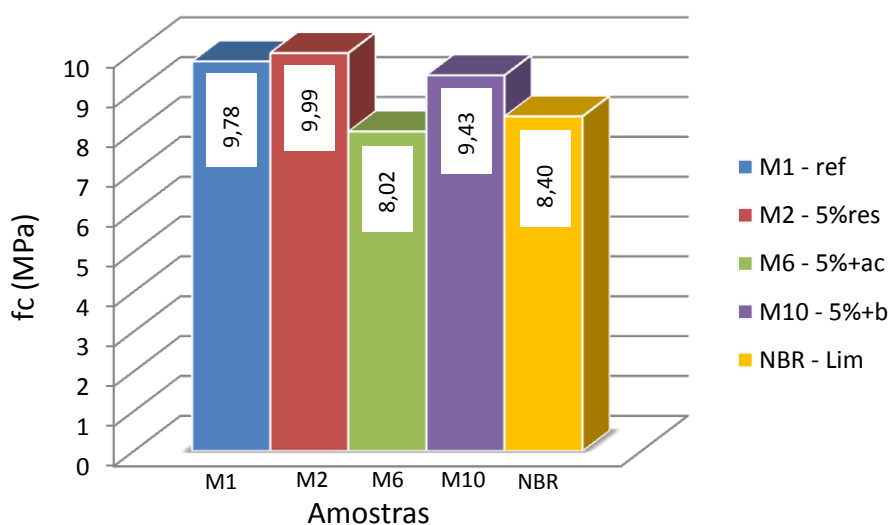
Figura 5.18(a) - Gráfico de resistência à compressão (f_c) – série com 0% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

A utilização do aditivo ácido cítrico na pasta sem incorporação de resíduo reduziu a resistência em 24,02% em relação à pasta referência M1, não atingindo o mínimo exigido em norma. A pasta com bórax, M9, apesar de ter sido superior a solicitação da norma, apresentou uma redução de 3,57% em relação a M1. Esses resultados conferem com os resultados apresentados por Hincapié e Cincotto (1997a).

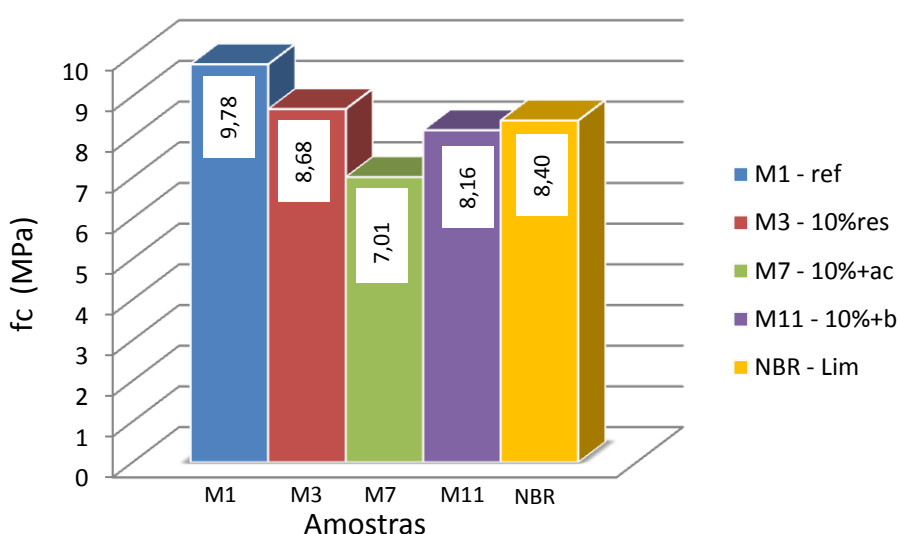
Figura 5.18(b) - Gráfico de resistência à compressão (f_c) – série com 5% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

A incorporação do resíduo aparenta ter promovido um incremento na resistência conforme o gráfico da Figura 5.18(b), porém com a utilização dos retardadores as resistências foram reduzidas. A utilização do aditivo ácido cítrico na pasta com incorporação de resíduo a 5% reduziu a resistência em 17,99% em relação à pasta piloto M1. A pasta com bórax, M10, apresentou uma redução de 3,57% em relação a M1, porém é superior a solicitação da norma em 10,92%.

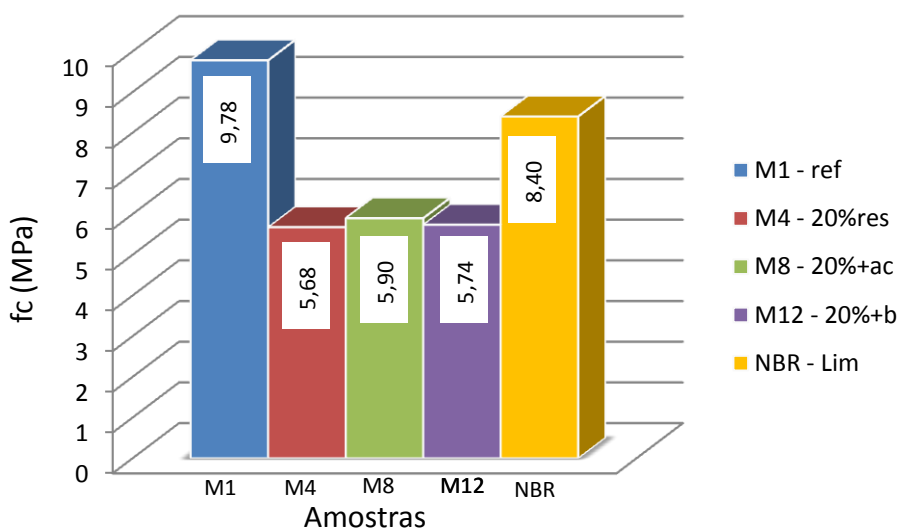
Figura 5.18(c) - Gráfico de resistência à compressão (f_c) – série com 10% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

A pasta M3, com incorporação de 10% de resíduo e sem aditivo, apesar da redução de 11,24% em relação a M1, manteve-se no limiar da norma, apresentando-se 3,22% superior ao exigido pela norma. A pasta com aditivo ácido cítrico e incorporação de resíduo a 10%, M7, reduziu a resistência em 28,32% em relação à pasta piloto M1, não atendendo a solicitação da norma. A pasta com bórax, M11, apresentou uma redução de 16,56% em relação a M1 e em relação à solicitação da NBR 13207 (ABNT, 1994), redução de 2,85%.

Figura 5.18 (d) - Gráfico de Resistência à compressão – série com 20% resíduo.



Fonte: Acervo próprio.

As misturas com adição de 20% de resíduo apresentaram reduções superiores à 39% em relação a mistura referência e 29% em relação a solicitação da NBR 13207 (ABNT, 1994).

Pela similaridade dos resultados referente às pastas com 20% de resíduo, conclui-se que a ação dos aditivos, nesses teores não teve relevância. Nenhuma mistura, com teor de 20% de resíduo, atingiu o valor mínimo exigido para gesso de construção pela NBR 13207 (ABNT, 1994).

Observando o conjunto dos gráficos de resistência à compressão é possível observar que a incorporação de 5% do resíduo contribui para o aumento das resistências, porém há a necessidade de controlar a velocidade da reação, pois compromete a trabalhabilidade.

Na avaliação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das misturas com incorporação de resíduo, apenas as misturas M2 e M10 atenderam a exigência da norma, apresentando valores acima de 8,4 MPa. Esse resultado deve ser cruzado com a informação do tempo de consistência útil, para a definição da melhor mistura a ser utilizada.

Para os ensaios de resistência à compressão foi realizada uma análise estatística utilizando-se da ferramenta de Análise de Variância (ANOVA) desenvolvida através do programa computacional STATISTICA®. Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Análise de variância do efeito do teor de resíduo e tipo de aditivo sobre a resistência à compressão.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F _{cal}	p-valor	Significância
% Resíduo	20,3549	3	6,7850	19,796	0,001631	S
Aditivo	4,3615	2	2,1807	6,362	0,032900	S
Erro	2,0565	6	0,3427			

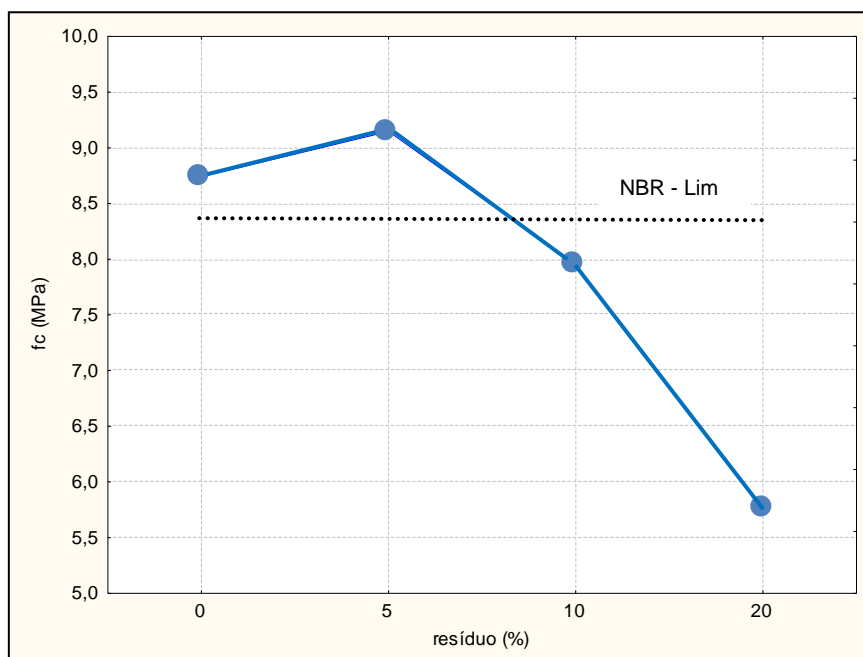
S – Efeito significativo; NS – Efeito não significativo; SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F_{cal} – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Acervo próprio.

A Tabela 5.19 mostra a análise de variância dos resultados dos ensaios de resistência à compressão em relação ao teor de resíduo incorporado e tipo de aditivo utilizado. O resultado da análise indicou que ambas as variáveis foram significativas para a propriedade analisada, apresentando “p-valor” inferior a 0,05 (5%).

A Figura 5.18 (e) apresenta o gráfico do efeito isolado do percentual de substituição do resíduo sobre a resistência à compressão e a Figura 5.18 (f) apresenta o gráfico do efeito isolado do tipo de aditivo utilizado sobre a propriedade mecânica estudada.

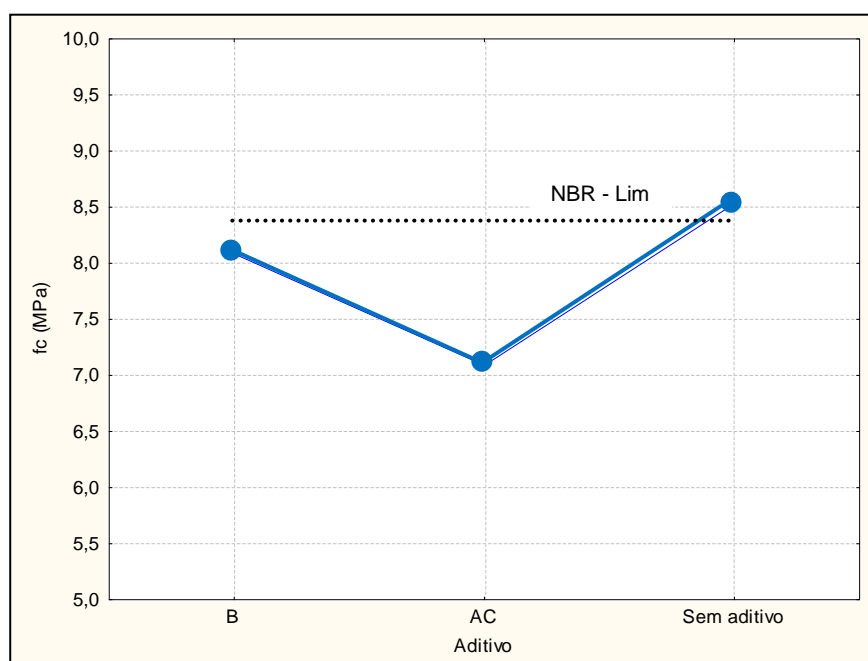
Figura 5.18(e) – Efeito isolado do teor de resíduo sobre a resistência à compressão.



Fonte: Acervo próprio.

No gráfico da Figura 5.18 (e) pode-se verificar que a resistência à compressão varia em função do teor de resíduo, apresentando uma influência positiva na incorporação de 5% de resíduo, decrescendo à medida que aumenta o teor do resíduo.

Figura 5.18(f) – Efeito isolado do tipo de aditivo sobre a resistência à compressão.

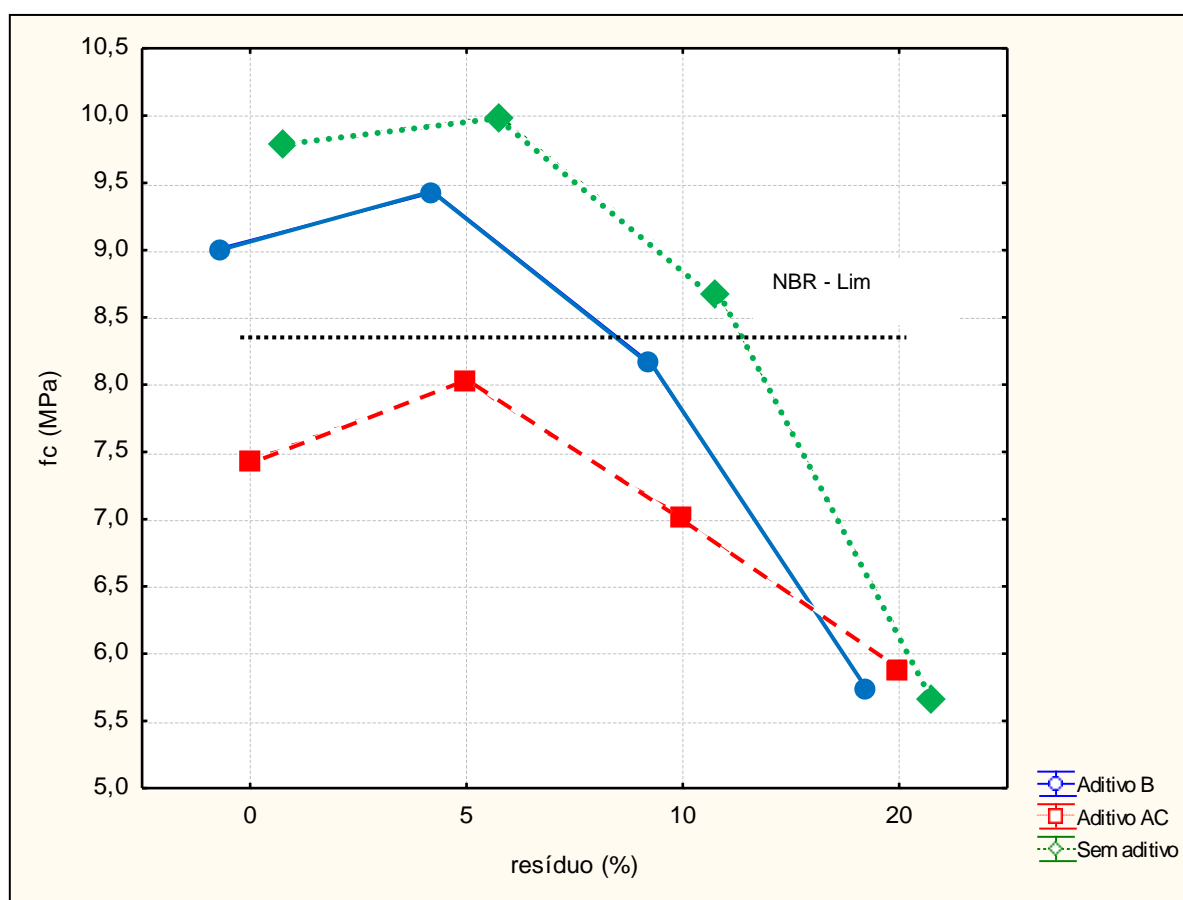


Fonte: Acervo próprio.

De acordo com o gráfico da Figura 5.18 (f) pode-se verificar que a resistência à compressão é maior na ausência de aditivo em torno de 0,5 MPa em relação à ação do aditivo bórax, que apresenta resultado satisfatório segundo a exigência da norma. A análise isolada desta variável apresentou significância, segundo a análise estatística, devido à variação dos resultados do grupo.

A Figura 5.18 (g) apresenta o efeito da interação entre o percentual de resíduo com os diferentes tipos de aditivos sobre a resistência à compressão.

Figura 5.18g – resistência à compressão em função do teor de resíduo e tipo de aditivo.



Fonte: Acervo próprio.

De acordo com o gráfico da Figura 5.18 (g) pode-se verificar que os resultados de resistência à compressão variam em função da interação das variáveis, apresentando os melhores resultados no teor de 5% de resíduo e à medida que o teor é elevado, sendo significativo segundo a análise estatística. Após a incorporação de 5% de resíduo ocorre uma tendência de diminuição dos valores da

resistência à compressão. O melhor resultado obtido na análise estatística refere-se ao grupo das pastas sem aditivo, seguido pelo grupo com bórax.

A incorporação do resíduo adensa a pasta e reduz o tamanho e a quantidade de poros. Por outro lado, acelera toda reação, desde a precipitação até o endurecimento, comprometendo a sua trabalhabilidade. A utilização de aditivos retardadores de pega foi fundamental para a ampliação do tempo de uso da pasta, porém sua eficiência no percentual utilizado foi adequada à incorporação de 5% de resíduo, que proporcionou resistências compatíveis à pasta de referência M1. Ao aumentar o teor de resíduo, os aditivos não mais controlam a velocidade da reação, acarretando em corpos de prova defeituosos, com presença de vazios internos e externos aos blocos.

Capítulo 6

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"

Aristóteles.

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho cumpriu seus objetivos, potencializando o uso do resíduo de gesso na própria fonte geradora, as pastas de revestimentos e fundição.

Através da análise por microscopia eletrônica de varredura foi possível observar a diferença existente entre o dihidrato (resíduo) e o hemidrato (gesso), em que os cristais de hemidrato apresentaram aspecto desidratado, característico da perda de água pela calcinação.

A análise microestrutural da amostra com teor de 5% de resíduo e aditivo retardador de pega bórax apresentou um grande adensamento devido ao entrelaçamento de pequenos e numerosos cristais que se apresentaram de forma heterogênea. As formas observadas na amostra foram hexagonais individualizados e aciculares imbricados, com textura lisa, sem poros identificáveis. A pasta apresentou poros de pequenos diâmetros que, associado às formas dos cristais, proporcionaram os resultados satisfatórios nas propriedades mecânicas ensaiadas.

Através das análises por EDS (Sistema de Energia Dispersiva) foi possível verificar a redução do teor de oxigênio (elemento presente na composição da água – H₂O) na amostra de gesso, confirmando os ensaios de caracterização química elaborados, que indicaram a redução de moléculas de água nas amostras de hemidrato.

O intervalo de consistência útil da pasta M10 (5% Resíduo e bórax) e M6 (5% resíduo e ácido cítrico) mostraram-se satisfatórios em relação à mistura de referência e também em relação às outras misturas com incorporação de resíduo de gesso por apresentar uma ampliação no tempo de utilização da pasta.

O ensaio de calorimetria mostrou que, com a presença do dihidrato (resíduo), as temperaturas são antecipadas, porém com o uso do bórax foi possível prolongar a elevação da temperatura similarmente ao apresentado pela pasta de referência.

Através do ensaio de dureza e resistência à compressão foi possível verificar que os aditivos utilizados não prejudicaram as propriedades mecânicas do gesso quando associado a 5% do seu resíduo. No ensaio de dureza, a amostra M10 com 5% de resíduo e bórax apresentou melhor desempenho em relação à amostra de referência. No ensaio de resistência à compressão, os resultados apresentados pela amostra M10 mostraram-se satisfatórios, atendendo à exigência da norma, apesar de ter apresentado um decréscimo em relação à pasta de referência.

As pastas com 20% de resíduo apresentaram uma grande aceleração no processo de hidratação mostrando ineficiência do aditivo no teor utilizado. As moldagens tornaram-se problemáticas devido ao rápido endurecimento das pastas o que acarretou em corpos de prova mal moldados, que conseqüentemente, prejudicaram os resultados dos ensaios mecânicos.

O resíduo de gesso na forma de dihidrato apresenta a propriedade de acelerar a reação de hidratação, cuja incorporação às pastas de gesso acarretaria em maior geração de resíduo do que as pastas normais. No entanto, ao interagir com o aditivo retardador bórax, foi possível obter uma ampliação do intervalo de consistência útil da pasta e eficiência nos resultados dos ensaios de dureza e resistência à compressão nas pastas com incorporação de 5% de resíduo, utilizando a relação água/gesso igual a 0,7.

Considerando todos esses aspectos pode-se concluir, com base nos resultados obtidos, que existe potencial de aplicação do resíduo de gesso na produção de pastas de gesso para revestimento, em teores de substituição de 5%. Contudo, essa aplicação deve vir associada com a utilização de aditivos retardadores de pega.

O uso do resíduo de gesso incorporado à misturas de hemidratos é uma alternativa para a minimização dos resíduos gerados, dos impactos ambientais causados com a má disposição desses resíduos em locais inadequados.

A aplicação do resíduo de gesso em pastas para revestimento carece do desenvolvimento de mais pesquisas acerca da sua viabilidade técnica de uso. Para isso, sugere-se alguns temas para estudos futuros no sentido de corroborar com os resultados obtidos neste trabalho e também para um grau de aprofundamento do comportamento do resíduo de gesso quando incorporado ao gesso e aditivos retardadores de pega.

6.1 Sugestões para estudos futuros

- Para implementar a utilização das pastas é necessário testes em obras, em escalas maiores, para confirmar o tempo de consistência útil, pois todas as pastas foram elaboradas em dimensões laboratoriais.
- Execução de ensaios de aderência às pastas com 5% de resíduo, 0,7% bórax e a/g de 0,7.
- Testar diferentes teores de aditivos para incorporação de 10% de resíduo.
- Fazer novos experimentos com percentuais de resíduos próximos a 5%.

Capítulo 7

"Onde os seus talentos e as necessidades do mundo se cruzam: aí está a sua vocação"
Aristóteles.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA ESTADO. **Emprego na construção civil cresce 0,57% em outubro.** 2010. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia-e-negocios/noticia/2010/12/emprego-na-construcao-civil-cresce-057-em-outubro.html>>. Acesso em: 05 abr. 2011.
- AGOPYAN, V. *et al.* Alternativas para redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras. Relatório Final. São Paulo: FINEP, ITQC, PCC, 5V. 1998.
- AGUIAR, G. de; SELMO, S. M. de S. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção.** São Paulo: EPUSP, 2004. 22p.(Boletim técnico, PCC/438).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 11:** Terminology relating to gypsum and related building materials and systems. USA, 2005a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 28:** Standard specification for gypsum plasters. USA, 2005b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 35:** Specification for inorganic aggregates for use in gypsum plaster. USA, 2005C.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 471M** Test methods for chemical analysis of gypsum and gypsum products. USA, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 472** Test methods for physical testing of gypsum, gypsum plasters, and gypsum concrete. USA, 2004b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1396** Specification for gypsum board. USA, 2004a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 842** Specification for application of interior gypsum plaster. USA, 2005d.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 11** Specification for wire cloth and sieves for testing purposes. USA, 2004c.
- ANTUNES, Rubiane Paz do Nascimento. **Estudo da influência da cal hidratada nas pastas de gesso.** 1999. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2010 – **setor de transformação de não-metálicos.** 2010. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/publicacoes/Anuarios/2 ANUARIO DA TRANSFORMACAO DOS NAO METALICOS 2010.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/publicacoes/Anuarios/2_ANUARIO_DA_TRANSFORMACAO_DOS_NAO_METALICOS_2010.pdf)>. Acesso em: 08 out. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 12127**: gesso para construção – determinação das propriedades físicas do pó – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12128**: gesso para construção – determinação das propriedades físicas da pasta – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12129**: gesso para construção – determinação das propriedades mecânicas – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12130**: gesso para construção – determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 13207**: gesso para construção civil – especificação. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 13867**: revestimento interno de paredes e tetos com pasta de gesso – materiais, preparo, aplicação e acabamento - procedimento. Rio de Janeiro, 1997.

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.

BERNHOEFT, L. F.; GUSMÃO, A. D.; TAVARES, Y. V. P. Influência da adição de resíduo de gesso no calor de hidratação da argamassa de revestimento interno. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.11, n.2, p.189-199, jun. 2011.

BRAGANÇA, S.R.; BERGMANN, C.P. Microestrutura e propriedades de porcelanas. **Cerâmica**, n. 50, p. 291- 299, 2004.

CANUT, Mariana Moreira Cavalcanti. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 153p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CARVALHO, M. T. M.; LELES, M. I. G.; TUBINO, R. M. C. TG and DSC studies on plaster residues as recycled material. **Jornal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v.91, n.2, p. 621-625, 2008.

CASTRO, Cassiano Costa e. **Metais raros associados ao Granito Desembarque: estudo mineralógico e químico utilizando MEV-EDS**. 2007. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Análise em bacias e faixas móveis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Banco de Dados da CBIC. **Construção Civil: Análise e perspectivas**. Brasília, 2010.

CHANDARA, C.; AZIZ LI, K. A. M.; AHMAD, Z.A.; SAKAI, E. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement. **Waste Management**, n.29, p. 1675-1679, 2009.

CLIFTON, J. R. Some aspects of the setting and hardening of gypsum plaster. Technical Note, 755, **National Bureau of Standards**, Washington, EUA, 1973.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº307, de 5 de julho de 2002. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jul. 2002. Seção 1, p. 95-96.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº431, de 24 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, nº99, Brasília, 25 maio. 2011. p. 123.

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

642 p.

DEUTSCHIE INSTITUT FUR NORMUNG. **Building plaster**: requirements, testing control. – DIN 1168: part 2, Berlin, 1975.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de método de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ENGESSUL. **O gesso e o meio ambiente**: a importância da reciclagem dos resíduos de gesso. Santa Catarina. Disponível em: <http://www.engessul.com.br/downloads/o_gesso_e_o_meio_ambiente.pps>. Acesso em: Set. 2011.

ESTAÇÃO TURISMO. **Produção de gesso**. Trindade- PE, 2009. Disponível em: <<http://mais.uol.com.br/view/wgqk25yv4e94/producao-de-gesso-04023966DC992366?types=A>>. Acesso em: set. 2011.

GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL. Disponível em: <http://www.gypsumrecycling.biz/danigip/gypsum_recycling.php>. Acesso em: Nov. 2011.

GYPSUM MINERAL DATA. **Crystal structure**. Disponível em: <<http://webmineral.com/data/Gypsum.shtml>>. Acesso em: Fev 2012.

HARADA, E.; PIMENTEL, L. L. Estudo da viabilidade do reaproveitamento de gesso – queima lenta. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC, XIV.,2009, Campinas. **Anais...**Campinas:Pontifícia Universidade Católica, 2009.

HINCAPIÉ, A. M.; OLIVEIRA, C. T. A.; CINCOTTO, M.A.; SELMO, S. M. Revestimento de gesso I. **Téchne**, nº 21, mar/abr., p.44-47, 1996a.

HINCAPIÉ, A. M. **Efeito de substâncias retardadoras de pega nas propriedades do gesso de construção**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HINCAPIÉ, A. M.; CINCOTTO, M. A. Seleção de substâncias retardadoras do tempo de pega do gesso de construção. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, v.184, 25p, 1997a.

HINCAPIÉ, A. M.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Ambiente Construído**, São Paulo, v.1, nº2, p.07-16, jul/dez, 1997b.

ISERHARD, José Luís Rodrigues de Freitas. **Contribuição ao estudo da viabilidade da cura do concreto por energia solar**. 2000. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

JOHN, Vanderley Moacir. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000.113p. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar. **USP**, texto técnico, p. 1-9. Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm>. Acesso em: 24 nov 2010.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In:_____.**IBRACON, Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Nº1, G.C. Isaia, 2007. Cap.22.2, p.727-760.

KANNO, Wellington Massayuki. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. 2009. 130p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: origin and properties. **Materials and Structure**. Nº 28, p. 92-100, 1995.

LIMA, L. **Produção de gesso em Trindade – PE**. Disponível em:<<http://www.youtube.com/watch?v=TtvNRk1Ofyc>>. Acesso em: Nov. 2011.

MARTELLO, A. **PIB da construção civil deve avançar 11% em 2010, maior valor em 24 anos**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia-e-negocios/noticia/2010/12/pib-da-construcao-civil-deve-avancar-11-em-2010-maior-valor-em-24-anos.html>>. Acesso em: 05 abr 2011.

MARVIN, E. Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in the State of Vermont. **Vermont Agency of Natural Resources**, Waste Management Division, EUA, 2000.

MONÇÃO JÚNIOR, Ariosto Rodrigues. **Otimização das condições experimentais na desidratação da gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. 2008. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

MURAT, M.; PUSZTASZERI, L.; GREMION, M. Correlations "texture crystalline proprieties mécaniques" des plâtres durcis: étude préliminaire. **Matériaux et Constructions**, vol. 8, nº 47, p. 377-385, 1975.

MURAT, M.; PUSZTASZERI, L.; GREMION, M. A preliminary survey of the correlation between the crystalline structure and hardened gypsum plasters. **Materials and Building Research**, vol. 1, p. 264-271, 1979.

NASCIMENTO, F. J. de F.; PIMENTEL, L. L. Reaproveitamento de resíduo de gesso. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC, XV.,2010, Campinas. **Anais...**Campinas:Pontifícia Universidade Católica, 2010.

RIDGE, M. J. Effect of temperature on the rate of setting of gypsum plaster. **Nature**, v. 184, nº 47, p. 47-48, 1959.

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. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49º, 2005, São Pedro. **Anais...** São Pedro, SP, 2005.

SCHMITZ, I. B. T. A.; TAVARES, Y. V. P. Estudo do desempenho da pasta de gesso com adição de seu resíduo como revestimento interno de parede. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VII , 2009, Curitiba. **Anais...**Curitiba: VIII SBTA, PR, 2009.

SJÖSTRÖM, C. Service life of the building. In: **Applications of performance concept in building**. Proceedings...CIB: Tel Aviv, v.2, p.6-11, 1996.

SOUZA,L. Apostila de caracterização - MEV e DRX. Curso de Engenharia de minas. UEMG

Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABVuMAD/apostila-caracterizacao-mev-drx-an-1-quimica-gran>>. Acesso em: fev., 2012.

SOUZA, U. E. L. de; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. de; AGOPYAN, V. Os valores das perdas de materiais nos canteiros de obras do Brasil. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO, Tecnologia e gestão na produção de edifícios – Soluções para o terceiro milênio, 1998, São Paulo. **Anais...** PPC-USP, 1998 p. 355-362.

STAV, E.; BENTUR, A. Characterization of the hydration process of calcium sulphate hemihydrates by simultaneous evaluations of chemical and physical parameters. **Advances in Cement Research**, v. 7, nº 27, p. 113-116, 1995.

TAVARES, Y. V. P.; LORDSLEEM JR. A. C.; SCHMITZ, I. B. T. A.; JOHN, V. M. Reaproveitamento do resíduo de gesso de revestimento interno de vedação vertical. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.10, nº 1, p.103-119, jan/mar, 2010.

THOLE, V. Determination of the end of hydration of gypsum plaster at room temperature using temperature-time curve. **Zement-Kalk-Gips**, nº 2, p. 70-74, 1994.

VIEIRA, Alexandre Lopes. **Propriedades dos microconcretos fabricados com agregados contaminados por resíduos de gesso**. 2008. 148p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WIKIPEDIA. 3D model hydrogen bonds in water.svg. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:3D_model_hydrogen_bonds_in_water.svg>. Acesso em: Fev 2011.

YU, Q. L.; BROUWERS, H. J. H. Microstructure and mechanical properties of β -hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process. **Construction and building Materials**, nº 25, p. 3149-3157, 2011.