



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Análise das Propriedades de Pastas de Gesso de Construção Reciclado

Paulo Sérgio Bardella

**Campinas
2011**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Análise das Propriedades de Pastas de Gesso de Construção Reciclado

Paulo Sérgio Bardella

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gladis Camarini

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

**Campinas
2011**

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

B236a Bardella, Paulo Sérgio
Análise das propriedades de pastas de gesso de
construção reciclado / Paulo Sérgio Bardella. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

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

1. Gesso. 2. Reciclagem. 3. Propriedades físicas. 4.
Propriedades mecânicas. 5. Microestrutura. I. Camarini,
Gladis. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of the properties of recycled plaster from building
construction

Palavras-chave em Inglês: Plaster, Recycling, Physical properties, Mechanical
properties, Microstructure

Área de concentração: Edificações

Titulação: Doutor em Engenharia Civil

Banca examinadora: Janaíde Cavalcante Rocha, Silvia Maria de Souza Selmo,
Vitor Antonio Ducatti, Antonio Ludovico Beraldo

Data da defesa: 25-11-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

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

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DE PASTAS DE GESSO DE
CONSTRUÇÃO RECICLADO**

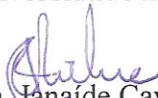
Paulo Sérgio Bardella

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Profa. Dra. Gládis Camarini

Presidente e Orientadora/Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP



Profa. Dra. Janaide Cavalcante Rocha

Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC



Profa. Dra. Silvia Maria de Souza Selmo

Escola Politécnica-USP



Prof. Dr. Vitor Antonio Ducatti

Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP



Prof. Dr. Antonio Ludovico Beraldo

Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP

Campinas, 25 de novembro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às pessoas que sempre contribuíram, acreditaram e me apoiaram durante toda a minha formação como Engenheiro Civil.

Lourdes Buranello Bardella (minha mãe), Décio Buranello (meu tio) e Antonio Carlos Bardella (meu irmão).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos, que estando presentes ou distantes contribuíram para a realização desta tese de doutorado, com os quais gostaria de compartilhar este trabalho.

Em especial à minha mãe, meu irmão e sua família, e meu tio Décio (meu segundo pai), que mesmo de longe se fizeram presentes no meu dia a dia, e foram os maiores motivos de minha dedicação.

A meu pai (in memoriam) que pela vontade de DEUS não teve a oportunidade de compartilhar comigo esta realização.

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

Aos técnicos e engenheiros do Laboratório de Aglomerantes e Resíduos (LARES) e Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas: Ademir de Almeida, José Reinaldo Marçal, Luciano Passos, Marcelo Ramos e Rodolfo Bonamigo, pela prontidão em ajudar e pela grata satisfação da companhia diária.

Aos amigos e colegas do programa de pós-graduação da FEC/UNICAMP, os quais me auxiliaram em momentos de grande volume de trabalho.

Ao LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, pelos ensaios de Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura.

Aos meus familiares e amigos, que torceram, acreditaram e me apoiaram incondicionalmente durante toda a pós-graduação.

Aos Professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, área de concentração Edificações, pela contribuição à minha formação.

E principalmente e acima de todos a DEUS, pelos dons e oportunidades recebidos e que através de seu Espírito, permitiu que eu levantasse a cada dia acreditando que eu podia e que eu era capaz, sempre me dando força e perseverança para a realização deste trabalho.

*“Se você espera pelas condições perfeitas, você
nunca irá realizar nada !”*

Eclesiastes 11 : 4 (BEP)

RESUMO

Bardella, Paulo Sérgio. **Análise das Propriedades de Pastas de Gesso de Construção Reciclado.** 214 p.

O gesso de construção é obtido pela calcinação da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e tem como seu principal constituinte o hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), que, em contato com a água, se hidrata formando novamente o di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Essa reação é responsável pelo endurecimento e pela resistência mecânica da pasta de gesso. De acordo com a Resolução do CONAMA nº 431 (2011), o gesso é classificado como resíduo Classe B destinados a outras aplicações diferentes da utilização como agregado reciclado (Resíduos Classe A). Para se conhecer as potencialidades da reciclagem do gesso, é de interesse científico e tecnológico o entendimento das propriedades dos gessos oriundos dessa calcinação. Portanto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar as potencialidades de reutilização dos resíduos de gesso que já foram empregados em obras de construção civil, como pastas em revestimentos de paredes. Neste sentido, esse material foi recuperado e reutilizado (gesso reciclado); foram estudadas as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e microestrutura; e foi avaliado o seu comportamento quando aplicado como revestimento em superfícies de blocos cerâmicos estruturais. O gesso reciclado foi obtido por meio de calcinação em três temperaturas com dois graus de moagem. Esse material foi analisado em pó (granulometria, módulo de finura, massa unitária, massa específica, difração de raios-X); em pastas no estado fresco (consistência, tempos de pega e calor de hidratação); e no estado endurecido (resistência à compressão, dureza, resistências à tração na flexão, microscopia eletrônica de varredura – MEV, e revestimento de blocos). Os resultados indicam que os gessos reciclados estudados neste trabalho são constituídos essencialmente de hemi-hidrato e anidrita solúvel (anidrita III). As temperaturas utilizadas para a calcinação e o grau de moagem não influenciaram nas propriedades das pastas no estado endurecido. Entretanto, o grau de moagem foi importante para as propriedades da pasta no estado fresco, pois ocorreram fissuras de retração nos revestimentos de gessos reciclados aplicados sobre a superfície dos blocos cerâmicos estruturais. Com base nesses resultados é possível vislumbrar a potencialidade de reciclagem dos resíduos de gesso da construção civil.

Palavras-chave: gesso, reciclagem, calor de hidratação, composição, microestrutura, propriedades.

ABSTRACT

Bardella, Paulo Sérgio. **Analysis of the Properties of Recycled Plaster from Building Construction.** 214 p.

Commercial plaster is obtained from gypsum partial dehydration ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Its main constituent is hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) which in contact with water hydrates becoming dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). This reaction is responsible for the hardening and mechanical properties of the paste. According to CONAMA Resolutions nº 431 (2011) this waste is classified as Class B, which is a waste classification for other applications, different from using as recycled aggregate (Class A waste). In order to know the possibility of plaster recycling, the aim of this study was to evaluate the performance of plaster wastes which were used in construction sites in renderings walls. In this way, this material was recovery and reused (recycled plaster). It was studied its physical, chemical and mechanical properties, and its microstructure, as well as evaluating its performance in rendering ceramic blocks. The plaster dehydration was made at three different temperatures. It was also used two different particle size distribution, the recycled plaster was analyzed in powder (particle size distribution, fineness modulus, specific gravity, X-ray diffraction (XRD) and chemical analysis); in fresh state (normal consistency, setting time and heat of hydration); and after hardening (compressive strength, hardness, flexural strength, scanning electron microscope observation – SEM, and as rendering in ceramic blocks). The results showed that the recycled plasters, independent of the grinding and the temperature of hidration, had shown similar mechanical properties. The particle size distribution showed to be important for pastes in fresch state because shrinkage cracks appeared in renderings made in structural ceramic blocks. From these results it was possible to verify the potential for reusing of gypsum waste from construction works.

Keywords: plaster of Paris, recycling, heat of hidration, composition, microstructure, properties.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição química dos gessos comerciais.....	34
Tabela 4.1	Propriedades físicas dos gessos comerciais e reciclados.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Classificação dos gessos com relação ao Módulo de Finura (MF) – NBR 13207 (ABNT, 1994).....	23
Quadro 2.2	Exigências físicas do gesso para construção civil – NB4 13207 (ABNT, 1994).....	24
Quadro 2.3	Exigências mecânicas do gesso para construção civil NBR 13207 (ABNT, 1994).....	24
Quadro 3.1	Misturas experimentais de gessos comerciais e gessos reciclados.....	37
Quadro 3.2	Misturas Experimentais de gesso misto.....	38
Quadro 3.3	Relações estequiométricas propostas para o cálculo da composição porcentual de gessos (JOHN; CINCOTTO, 2007).....	39
Quadro 3.4	Relações estequiométricas utilizadas para a determinação da composição porcentual provável dos gessos estudados neste trabalho experimental.....	40
Quadro 4.1	Características químicas dos gessos comerciais e gessos reciclados – NBR 12130 – MB 3471 (ABNT, 1991).....	51
Quadro 4.2	Hipótese simplificada que relaciona a H ₂ O combinada com os compostos constituintes presentes nos gessos (JOHN; CINCOTTO, 2007).....	51
Quadro 4.3	Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemihidrato e anidrita – Gesso reciclado 150 °C.....	52
Quadro 4.4	Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemihidrato e anidrita – Gesso reciclado 180 °C.....	53
Quadro 4.5	Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemihidrato e anidrita – Gesso reciclado 200 °C.....	54
Quadro 4.6	Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemihidrato e gipsita residual – GC1.....	55
Quadro 4.7	Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemihidrato e gipsita residual – GC2.....	56
Quadro 4.8	Composição porcentual provável dos gessos comerciais e reciclados estudados neste trabalho experimental.....	56
Quadro 4.9	Tempos de início e fim de pega dos gessos estudados.....	67
Quadro 4.10	Resumo das dimensões dos cristais de gipsita encontrados nas microscopias para cada um dos gessos estudados (comerciais e reciclados) – a/g 0,70.....	99
Quadro 4.11	Resumo das dimensões dos cristais de gipsita encontrados nas microscopias para cada um dos gessos estudados (comerciais e reciclados) – pasta de consistência normal.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Reações de desidratação térmica da gipsita.....	11
Figura 2.2	Varição da temperatura durante a hidratação inicial do gesso.....	15
Figura 2.3	Cristais de gesso hidratado aumentados 4000 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	20
Figura 2.4	Cristais de gesso hidratado aumentados 350 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	21
Figura 2.5	Difratograma de gesso comercial utilizado na construção civil.....	22
Figura 2.6	Aplicação manual de pastas de gesso como revestimento de parede.....	23
Figura 2.7	Fontes de resíduos de gesso.....	25
Figura 2.8	Resíduos de gesso gerado na aplicação de revestimento interno de paredes (a). Resíduos de gesso depositado em via pública (b).....	26
Figura 2.9	Cristais de di-hidrato de gesso comercial aumentados 1500 vezes em microscópio eletrônico de varredura.....	28
Figura 2.10	Cristais de di-hidrato de gesso reciclado desidratado a 200 °C aumentados 1500 vezes em microscópio eletrônico de varredura.....	29
Figura 2.11	Difratogramas de raios-X – A) Gesso comercial (anidro), B) Gesso reciclado a 100 °C, C) Gesso hidratado (placa de gesso moída).....	30
Figura 2.12	Difratogramas de raios-X – Gesso reciclado a 200 °C (resíduo de gesso utilizado como revestimento de paredes).....	30
Figura 2.13	Cristais de gesso beta reciclado desidratado sobre pressão de 0,60 atm em temperatura de 170 °C aumentados 3700 vezes em microscópio eletrônico de varredura.....	31
Figura 2.14	Cristais de gesso convencional desidratado sobre pressão de 0,60 atm em temperatura de 170 °C aumentados 3700 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	32
Figura 3.1	Fluxograma de atividades desenvolvidas no desenvolvimento da pesquisa experimental.....	33
Figura 3.2	Gesso residual gerado durante a aplicação da pasta de gesso como revestimento interno de paredes.....	35
Figura 3.3	Equipamento utilizado para a moagem do gesso residual – Picador/Triturador/Forrageiro: TRAPP/TRF 300.....	35
Figura 3.4	Recipiente plástico com revestimento de isopor para coleta de temperaturas de hidratação.....	42
Figura 3.5	Blocos cerâmicos de alvenaria antes e depois da aplicação das pastas de gesso (comercial e reciclado) como revestimento.....	43
Figura 3.6	Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova prismático 50x50x50 mm.....	44
Figura 3.7	Ensaio de dureza em corpo de prova cúbico 50x50x50 mm.....	44

Figura 3.8	Ensaio de resistência à tração na flexão em corpo de prova prismáticos de 40x40x160 mm.....	44
Figura 3.9	Corpos de prova para realização de ensaio de resistência de aderência	45
Figura 3.10	Ensaio de resistência de aderência.....	46
Figura 3.11	Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL - JSM 5900 LV (Low Vacuum) (LNLS – Campinas).....	48
Figura 3.12	Sputter Coater BAL-TEC SCD 050 (LNLS – Campinas).....	48
Figura 3.13	Corpos de prova de pastas de gesso fraturas no interior da câmara de vácuo do MEV - JSM 5900 LV (LNLS – Campinas).....	49
Figura 4.1	Difratograma - Gesso Hidratado – Gesso Moído – A - anidrita (CaSO_4) e D – di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).....	59
Figura 4.2	Difratograma - Gesso Comercial – GC1 (anidro).....	60
Figura 4.3	Difratograma - Gesso Comercial – GC2 (anidro).....	61
Figura 4.4	Difratograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 150 °C....	61
Figura 4.5	Difratograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 180 °C....	62
Figura 4.6	Difratograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 200 °C....	62
Figura 4.7	Curvas granulométricas – gesso comercial e gesso reciclado fino.....	65
Figura 4.8	Curvas granulométricas – gesso comercial e gesso reciclado grosso.....	66
Figura 4.9	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Comercial (GC1 e GC2) – Relação água/Gesso 0,70.....	70
Figura 4.10	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 150 °C – Relação Água/Gesso 0,70.....	72
Figura 4.11	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 180 °C – Relação Água/Gesso 0,70.....	73
Figura 4.12	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 200 °C – Relação Água/Gesso 0,70.....	74
Figura 4.13	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Comercial (GC1 e GC2) – Pasta de Consistência Normal.....	76
Figura 4.14	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 150 °C – Pasta de Consistência Normal.....	78
Figura 4.15	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 180 °C – Pasta de Consistência Normal.....	79
Figura 4.16	Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 200 °C – Pasta de Consistência Normal.....	79
Figura 4.17	Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.....	81
Figura 4.18	Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.....	81
Figura 4.19	Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.....	83
Figura 4.20	Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.....	83
Figura 4.21	Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.....	84
Figura 4.22	Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.....	85
Figura 4.23	Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.....	86
Figura 4.24	Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.....	87
Figura 4.25	Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e	

	gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.....	88
Figura 4.26	Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.....	90
Figura 4.27	Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.....	91
Figura 4.28	Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.....	91
Figura 4.29	Resistência à compressão – Misturas de GC1 (50%) com Gessos Reciclados finos (50%).....	93
Figura 4.30	Resistência à compressão – Misturas de GC2 (50%) com Gessos Reciclados finos (50%).....	94
Figura 4.31	Resistência à compressão – Misturas de GC1 (50%) com Gessos Reciclados grossos (50%).....	94
Figura 4.32	Resistência à compressão – Misturas de GC2 (50%) com Gessos Reciclados grossos (50%).....	95
Figura 4.33	Dureza Misturas de GC1 (50%) com Gessos Reciclados (Finos e Grossos) (50%).....	97
Figura 4.34	Dureza Misturas de GC2 (50%) com Gessos Reciclados (Finos e Grossos) (50%).....	98
Figura 4.35	Microscopia – 28 dias – Pastas de GC1 (a) e GC2 (b) – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes.....	100
Figura 4.36	Microscopia – 180 dias – Pastas de GC1 (a) e GC2 (b) – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes.....	101
Figura 4.37	Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino – 28 dias – Relação água/gesso 0,70 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes (a) e (c) e 1500 vezes (b).....	103
Figura 4.38	Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino – 180 dias – Relação água/gesso 0,70 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	104
Figura 4.39	Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso – 28 dias – Relação água/gesso 0,70 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	105
Figura 4.40	Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso – 180 dias – Relação água/gesso 0,70 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1500 vezes (a) e 1000 vezes (b) e (c).....	106
Figura 4.41	Microscopia – Pastas de gesso reciclado – 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c) - Relação água/gesso 0,70 - . Ampliação 1000 vezes.....	107
Figura 4.42	Microscopia – 28 dias – Pastas de relação água/gesso 0,53 – Ampliação 1000 vezes – GC1 (a) e GC2 (b).....	109
Figura 4.43	Microscopia – 180 dias – Pastas de relação água/gesso 0,53 – Ampliação 1000 vezes – GC1 (a) e GC2 (b).....	110
Figura 4.44	Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino – 28 dias – Relação água/gesso 0,80 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	112
Figura 4.45	Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino – 180 dias – Relação água/gesso 0,80 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	113
Figura 4.46	Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso – 28 dias – Relação água/gesso 0,75 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	114
Figura 4.47	Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso – 180 dias – Relação	

	água/gesso 0,75 - 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.....	116
Figura 4.48	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 3000 vezes (b).....	118
Figura 4.49	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 2000 vezes (a) e 4000 vezes (b).....	118
Figura 4.50	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a), 1000 vezes (b), 2000 vezes (c) e 5000 vezes (d).....	121
Figura 4.51	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 900 vezes (a) e 1000 vezes (b).....	122
Figura 4.52	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a), 1000 vezes (b) e 2000 vezes (c).....	123
Figura 4.53	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a), 2000 vezes (b) e 5000 vezes (c).....	124
Figura 4.54	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).....	125
Figura 4.55	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 3000 vezes (b).....	126
Figura 4.56	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 2000 vezes (a) e 4000 vezes (b).....	127
Figura 4.57	Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).....	128
Figura 4.58	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).....	129
Figura 4.59	Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).....	130
Figura 4.60	Blocos cerâmicos de alvenaria depois da aplicação das pastas de gesso comercial como revestimento (Bloco esquerdo – GC1, Bloco direito GC2).....	133
Figura 4.61	Blocos cerâmicos de alvenaria estrutural depois da aplicação de pasta de gesso reciclado grosso (direita) e fino (esquerda) calcinado a 180 °C como revestimento.....	134
Figura 4.62	Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 150 °C.....	135
Figura 4.63	Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 150 °C.....	136
Figura 4.64	Blocos cerâmicos de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 180 °C.....	137
Figura 4.65	Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso	

	reciclado fino calcinado a 180 °C.....	137
Figura 4.66	Detalhe - Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 150 °C.....	138
Figura 4.67	Bloco cerâmico de alvenaria depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 200 °C.....	138
Figura 4.68	Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 200 °C.....	139
Figura 4.69	Bloco cerâmico de alvenaria depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 200 °C.....	139
Figura 4.70	Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 200 °C.....	140
Figura 4.71	Resistência de aderência (150 dias) de pastas de gesso (comercial e reciclado) Relação água/gesso 0,70.....	141
Figura 4.72	Substrato cerâmico (bloco cerâmico) com revestimento de gesso (gesso comercial – GC1 (a), GC2 (b) e (gesso reciclado 150 °C – (c)) após realização de ensaio de aderência.....	142

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ANOVA	Análise de Variância
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
água/gesso	Relação água/gesso em massa
a/g	Relação água/gesso em massa
RCC	Resíduos de Construção Civil
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfato de Cálcio Di-hidratado (gipsita)
CaSO ₄ .1/2H ₂ O	Sulfato de Cálcio Hemi-hidratado
β CaSO ₄ .1/2H ₂ O	Hemi-hidrato β
CaSO ₄ .εH ₂ O	Sulfato Anidro Solúvel – Anidrita III
CaSO ₄	Sulfato Anidro Insolúvel – Anidrita II
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
DRX	Difração de Raios-X
CO ₂	Dióxido de carbono (Gás Carbônico)
CaO	Óxido de cálcio
SO ₃	Anidrido sulfúrico
H ₂ O	Água

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Delimitação do Tema.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
2	Gesso de Construção	6
2.1	Gipsita – A Matéria Prima para a Produção do Gesso.....	7
2.1.1	Gipsita – Aspectos Históricos.....	7
2.1.2	Gipsita – Aspectos Gerais.....	7
2.2	Produção do Gesso.....	11
2.3	Hidratação do Gesso.....	12
2.4	Fatores que Influenciam a Cinética de Hidratação e a Pega das Pastas de Gesso	15
2.5	Propriedades Mecânicas da Pasta de Gesso.....	17
2.6	Microestrutura e Composição Mineral do Gesso.....	19
2.6.1	Microestrutura do Gesso por Microscopia Eletrônica de Varredura.....	19
2.6.2	Difração de Raios-X.....	21
2.7	Desempenho das Pastas de Gesso em Revestimentos.....	22
2.8	Resíduos de Gesso da Construção Civil.....	24
2.9	Gesso Reciclado.....	25
3	Programa Experimental	33
3.1	Materiais.....	34
3.2	Desidratação.....	36
3.3	Misturas Experimentais.....	36
3.4	Composição Química Provável e Análise Mineralógica.....	38
3.5	Propriedades Físicas e Mecânicas.....	40
3.5.1	Curvas de Evolução de Temperatura.....	41
3.5.2	Avaliação da Superfície do Revestimento de Gesso em Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural.....	42
3.5.3	Propriedades Mecânicas.....	43
3.6	Microestrutura.....	47

4	Apresentação e Análise dos Resultados	50
4.1	Composição Química e Mineralógica.....	50
4.1.1	Propriedades Químicas (Análise Quantitativa).....	50
4.1.2	Propriedades Mineralógicas – Difração de Raios-X.....	59
4.2	Propriedades Físicas do Pó.....	63
4.3	Propriedades Físicas da Pasta no Estado Fresco.....	67
4.3.1	Curvas de Evolução de Temperatura.....	69
4.4	Propriedades Físicas da Pasta no Estado Endurecido.....	79
4.4.1	Propriedades Mecânicas.....	80
4.5	Análise de Imagens – Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....	98
4.5.1	Pastas Produzidas com a Mesma Relação Água/Gesso (a/g 0,70).....	99
4.5.2	Pastas Produzidas com a Mesma Consistência – Consistência Normal.....	108
4.5.3	Pastas produzidas com 50% de GC e 50% de Gesso Reciclado.....	117
4.6	Avaliação da Superfície dos Revestimentos de Gesso em Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural.....	132
4.6.1	Pastas Produzidas com Gessos comerciais (GC1 e GC2).....	132
4.6.2	Pastas Produzidas com Gessos Reciclados Grossos e Finos.....	133
4.7	Resistência de Aderência.....	140
5	Conclusões	144
5.1	Sugestões para Prosseguimento dos Estudos.....	147
	Referências	149
	ANEXOS	158
	Anexo 1.....	159
	APÊNDICE A	163
	Apêndice A1 – Resistência à Compressão.....	164
	Apêndice A2 – Resistência à Tração na Flexão.....	170
	Apêndice A3 – Dureza.....	176
	Apêndice A4 – Resistência de Aderência.....	182
	APÊNDICE B	184
	Apêndice B1 – Resistência à Compressão.....	185
	Apêndice B2 – Resistência à Tração na Flexão.....	191
	Apêndice B3 – Dureza.....	197
	APÊNDICE C	203
	Apêndice C1 – Resistência à Compressão.....	204
	Apêndice C2 – Dureza.....	208
	APÊNDICE D	212
	APÊNDICE E	213

INTRODUÇÃO

A conscientização a respeito dos problemas ambientais enfrentados, no mundo moderno, conduz à procura por produtos e serviços desenvolvidos por meio de processos construtivos e industriais voltados para um consumo limpo dos recursos naturais. É preciso se adequar a um modelo de desenvolvimento econômico capaz de satisfazer as necessidades atuais, sem comprometer as necessidades futuras.

A questão ambiental está, cada vez mais, sendo debatida nas esferas internacional, nacional e local. O crescimento da população e os progressos da indústria e da urbanização contribuem para o aumento da geração de resíduos. Assim, o desenvolvimento, no setor da construção civil, ocasiona aumento do consumo de energia e de matéria prima e leva à geração de resíduos, provocando impacto ao meio ambiente.

As perdas, em processos construtivos, vêm sendo tratadas de forma cada vez mais abrangente. A elevada geração de resíduos sólidos, determinada pelo acelerado desenvolvimento da economia mundial, no último século, coloca como inevitável a valorização dos resíduos e de sua reciclagem.

O desperdício de materiais, nas construções, não se baseia somente na geração de resíduos sólidos, mas, também, na não reutilização desses resíduos no processo de construção, desperdiçando, assim, as potencialidades desses materiais. Portanto, todo e qualquer resíduo oriundo das atividades de construção pode ser considerado como resíduo da construção civil (RCC), também conhecido como resíduo de construção e demolição ou entulho da construção civil (ZORDAN, 1997; PINTO, 1999; JOHN, 2000; ANGULO, 2005).

Os resíduos da construção civil (RCC) são, hoje, um grave problema nas principais cidades brasileiras. Estima-se que a produção média de entulho, no Brasil, varia de 450 a 550 kg para cada habitante por ano, o que chega a corresponder a, aproximadamente, 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999; SINDUSCON-SP, 2005;

SINDUSCON-MG, 2005, BUTLER, 2007; HABITARE, 2008). Dessa forma, com o aumento constante da população, a cada ano que passa a quantidade de Resíduos da Construção Civil (RCC) aumenta progressivamente.

Assim, a redução dos resíduos pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, com base no uso de materiais recicláveis ou reutilizáveis, e de resíduos como materiais secundários, e na coleta e deposição inertes, é uma medida que deve ser tomada para se transformar resíduos em recursos reutilizáveis (VÁZQUES, 2001).

A Resolução nº 307, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2002), estabelece que os geradores de resíduos, na construção civil, devem ser responsáveis por esses. Dessa forma, a reciclagem insere-se como uma atitude necessária, pois, além de se conscientizarem sobre os aspectos relativos à questão ambiental, os geradores de resíduos estão sujeitos a sanções judiciais, no caso do não cumprimento da lei.

A Resolução nº 431 (2011) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), complementa a nº 307 e estabelece a classificação dos resíduos de gesso como classe B, recicláveis.

O gesso de construção é obtido pela calcinação de um minério natural, o gipso, que é composto essencialmente da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O gesso tem como seu principal constituinte o hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) que, em contato com a água, se hidrata, formando novamente a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Essa reação é responsável pelo endurecimento e pela resistência mecânica da pasta.

O gesso é um material usado na construção civil em todo o mundo e a sua utilização está crescendo devido às suas diferentes aplicações, tais como, revestimentos de paredes e tetos, peças para decoração, placas para forro e placas acartonadas para paredes (*drywall*). As vantagens da utilização do gesso, na construção civil, são o seu bom desempenho, a fácil aplicação e o acabamento liso. Sua principal desvantagem é a sua incapacidade de se manter intacto quando aplicado em locais sujeitos à umidade, necessitando, assim, atenção especial quanto aos ambientes em que será utilizado.

O gesso utilizado na construção civil, como revestimento de paredes, apresenta uma grande perda de material. De acordo com Dias (1994), os valores médios de desperdício desse material, durante a sua aplicação, são maiores do que 45% da quantidade de gesso utilizada. Camarini, Pimentel e Sá (2011), em um estudo para quantificar a quantidade de resíduo gerado durante o processo de aplicação do gesso como revestimento interno de paredes, apontaram uma média de 18% a 35% de resíduo de gesso gerado durante esse processo.

Portanto, devido a esse elevado desperdício e à crescente conscientização sobre a reciclagem de materiais, a manutenção de recursos naturais e a preservação do meio ambiente, os resíduos de gesso da construção apresentam-se como um importante material que pode ser reciclado na cadeia produtiva da construção civil.

Assim, avaliar a viabilidade técnica da utilização do gesso reciclado, como revestimento de paredes ou componentes em obras de construção civil, torna-se um desafio que deve ser enfrentado.

1.1 – Objetivos

Estudar as propriedades do gesso reciclado obtido a partir dos resíduos de gesso provenientes do revestimento de paredes e tetos.

Neste estudo são avaliados a influência da finura e da temperatura de calcinação nas propriedades do material em pó, em pasta no estado fresco e em pasta no estado endurecido.

1.2 – Justificativa

O Brasil é um dos maiores produtores de Gipsita do mundo e o maior produtor da América do Sul. Assim, o gesso é um material abundante e com o crescimento do setor da construção civil e a necessidade de materiais de construção que substituam os materiais tradicionais utilizados nos canteiros de obras brasileiros, tem aumentado a sua demanda de utilização (LYRA SOBRINHO; AMORIN NETO; DANTAS, 2010).

Entretanto, esse crescimento na utilização do gesso de construção tem gerado problemas ambientais, pois na aplicação de pastas de gesso como revestimento interno de paredes, o índice de perda de material chega a ser superior aos 30% (CAMARINI; PIMENTEL; SÁ, 2011). Conseqüentemente, a quantidade de resíduos gerados só tende a aumentar e sem perspectivas de solução, pois o gesso é um material poluente e não é aceito para ser depositado na maioria dos locais de despejo dos resíduos da construção civil (RCC).

Portanto, estudar o reaproveitamento desse resíduo de gesso é algo necessário visando o bem estar ambiental para os próximos anos.

Assim, devido à elevada perda de gesso durante a sua aplicação, à busca por inovações tecnológicas, ao aumento de produtividade na construção civil e à crescente conscientização sobre a importância da reciclagem de materiais para a manutenção dos

recursos naturais, justifica-se a avaliação das propriedades desse material como produto reciclado e hoje ainda desperdiçado.

1.3 – Delimitação do Tema

Essa pesquisa experimental, em nenhum momento, teve como objetivo fazer um estudo completo a respeito do gesso reciclado. O estudo realizado teve como princípio adotar equipamentos não sofisticados, de fácil obtenção e de baixo custo, para a obtenção de um processo simplificado de reciclagem do gesso.

Para isso, foi adotado, no processo de moagem dos resíduos de gesso hidratado, um equipamento que permitiu que a finura alcançada pelo resíduo de gesso fosse a menor possível para permitir sua reciclagem e que o gesso reciclado tivesse propriedades semelhantes ao gesso comercial. No processo de calcinação do gesso, adotou-se uma estufa de laboratório com o objetivo de simular um forno estacionário convencional. Dessa forma, estabelecidas essas delimitações relacionadas ao tema em estudo, os principais parâmetros adotados para o desenvolvimento desta pesquisa foram:

- O resíduo de gesso foi coletado, em obra, durante a aplicação do gesso como revestimento interno de paredes e tetos.
- Foram realizadas avaliações das propriedades dos gessos reciclados, visando à reciclagem desse resíduo como gesso de revestimento interno de paredes.
- Intencionalmente, não se quis reproduzir as condições de finura do gesso comercial. Nesse caso visou-se a uma economia no processo de produção dos gessos reciclados.
- Realizou-se somente um ciclo de calcinação no processo de recuperação do gesso hidratado.
- Com o objetivo de se obter uma maior homogeneidade do resíduo de gesso coletado, todo o resíduo utilizado no estudo foi coletado em uma única obra.

1.4 – Estrutura do Trabalho

Este trabalho inicia-se com esta Introdução, onde foram apresentadas as considerações iniciais, os objetivos, a delimitação e a justificativa para a realização do

trabalho. No **Capítulo 2**, é feita uma revisão sobre o gesso de construção; a matéria prima básica para a sua produção; aspectos históricos do seu uso, de um modo geral; o processo de produção, suas propriedades e seu mecanismo de hidratação. Também são apresentadas técnicas de análise microscópica, mineralógica e química do gesso, bem como, informações a respeito de estudos com gesso reciclado.

No **Capítulo 3**, apresenta-se a metodologia empregada para a avaliação das propriedades macroscópicas e microscópicas dos gessos empregados (comercial e reciclado) e a descrição dos métodos, procedimentos e equipamentos que foram utilizados durante a realização desta pesquisa.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados dos ensaios realizados neste trabalho experimental, o que compreende: uma análise das propriedades mecânicas do gesso (propriedades macroscópicas); das características da composição química e mineralógica dos gessos comerciais e reciclados; da liberação do calor durante o processo de hidratação (calorimetria); e da microestrutura dos gessos utilizados nesta pesquisa.

No **Capítulo 5**, são apresentadas as conclusões a respeito do estudo realizado nesta pesquisa e também algumas sugestões para o prosseguimento dos estudos com reciclagem de gesso de construção.

2

GESSO DE CONSTRUÇÃO

O gesso de construção é um aglomerante mineral obtido pela calcinação do gipso, um minério constituído essencialmente de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O gesso de construção tem como seu principal constituinte o hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), o qual em contato com a água, se hidrata formando, novamente, o di-hidrato ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). As propriedades físicas, químicas e mecânicas dos produtos de gesso dependem da homogeneidade da gipsita calcinada e de sua qualidade estrutural (DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007; JOHN; CINCOOTTO, 2007; GARTNER, 2009).

O gesso é um material de construção cujo uso está crescendo tanto no Brasil quanto no mundo todo. As vantagens da aplicação do gesso na construção civil são o seu bom desempenho, a fácil aplicação e o seu acabamento liso. Sua principal desvantagem é a sua incapacidade de se manter intacto após o seu endurecimento, quando em contato com a água, o que exige atenção especial quanto aos ambientes em que será aplicado.

Devido à grande utilização de gesso nas obras de construção civil, a quantidade de resíduo de gesso gerado também é grande e demonstra uma tendência de crescimento para os próximos anos. Somente na cidade de São Paulo, a quantidade de resíduos de gesso gerados é da ordem de 120.000 toneladas por ano (AGOPYAN et al., 2005).

Para a obtenção de um processo de reciclagem do resíduo de gesso, além do entendimento do mecanismo de calcinação do di-hidrato, que o transforma, novamente, em hemi-hidrato, também é de fundamental importância o conhecimento das consequências do mecanismo de hidratação dos gessos oriundos dessa calcinação.

Nesse capítulo, são apresentados: a matéria prima da produção do gesso, os mecanismos de hidratação do gesso de construção e alguns aspectos referentes à reciclagem do gesso de construção.

2.1 Gipsita - Matéria Prima para a Produção do Gesso

O mineral que se constitui na matéria prima para a obtenção do gesso é a gipsita encontrada no minério denominado gipso. A gipsita é um cristal de sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) cuja composição estequiométrica média é de 32,5% de CaO, 46,6% de SO_3 e 20,9% de H_2O . A gipsita é usada, principalmente, na fabricação do cimento e do gesso de Paris. Este mineral também é conhecido popularmente como gipso ou gesso, sendo este último termo, no entanto, mais usado como sinônimo de gipsita calcinada, enquanto o primeiro termo se refere de fato ao minério (PEREIRA, 1973; ZHANG; KASAI; SAITO, 1995; SINDUSGESSO, 2004).

2.1.1 Gipsita – Aspectos Históricos

O mais antigo emprego da gipsita de que se tem conhecimento foi em obras artísticas. O alabastro era utilizado, pelas civilizações antigas, em esculturas e ornamentações. Os egípcios também usaram a gipsita como argamassa, na construção de pirâmides, há cerca de 3.000 a.C., e os romanos a utilizaram, em pequenas quantidades, no acabamento de construções (PEREIRA, 1973; MINDESS; YOUNG, 1981; NEVILLE, 1982; SCHIESSI, 1996).

Durante a Idade Média, não foram descobertos novos usos para a gipsita e, somente no fim do século XVIII, teve início, na Europa, o seu emprego como corretivo de solos. Nos Estados Unidos, a calcinação da gipsita para emprego na construção civil começou em 1835, mas essa aplicação só se desenvolveu por volta de 1885, com a descoberta de um método comercial para retardar o tempo de pega do gesso (PEREIRA, 1973).

O desenvolvimento da indústria de cimento, cuja fabricação requer a adição de gipsita ao clínquer, na proporção de 2% a 5%, para retardar o tempo de pega, possibilitou um grande aumento no consumo deste mineral. A indústria da construção civil é a maior consumidora de produtos onde a gipsita é utilizada (PEREIRA, 1973; BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

2.1.2 Gipsita – Aspectos Gerais

A gipsita pode ser tanto natural como artificial. No minério natural, a gipsita geralmente, é encontrada sob a forma compacta, de granulação fina e média, sendo esta a variedade de maior importância econômica.

O sulfato de cálcio existe, na natureza, principalmente, sob as formas de anidrita (CaSO_4) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Essas espécies minerais são encontradas em depósitos evaporíticos originados de antigos oceanos. A formação geológica desses depósitos é explicada pela ocorrência de precipitação, seguida de evaporação e, conseqüentemente, concentração dos sais de sulfato de cálcio (PEREIRA, 1973; JORGENSEN, 1994). A anidrita *in natura* tem pouco interesse econômico; entretanto, a gipsita apresenta uma grande diversidade de opções de aproveitamento industrial, podendo ser utilizada na forma natural ou calcinada (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

A forma natural da gipsita é amplamente utilizada na fabricação de cimento Portland e na agricultura. Na produção do cimento Portland, a gipsita é adicionada ao clínquer, durante a moagem (na proporção de 2% a 5%), para retardar o tempo de pega do cimento. Na agricultura, a gipsita pode atuar como agente corretivo de solos ácidos, como fonte de cálcio, como fertilizante em culturas específicas (amendoim, batatas, legumes e algodão) e como condicionador de solos, aumentando a permeabilidade, a aeração, a drenagem, a penetração e a retenção da água (PEREIRA, 1973; BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

A gipsita também tem aplicação para a fabricação de ácido sulfúrico, cerveja, moldes para fundição, giz, vidros, esmaltes, e na metalurgia (PEREIRA, 1973; JOHN; CINCOTTO, 2007).

Até o ano de 2007, os Estados Unidos da América (EUA) eram os maiores produtores e consumidores mundiais de gipsita. Nesse ano, a sua produção foi da ordem de 22 milhões de toneladas, enquanto a produção, nos países que mais se aproximaram desses valores, Irã e Espanha, foi de, respectivamente, 13,2 e 13 milhões de toneladas (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008). Entretanto, a partir do ano de 2008, a China passou a ser o país com maior produção de gipsita no mundo, alcançando, em 2009, uma produção de 42 milhões de toneladas, o que representa 27,63% de toda a produção de 2009 (LYRA SOBRINHO; AMORIN NETO; DANTAS, 2010).

Os Estados Unidos, país que ocupava a segunda posição entre os maiores produtores mundiais de gipsita, no ano de 2008, devido à crise econômica originada em seu sistema financeiro habitacional, teve uma drástica redução na produção de gipsita, chegando a 9,4 milhões de toneladas em 2009, volume inferior ao do Irã e da Espanha, países que produziram 12 milhões de toneladas e 11,5 milhões de toneladas, respectivamente (LYRA SOBRINHO; AMORIN NETO; DANTAS, 2010).

No Brasil, até o ano de 2001, as reservas de gipsita natural eram estimadas em cerca de 1.248 bilhões de toneladas (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2001). Entretanto, 93% dessas reservas encontravam-se nos estados da Bahia (44%), Pará (31%) e Pernambuco (18%); o restante distribuía-se, em ordem decrescente, entre o Maranhão, Ceará, Piauí, Tocantins e Amazonas (ANTUNES, 1999; LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008; MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

No ano de 2007, as reservas brasileiras de gipsita eram estimadas na ordem de 1.300 bilhões de toneladas; 98% dessas reservas distribuía-se entre os estados da Bahia (42,7%), Pará (30,3%) e Pernambuco (25,1%) (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008). No Sumário Mineral Brasileiro de 2009, as reservas brasileiras de gipsita foram estimadas em 1.302 bilhões de toneladas. Cerca de 98% das reservas brasileiras de gipsita encontram-se na Bahia (43%), Pará (30%) e Pernambuco (25%); o restante distribuía-se, em ordem decrescente, entre o Maranhão, Ceará, Piauí, Amazonas, Rio Grande do Norte e Tocantins (LYRA SOBRINHO; DANTAS, 2010).

As reservas de gipsita localizadas no estado do Pará (30%), controladas pelo Serviço Geológico do Brasil, e ainda sem concessão de lavra, têm, como empecilhos ao seu aproveitamento econômico: restrições ambientais (está situada no interior de uma floresta nacional), a grande distância dos centros consumidores, dificuldade de transferência do seu controle e também deficiências de infra-estrutura (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008).

Dessa forma, as jazidas brasileiras de gipsita localizam-se em oito estados das regiões norte e nordeste, porém, a porção da reserva brasileira de gesso, que apresenta melhor condição de aproveitamento econômico, está situada na Bacia Sedimentar do Araripe, região de fronteira dos Estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, com destaque para as jazidas deste último (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008; MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

A região do Araripe, sertão do estado de Pernambuco, possui abundantes reservas de gipsita que são consideradas como as de melhor qualidade no mundo, devido ao elevado teor de pureza do minério, que varia de 88% a 98% de pureza. O chamado Pólo Gesseiro de Pernambuco é responsável por, aproximadamente, 95% da produção brasileira de gesso (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005, CANUT, 2006; AGUIAR, 2007; MONÇÃO JÚNIOR, 2008) e suas reservas de gipsita são suficientes para 500 anos de exploração (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Os principais fatores que contribuem para o interesse do aproveitamento da gipsita da região do Araripe são: as condições favoráveis de mineração, a elevada pureza do minério de gipsita e a melhor localização, quando comparada às jazidas localizadas no estado do Pará (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Até o ano de 2005, a produção brasileira de gipsita atingia, em média, cerca de 1,63 milhões de toneladas por ano, estando o país ranqueado como o quinto produtor mundial (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005). No ano de 2006, sob a influência de uma maior demanda por parte da construção civil (gesso e derivados) e da agricultura (gesso agrícola), a produção de gipsita apresentou um crescimento da ordem de 5% em relação ao ano anterior e, conseqüentemente, foi aumentada a produção nacional de gesso nesse mesmo período. No ano de 2007, a produção nacional de gesso atingiu o valor médio de 1,92 milhões de toneladas (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008). Entretanto, devido a uma maior produção mundial de gesso, principalmente na Tailândia, China, México, Japão e Austrália, a quinta posição como produtor mundial de gesso já não era mais ao Brasil (LYRA SOBRINHO; AMARAL; DANTAS, 2008).

No ano de 2009, o Brasil ocupava a décima posição como produtor mundial de gipsita, estando atrás de China, Irã, Espanha, Estados Unidos, Tailândia, Japão, Canadá, Itália e França. Mesmo assim, o Brasil é o maior produtor da América do Sul, com uma produção de, aproximadamente, 2,35 milhões de toneladas por ano, valor que representa 1,55% do total mundial. As reservas lavráveis do Brasil, ao final de 2009, totalizavam 228.410.716 de toneladas, das quais, 93% estavam concentradas no Estado de Pernambuco (LYRA SOBRINHO; AMORIN NETO; DANTAS, 2010).

Deve-se destacar que, a partir do Sumário Mineral de 2010, o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral) passou a aplicar o conceito de “reserva lavrável” para quantificar as reservas brasileiras de gipsita, ou seja, passou a computar somente as reservas cuja lavra é técnica e economicamente viável no momento atual (LYRA SOBRINHO; AMORIN NETO; DANTAS, 2010).

O Pólo Gesseiro do Araripe reúne 312 empresas (21 mineradoras, 61 calcinadoras e 230 fábricas de pré-moldados) que transformam 1,8 milhões de toneladas de gipsita por ano (MONÇÃO JÚNIOR, 2008). Entretanto, o transporte é, ainda, uma barreira para a indústria do gesso no Brasil, pois, atualmente, o fluxo do transporte do gesso, nas regiões norte e nordeste, é realizado, predominantemente, por meio de rodovias (CANUT, 2006). Assim, a distância entre as reservas e os centros consumidores é grande e os gastos com transporte são similares ao preço da obtenção do material (ANTUNES, 1999; JOHN; CINCOTTO,

2007). Além disso, a precária condição da malha rodoviária brasileira torna o transporte do gesso cada vez mais oneroso (CANUT, 2006).

2.2 Produção do Gesso

O processo de produção do gesso de construção, normalmente, envolve as seguintes atividades: extração do minério (gipso), realizada, em geral, a céu aberto; britagem; moagem grossa e estocagem com homogeneização; secagem (pois a umidade da matéria prima pode chegar a 10%); calcinação; moagem fina; e embalagem (DE MILITO, 2007; JOHN; CINCOTTO, 2007; AGUIAR, 2007).

A obtenção do gesso ocorre a partir da desidratação da gipsita em temperaturas apropriadas. Durante essa desidratação, há a formação de diferentes compostos, cujas características dependem do tipo de forno, da temperatura e da pressão do vapor no interior do forno, da velocidade de aquecimento da matéria prima, da finura e da densidade da gipsita.

A produção do gesso requer baixo consumo de energia, com temperaturas inferiores a 300 °C. O processo industrial de fabricação do gesso compreende: desidratação térmica da gipsita (reações 1, 2 e 3); moagem do produto; e seleção em frações granulométricas, em conformidade com a sua utilização: construção (pré-fabricação, revestimento) ou moldagem (arte, indústria) (Figura 2.1) (DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007; JOHN; CINCOTTO, 2007; GARTNER, 2009).

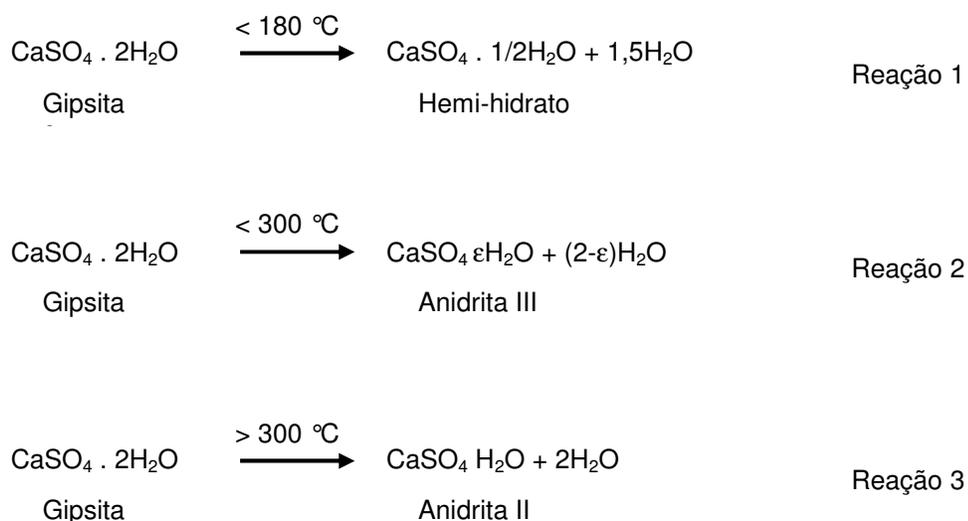


Figura 2.1 – Reações de desidratação térmica da gipsita (DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007; JOHN; CINCOTTO, 2007; GARTNER, 2009).

A desidratação da gipsita produz o hemi-hidrato β ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), em temperaturas entre 100 °C e 180 °C (Reação 1); o sulfato anidro solúvel ou anidrita III ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$), em temperaturas abaixo de 300 °C (Reação 2); e sulfato anidro insolúvel ou anidrita II (CaSO_4), em temperaturas acima de 300 °C (Reação 3). O material obtido não é totalmente homogêneo devido à variação de temperatura no interior do forno. Portanto, o gesso comercial, usado em construções, contém os três compostos: hemi-hidrato β e as anidritas III e II (em menores proporções) (DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007; JOHN; CINCOTTO, 2007; GARTNER, 2009).

O tipo de forno utilizado influencia o processo de calcinação e o produto final obtido. O forno ideal para a calcinação da gipsita seria aquele onde as condições de temperatura fossem idênticas em todos os seus pontos, o que levaria a um rendimento de 100 %, ou seja, todo o sulfato di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), presente na gipsita, passaria a hemi-hidratado. Entretanto, verifica-se que isso dificilmente acontece, pois resta sempre uma porcentagem de material não calcinado (di-hidratado) nos pontos onde a temperatura não atingiu o valor necessário para a dissociação em hemi-hidratado. Nos pontos onde a temperatura for excessiva, parte do material poderá se transformar em sulfato de cálcio (anidrita) (DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007).

Dessa forma, a calcinação da gipsita deve ser realizada em fornos apropriados para se obter maior porcentagem de hemi-hidrato no gesso produzido, o que o torna de melhor qualidade, pois quanto maior for a quantidade de hemi-hidrato no gesso, maior será o seu poder aglomerante para a utilização na construção civil (DE MILITO, 2007).

Comercialmente, o gesso pode ser encontrado a granel ou, com maior frequência, em sacos de 40 kg; é um pó branco, de elevada finura, cuja massa unitária varia de 700 kg/m³ a 1000 kg/m³, conforme o grau da finura. Sua massa específica é aproximadamente 2700 kg/m³ (DE MILITO, 2007).

2.3 Hidratação do Gesso

O gesso é um aglomerante que, quando misturado à água, forma uma pasta homogênea, consistente e trabalhável, que, após poucos minutos, apresenta uma perda de consistência e um ganho de viscosidade. Com o endurecimento, porém, a pasta passa a ter mais resistência. Esse ganho de viscosidade (pega inicial da pasta) e o endurecimento (incremento da resistência do material) são fenômenos que podem ser explicados pelo mecanismo de hidratação do gesso. A hidratação é um fenômeno químico no qual o material

anidro em pó é transformado em hidrato, devido a uma reação química do pó com a água (HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; ANTUNES, 1999; GARTNER, 2009).

No processo de hidratação, o hemi-hidrato e a anidrita retomam a quantidade de água perdida durante a calcinação, regenerando o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). No entanto, a velocidade das reações é diferente, sendo mais rápida para a anidrita III e mais lenta para o hemi-hidrato. O início de pega depende do constituinte de pega mais rápida, e o endurecimento, do mais lento (LE COVEC, 1978 *apud* JOHN; CINCOTTO, 2007).

Assim, o hemi-hidrato β ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e a anidrita III ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$) (sulfato anidro solúvel), resultantes da calcinação da gipsita, em presença de água à temperatura ambiente, reconstituem, rapidamente, o sulfato di-hidratado original. Essa combinação se faz com a produção de uma fina malha cristalizada, interpenetrada, responsável pela coesão do conjunto (HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; DE MILITO, 2001; BRANDT; BOSBACH, 2001). Tal fenômeno, conhecido pelo nome de pega do gesso, é acompanhado por elevação da temperatura, por ser a hidratação uma reação exotérmica, que libera energia em forma de calor (HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; SINGH; MIDDENDORF, 2007; GARTNER, 2009).

A quantidade de anidrita no gesso deve ser controlada, pois uma grande porcentagem de anidrita III irá causar maior liberação de calor de hidratação. Esse excesso de calor poderá causar problemas no gesso acabado, tais como microfissuras e alteração no tempo de pega, pois acelera as reações de hidratação do gesso (MAKSOUUD; ASHOUR, 1981; HINCAPIE et al., 1996a). Para se evitar um excesso de anidrita no gesso, a temperatura de calcinação deve ser controlada, ou seja, sempre inferior a 180 °C.

Na literatura, há dois modelos para explicar o mecanismo das reações de hidratação do gesso: o modelo coloidal e o modelo de Le Chatelier. No modelo coloidal, assume-se que, ao redor dos cristais de hemi-hidrato, forma-se um gel de sulfato de cálcio hidratado. A cinética da transformação desse gel controlaria a cristalização da gipsita (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988). O modelo proposto por Le Chatelier é o de dissolução-precipitação, que ocorre em três etapas: fenômeno químico da dissolução, fenômeno físico de cristalização e fenômeno mecânico de endurecimento (teoria da cristalização) (HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; JOHN; CINCOTTO, 2007). Assim, nesse modelo, a hidratação é considerada da seguinte maneira: os cristais de hemi-hidrato se dissolvem, são rodeados por uma camada de solução supersaturada de gipsita que forma pontos de nucleação e se precipitam (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; CINCOTTO et al. 1990 *apud* DE MILITO, 2007).

Assim, em se tratando de um aglomerante de origem mineral, a partir do momento em que a água entra em contato com o pó de gesso, as reações de hidratação da pasta ocorrem por dissolução e precipitação, formando uma solução de íons hidratados que, em pouco tempo, atinge um estado de supersaturação, onde o sulfato de cálcio di-hidratado é precipitado (PAPADAKIS; VENUAT, 1970 *apud* DIAS, 1994; JEULIN; MONNAIE; PÈRONNET, 2001; HILL; PLANK, 2004; REYNAUD *et al.*, 2006; SINGH; MIDDENDORF, 2007; GARTNER, 2009).

A maioria dos estudos realizados a respeito do processo de hidratação do gesso considera o modelo proposto por Le Chatelier. No início do processo, supõe-se que a dissolução de hemi-hidrato e a cristalização da gipsita tenham a mesma velocidade, o que resulta em um estado estável de reações, denominado período de indução (SINGH, 1978; AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; CINCOTTO *et al.* 1990 *apud* DE MILITO, 2007).

Durante a pega do gesso, o hemi-hidrato é dissolvido na água e libera íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , que se transformam no di-hidrato que se precipita na solução. Esses íons vão se depositando sobre os núcleos do di-hidrato e, conseqüentemente, os cristais crescem, entrelaçam-se em forma de agulhas e se precipitam a partir de uma solução supersaturada. A baixa solubilidade do di-hidrato permite a cristalização antes de uma dissolução total do hemi-hidrato. Esse mecanismo é extremamente exotérmico, pois libera energia em forma de calor (calor de hidratação). O processo continua até que todo hemi-hidrato, por meio de dissolução e precipitação, volte à forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quando ocorre o endurecimento da pasta (KARNI; KARNI, 1995; HENAO, 1997; BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999; BRANDT; BOSBACH, 2001; EVE *et al.*, 2001; CINCOTTO *et al.*, 1990 *apud* DE MILITO, 2007).

Quanto maior a quantidade de hemi-hidrato que se dissolve, maior é a precipitação de cristais de gipsita. Esse mecanismo continua até que o período de pega se encerre e se inicie o período de endurecimento do gesso (HAND, 1994). Esse fenômeno é acelerado com o aumento da temperatura da hidratação (WITKAMP; VAN DER ERDEN; VAN ROSMALEN, 1990).

A hidratação do gesso pode ser representada pela curva de variação da temperatura em função do tempo (Figura 2.2). Observa-se, esquematicamente, que há três períodos bem nítidos: período de indução, período de nucleação (onde ocorrem os tempos de início e fim de pega), e o período de endurecimento (que ocorre após a pega) (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

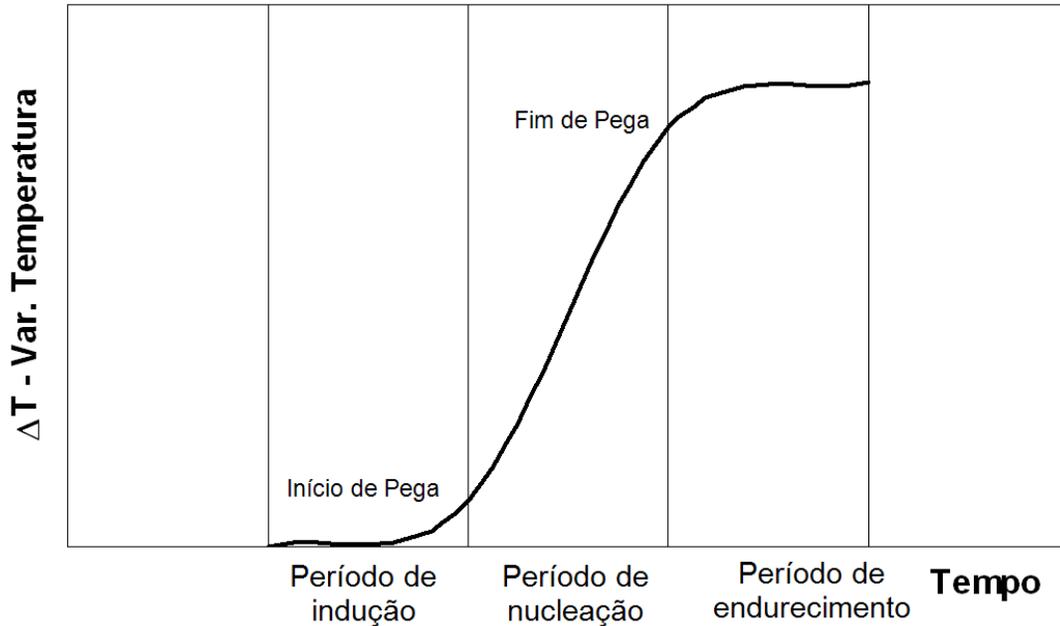


Figura 2.2 - Variação de temperatura durante a hidratação inicial do gesso (CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Entretanto, deve-se destacar que, de acordo com Magnam (1973 *apud* John; Cincotto, 2007), a hidratação de pastas de gesso ocorre em quatro etapas, sendo que a primeira consiste no primeiro pico de liberação de calor, que se inicia no momento da introdução do pó de gesso na água. Nesse período, que dura, aproximadamente, 30 segundos, inicia-se o processo de dissolução e surgem os primeiros hidratos, pouco estáveis física e quimicamente. Na Figura 2.2, as etapas 2, 3 e 4 são, respectivamente, os períodos de indução, nucleação e endurecimento.

No período de indução ocorre uma pequena hidratação inicial, seguida do equilíbrio da solução que não apresenta reações químicas. Essa etapa é finalizada pelo início da pega, que é o instante em que ocorre uma elevação da temperatura da pasta. No período de nucleação, há uma elevação rápida de temperatura, que indica aumento da velocidade da reação, momento em que ocorre, também, o final da pega. O período de endurecimento é caracterizado pela estabilidade da temperatura devido à baixa velocidade das reações de hidratação do gesso.

2.4 Fatores que Influenciam a Cinética de Hidratação e a Pega das Pastas de Gesso

A pega e o endurecimento do gesso são afetados por diferentes fatores como: finura e pureza do hemi-hidrato, velocidade de mistura, aditivos, relação água/gesso, tempo de

mistura, temperatura de preparo da pasta, além da origem geológica, impurezas, tempo de calcinação, finura e forma dos grãos (KARNI; KARNI, 1995). Durante o preparo das pastas, as impurezas presentes aceleram a pega por atuarem como núcleos de cristalização (CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; LEWRY; WILLIAMSON, 1994b).

Um aumento da relação água/gesso provoca a queda nas propriedades mecânicas. Isto pode ser explicado pela relação entre o teor de água da pasta e a porosidade resultante. No estado fresco, a relação água/gesso influencia a cinética da reação de hidratação e a formação da microestrutura. No estado endurecido, ela interfere na porosidade total da pasta e, conseqüentemente, sobre as propriedades mecânicas (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995).

Estequiometricamente, a relação água/gesso de 0,17 é a necessária para se conseguir a hidratação completa do gesso (KARNI; KARNI, 1995). No entanto, relações água/gesso mais elevadas são necessárias para que a pasta seja trabalhável. Observa-se que a quantidade de água utilizada em obra, em relação à massa de gesso, está na faixa de 0,60 kg/l a 0,80 kg/l (LEWRY; WILLIAMSON, 1994a; KARNI; KARNI, 1995; HINCAPIE *et al.*, 1996b; DE MILITO, 2001).

Quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior o intervalo de tempo necessário para saturar a solução. Isto causa a ampliação do período de indução e retarda o início da precipitação dos cristais de di-hidrato, pois as distâncias entre as partículas aumentam com o aumento da relação água/gesso e, portanto, os cristais de di-hidrato vão ter mais espaço para crescer; assim, o tempo de pega aumenta, pois o crescimento dos cristais vai ser mais lento (KARNI; KARNI, 1995). Logo, quanto maior a relação água/gesso, menor a velocidade da reação e maior o tempo de pega (NOLHIER, 1986; LEWRY; WILLIAMSON, 1994a).

A forma da partícula, a distribuição do tamanho da partícula e a área específica determinam a quantidade de água requerida para uma determinada consistência (RIDGE, 1961 *apud* HENAO, 1997). O tamanho das partículas influencia a cinética da reação. A taxa de hidratação aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, que aumenta a área específica do material (KARNI; KARNI, 1995).

A temperatura da água de amassamento influencia a solubilidade do gesso. Até 45 °C a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura, acelerando a hidratação. Acima de 45 °C o efeito é inverso (CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999).

O incremento na energia de mistura acelera a hidratação das pastas de gesso por facilitar a dispersão do pó na água de amassamento e por possibilitar a formação de mais

núcleos de cristalização (MAGNAN, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; BLAINE, 1997 *apud* ANTUNES, 1999).

Os aditivos controladores de pega interferem na velocidade da reação de hidratação (acelerando-a ou retardando-a) e no tempo de pega. Os aceleradores aumentam a solubilidade do hemi-hidrato, acelerando a hidratação. Os retardadores dividem-se em 2 grupos (LEWRY; WILLIAMSON, 1994c):

- 1) os que ampliam o período de indução, causando o deslocamento da curva de calor de hidratação;
- 2) os que interferem na cinética da formação da microestrutura do di-hidrato.

2.5 Propriedades Mecânicas da Pasta de Gesso

As propriedades mecânicas das pastas de gesso são dependentes da estrutura da fase sólida da pasta endurecida e da morfologia dos poros, que são controladas pela cinética de hidratação dos cristais de gipsita (GMOUH *et al.*, 2003). A estrutura cristalina tem influência nas propriedades mecânicas, pois cristais de gesso bem formados são mais favoráveis para a obtenção de valores mais elevados para os resultados das propriedades mecânicas nas pastas de gesso (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; KARNI; KARNI, 1995; BADENS, VEESLER; BOISTELLE, 1999; CAVALCANTI, 2006). Portanto, o desenvolvimento da resistência mecânica está relacionado ao entrelaçamento da estrutura cristalina (agulhas) e aos macro-defeitos dos cristais de gipsita (di-hidrato) (KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

É importante destacar, também, que o endurecimento do gesso será afetado por diferentes fatores, tais como: finura e pureza do hemi-hidrato, velocidade de mistura, relação água/gesso, tempo de mistura, temperatura de preparo da pasta, além da origem geológica, impurezas, tempo de calcinação, finura e forma dos grãos (KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Durante a hidratação, os cristais de di-hidrato crescem a partir de núcleos de cristalização ou simplesmente núcleos. A quantidade de núcleos presentes na solução vai influenciar a taxa de crescimento da microestrutura e o tamanho dos cristais. Quando ocorre a formação de poucos núcleos, o crescimento é lento, o que favorece a formação de cristais grandes e interfere nas propriedades mecânicas da pasta endurecida. Microestruturas formadas por cristais grandes são menos resistentes (mais porosas) do que as formadas por

cristais pequenos (mais densas) (MURAT et al. 1975 *apud* HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; HENAO, 1997; BADENS, VEESLER; BOISTELLE, 1999).

Deve-se salientar que o crescimento da estrutura cristalina manifesta-se de duas formas: pode ser que o tamanho crítico dos cristais seja atingido com poucos núcleos, resultando em cristal de tamanho grande; ou os cristais podem formar-se a partir de numerosos núcleos, resultando em cristais pequenos. Em ambos os casos, os cristais estão entrelaçados uns com os outros. Esta diferença na cristalização, ou seja, na forma dos cristais, vai definir as propriedades mecânicas do gesso endurecido (MURAT et al. 1975 *apud* HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; HENAO, 1997; BADENS, VEESLER; BOISTELLE, 1999).

Quando a velocidade de crescimento é rápida formam-se cristais bem definidos, com maior número por unidade de volume; um crescimento lento favorece a formação de cristais grossos, cuja estrutura é mais organizada, com menos defeitos. Isto mostra que a velocidade de crescimento é um fator importante nas propriedades mecânicas (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; HINCAPIE; CINCOTTO, 1997).

Os primeiros sulfatos a se precipitarem formam o núcleo do sulfato di-hidratado; continuando a precipitação, ocorre o aparecimento de uma superfície de núcleos, que possibilitam o crescimento, a superposição e o entrelaçamento dos cristais de sulfato de cálcio di-hidratado, onde o teor de água excedente é evaporado. As taxas de nucleação e o crescimento dos cristais são proporcionais à supersaturação da solução (TAYLOR, 1964 *apud* DIAS, 1994; RAMACHANDRAN, 1969 *apud* DIAS, 1994; CLIFTON, 1973 *apud* DIAS, 1994).

A forma do cristal também influencia as propriedades mecânicas da pasta endurecida. Os cristais do di-hidrato têm a forma de agulhas e apresentam um bom intertravamento. A presença de impurezas e controladores de pega ocasiona mudanças em sua forma, diminuindo suas propriedades mecânicas (MURAT et al. 1975 *apud* HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; HENAO, 1997; BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999).

A estrutura de agulhas entrelaçadas é originada por núcleos de cristalização que geram os formatos aciculares (agulhas), formando uma estrutura mais compacta, quando ocorre o endurecimento das pastas. Dessa forma, as agulhas de di-hidrato agrupam-se radialmente, em torno de um ponto (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

A disposição de agulhas com entrelaçamento entre os cristais (cristais embricados) também foi encontrada por outros pesquisadores, tais como: Knauf (1973), Robler; Odler (1989), Hallows (1992) *apud* Henao (1997), Henao (1997); Hincapie; Cincotto (1997); Gmouh

et al (2003), De Milito (2007) e Singh; Middendorf (2007) em pastas de gesso comercial produzidas com relação água/gesso em torno de 0,70. De acordo com alguns desses pesquisadores, isso é um indicativo de que o material anidro apresenta adições de material inerte que favorecem a germinação dos cristais de di-hidrato durante a hidratação do hemi-hidrato.

Quando a superfície da pasta sofre alguma espécie de tratamento mecânico, como, por exemplo, desempenho, ocorre uma orientação na formação dos cristais que estão nesta região. Isto resulta em uma camada compacta que apresenta propriedade mecânica superior à do interior da pasta (MURAT et al. 1973 *apud* ANTUNES, 1999).

A exposição das pastas endurecidas à umidade provoca queda em suas propriedades mecânicas. A estrutura da pasta modifica o contato entre os cristais, o que ocasiona a queda da resistência mecânica. Outra explicação para isso é que a água adsorvida possibilita o escorregamento entre os cristais sob pressão (LEWRY; WILLIAMSON, 1994a; KARNI; KARNI, 1995; BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999).

A relação água/gesso influencia, de maneira discreta, o tamanho dos cristais de di-hidrato, sem influenciar na sua forma. O aumento da relação água/gesso altera a distribuição dos poros, ou seja, a adição de água faz com que a pasta passe a ter mais poros, relativamente, maiores (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b). Essa quantidade de água excedente evapora e confere porosidade ao gesso, o que aumenta a sua capacidade de deformação (HINCAPIE et al., 1996b).

2.6 Microestrutura e Composição Mineral do Gesso

O desempenho do gesso depende da sua composição mineral, da cristalinidade e da microestrutura. Os cristais de di-hidrato precipitam-se durante a hidratação, formando ligações secundárias entre eles. Nessas ligações, ocorrem vazios e poros que influenciam a resistência mecânica da pasta (JOHN; CINCOTTO, 2007). A seguir, estão discutidas algumas das técnicas para estudo de microestrutura e da composição mineralógica do gesso.

2.6.1 Microestrutura do Gesso por Microscopia Eletrônica de Varredura

As dimensões típicas dos cristais de di-hidrato puro variam entre 10 e 20 μm de comprimento e 1 e 1,6 μm de diâmetro (ODLER; ROSSLER, 1989 *apud* ANTUNES, 1999;

HENAO, 1997). Portanto, o conhecimento da microestrutura do gesso, isto é, como ela se desenvolve e que fatores a influenciam, é importante para se compreender as suas propriedades físicas e mecânicas.

Assim, a análise de imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) propicia um melhor nível de conhecimento dos materiais, pois esta ferramenta é adequada para avaliar as mudanças morfológicas que ocorrem durante o seu processamento e seu uso. A análise de imagens permite que se relacione a microestrutura das pastas, por meio da observação da formação dos produtos de hidratação dos aglomerantes, com as propriedades físicas e mecânicas do material em estudo.

A quantidade de núcleos de cristalização presentes na pasta de gesso, no estado fresco, vai influenciar a taxa de crescimento da microestrutura (durante o processo de hidratação do gesso) bem como o tamanho dos cristais (MURAT et al. 1979; *apud* ANTUNES, 1999).

A análise de imagens oferece condições para se visualizar os fatores que influenciam a formação da microestrutura do gesso. As Figuras 2.3 e 2.4 mostram a geometria dos cristais de pastas de gesso hidratado produzidas com hemi-hidrato β , que, em geral, apresenta estrutura cristalina em forma de agulhas (RASAHD et al., 2004; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

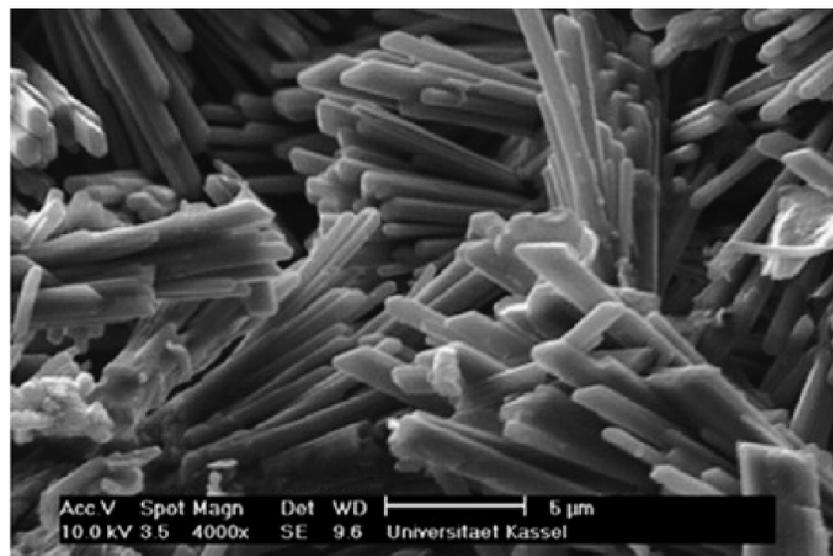


Figura 2.3 – Cristais de gesso hidratado aumentados 4000 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

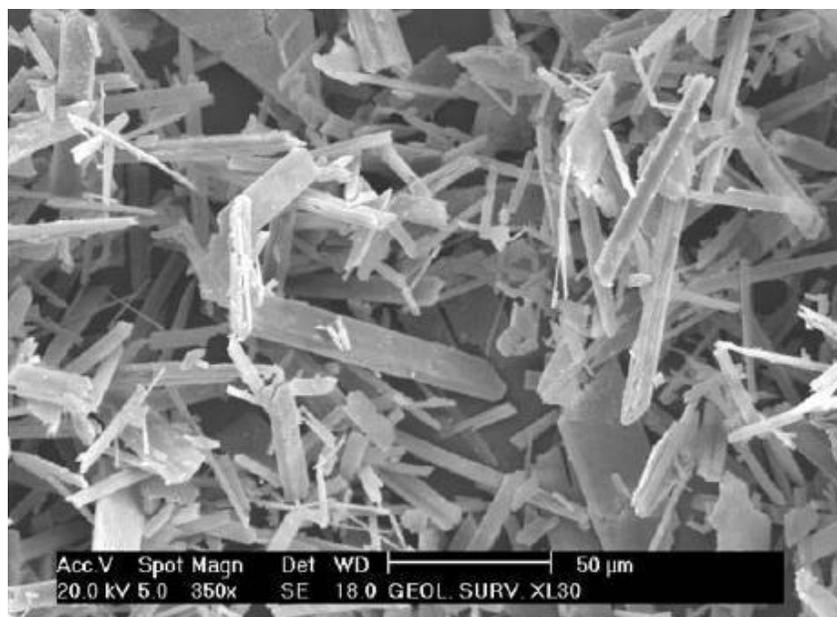


Figura 2.4 – Cristais de gesso hidratado aumentados 350 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (RASAHD et al., 2004).

Nas Figuras 2.3 e 2.4, observa-se a formação dos cristais de di-hidrato (agulhas), seu intertravamento e a estrutura porosa da pasta, fatores que influenciam na sua pega e resistência mecânica. Assim, o intertravamento dos cristais e a estrutura porosa são características presentes nas pastas de gesso.

2.6.2 Difração de Raios-X

A difração de raios-X é uma técnica que responde à cristalinidade da substância e permite, assim, a identificação de materiais quanto às suas características cristalinas e a quantificação de elementos de constituição, desde que em faixa adequada de concentração. É uma técnica de análise muito utilizada para substâncias minerais.

Essa técnica consiste na investigação da estrutura cristalina e na identificação dos componentes mineralógicos de um determinado material, pois os raios-X são difratados pelos cristais quando estes apresentam as distâncias interplanares do retículo cristalino com a mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X.

Quando o gesso é exposto aos raios-X, com determinado comprimento de onda, as camadas dos átomos difratam os raios, produzindo os picos característicos. Os compostos cristalinos, semi-cristalizados e amorfos, têm sua contribuição diferenciada pela intensidade dos picos apresentados nos difratogramas, isto é, as substâncias cristalinas apresentam

picos acentuados; quando mal cristalizadas, os picos não são bem definidos (CAMARINI, 2002).

Com o uso de equipamentos modernos, obtém-se o difratograma e a listagem dos compostos presentes na amostra, correspondentes aos ângulos de difração e às intensidades relativas dos picos presentes (Figura 2.5).

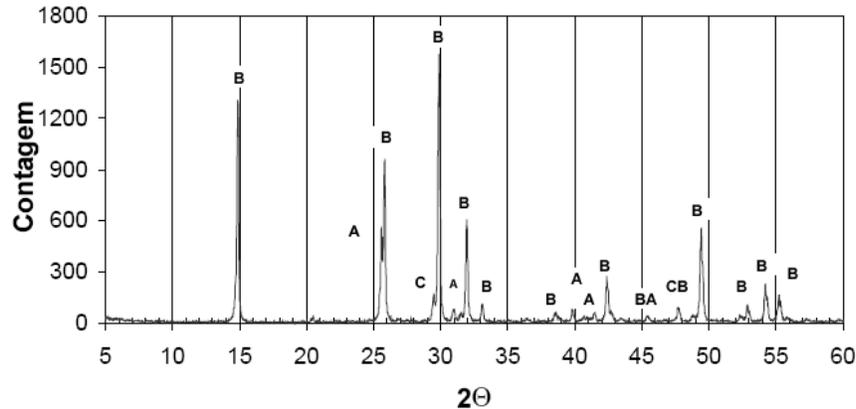


Figura 2.5 – Difratograma de gesso comercial utilizado na construção civil (A - anidrita (CaSO_4), B - bassanita ($\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), C - calcita (CaCO_3) (ANTUNES, 1999).

A identificação dos compostos anidros e hidratados presentes no gesso, feita por meio da análise dos difratogramas, pode fornecer informações importantes a respeito destes compostos, principalmente do gesso reciclado.

Na Figura 2.5, observa-se que, para cada composto da amostra analisada, foi gerado um pico característico em um determinado ângulo 2θ específico. Tendo-se conhecimento desse ângulo gerado no difratômetro, por meio de valores conhecidos e tabelados de ângulos 2θ , é possível identificar quais os compostos presentes na amostra. Os compostos minerais identificados (A, B e C) foram: A = anidrita (CaSO_4), B = bassanita ($\beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), C = calcita (CaCO_3) (ANTUNES, 1999).

2.7 Desempenho das Pastas de Gesso em Revestimentos

Diversas anomalias podem surgir nos revestimentos de gesso, dependendo do tipo e da qualidade do gesso utilizado. O resultado final depende de fatores como: a mistura das pastas, a forma de aplicação e de fatores externos ao revestimento. As características da pasta fresca constituem um dos fatores que influencia, diretamente, a qualidade do revestimento de gesso.

As pastas de gesso são, normalmente, executadas de forma manual. A produção desse material ainda é realizada, em grande parte, nos canteiros de obra, entretanto, alguns fabricantes já começaram a colocar, no mercado, produtos aplicáveis por projeção mecânica (DE MILITO, 2001).



Figura 2.6 – Aplicação manual de pastas de gesso como revestimento de parede.

As propriedades da pasta, no estado endurecido, também têm influência no desempenho do revestimento, e dependem das condições do substrato, como porosidade e absorção de água, resistência mecânica e textura superficial, e das próprias condições de execução do assentamento de componentes do substrato.

Portanto, a natureza do aglomerante tem influência sobre a aderência. A capacidade de aderência da interface substrato-pasta depende da capacidade de retenção de água, da consistência e do conteúdo de ar da pasta (CINCOTTO, 1995 *apud* DE MILITO, 2001). Dessa forma, as características físicas do pó, da pasta no estado fresco e da pasta no estado endurecido vão influenciar no desempenho dos revestimentos de gesso.

O Quadro 2.1 apresenta as exigências da norma brasileira para classificação dos gessos com relação ao valor de seu módulo de finura (MF). No Quadro 2.2 apresenta-se as exigências físicas para os tempos de início e fim de pega para pastas de gesso e no Quadro 2.3 as exigências mecânicas para os gessos de construção civil NBR 13207 (ABNT, 1994).

Quadro 2.1 – Classificação dos gessos com relação ao Módulo de Finura (MF) – NBR 13207 (ABNT, 1994).

Classificação do Gesso	Módulo de Finura NBR 12127
Gesso fino para revestimento	Menor 1,10
Gesso grosso para revestimento	Maior 1,10
Gesso fino para fundição	Menor 1,10
Gesso grosso para fundição	Maior 1,10

Quadro 2.2 – Exigências físicas do gesso para construção civil – NBR 13207 (ABNT, 1994).

Classificação do Gesso	Tempo de Pega (minutos)	
	Início	Fim
Gesso fino para revestimento	Maior 10	Maior 45
Gesso grosso para revestimento	Maior 10	Maior 45
Gesso fino para fundição	4 - 10	20 - 45
Gesso grosso para fundição	4 - 10	20 - 45

Quadro 2.3–Exigências mecânicas do gesso para construção civil–NBR 13207(ABNT, 1994).

Propriedades Mecânicas do Gesso	Unidade	Limites
Resistência à Compressão NBR 12129 (MB 3470)	MPa	Maior 8,40
Dureza NBR 12129 (MB 3470)	N/mm ²	Maior 30,00

2.8 – Resíduos de Gesso da Construção Civil

O gesso utilizado na construção civil como revestimento de paredes apresenta uma grande perda de material. De acordo com Dias (1994) os valores médios de desperdício desse material, durante a sua aplicação, são maiores do que 45% da quantidade de gesso utilizado. Pimentel e Camarini (2009) e Camarini, Pimentel e Sá (2011), em um estudo para quantificar a quantidade de resíduo gerado durante o processo de aplicação do gesso como revestimento interno de paredes, apontaram valores entre 18% e 35% de resíduo de gesso gerado durante o processo de aplicação.

No processo de coleta de resíduos de gesso aplicados como revestimento de paredes em canteiros de obras de apartamentos residenciais na cidade de Campinas (SP), foi feito um levantamento da quantidade de desperdício do gesso durante a sua aplicação. O levantamento foi feito comparando-se a massa de gesso comercial em pó, utilizada para aplicação do revestimento de paredes e tetos, com a massa do resíduo desse gesso desperdiçado durante essa aplicação (a massa do resíduo foi verificada no resíduo seco). O valor de desperdício encontrado entre o gesso comercial, que entrou no canteiro de obras, e o resíduo do gesso, que saiu, correspondeu a 33%, ou seja, um pouco mais de um terço do gesso que entrou na obra foi desperdiçado na forma de resíduo de construção (BARDELLA; PEREIRA; CAMARINI, 2007).

Assim, avaliar a possibilidade de recuperar o gesso já utilizado em obras de construção civil, com a finalidade de reutilizar esse material, por meio de uma triagem

adequada, realizada em canteiros de obras, apresentará uma contribuição para o meio ambiente e atenderá as exigências da Resolução n° 307 do CONAMA (2002), que estabelece que os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção.

Os resíduos de gesso são indesejáveis nos aterros sanitários e lixões, pois, em contato com a umidade e em condições anaeróbicas, com baixo pH, e sob a ação de bactérias redutoras de sulfatos, podem formar gás sulfídrico (H_2S) que é tóxico, inflamável e tem odor característico de ovo podre (Environment Agency, 2002; CIWMB, 2003 *apud* JOHN; CINCOTTO, 2003).

2.9 – Gesso Reciclado

Somente na cidade de São Paulo, a quantidade de resíduos de gesso gerados é da ordem de 120.000 toneladas por ano, sendo que 88% desse resíduo é proveniente da utilização de gesso como revestimento (AGOPYAN et al., 2005) (Figura 2.7).

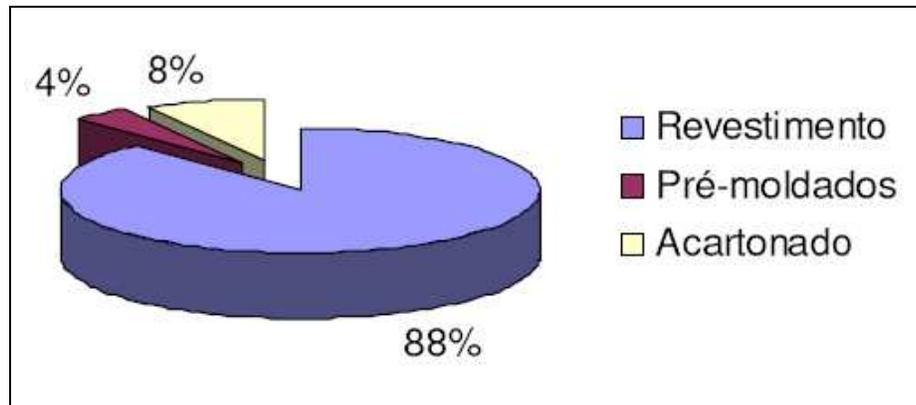


Figura 2.7 – Fontes de Resíduos de Gesso (AGOPYAN et al., 2005).

Logo, devido a esse elevado desperdício e à crescente conscientização da importância da reciclagem de materiais para a manutenção dos recursos naturais e para a preservação do meio ambiente, os resíduos de gesso de construção apresentam-se com perspectivas de reutilização como material reciclado na cadeia produtiva da construção civil (Figura 2.8).



a)



b)

Figura 2.8 – a) - Resíduos de gesso gerados na aplicação de revestimento interno de paredes. b) Resíduos de gesso depositados em via pública.

No cenário internacional, em países desenvolvidos como Dinamarca, Suécia, Noruega, Holanda, Irlanda, Alemanha, Reino Unido e Estados Unidos da América, já está consolidada uma forma de reutilização do resíduo de gesso proveniente de perdas durante o processo de aplicação de placas de gesso acartonado. Esses resíduos são reutilizados pela indústria como matéria prima na produção do próprio gesso acartonado. Nos Estados Unidos da América, estima-se que entre 10% a 12% do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção. Essas perdas são significativas e ocorrem devido às atividades de corte das placas durante a aplicação do material (CAVALCANTI, 2006; GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL, 2007).

Essa metodologia de reutilização dos resíduos de placas de gesso acartonado é utilizada pela empresa canadense New West Gypsum Recycling desde 1986. A empresa dispõe de um equipamento móvel que pode ser transportado para diferentes localizações. Essa tecnologia, no entanto, requer limpeza manual do resíduo e proteção da chuva, para que o material seja reutilizado como aglomerante na produção de gesso acartonado. Os clientes que utilizam o gesso reciclado produzido pela New West Gypsum Recycling usam até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho (CAMPBELL, 2003 *apud* JOHN; CINCOTTO, 2003; CAVALCANTI, 2006).

Deve-se destacar que novos equipamentos já permitem a separação entre o gesso e o papel contido nos resíduos de placas de gesso acartonado, sem que seja necessária uma limpeza manual do resíduo. Entretanto, ainda é necessária a proteção do resíduo em relação à chuva. Para isso, são utilizados *containers* especiais onde os resíduos são coletados e

ficam protegidos para que possam ser reciclados posteriormente (GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL, 2007).

No Brasil, como a utilização do gesso acartonado ainda não é tão expressiva como nos países desenvolvidos, não existe uma cultura para coleta e reaproveitamento dos seus resíduos. A empresa Placo do Brasil, fabricante de gesso acartonado para a utilização na construção civil, reaproveita 100% do resíduo de gesso gerado no processo de fabricação desse material, reutilizando-o como matéria-prima na linha de produção (PLACO IMPRENSA, 2004).

Portanto, a reciclagem dos resíduos de gesso é, tecnicamente, possível, com várias aplicações, mas a viabilização da reciclagem, em escala comercial, depende de fatores regionais. A segregação do resíduo de gesso, no momento da geração, e o controle de sua contaminação, nas etapas de estoque e transporte, são condições para tornar a reciclagem possível. Este tipo de medida depende da conscientização das empresas especializadas em gesso, dos construtores, dos engenheiros e dos operários (JOHN; CINCOTTO, 2003).

Em estudos realizados com pastas de gesso reciclado, foi observado que as propriedades físicas e mecânicas desse material foram similares às propriedades do gesso comercial. Este fato permite vislumbrar o emprego do gesso reciclado em obras de construção civil e na fabricação de elementos decorativos. Ressalva deve ser feita quanto ao aspecto final do produto reciclado, que apresenta coloração mais escura do que o gesso comercial, devido à presença de impurezas. No entanto, isso não impede seu emprego, pois, em geral, aplica-se uma pintura sobre os revestimentos de gesso (BARDELLA; SANTOS; CAMARINI, 2004; BARDELLA; CAMARINI, 2004).

Nas pastas utilizando-se gesso reciclado foi observado um aumento no consumo de água e no tempo de pega (BARDELLA; FERREIRA JR.; CAMARINI, 2003; NITA *et al.*, 2004; PETRI; BARDELLA; CAMARINI, 2007). A diferença entre os tempos de início e fim de pega manteve-se, praticamente, a mesma para ambos os gessos. Gessos produzidos sob diferentes processos apresentam reatividades diferentes, e a matéria prima, as impurezas presentes e as condições de produção do gesso podem afetar o tempo de pega (BARDELLA; FERREIRA JR.; CAMARINI, 2003).

Deve-se destacar que, em estudos realizados em pastas de gesso reciclado calcinado na temperatura de 200 °C foram observados resultados similares entre os tempos de pega obtidos para os gessos reciclados e os obtidos para o gesso comercial (para pastas com a mesma consistência) (BARDELLA; FERREIRA JUNIOR; CAMARINI, 2003; BARDELLA; SANTOS; CAMARINI, 2004; BARDELLA; CAMARINI, 2004).

Carvalho (2005), ao estudar o reaproveitamento do entulho de gesso para a sua reutilização na forma de pasta e para a fabricação de molduras de gesso, também observou que as propriedades dos gessos comercial e reciclado foram semelhantes, destacando somente que a resistência mecânica obtida pelo gesso reciclado foi inferior à do gesso natural. O autor observa que ambos os gessos estudados (comercial e reciclado) atenderam às exigências da NBR 13207: Gesso para Construção Civil - Especificação (ABNT, 1994) para as propriedades da pasta, no estado endurecido (resistência à compressão e dureza) e também para as propriedades da pasta, no estado fresco (início e fim de pega).

Os cristais formados na hidratação da pasta produzida com gesso comercial (Figura 2.9) apresentaram-se similares à estrutura cristalina formada na pasta produzida utilizando-se gesso reciclado (desidratado na temperatura de 200 °C) (Figura 2.10), ambas as pastas foram produzidas utilizando-se uma relação água/gesso de 0,70 (BARDELLA; CAMARINI, 2007a).

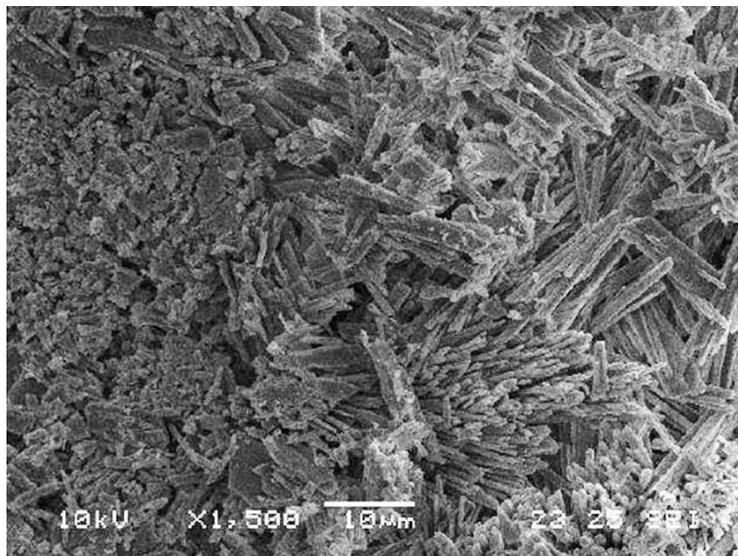


Figura 2.9 – Cristais de di-hidrato de gesso comercial aumentados 1500 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (BARDELLA; CAMARINI, 2007a).

Observa-se, também (Figuras 2.9 e 2.10), a formação dos cristais de di-hidrato (agulhas), seu intertravamento e a estrutura porosa da pasta, que influenciam na sua pega e na sua resistência mecânica. Assim, o intertravamento dos cristais e a estrutura porosa foram similares para ambas as pastas (BARDELLA; CAMARINI, 2007a).

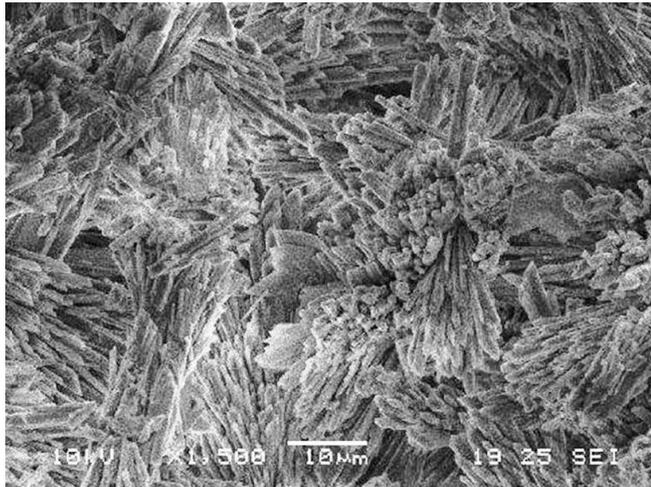


Figura 2.10 – Cristais de di-hidrato de gesso reciclado desidratado a 200 °C aumentados 1500 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (BARDELLA; CAMARINI, 2007a).

Em estudo com gesso reciclado proveniente de resíduos de placas de gesso, Bardella e Camarini (2006b) observaram que os compostos presentes nos materiais desidratados são os mesmos encontrados nos gessos comerciais (Figura 2.11).

A única diferença está na intensidade dos picos observados nos difratogramas de raios-X, pois, no material anidro, os picos observados são mais intensos, o que indica uma melhor desidratação da gipsita (Figura 2.11).

Resultados similares foram encontrados para resíduos de gesso de construção provenientes da aplicação de pastas como revestimento de paredes e que foram reciclados para serem utilizados, novamente, como gesso de construção (Figura 2.12) (BARDELLA; CAMARINI, 2007b).

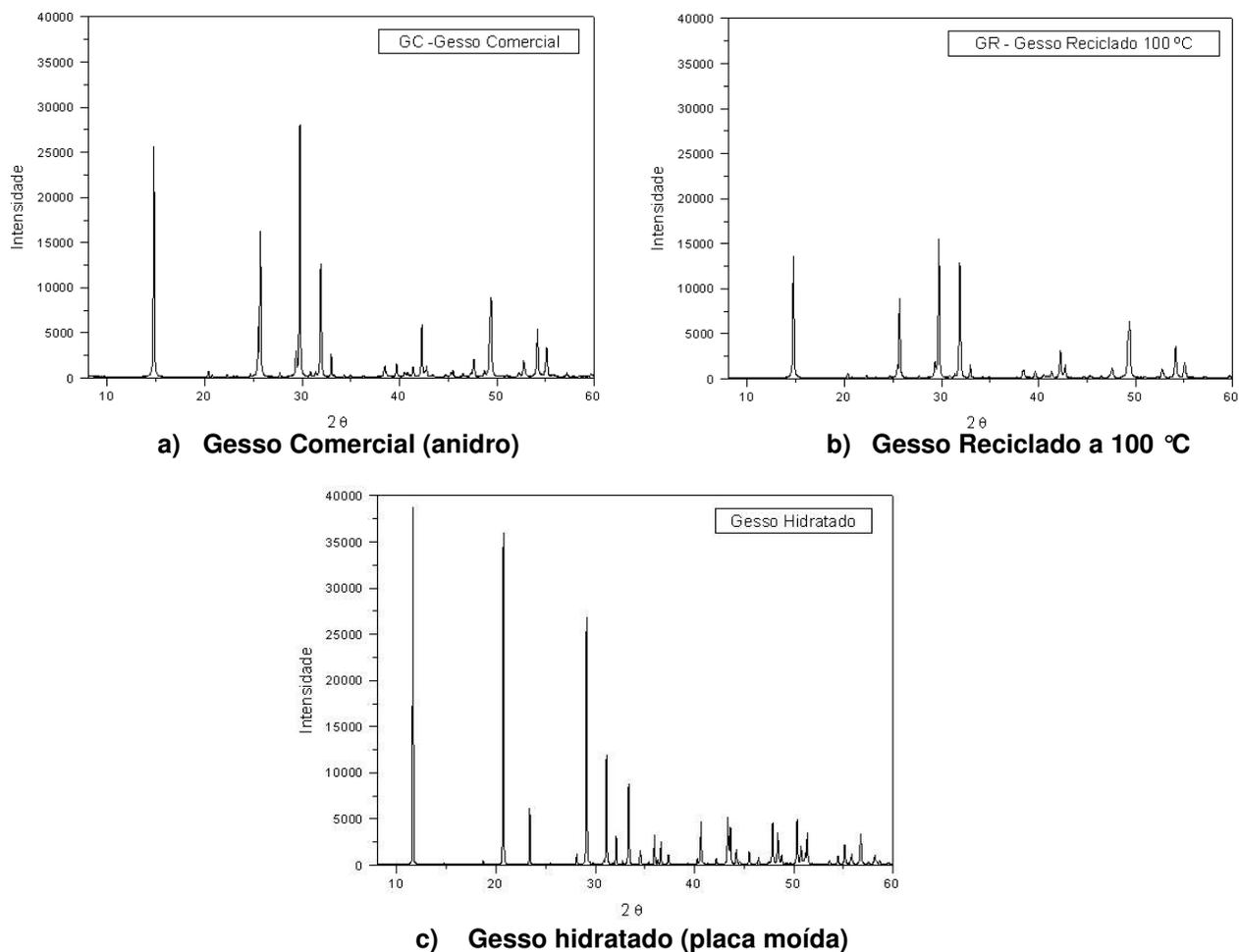


Figura 2.11 – Difratoigramas de raios-X – a) Gesso comercial (anidro), b) Gesso reciclado a 100 °C, c) Gesso hidratado (placa de gesso moída) (BARDELLA; CAMARINI, 2006b).

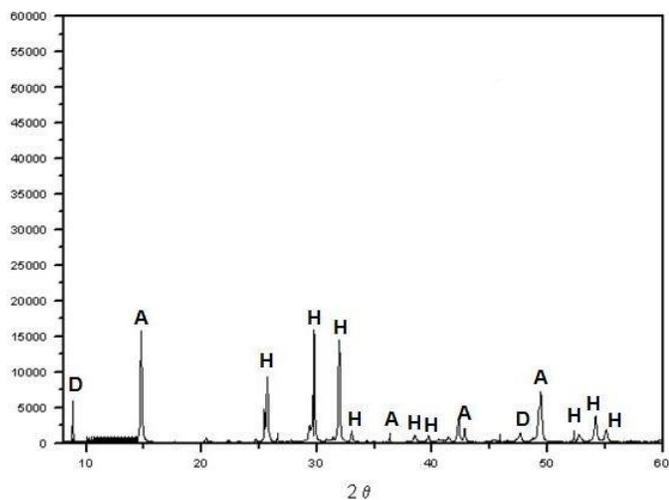


Figura 2.12 – Difratoigramas de raios-X – Gesso reciclado a 200 °C (resíduo de gesso utilizado como revestimento de paredes) (BARDELLA; CAMARINI, 2007b).

Argamassas produzidas com gesso reciclado apresentaram propriedades físicas e mecânicas similares e, algumas vezes, até superiores às das argamassas produzidas com gesso comercial. No entanto, deve-se ressaltar que, para viabilizar o emprego de argamassas de gesso, tanto as produzidas com gesso comercial quanto as produzidas com gesso reciclado, na execução de revestimentos internos de parede, é imprescindível o uso de aditivos retardadores de pega (PETRI; BARDELLA; CAMARINI, 2007).

A desidratação da gipsita para a produção de gesso beta reciclado em laboratório, segundo Cavalcanti (2006), produziu gessos com cristais bem formados e homoganeamente dispostos. Quando comparados a gessos convencionais (desidratados em pressão manométrica próximas de zero) os gessos reciclados sob pressão manométrica acima da pressão atmosférica, apresentaram superioridade quanto às propriedades mecânicas, obtendo índice de reciclagem de 100%.

Em continuidade ao estudo de Cavalcanti (2006), foram determinadas as condições operacionais consideradas ótimas para a produção de gesso beta reciclável a partir do controle da pressão e da temperatura de calcinação da gipsita e também do gesso já hidratado (gesso beta reciclado). A região de condições ótimas foi identificada em torno de 0,60 atmosferas monométricas e 170 °C. O gesso reciclado produzido, nesse processo (Figura 2.13), apresentou a formação de cristais alongados, responsáveis por uma microestrutura que garante propriedades semelhantes ou melhores do que as da amostra de referência (gesso convencional) (Figura 2.14) (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

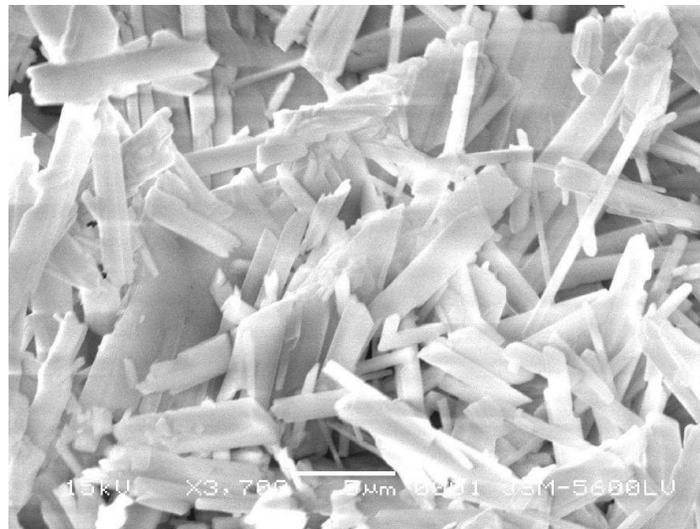


Figura 2.13 – Cristais de gesso beta reciclado desidratado sob pressão de 0,60 atm em temperatura de 170 °C, aumentados 3700 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Comparando-se as imagens das Figuras 2.13 e 2.14, observa-se a formação de cristais bem mais homogêneos e alongados (do tipo agulha) (Figura 2.13), que se entrelaçam e, por isso, podem ser responsáveis por propriedades que conferem maior resistência mecânica à pasta. Na Figura 2.14, podem ser observadas características cristalinas de um material composto de cristais heterogêneos, na sua maioria, e de aspecto quebradiço, o que confere uma menor resistência mecânica à pasta (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Dessa forma, a presença de cristais mal formados dá origem a cristais de di-hidrato defeituosos e as chamadas agulhas cristalinas soldadas, responsáveis pelas propriedades mecânicas do gesso re-hidratado. Cristais bem formados, devido às condições de temperatura e pressão sob controle, garantem a formação de cristais alongados o suficiente para a geração de uma malha de entrelaçados, o que garante melhores propriedades mecânicas ao material final (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).



Figura 2.14 – Cristais de gesso convencional desidratado sob pressão de 0,60 atm em temperatura de 170 °C aumentados 3700 vezes em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os materiais e os métodos de ensaio que foram utilizados durante a parte experimental desta pesquisa. A Figura 3.1, apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas na realização desse trabalho experimental.

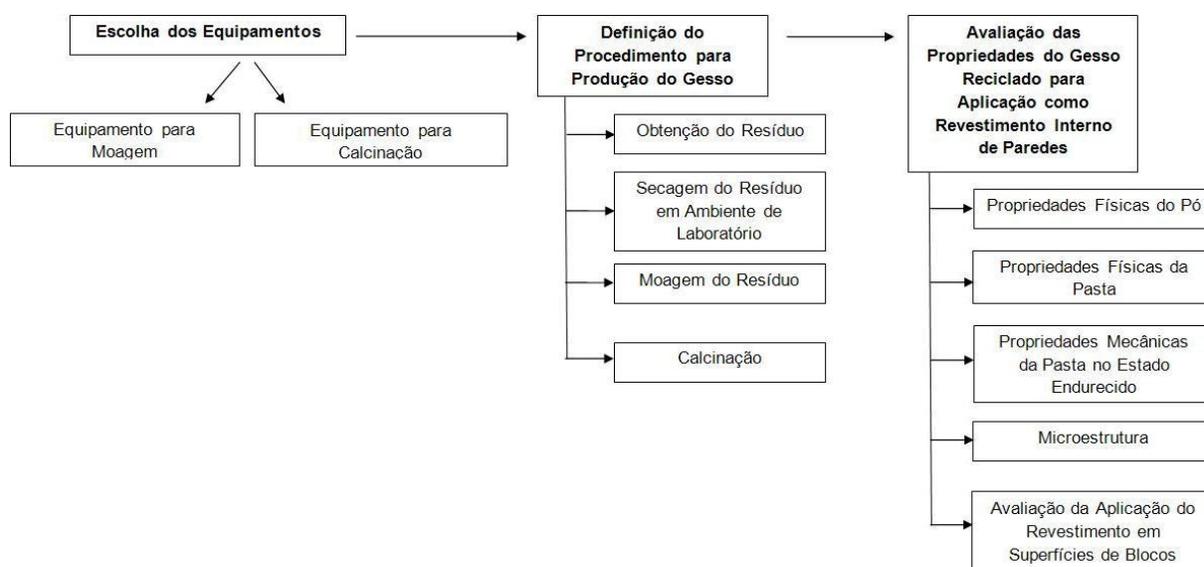


Figura 3.1 – Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa experimental.

Os ensaios foram realizados nas instalações do LARES - Laboratório de Aglomerantes e Resíduos e LMC – Laboratório de Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas e, também, nas instalações do LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncroton, instituição federal localizada na cidade de Campinas. Os ensaios químicos foram realizados nas instalações do Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente da FEC/UNICAMP e no Instituto de Química da UNICAMP.

3.1 – Materiais

Os gessos utilizados no desenvolvimento deste trabalho experimental foram: o gesso comercial de pega lenta, adquirido no mercado da região de Campinas, estado de São Paulo, que é, usualmente, utilizado em trabalhos de revestimento interno de paredes em obras de construção civil; e o gesso residual, coletado em obras na mesma região, resultante das perdas de gesso hidratado quando do revestimento de paredes (gesso liso).

Foram utilizadas, como gessos de referência, duas marcas comerciais de gesso de pega lenta, que são frequentemente, utilizadas na aplicação de revestimento interno de paredes, em obras de edificação, na região de Campinas. Essas marcas comerciais são facilmente encontradas no comércio da cidade de Campinas e na sua região metropolitana.

A Tabela 3.1 apresenta a composição química dos dois gessos comerciais utilizados neste trabalho experimental. Os resultados dessa composição química foram obtidos por meio de ensaios realizados na Central Analítica do Instituto de Química da UNICAMP, em amostras fornecidas ao laboratório para essa finalidade (Anexo 1).

Tabela 3.1 – Composição química dos gessos comerciais.

Parâmetros	Unidade	GC1	GC2
Água Livre	%	1,3 ± 0,3	1,2 ± 0,7
Água de Cristalização	%	5,6 ± 0,4	6,4 ± 0,2
Anidrido Sulfúrico	%	73,4 ± 0,6	66,2 ± 0,6
Cálcio	%	24,2 ± 0,5	25,1 ± 0,2
Magnésio	%	0,11 ± 0,01	0,10 ± 0,01
Óxido de Cálcio	%	33,9 ± 0,6	35,1 ± 0,2
Óxido de Magnésio	%	0,18 ± 0,02	0,17 ± 0,01

O gesso residual é o resíduo de gesso gerado durante o processo de aplicação de pastas de gesso como revestimento interno de paredes. Esse resíduo é a matéria prima para a obtenção do gesso reciclado. O material, que já foi utilizado em trabalhos de revestimento interno de paredes (gesso hidratado), foi recolhido no ambiente de sua aplicação, antes que entrasse em contato com outro tipo de resíduo de construção. Em seguida, esse resíduo foi armazenado em ambiente de laboratório até a sua secagem e, então, foi moído e desidratado em estufa para ser reutilizado. Após a desidratação e o resfriamento, o material foi armazenado em recipientes plásticos, hermeticamente fechados, em local isento de umidade.

As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam, respectivamente, o gesso residual gerado durante a aplicação da pasta de gesso como revestimento interno de paredes e o equipamento

utilizado para se realizar a moagem e a transformação do resíduo do gesso de construção em material pulverulento (material em pó).



Figura 3.2 - Gesso residual gerado durante a aplicação de pasta de gesso como revestimento interno de paredes.



Figura 3.3 – Equipamento utilizado para a moagem do gesso residual – Picador/Triturador/Forageiro: TRAPP/TRF 300.

3.2 – Desidratação

Utilizando-se uma estufa alimentada por energia elétrica (220 volts) e com capacidade de aquecimento de até 300 °C (estufa ventilada) os resíduos do gesso de construção foram desidratados. O gesso residual moído foi espalhado sobre bandejas de alumínio, controlando-se a espessura da camada de gesso residual em pó, para que esta não ficasse com valor superior a 5 mm.

Em seguida, as bandejas com o gesso residual foram colocadas no interior da estufa (três bandejas em cada ciclo de calcinação). Após fechar a estufa, a mesma foi ligada e se iniciou a elevação da temperatura. As temperaturas utilizadas na calcinação dos gessos reciclados, neste trabalho, foram 150 °C, 180 °C e 200 °C (Item 3.3). A partir do instante em que a estufa atingiu a temperatura de desidratação designada (150 °C, 180 °C ou 200 °C), foi marcado um período de 24 horas, durante o qual essa temperatura foi mantida. No término desse período, a estufa foi desligada e se deixou o gesso desidratado esfriar no interior da mesma (mantendo-se as portas da estufa fechadas).

Quando o gesso atingiu a temperatura ambiente, foi retirado da estufa e armazenado dentro de recipientes, herméticamente fechados, até a sua utilização.

3.3 – Misturas Experimentais

As propriedades dos gessos foram investigadas em pó e em pasta. As misturas foram produzidas, utilizando-se gessos comerciais (referência) e gesso reciclado. O resíduo de gesso foi desidratado nas temperaturas de 150 °C (± 5 °C), 180 °C (± 5 °C) e 200 °C (± 5 °C). Essas temperaturas de desidratação foram escolhidas visando-se um menor consumo de energia no processo de obtenção do gesso reciclado. Com o objetivo de se obter um menor consumo energético, no processo de moagem do gesso, e uma melhor desidratação, esse resíduo foi transformado em pó, com granulometrias similares às das areias finas. O resíduo foi moído e foram obtidas duas finuras: material passante em peneira de abertura 3,0 mm e material passante em peneira de abertura 0,8 mm. Neste trabalho, convencionou-se chamar os gessos reciclados, com material passante na peneira de abertura 3,0 mm, como gessos grossos, e os gessos reciclados, com material passante na peneira de abertura 0,8 mm, como gessos finos.

Foram utilizadas misturas que alcançassem boa trabalhabilidade para serem aplicadas em revestimentos internos de paredes e tetos. Assim, todas as pastas foram analisadas com a relação água/gesso de 0,70, por ser esta uma relação, frequentemente, utilizada nas obras de construção civil. Também foram realizadas análises em pastas de consistência normal.

As consistências das pastas foram avaliadas de acordo com a NBR 12128 - MB 3469: Gesso de Construção – Determinação das Propriedades Físicas da Pasta (ABNT, 1991a). As pastas de consistência normal foram determinadas por meio da utilização do Aparelho de Vicat Modificado e foram avaliadas tanto para os gessos de referência quanto para os gessos reciclados, nas diferentes granulometrias e temperaturas de calcinação estudadas.

Dessa forma, utilizando-se os gessos de referência e os gessos reciclados, foram obtidas as seguintes pastas de consistência normal: relação água/gesso de 0,53, para os gessos comerciais (GC1 e GC2) (referência), relação água/gesso de 0,75, para o gesso reciclado com material passante na peneira 3,0 mm (gesso grosso); e relação água/gesso de 0,80, para gesso reciclado com material passante na peneira 0,8 mm (gesso fino).

O Quadro 3.1 apresenta as nomenclaturas adotadas, nessa pesquisa experimental, para as pastas de gesso estudadas (gesso comercial e gesso reciclado).

Quadro 3.1 – Misturas experimentais de gessos comerciais e gessos reciclados

Material	Símbolo	Gesso (g)	Água (g)	Relação água/gesso
Gesso Comercial (Referência)	GC1 - 0,53	1000	530	0,53
	GC1 - 0,70	1000	700	0,70
	GC2 - 0,53	1000	530	0,53
	GC2 - 0,70	1000	700	0,70
Gesso Reciclado - 150 °C Grosso	GR1 – 0,70	1000	700	0,70
	GR1 – 0,75	1000	750	0,75
Gesso Reciclado - 150 °C Fino	GR2 – 0,70	1000	700	0,70
	GR2 – 0,80	1000	800	0,80
Gesso Reciclado - 180 °C Grosso	GR3 – 0,70	1000	700	0,70
	GR3 – 0,75	1000	750	0,75
Gesso Reciclado - 180 °C Fino	GR4 – 0,70	1000	700	0,70
	GR4 – 0,80	1000	800	0,80
Gesso Reciclado - 200 °C Grosso	GR5 – 0,70	1000	700	0,70
	GR5 – 0,75	1000	750	0,75
Gesso Reciclado - 200 °C Fino	GR6 – 0,70	1000	700	0,70
	GR6 – 0,80	1000	800	0,80

GC – Gesso comercial

GR – Gesso reciclado

Também foram estudadas misturas, escolhidas empiricamente, compostas de gesso comercial GC1 (50%) com os gessos reciclados (50%), e do gesso comercial GC2 (50%)

com gessos reciclados (50%). Para essas pastas foram adotadas as seguintes nomenclaturas (Quadro 3.2):

Quadro 3.2 – Misturas experimentais de gesso misto

Material	Símbolo	Gesso (g)	Água (g)	Relação água/gesso
GC1+Gesso Reciclado-150 °C - Fino	GM1	1000	700	0,70
GC1+Gesso Reciclado-180 °C - Fino	GM2	1000	700	0,70
GC1+Gesso Reciclado-200 °C - Fino	GM3	1000	700	0,70
GC1+Gesso Reciclado-150 °C – Grosso	GM4	1000	700	0,70
GC1+Gesso Reciclado-180 °C – Grosso	GM5	1000	700	0,70
GC1+Gesso Reciclado-200 °C - Grosso	GM6	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-150 °C - Fino	GM7	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-180 °C - Fino	GM8	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-200 °C - Fino	GM9	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-150 °C – Grosso	GM10	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-180 °C – Grosso	GM11	1000	700	0,70
GC2+Gesso Reciclado-200 °C - Grosso	GM12	1000	700	0,70

GC1 – Gesso comercial (50%) + Gesso reciclado (50%)

GC2 – Gesso comercial (50%) + Gesso reciclado (50%)

3.4 – Composição Química Provável e Análise Mineralógica

Os teores de água livre, água de cristalização, óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃) foram determinados para os gessos reciclados e, novamente, para os gessos comerciais, de acordo com a NBR 12130 - MB 3471 (ABNT, 1994). Os resultados obtidos para essas composições químicas prováveis dos gessos estudados (gessos comerciais e reciclados) estão apresentadas no Capítulo 4.

Com base nas relações estequiométricas propostas por John e Cincotto (2007) (Quadro 3.3) foram determinados os teores de hemi-hidrato e anidrita contidos nos gessos reciclados; e de hemi-hidrato e gipsita residual para os gessos comerciais (Capítulo 4).

Devido ao fato de a existência de impurezas, tais como RI (resíduos insolúveis), Fe₂O₃, Al₂O₃, P₂O₅ e SiO₂, e os teores de MgCO₃ e CaCO₃ serem muito pequenos, não foi considerado o desconto desses teores (MgCO₃ e CaCO₃) no teor de óxido de cálcio total (CaO_{total}) utilizado no cálculo das composições percentuais prováveis dos gessos, pois não influenciaria de forma significativa na porcentagem final encontrada para o hemi-hidrato e para a anidrita solúvel.

Quadro 3.3 - Relações estequiométricas propostas para o cálculo da composição porcentual de gessos (JOHN; CINCOTTO, 2007).

Sequência de Cálculo
a) $\% \text{MgO} \times 2,09 = \% \text{MgCO}_3$
b) $\% \text{CO}_2 - 1,09 \times \% \text{MgO} = \text{CO}_2$ combinado como CaCO_3
c) $(b) \times 2,27 = \text{CaCO}_3$
d) $\% \text{CaO}_{\text{total}} - 0,56 \times (c) = \% \text{CaO}$ combinados como sulfatos
$X = (d) / \text{SO}_3$
e1) Se $X = 0,7$ a relação CaO/SO_3 é teórica
e2) Se $X > 0,7$ existe CaO em excesso, deduzido de: $(d) - 0,7 \times \text{SO}_3$
e3) Se $X < 0,7$ existe SO_3 em excesso, deduzido de: $\% \text{SO}_3 - 1,43 \times (d)$
e4) Se X é $0,7$ $\% \text{SO}_3 \times 1,7 = \% \text{CaSO}_4$
e5) Se $X < 0,7$, $(\% \text{SO}_3 - e3) + d = \% \text{CaSO}_4$
$Y = \% \text{CaSO}_4 / \% \text{H}_2\text{O} = 15,129$
f1) Se $Y = 15,129$, o teor de sulfato combinado como hemi-hidrato é calculado de:
$\% \text{H}_2\text{O} \times 15,129 = \% \text{CaSO}_4$
O teor de hemi-hidrato é calculado de $\% \text{H}_2\text{O} + f1$
O teor de anidrita é deduzido de $(e4 \text{ ou } e5) - f1$
f2) Se $Y < 15,129$, existe gipsita residual presente, calculada a partir de duas equações e duas incógnitas (não se admite a presença de anidrita)
$\% \text{CaSO}_4 = 0,79 \text{ gipsita} + 0,94 \text{ hemi-hidrato}$
$\% \text{H}_2\text{O} = 0,21 \text{ gipsita} + 0,0622 \text{ hemi-hidrato}$
f3) Se $Y > 15,129$, existe anidrita presente, deduzida de:
$\% \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} = \% \text{H}_2\text{O} \times 15,129$
$\% \text{CaSO}_4 = (\% \text{CaSO}_4 \text{ total}) - 0,938 \times \% \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$

Dessa forma, utilizando-se essa consideração, no Quadro 3.4 é feita a apresentação das relações estequiométricas utilizadas neste trabalho experimental para a determinação da composição porcentual dos gessos apresentadas no Capítulo 4.

A difração de raios-X (DRX) foi realizada qualitativamente, investigando-se as diferentes fases cristalinas presentes nos gessos estudados nesta pesquisa (gessos comerciais e gessos reciclados), por meio da identificação dos picos de difração (ângulo 2θ) dos compostos presentes nos difratogramas.

Quadro 3.4 – Relações estequiométricas utilizadas para a determinação da composição porcentual provável dos gessos estudados neste trabalho experimental.

Sequência de Cálculo
%CaO / %SO₃ = X
se X < 0,7 – Existe SO ₃ em excesso, deduzido de: %SO₃ – 1,43xCaO
%CaSO₄ TOTAL = %SO₃ – (%SO₃ – 1,43xCaO)+CaO
Y = %CaSO₄ TOTAL / %H₂O
se Y > 15,129 – Existe anidrita presente
%CaSO₄.1/2.H₂O = %H₂O x 15,129
%CaSO₄ = %CaSO₄ total – (0,938 x %CaSO₄.1/2.H₂O)
se Y < 15,129 – Existe gipsita residual presente (não se admite a presença de anidrita)
Calculada a partir de duas equações e duas incógnitas
%CaSO₄ TOTAL = 0,79 gipsita + 0,94 hemi-hidrato
%H₂O = 0,21 gipsita + 0,0622 hemi-hidrato

Os ensaios com difração de raios-X (DRX) foram realizados nas instalações do Laboratório Nacional de Luz Síncroton (LNLS), utilizando-se feixe de luz síncroton de alta intensidade para a obtenção dos difratogramas de raios-X. Nesses ensaios, foi realizada uma investigação dos gessos de referência (GC1 e GC2), na matéria prima para obtenção do gesso reciclado (gesso residual), e nos gessos reciclados finos produzidos em diferentes temperaturas de calcinação (150 °C, 180 °C e 200 °C), utilizando-se, para isso, amostras em pó. Para a realização dos ensaios, as amostras foram colocadas em um porta amostra de alumínio, com medida externa de 3,5 cm de diâmetro, diâmetro interno de 2,0 cm e espessura de 2,0 mm.

Por meio da difração de raios-X (DRX) foram identificados os picos de difração para valores do ângulo 2θ, variando de 5° até 60°. Os difratogramas obtidos para as amostras em pó estudadas (gessos comerciais, residual e reciclados) estão apresentados no Capítulo 4.

3.5. – Propriedades Físicas e Mecânicas

As propriedades físicas e mecânicas dos gessos (comercial e reciclado) (Quadro 3.1) foram observadas em pó, em pastas no estado fresco e em pastas no estado endurecido. Foram avaliadas, também, as propriedades das pastas no estado endurecido, obtidas pela mistura de gesso comercial e gesso reciclado na proporção 1 : 1 (um : um) (Quadro 3.2).

Para as propriedades em pó foram observadas: granulometria, módulo de finura, massa específica e massa unitária (ABNT, 1991b). As propriedades em pasta, no estado

fresco, foram: pasta de consistência normal e pega (a pega foi determinada utilizando-se o Aparelho de Vicat) (ABNT, 1991a), e ainda, no estado fresco, as curvas de calor de hidratação (condições semiadiabáticas) e aplicação das pastas em superfícies de blocos cerâmicos.

No estado endurecido, foram determinadas: a resistência à tração na flexão (ASTM C580-85), a resistência à compressão, a dureza (ABNT 1991c) e a resistência de aderência.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas do pó e das pastas dos gessos estudados (gessos comerciais e reciclados) estão apresentados no Capítulo 4.

3.5.1 – Curvas de Evolução de Temperatura

As curvas de evolução de temperatura das pastas de gesso (comercial e reciclado) foram observadas para as diferentes finuras e relações água/gesso, nas misturas apresentadas no Quadro 3.1. A determinação do calor de hidratação foi realizada em condições semiadiabáticas.

Para a obtenção do calor de hidratação, as pastas de gesso foram misturadas em uma argamassadeira. Na cuba de aço inox da argamassadeira, primeiramente, colocou-se a água (na relação água/gesso da pasta a ser produzida – Quadro 3.1); em seguida, o gesso em pó foi polvilhado sobre a mesma para que todo o pó fosse disperso e molhado, evitando-se a formação de grumos. Depois de concluído o polvilhamento do gesso sobre a água, realizou-se a mistura por um período de tempo total de 1 minuto, em velocidade baixa, na argamassadeira (em torno de um movimento circular por segundo).

Imediatamente após a mistura, as pastas de gesso foram colocadas em recipiente apropriado (revestido com isopor) (Figura 3.4); em seguida, foram colocados termopares para a coleta da temperatura dentro da pasta (durante o período de hidratação e endurecimento do gesso). O equipamento utilizado para a coleta de dados foi um data logger Testo 177-T4 com termopares Testo TP tipo K de ponta de imersão flexível.

No período de obtenção dos dados, foram utilizados 3 (três) termopares distribuídos em pontos diferentes da pasta de gesso. Para a apresentação da curva de hidratação dos gessos estudados, foi considerado, como valor de leitura da elevação de temperatura, a média aritmética da leitura dos três termopares.

As curvas de evolução de temperatura obtidas para as pastas de gesso estudadas (gessos comerciais e reciclados) estão apresentadas no Capítulo 4.

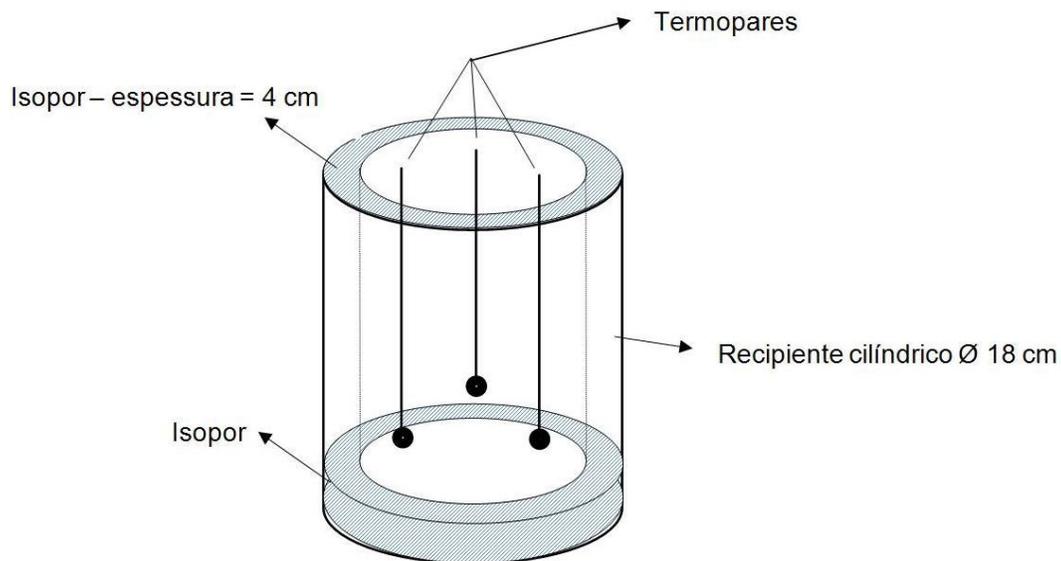


Figura 3.4 – Recipiente plástico com revestimento de isopor para a coleta de temperaturas de hidratação.

3.5.2 – Avaliação da Superfície do Revestimento de Gesso em Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural

Para antever o desempenho das pastas de gesso reciclado como revestimento interno de paredes, estas foram aplicadas na superfície de blocos cerâmicos de alvenaria (foram utilizados dois blocos cerâmicos para cada pasta de gesso observada). O desempenho dessas pastas foi analisado, observando-se o seu comportamento com relação ao tempo de aplicação, ao acabamento superficial final e à facilidade de aplicação das pastas.

A aplicação e o acabamento superficial das pastas foram realizados em camada única com espessura de 5 mm (± 2 mm), com desempenadeira de aço, observando-se as dificuldades na aplicação de cada pasta (o tempo de aplicação foi contado a partir da mistura da água com o gesso) (Figura 3.5).

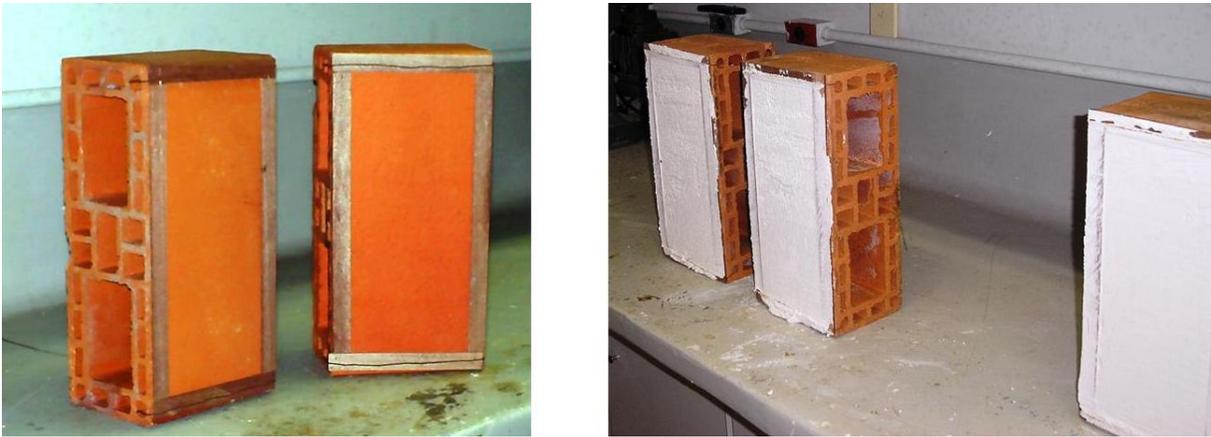


Figura 3.5 – Blocos cerâmicos de alvenaria antes e depois da aplicação das pastas de gesso (comercial e reciclado) como revestimento.

Após a aplicação, foi feita uma análise quanto ao desempenho de cada pasta aplicada no bloco cerâmico, comparando-se as pastas de gesso reciclado, com diferentes granulometrias, com as pastas produzidas com gesso comercial. Em seguida, quando as pastas já se apresentavam no estado endurecido, foi feita, visualmente, uma análise comparativa entre as pastas utilizadas, observando-se o acabamento superficial obtido.

Os resultados obtidos para a avaliação do comportamento das pastas de gesso estudadas (gessos comerciais e reciclados) estão apresentados no Capítulo 4.

3.5.3 – Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos gessos avaliadas foram: resistência à compressão e dureza, de acordo com a NBR 12129 - MB 3470 (ABNT, 1991c); resistência à tração na flexão de acordo com a ASTM C580-85; e a resistência de aderência.

A resistência à compressão e a dureza (Figuras 3.6 e 3.7) foram determinadas, utilizando-se corpos de prova cúbicos de 50x50x50 mm, e a resistência à tração na flexão (Figura 3.8) foi determinada, utilizando-se corpos de prova prismáticos de 40x40x160 mm. A dureza foi determinada na superfície lateral dos mesmos corpos de prova utilizados para a determinação da resistência à compressão de acordo com a NBR 12129 - MB 3470 (ABNT, 1991c). Após a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório sem controle da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar.

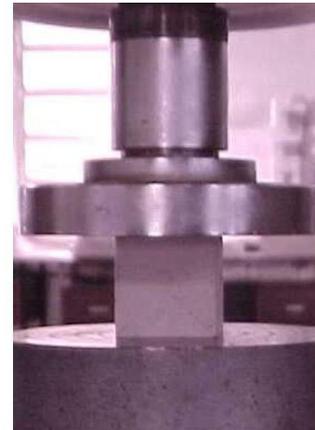


Figura 3.6 - Ensaio de resistência à compressão em corpo de prova cúbico 50x50x50 mm.

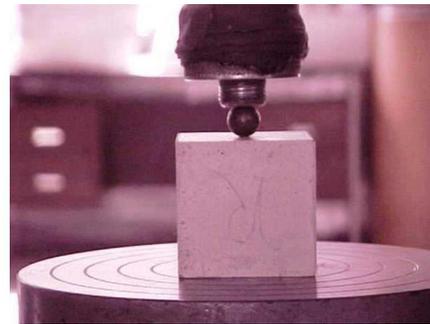


Figura 3.7 – Ensaio de dureza em corpo de prova cúbico 50x50x50 mm.

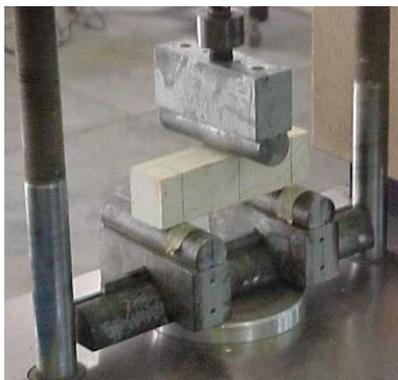


Figura 3.8 – Ensaio de resistência à tração na flexão em corpo de prova prismático de 40x40x160 mm.

Para a determinação de cada uma dessas propriedades, foram moldados e ensaiados três corpos de prova para a resistência à compressão e dureza (ABNT, 1991c) e quatro corpos de prova para a resistência à tração (ASTM C580-85). O resultado final obtido para cada uma das propriedades estudadas foi a média dos resultados individuais, para cada idade de realização de ensaios. As idades utilizadas para esses ensaios foram 3, 7, 28, 90 e 180 dias para as pastas do Quadro 3.1. Para as pastas do Quadro 3.2, as idades utilizadas foram 3, 7 e 28 dias (nestas pastas não se efetuou o ensaio de resistência à tração na flexão).

As resistências de aderência das pastas de gesso foram verificadas nos mesmos blocos utilizados para a observação visual do revestimento em blocos cerâmicos. Os ensaios de aderência foram realizados, promovendo-se o descolamento na interface base revestimento, por meio da aplicação de uma tensão de tração, uniformemente distribuída, na interface das pastas de gesso e na superfície na qual a pasta estava aderida (Figura 3.9). Para isso, foram utilizadas pastilhas metálicas com 50 mm de diâmetro (com dispositivo central para fixação da pastilha ao equipamento de aplicação da carga de tração), que foram coladas na superfície das pastas de gesso (antes de se colar as pastilhas na superfície das pastas de gesso, realizou-se o corte das pastas com serra copo no mesmo diâmetro de cada pastilha), para acoplamento do equipamento de medição da carga de tração aplicada (Figura 3.10).

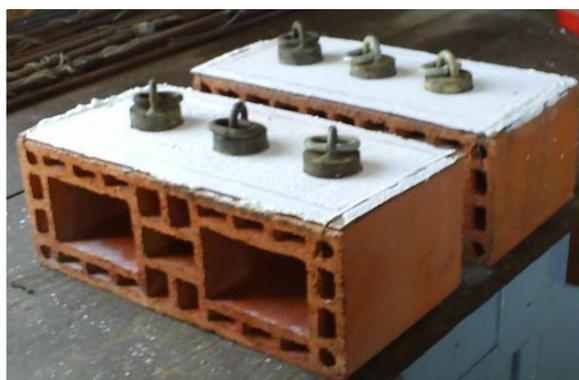


Figura 3.9 – Corpos de prova para a realização de ensaio de resistência de aderência.

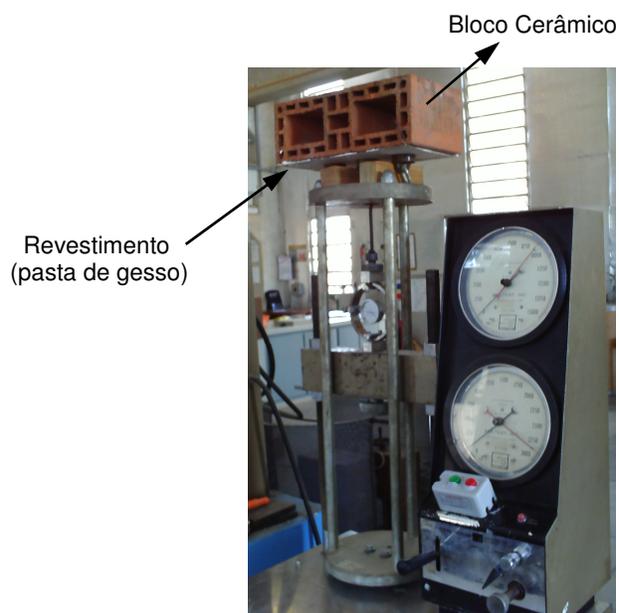


Figura 3.10 – Ensaio de resistência de aderência.

As resistências de aderência foram determinadas em pastas com relação água/gesso 0,70, por ser esta uma relação frequentemente utilizada na aplicação de gesso como revestimento interno de paredes nas obras de construção civil.

Foram moldados e ensaiados seis corpos de prova (seis pastilhas metálicas) para cada uma das pastas estudadas com relação água/gesso de 0,70 (Quadro 3.1).

O resultado final obtido para as resistências de aderência é a média dos resultados individuais. A idade utilizada para a realização desse ensaio foi de 150 dias.

Os dados obtidos, em laboratório, para as propriedades mecânicas das pastas estudadas, foram analisados por estatística descritiva e por comparação entre as médias pelo Teste de Tukey. Essa análise estatística foi aplicada separadamente em cada idade de obtenção de resultados (3, 7, 28, 90 e 180 dias) e também aplicada separadamente para cada relação água/gesso estudada (relação água/gesso 0,70 e relação água gesso das pastas de consistência normal), em cada uma das propriedades mecânicas observadas (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza) para que os resultados se apresentassem em um intervalo de confiança de 95% (Apêndices A, B e C).

A estatística descritiva teve como objetivos a organização e a descrição dos dados experimentais. A comparação entre as médias pelo Método de Tukey ao nível de 95% de probabilidade teve como objetivo determinar diferenças significativas entre as médias obtidas em cada idade de observação de resultados de cada propriedade mecânica.

Entretanto, deve-se destacar que esse tratamento estatístico adotado é um refinamento realizado após a aplicação de todos os dados encontrados para as propriedades mecânicas em um tratamento de análise de variância multifatorial (ANOVA) para todos os fatores possuindo um intervalo de confiança de 95% de probabilidade (Apêndice E). Nessa análise de variância multifatorial, os fatores de análise foram grau de moagem, temperatura de calcinação, relação água/gesso e idade de obtenção de resultados para as propriedades mecânicas.

Devido ao critério de observação de resultados utilizado para as pastas de gesso ser a observação separadamente de cada propriedade mecânica e em cada idade de obtenção de resultados em separado, a análise estatística utilizada para as análises das propriedades mecânicas utilizadas nessa pesquisa foi a comparação de médias pelo Método de Tukey, Entretanto no Apêndice E é feita a apresentação dos resultados obtidos para a análise de variância multifatorial.

Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas das pastas dos gessos estudadas (gessos comerciais e reciclados) estão apresentados no Capítulo 4.

3.6 – Microestrutura

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para observar a microestrutura das pastas de gesso estudadas, no que diz respeito à formação de seus compostos hidratados. As observações foram realizadas com o objetivo de se avaliar a estrutura e a formação dos compostos hidratados, principalmente, para os gessos reciclados.

Assim, a microestrutura das pastas de gesso foi observada em seções de amostras fraturadas, extraídas de corpos de prova de pastas moldadas para esse fim, levadas ao microscópio eletrônico de varredura (Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM 5900 – LV) (Figura 3.11).

Para tanto, foram feitas imagens formadas por elétrons secundários (SE), em magnitudes que variaram de 1000 a 5000 vezes.

Para a obtenção das amostras fraturadas analisadas no microscópio eletrônico foram moldados corpos de prova de seção circular com diâmetro de 10 cm e espessura de 1 cm para todas as pastas de gessos estudadas nesta pesquisa. Esses corpos de prova foram quebrados utilizando-se um martelo, nas idades de 28 e 180 dias, e de seu interior foram retiradas as amostras fraturadas para ensaio de microestrutura. Essas amostras fraturadas foram retiradas do interior dos corpos de prova quebrados com auxílio de uma pinça e foram

transportadas dentro de recipientes plásticos herméticamente fechados até o local de realização do ensaio.



Figura 3.11 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL - JSM 5900 LV (low vacuum) (LNLS – Campinas).

Essa etapa da pesquisa foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica - LME do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), localizado na cidade de Campinas. Foram analisadas pastas de gesso produzidas com gessos de referência (comercial), gessos reciclados e pastas compostas por 50% de gesso comercial e 50% de gesso reciclado, na sua mistura.

Para a observação das amostras das pastas de gesso fraturadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi feita a aplicação de uma película fina de carbono, na superfície dos corpos de prova, para a condução dos elétrons no MEV (Figura 3.12). Após essa etapa, os corpos de prova foram colocados no interior da câmara de vácuo do MEV, para a realização das microscopias (Figura 3.13).



Figura 3.12 – Sputter Coater BAL-TEC SCD 050 (LNLS – Campinas).

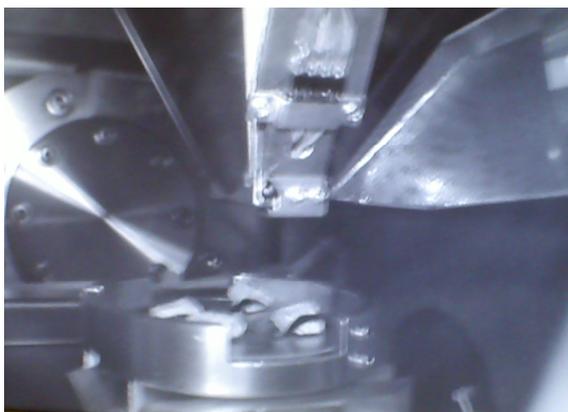


Figura 3.13 – Corpos de prova de pastas de gesso fraturadas no interior da câmara de vácuo do MEV - JSM 5900 LV (LNLS – Campinas).

A estrutura interna de formação dos compostos hidratados, nas pastas de gesso, foi observada nas idades de 28 e 180 dias para as pastas formadas somente de gesso comercial (GC1 e GC2) e também para as pastas produzidas com gessos reciclados. Para as pastas formadas, utilizando-se uma mistura de 50% de gesso comercial (GC1 e GC2) e 50% de gesso reciclado, foram feitas observações na idade de 28 dias.

As microscopias obtidas para os gessos estudados estão apresentadas no Capítulo 4.

4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa. Essa apresentação foi organizada da seguinte forma:

- Composição porcentual dos gessos estudados (análise quantitativa);
- Difração de raios-X (análise qualitativa);
- Calorimetria
- Caracterização dos gessos, e propriedades físicas e mecânicas;
- Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura;
- Avaliação da aplicação do revestimento de gesso em superfícies de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural.

4.1 – Composição Química e Minerológica

4.1.1 – Propriedades Químicas (Análise Quantitativa)

O Quadro 4.1 apresenta os teores de água livre, água de cristalização, óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃) encontrados para os gessos comerciais e gessos reciclados estudados neste trabalho experimental.

A apresentação das exigências estabelecidas pela NBR 13207 – Gesso para Construção Civil - Especificação (ABNT, 1994) com relação aos teores de água livre, água de cristalização, óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃) dos gessos comerciais e gessos reciclados também estão relatadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características químicas dos gessos comerciais e gessos reciclados – NBR 12130 – MB 3471 (ABNT, 1991).

Determinações Químicas	Propriedades Químicas dos Gessos Estudados (%)					Limites NBR 13207 (%)
	GC1	GC2	150 °C	180 °C	200 °C	
Água livre	1,2	1,3	0,8	0,8	0,8	< 1,3
Água de cristalização	6,2	6,1	5,6	5,0	4,9	4,2 – 6,2
Óxido de cálcio (CaO)	31,8	35,1	36,5	33,5	40,4	> 38
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	73,4	67,0	63,9	64,5	61,9	> 58

Os gessos comerciais e os gessos reciclados, com exceção do gesso desidratado na temperatura de 200 °C, não apresentaram o valor mínimo de 38% para o teor de óxido de cálcio (CaO). Para as demais propriedades químicas, todos os gessos atenderam os critérios exigíveis para os gessos de construção civil.

O teor de água combinada (água de cristalização) nos gessos vai depender da composição do gesso: anidro, hemi-hidrato ou di-hidrato (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988). Portanto, o teor de água de cristalização apresenta influência na quantidade dos constituintes SO₃ (anidrido sulfúrico) e CaO (óxido de cálcio) assim, por meio do conhecimento do teor de água combinada contida no gesso John e Cincotto (2007) propõem uma hipótese simplificadora que relaciona o teor de água combinada com os compostos constituintes nos gessos (gipsita, hemi-hidrato e anidrita) (Quadro 4.2).

Quadro 4.2 – Hipótese simplificada que relaciona a H₂O combinada com os compostos constituintes presentes nos gessos (JOHN; CINCOTTO, 2007).

H ₂ O Combinada – água de cristalização	Compostos constituintes nos gessos
se H ₂ O < 6,2%	há anidrita e hemi-hidrato
se H ₂ O > 6,2%	há gipsita e hemi-hidrato
se H ₂ O = 6,2%	há somente hemi-hidrato

Com os teores encontrados para a água combinada (água de cristalização) dos gessos (Quadro 4.1) pode-se fazer uma estimativa com relação aos constituintes presentes por meio dessa hipótese simplificada. Portanto, os gessos comerciais (GC1 e GC2) são constituídos essencialmente de hemi-hidrato e os gessos reciclados desidratados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C apresentam em sua constituição: hemi-hidrato e anidrita solúvel (anidrita III).

Com base em relações estequiométricas das diferentes fases desses gessos foi calculada a composição provável para os gessos estudados neste trabalho experimental.

Para a obtenção dos teores de hemi-hidrato, anidrita solúvel e gipsita residual foram utilizadas como referência as relações estequiométricas apresentadas por John e Cincotto (2007) para o cálculo da composição porcentual provável de gessos de construção (Quadro 3.4 – Capítulo 3).

Por meio da utilização do Quadro 3.5, apresentado no Capítulo 3, foi calculado os teores percentuais prováveis dos gessos reciclados e comerciais estudados neste trabalho experimental (Quadro 4.3 a 4.7).

A consideração adotada para a realização desse cálculo se deve ao fato das porcentagens de MgO, MgCO₃ e CaCO₃ presentes no gesso serem pequenas. Em média, esses valores para os gessos nacionais são de, aproximadamente, 0,07% até 0,59% para o MgO, 0,15% até 1,00% para o MgCO₃ e 1,72% até 3,71% para o CaCO₃. A porcentagem de impurezas e resíduos insolúveis (RI) é de, aproximadamente, 0,83% (HENAO, 1997; ANTUNES, 1999; DE MILITO, 2001; CARVALHO, 2005; MILITO, 2007).

O Quadro 4.3 apresenta a sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita presente no gesso reciclado calcinado na temperatura de 150 °C.

Quadro 4.3 – Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita – Gesso reciclado 150 °C.

Sequência de Cálculo – Gesso Reciclado 150 °C
$\%CaO / \%SO_3 = 36,5/63,9 = 0,57 \Rightarrow X < 0,7$
<p>se $X < 0,7$ – Existe SO₃ em excesso, deduzido de: $\%SO_3 - 1,43xCaO$</p>
$\%SO_3 - 1,43xCaO = 63,9 - 1,43 \times 36,5 = \underline{11,7 \%}$
$\%CaSO_4_{TOTAL} = \%SO_3 - (\%SO_3 - 1,43xCaO) + CaO$
$\%CaSO_4_{TOTAL} = 63,9 - 11,7 + 36,5 = \underline{88,6 \%}$
$Y = \%CaSO_4_{TOTAL} / \%H_2O$
$Y = 88,6 / 5,6 = \underline{15,83} \quad Y > 15,129$
<p>se $Y > 15,129$ – Existe anidrita presente</p>
$\%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O = \%H_2O \times 15,129 = 5,6 \times 15,129 = \underline{84,7 \%} \text{ (% Hemi-hidrato)}$
$\%CaSO_4 = \%CaSO_4_{total} - (0,938 \times \%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O)$
$\%CaSO_4 = 88,7 - (0,938 \times 84,7) = \underline{9,3 \%} \text{ (% Anidrita)}$

No Quadro 4.4 é feita a apresentação da sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita presente no gesso reciclado calcinado na temperatura de 180 °C.

Quadro 4.4 – Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita – Gesso reciclado 180 °C.

Sequência de Cálculo – Gesso Reciclado 180 °C
$\%CaO / \%SO_3 = 33,5/64,5 = 0,52 \Rightarrow \underline{X < 0,7}$
<p>se $X < 0,7$ – Existe SO_3 em excesso, deduzido de: $\%SO_3 - 1,43xCaO$</p>
$\%SO_3 - 1,43xCaO = 64,5 - 1,43 \times 33,5 = \underline{16,6 \%}$
$\%CaSO_4_{TOTAL} = \%SO_3 - (\%SO_3 - 1,43xCaO) + CaO$
$\%CaSO_4_{TOTAL} = 64,5 - 16,6 + 33,5 = \underline{81,4 \%}$
$Y = \%CaSO_4_{TOTAL} / \%H_2O$
$Y = 81,4 / 5 = \underline{16,28} \quad Y > 15,129$
<p>se $Y > 15,129$ – Existe anidrita presente</p>
$\%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O = \%H_2O \times 15,129 = 5 \times 15,129 = \underline{75,6 \%} \text{ (% Hemi-hidrato)}$
$\%CaSO_4 = \%CaSO_4_{total} - (0,938 \times \%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O)$
$\%CaSO_4 = 81,4 - (0,938 \times 76,6) = \underline{9,5 \%} \text{ (% Anidrita)}$

No Quadro 4.5 é feita a apresentação da sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita presente no gesso reciclado calcinado na temperatura de 200 °C.

Quadro 4.5 – Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e anidrita – Gesso reciclado 200 °C.

Sequência de Cálculo – Gesso Reciclado 200 °C
$\%CaO / \%SO_3 = 40,4/61,9 = 0,65 \Rightarrow X < 0,7$
<p>se $X < 0,7$ – Existe SO_3 em excesso, deduzido de: $\%SO_3 - 1,43xCaO$</p>
$\%SO_3 - 1,43xCaO = 61,9 - 1,43 \times 40,4 = \underline{4,1 \%}$
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = \%SO_3 - (\%SO_3 - 1,43xCaO) + CaO$
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = 61,9 - 4,1 + 40,4 = \underline{98,2 \%}$
$Y = \%CaSO_{4\ TOTAL} / \%H_2O$
$Y = 98,2 / 4,9 = \underline{20} \quad Y > 15,129$
<p>se $Y > 15,129$ – Existe anidrita presente</p>
$\%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O = \%H_2O \times 15,129 = 4,9 \times 15,129 = \underline{74,1\%} \text{ (% Hemi-hidrato)}$
$\%CaSO_4 = \%CaSO_{4\ total} - (0,938 \times \%CaSO_4 \cdot 1/2.H_2O)$
$\%CaSO_4 = 98,2 - (0,938 \times 74,1) = \underline{28,7 \%} \text{ (% Anidrita)}$

O Quadro 4.6 apresenta a sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e gipsita residual presente no gesso comercial GC1.

Quadro 4.6 – Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e gipsita residual – GC1.

Sequência de Cálculo – GC1
$\%CaO / \%SO_3 = 31,8/73,4 = 0,43 \Rightarrow \underline{X < 0,7}$
<p>se $X < 0,7$ – Existe SO_3 em excesso, deduzido de: $\%SO_3 - 1,43xCaO$</p>
$\%SO_3 - 1,43xCaO = 73,4 - 1,43 \times 31,8 = \underline{27,9 \%}$
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = \%SO_3 - (\%SO_3 - 1,43xCaO) + CaO$
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = 73,4 - 27,9 + 31,8 = \underline{77,3 \%}$
$Y = \%CaSO_{4\ TOTAL} / \%H_2O$
$Y = 77,3 / 6,2 = \underline{12,46} \quad Y < 15,129$
<p>se $Y < 15,129$ – Existe gipsita residual presente (não se admite a presença de anidrita)</p>
<p>Calculada a partir de duas equações e duas incógnitas</p>
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = 0,79 \text{ gipsita} + 0,94 \text{ hemi-hidrato} \Rightarrow 77,3 = 0,79 \text{ gipsita} + 0,94 \text{ hemi-hidrato}$
$\%H_2O = 0,21 \text{ gipsita} + 0,0622 \text{ hemi-hidrato} \Rightarrow 6,2 = 0,21 \text{ gipsita} + 0,0622 \text{ hemi-hidrato}$
<p>Resolvendo o sistema de equações: gipsita = 7 % Hemi-hidrato = 76 %</p>

E no Quadro 4.7 tem-se a sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e gipsita residual presente no gesso comercial GC2.

Quadro 4.7 – Sequência de cálculo para obtenção da composição provável de hemi-hidrato e gipsita residual – GC2.

Sequência de Cálculo – GC2	
$\%CaO / \%SO_3 = 35,1/67 = 0,52 \Rightarrow X < 0,7$	
se $X < 0,7$ – Existe SO_3 em excesso, deduzido de: $\%SO_3 - 1,43xCaO$	
$\%SO_3 - 1,43xCaO = 67 - 1,43 \times 35,1 = \underline{16,8 \%}$	
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = \%SO_3 - (\%SO_3 - 1,43xCaO) + CaO$	
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = 67 - 16,8 + 35,1 = \underline{85,3 \%}$	
$Y = \%CaSO_{4\ TOTAL} / \%H_2O$	
$Y = 85,3 / 6,1 = \underline{13,98} \quad Y < 15,129$	
se $Y < 15,129$ – Existe gipsita residual presente (não se admite a presença de anidrita)	
Calculada a partir de duas equações e duas incógnitas	
$\%CaSO_{4\ TOTAL} = 0,79 \text{ gipsita} + 0,94 \text{ hemi-hidrato} \Rightarrow 85,3 = 0,79 \text{ gipsita} + 0,94 \text{ hemi-hidrato}$	
$\%H_2O = 0,21 \text{ gipsita} + 0,0622 \text{ hemi-hidrato} \Rightarrow 6,1 = 0,21 \text{ gipsita} + 0,0622 \text{ hemi-hidrato}$	
Resolvendo o sistema de equações: gipsita = 2,7 % Hemi-hidrato = 89,1 %	

O Quadro 4.8 apresenta os resultados obtidos nos Quadros 4.3 a 4.7 para a composição percentual provável presente nos gessos estudados nesta pesquisa.

Quadro 4.8 – Composição percentual provável dos gessos comerciais e reciclados estudados neste trabalho experimental.

Compostos Estimados	Composição Estimada dos Gessos Estudados (%)				
	GC1	GC2	150 °C	180 °C	200 °C
Hemi-hidrato (CaSO ₄ .1/2.H ₂ O)	76	89,1	84,7	75,6	74,1
Anidrita Solúvel (CaSO ₄)	-	-	9,3	9,5	28,7
Gipsita Residual	7	2,7	-	-	-

Os resultados apresentados no Quadro 4.8 corroboram com as informações encontradas na literatura, na qual apresenta o surgimento de anidrita solúvel a partir de uma temperatura de calcinação de 150 °C, tendo seu percentual elevado com o aumento da temperatura de calcinação (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988a; DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007).

Da análise do Quadro 4.1 tem-se um indicativo de que quanto menor for o percentual de CaO presente, maior será a quantidade de SO₃ em excesso no gesso. Assim, o SO₃ em excesso não permite o aumento percentual nos teores de hemi-hidrato e anidrita.

De acordo com as normas americanas para especificações de gesso para revestimento, ASTM C22/C22M-00 (ASTM, 2000a) e ASTM C28/C28M-00 (ASTM, 2000b) a quantidade de hemi-hidrato presente nos gessos após a calcinação não pode ser inferior a 66%.

Os valores percentuais obtidos para os gessos comerciais (Quadro 4.8) estão próximos aos valores encontrados na literatura para o gesso comercial brasileiro (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988a; ANDRADE, 1999; NITA et al., 2004; CARVALHO, 2005; DE MILITO, 2006; RIBEIRO, 2006; JOHN; CINCOTTO, 2007).

Para os gessos reciclados, os constituintes obtidos (Quadro 4.1) são os mesmos encontrados por Nita et al. (2004), Carvalho (2005) e Ribeiro (2006) em estudos utilizando gessos reciclados. Entretanto, os valores obtidos para os teores de hemi-hidrato e anidrita solúvel (Quadro 4.7) foram diferentes daqueles obtidos por Nita et al. (2004) (hemi-hidrato = 93%, anidrita = 7%) e Ribeiro (2006) (hemi-hidrato = 92,19%).

Essa diferença pode ser atribuída ao fato desses pesquisadores terem utilizado uma menor finura nos gessos reciclados. O tamanho das partículas do gesso reciclado por Nita et al. (2004) foi menor do que o tamanho das partículas do gesso comercial de referência. Ribeiro (2006) produziu um gesso reciclado com tamanho de partículas similar ao do gesso comercial de referência utilizado. As diferenças podem ser atribuídas também ao processo de calcinação utilizado por esses pesquisadores (ciclo de calcinação e temperaturas).

Após a realização dos cálculos para a obtenção da composição percentual provável dos gessos se constata que os constituintes, de acordo com a hipótese simplificada proposta por John e Cincotto (2007), correspondem aos compostos presentes na composição dos gessos estudados (Quadro 4.8).

Deve-se destacar que esta informação é de caráter qualitativo, pois não há como identificar o teor percentual de cada composto presente nos gessos somente utilizando a proposta simplificada.

A exceção observada para a hipótese simplificada foi o GC1, pois de acordo com o Quadro 4.2, por ter um teor de água de cristalização igual a 6,2% não deveria apresentar teor de gipsita residual em sua composição. Nessa situação, a existência de gipsita residual pode ser atribuída ao baixo teor de CaO que acarreta um elevado teor de anidrido sulfúrico (SO₃) presente em sua composição.

Dos resultados aqui encontrados para a composição química dos gessos, deve ser destacado que um processo industrial mais apurado proporciona uma maior constituição de hemi-hidrato nos gessos produzidos, como observado para o gesso comercial GC2. Entretanto, para os gessos reciclados, o fato de ter anidrita presente na sua constituição não é impedimento para a sua utilização como revestimento interno de paredes na construção civil, pois mesmo a anidrita sendo mais reativa do que o hemi-hidrato, ela se transforma em hemi-hidrato com a umidade do ar.

A hidratação da anidrita III (anidrita solúvel) em hemi-hidrato é chamada de “estabilização” do gesso, e essa “estabilização” ocorre após 12 horas de armazenamento do produto em atmosfera de 80% de umidade relativa do ar, e que uma parcela dessa fase pode estar presente no gesso por ocasião da sua utilização (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988a; JOHN; CINCOTTO, 2007).

Portanto, de acordo com os resultados encontrados para a análise química, tanto os gessos comerciais (GC1 e GC2) quanto os gessos reciclados, desidratados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C satisfizeram as exigências das normas ASTM C22/C22M-00 (ASTM, 2000a) (especificações técnicas para gipsita) e ASTM C28/C28M-00 (ASTM, 2000b) (especificações técnicas para gesso de construção), onde se especifica que a quantidade de hemi-hidrato presente nos gessos para aplicação em construções, após a calcinação, não pode ser inferior a 66%.

Os resultados encontrados na análise química quantitativa dos gessos reciclados também confirmam as informações obtidas na literatura, em que o surgimento de anidrita solúvel (CaSO₄) é maior com o aumento da temperatura de calcinação. Nesta pesquisa, foi observado que com o aumento da temperatura de calcinação (180 °C e 200 °C), ocorreu aumento no percentual de anidrita solúvel presente nesses gessos.

A normalização nacional apresenta critérios diferenciados daqueles estabelecidos pelas normas da ASTM, (ASTM, 2000). A norma brasileira estabelece faixas de percentual de teores de água livre, água de cristalização, óxido de cálcio (CaO) e anidrido sulfúrico (SO₃) que devem estar contidos na composição dos gessos para aplicação na construção civil.

Por meio dos dados obtidos em laboratório, tanto para os gessos comerciais (GC1 e GC2) quanto os gessos reciclados a 150 °C (CaO = 36,5%) e 180 °C (CaO = 33,5%), com exceção do gesso desidratado na temperatura de 200 °C (CaO = 40,4%), eles não apresentaram o valor mínimo de 38% para o teor de óxido de cálcio (CaO) estabelecido pela norma brasileira. Para as demais propriedades químicas, todos os gessos atenderam os critérios exigíveis pela NBR 13207 (ABNT, 1994).

Mesmo não tendo atendido a um dos critérios normativos com relação à composição química para os gessos de construção nacional (teor de óxido de cálcio pouco abaixo do mínimo estabelecido pela norma), isso não pode ser impedimento para que o gesso reciclado desta pesquisa seja inapto a ser utilizado como gesso de construção, pois os gessos comerciais encontrados no mercado (GC1 e GC2) também não atenderam ao critério da norma nacional. Mesmo assim, estão disponíveis no mercado para serem adquiridos e utilizados em construções.

4.1.2 – Propriedades Mineralógicas – Difração de Raios-X

Nas Figuras 4.1 até 4.6, estão apresentados os resultados para as propriedades mineralógicas obtidas conforme item 3.4 (Capítulo 3). Neste trabalho a difração de raios-X foi realizada de forma qualitativa com o objetivo de se verificar os compostos minerais presentes nos gessos estudados.

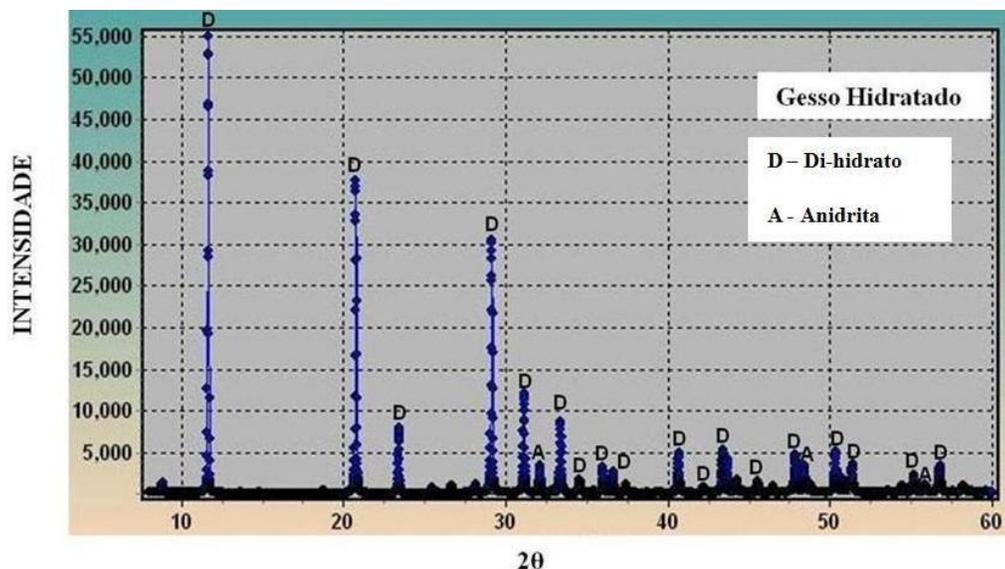


Figura 4.1 – Difratograma - Gesso Hidratado – Gesso Moído. A - Anidrita (CaSO_4) e D – Di-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Na Figura 4.1 é apresentado o difratograma do gesso hidratado. Nesse difratograma (gesso residual) é observado que o resíduo do gesso de construção é composto essencialmente por di-hidrato ($D = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Foram utilizadas as seguintes nomenclaturas para identificar os compostos minerais presentes nos gessos em pó: H = Hemi-hidrato, A = Anidrita e D = Di-hidrato.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam, respectivamente, os difratogramas dos gessos comerciais anidros (GC1 e GC2). As Figuras 4.4 a 4.6 apresentam, respectivamente, os difratogramas dos gessos reciclados desidratados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C.

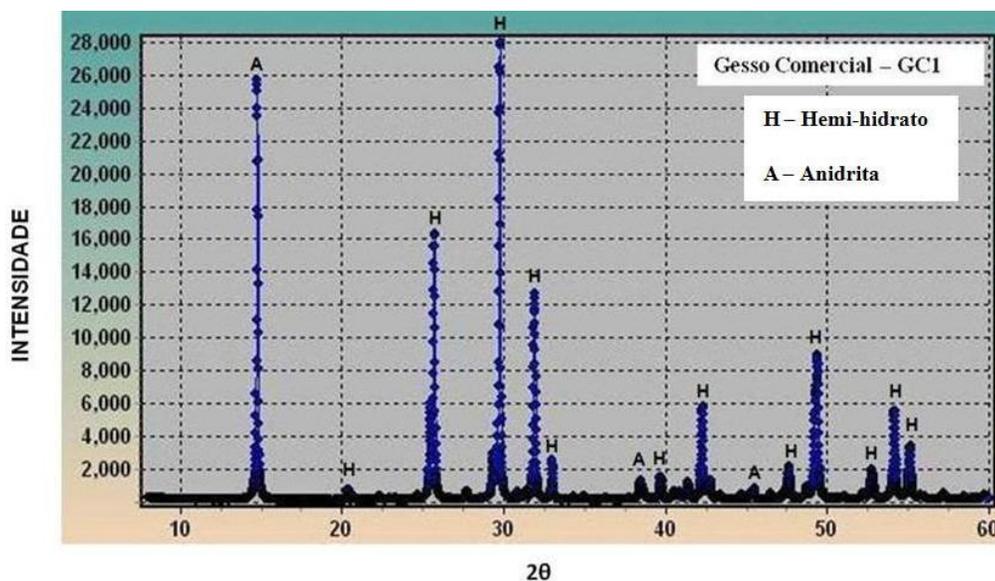


Figura 4.2 – Difratograma - Gesso Comercial – GC1 (anidro).

Nas Figuras 4.2 e 4.3, foi observado que os compostos presentes nos gessos comerciais são os mesmos, ou seja, os difratogramas desses gessos demonstram que as amostras são compostas essencialmente por hemi-hidrato, pois foram identificados os picos característicos de bassanita (composto mineral do hemi-hidrato = $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ($H = \beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Essa informação também foi identificada no item 4.1.1, Tabela 4.1 e Quadro 4.7. Nessas amostras de gessos comerciais (GC1 e GC2) também foram detectados picos de anidrita ($A = \text{CaSO}_4$), nos ângulos 2θ .

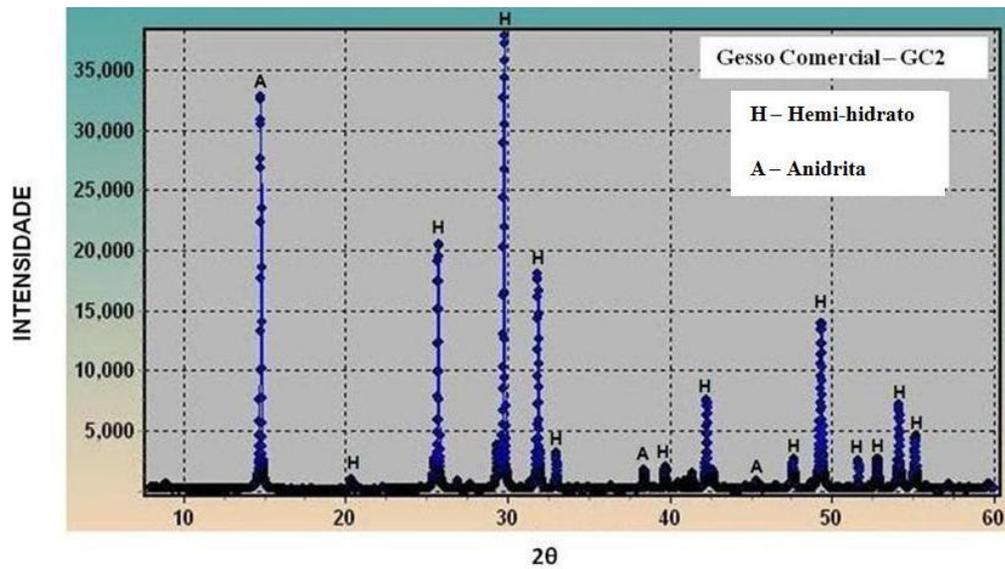


Figura 4.3 – Difratoograma - Gesso Comercial – GC2 (anidro).

Nas Figuras 4.4 a 4.6 observam-se os mesmos compostos identificados para os gessos comerciais: Hemi-hidrato ($H = \beta \text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e Anidrita ($A = \text{CaSO}_4$).

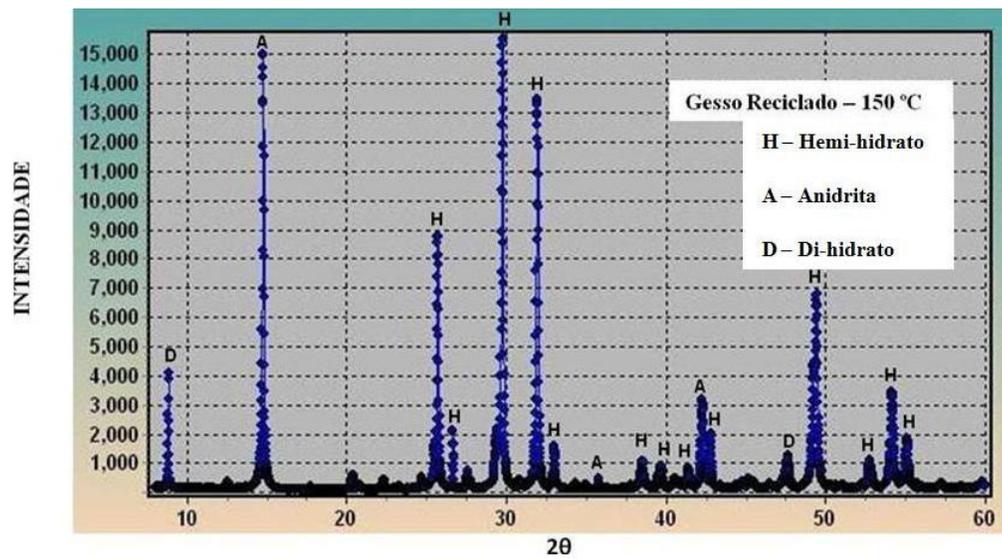


Figura 4.4 – Difratoograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 150 °C

A única diferença observada entre os gessos comerciais e os gessos reciclados está na intensidade dos picos e na presença de di-hidrato. Nas amostras de gesso comercial os picos são mais intensos, indicativo de uma melhor desidratação da gipsita.

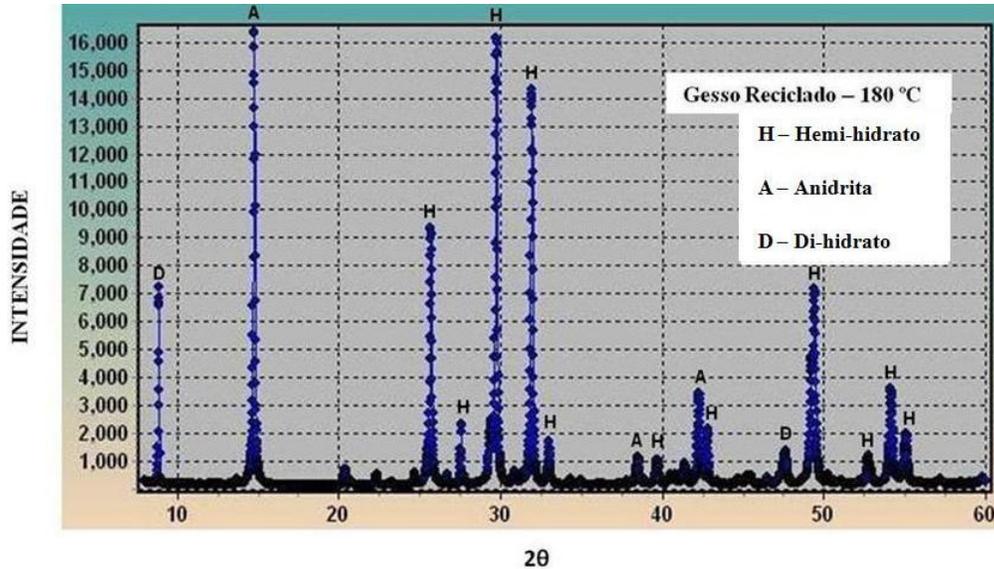


Figura 4.5 – Difratograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 180 °C

Nos difratogramas dos gessos reciclados (Figuras 4.4 a 4.6) também foi identificado a presença de di-hidrato ($D = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) evidenciando que não ocorreu sua desidratação completa durante a calcinação, mas isso não ficou evidente pelos cálculos de composição teórica apresentado no item 4.1.1.

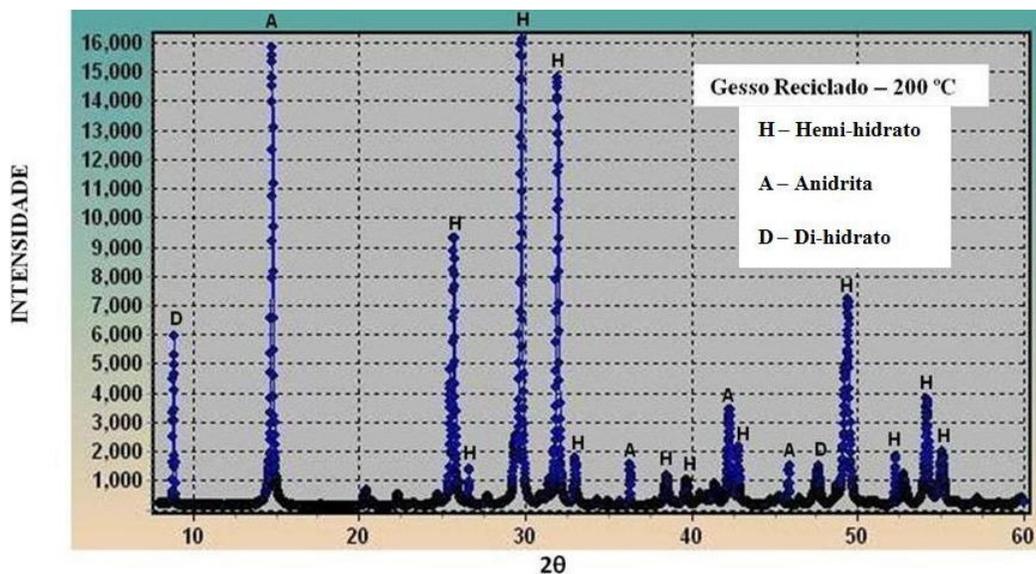


Figura 4.6 – Difratograma gesso reciclado desidratado em temperatura de 200 °C

Cabe salientar que no processo de calcinação industrial também surge uma porcentagem de material não calcinado (di-hidratado), pois em algumas regiões do forno, a temperatura não atinge o valor necessário para dissociação em hemi-hidrato, conforme se observa nas Figuras 4.2 e 4.3.

Os resultados encontrados estão de acordo com aqueles obtidos por difração de raios-X em resíduos de placas de gesso desidratados na temperatura de 100 °C (BARDELLA; CAMARINI, 2006b).

Carvalho (2005), em estudo com gesso reciclado desidratado na temperatura de 100 °C, com a mesma finura do gesso comercial, obteve resultados similares para a difração de raios-X. Nesse caso, entretanto, tanto para gesso comercial quanto para o gesso reciclado a intensidade dos picos nos difratogramas foi similar. Nita et al. (2004) e Ribeiro (2006) também encontraram os mesmos resultados em difratogramas de gessos reciclados calcinados na temperatura de 140 °C.

Portanto, a intensidade dos picos de difração será mais acentuada e mais próxima dos picos encontrados para os gessos comerciais (referência) quanto mais efetivo for o processo de calcinação utilizado na obtenção dos gessos reciclados.

Assim, com relação à estrutura cristalina, as análises dos resultados dos difratogramas obtidos nos ensaios de difração de raios-X demonstraram que os compostos presentes nos gessos comerciais (GC1 e GC2) foram os mesmos compostos encontrados nos gessos reciclados, desidratados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C exceto pela maior intensidade do pico de di-hidrato nos gessos reciclados. Mas, os gessos comerciais e reciclados são compostos essencialmente por hemi-hidrato. O que os diferencia é a intensidade dos picos de difração, pois nos gessos comerciais os picos de difração encontrados em um determinado ângulo 2θ foram mais intensos do que os mesmos ângulos de difração encontrados para os gessos reciclados.

Dessa forma, como nos difratogramas obtidos para os gessos comerciais (GC1 e GC2) e para os gessos reciclados (desidratados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C) foram encontrados os mesmos ângulos 2θ considera-se que os gessos comerciais e os gessos reciclados são materiais que apresentam composição mineralógica muito similar.

4.2. – Propriedades Físicas do Pó

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das propriedades físicas dos gessos comerciais (referência) e dos gessos reciclados de acordo com a nomenclatura apresentada no Quadro

3.1 do Capítulo 3. Essas propriedades foram determinadas para cada gesso após o processo de calcinação.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas dos gessos comerciais e reciclados

Gesso	Temperatura	Moagem	ME (kg/m³)	MU (kg/m³)	MF
GC1	-	-	2605	630,00	0,26
GC2	-	-	2615	655,00	0,60
GR1	150 °C	Grosso	2610	614,86	1,64
GR2	150 °C	Fino	2570	574,43	1,31
GR3	180 °C	Grosso	2580	640,44	1,59
GR4	180 °C	Fino	2610	549,57	1,17
GR5	200 °C	Grosso	2615	632,45	1,34
GR6	200 °C	Fino	2575	531,40	0,92

ME = Massa Específica MU = Massa Unitária MF = Módulo de Finura

Valores diferenciados para as propriedades físicas do gesso em pó são observados. Percebe-se que os resultados obtidos para a massa específica, massa unitária e módulo de finura variaram entre si de acordo com a variação na temperatura de calcinação dos gessos reciclados.

Isso pode ser atribuído ao arranjo dos cristais na massa do gesso, pois a estrutura cristalina dos gessos depende das condições de produção do hemi-hidrato (MURAT et al. 1975 *apud* HINCAPIE; CINCOTTO, 1997).

Com a variação do teor de água combinada (água de cristalização) presente nos gessos também ocorre variação nas propriedades físicas do pó de gesso. O aumento da temperatura durante a calcinação dos gessos reciclados acarretou uma maior perda da água de cristalização; assim, quanto maior a temperatura de calcinação menor a quantidade de água de cristalização contida no gesso.

Dessa forma, nos gessos reciclados calcinados em temperaturas mais elevadas (180 °C e 200 °C), a quantidade de água de cristalização encontrada demonstrou ser menor do que a encontrada nos gessos reciclados calcinados na temperatura de 150 °C. Assim, a calcinação em temperaturas mais elevadas apresentou valores de massa específica e massa unitária (massa específica aparente) menores aos encontrados para os gessos calcinados em temperaturas mais baixas.

Em termos gerais, o que se observa é que com a redução dos teores da água combinada ocorre redução nas propriedades físicas do pó. Isso fica evidenciado nos resultados encontrados para a massa unitária e para o módulo de finura apresentados na

Tabela 4.1 e também nas curvas granulométricas dos gessos estudados nesse trabalho experimental (Figuras 4.7 e 4.8).

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as curvas granulométricas dos gessos comerciais e dos gessos reciclados fino e grosso, respectivamente.

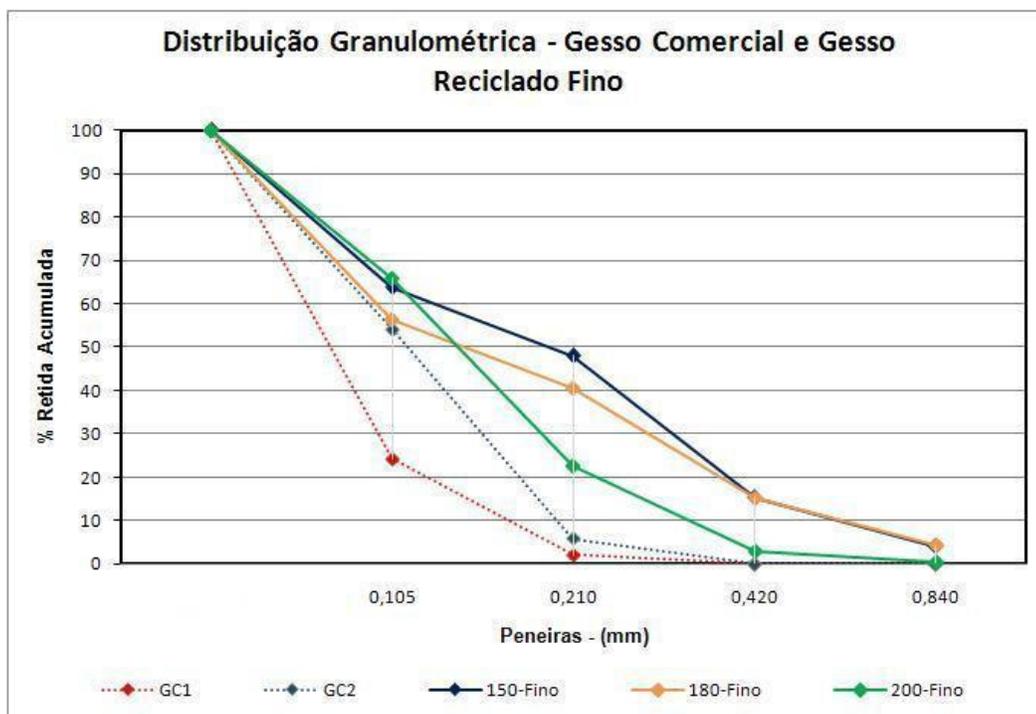


Figura 4.7 – Curvas granulométricas – gessos comerciais e gesso reciclado fino.

Gessos comerciais de diferentes fabricantes (GC1 e GC2) não apresentam a mesma finura. Os gessos reciclados finos, calcinados em diferentes temperaturas (150 °C, 180 °C e 200 °C) apresentaram partículas com dimensões maiores do que as encontradas para os gessos comerciais (Figura 4.7).

Para a temperatura de calcinação de 200 °C foram encontradas partículas de menores dimensões (com granulometria mais próxima a dos gessos comerciais). Isso é atribuído não somente a diferenças que podem ter ocorrido no processo de moagem dos resíduos de gesso para sua posterior calcinação em diferentes temperaturas, mas também à menor quantidade de água de cristalização. Com o aumento da temperatura de calcinação a curva granulométrica do gesso reciclado apresentou grãos de menor tamanho (Figura 4.7). A mesma tendência também foi observada para o gesso reciclado grosso (Figura 4.8).

Entretanto, não há diferença significativa para as curvas granulométricas dos gessos reciclados grossos calcinados a 150 °C e 180 °C. Assim, isso pode ser um indicativo de que

o tamanho das partículas obtidos na moagem do resíduo de gesso pode ter influência nas dimensões das partículas encontradas após a calcinação. Partículas de gesso maiores submetidas a temperaturas de calcinação menores perdem menor quantidade de água de cristalização. Isso é atribuído ao fato de que em temperaturas mais baixas a energia de calor produzida na calcinação não consegue penetrar totalmente nas partículas (grãos) de gessos.

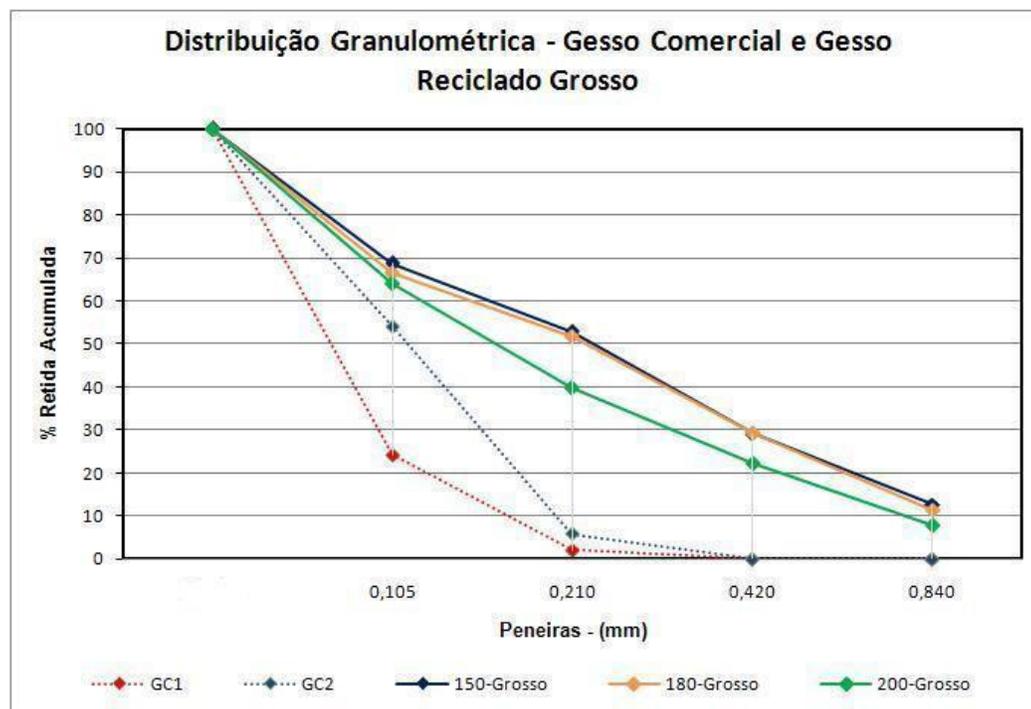


Figura 4.8 – Curvas granulométricas – gesso comercial e gesso reciclado grosso.

Deve-se ressaltar que o grau de moagem e os procedimentos de calcinação e de realização dos ensaios físicos para obtenção das propriedades do gesso em pó também podem apresentar alguma interferência nos resultados encontrados.

Em linhas gerais, os gessos de referência (gessos comerciais) apresentam uma finura maior (menor módulo de finura) do que os gessos reciclados.

Assim, para as propriedades físicas do gesso reciclado em pó foram observadas pequenas variações nos resultados encontrados para a massa específica, massa unitária e também para o módulo de finura. Segundo a literatura que aborda o assunto, isso pode ser atribuído ao arranjo dos cristais na massa do gesso, pois a estrutura cristalina dos gessos depende das condições de produção do hemi-hidrato. Essa variação nas propriedades físicas do pó também ocorreu para os dois gessos comerciais (GC1 e GC2) estudados como gessos de referência nesta pesquisa.

Portanto, os resultados encontrados nos ensaios das propriedades físicas do gesso em pó confirmam que ocorrendo variação do teor de água combinada (água de cristalização) presente nos gessos também ocorre variação nas propriedades físicas do pó de gesso. A redução dos teores da água combinada acarreta redução nas propriedades físicas do pó.

Com relação ao módulo de finura, os gessos comerciais (GC1 e GC2) atendem as condições da norma brasileira de gesso para construção civil NBR 13207 (ABNT, 1994) (Quadro 2.1 – Capítulo 2) na classificação de gesso fino para revestimento e gesso fino para fundição ($MF < 1,10$). Os gessos reciclados atenderam as condições da norma brasileira na especificação de gesso grosso para revestimento e gesso grosso para fundição ($MF > 1,10$).

Dessa forma, com essas diferenças encontradas nas propriedades dos gessos em pó foi avaliado o comportamento desses gessos na forma de pasta. O próximo item desse capítulo apresenta as propriedades observadas nas pastas produzidas com os gessos comerciais e com os reciclados.

4.3. – Propriedades Físicas das Pastas no Estado Fresco

O Quadro 4.9 apresenta os resultados obtidos para os tempos de início e fim de pega dos gessos comerciais (referência) e dos gessos reciclados, conforme descrito no item 3.3 do Capítulo 3.

Quadro 4.9 – Tempos de início e fim de pega dos gessos estudados

Gessos	Moagem	Relação água/gesso	Tempos de Pega (min:s)		$\Delta = \text{Final} - \text{Inicial}$ (min:s)
			Inicial	Final	
GC1	-	0,53	08:04	16:18	08:04
GC1	-	0,70	10:40	23:08	12:28
GC2	-	0,53	10:14	24:25	14:11
GC2	-	0,70	18:13	32:03	13:50
GR1	Grosso	0,70	32:10	51:12	19:02
GR1	Grosso	0,75	38:31	55:24	16:03
GR2	Fino	0,70	22:29	41:37	19:08
GR2	Fino	0,80	25:48	48:31	22:43
GR3	Grosso	0,70	32:29	52:09	19:40
GR3	Grosso	0,75	31:23	45:41	14:18
GR4	Fino	0,70	25:50	45:17	19:27
GR4	Fino	0,80	38:32	57:15	18:43
GR5	Grosso	0,70	20:14	32:02	11:48
GR5	Grosso	0,75	23:38	38:52	15:14
GR6	Fino	0,70	26:22	52:25	26:03
GR6	Fino	0,80	31:30	61:27	29:57

Os tempos de pega de gessos reciclados e gessos comerciais não foram similares entre si nesta pesquisa experimental. Para as pastas produzidas com o gesso reciclado, o tempo transcorrido desde a colocação da água no gesso até o início de pega da pasta foi maior do que o obtido para as pastas produzidas com o gesso comercial (GC1 e GC2). Isso ocorreu independentemente da relação água/gesso empregada para produzir as pastas.

O tempo transcorrido desde a colocação da água no gesso até o início de pega da pasta, para as pastas produzidas com os gessos reciclados, foi maior do que o obtido para as pastas produzidas com os gessos de referência (GC1 e GC2). Isso se deve ao fato do módulo de finura dos gessos reciclados serem maiores do que o módulo de finura dos gessos comerciais, o que influencia a cinética de hidratação. A mesma consideração pode ser atribuída para os gessos reciclados com diferentes módulos de finura (Finos e Grossos).

Essa variação ocorrida no tempo de pega das pastas de gesso estudadas ocorre devido ao processo de calcinação, à temperatura de calcinação e ao tamanho das partículas do resíduo do gesso utilizado no processo de calcinação. Isso também foi verificado por outros pesquisadores em estudos com gesso reciclado calcinado em diferentes temperaturas e também sobre pressão atmosférica controlada (BARDELLA; FERREIRA JUNIOR; CAMARINI, 2003; BARDELLA; SANTOS; CAMARINI, 2004; BARDELLA; CAMARINI, 2004; RIBEIRO, 2006; MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

Com relação à influência que a granulometria exerce no processo de hidratação do aglomerante, partículas com dimensões maiores têm uma menor velocidade de hidratação devido ao fato do processo de hidratação ocorrer da superfície externa do grão para o seu interior.

As pastas de gessos produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) atendem as condições da norma brasileira NBR 13207 (ABNT, 1994) (Quadro 2.2 - Capítulo 2). Os tempos de início e fim de pega obtidos nas pastas produzidas de gesso comercial foram parecidos com os encontrados em estudos com gessos comerciais brasileiros realizados por Cincotto, Agopyan e Florindo (1988b), Antunes (1999) e De Milito (2007).

As pastas de gessos produzidas com os gessos reciclados (Quadro 4.9) atenderam as condições da norma brasileira de gesso para construção civil NBR 13207 (ABNT, 1994) na especificação de gessos grossos classificados para revestimento de paredes, pois apresentam tempos de início de pega maiores do que 10 minutos e fim de pega maior do que 45 minutos. Das pastas produzidas com os gessos reciclados somente três delas (GR2 – 0,70, GR5 – 0,70 e GR5 – 0,75) apresentaram valores de fim de pega menores do que 45 minutos, mas seus valores de início de pega foram maiores do que 10 minutos.

Cabe ressaltar que esses resultados foram obtidos em ambiente de laboratório com temperatura ambiente controlada (24 ± 4 °C) de acordo com a NBR 12128 – MB 3469 (ABNT, 1991a). Em canteiro de obras a temperatura ambiente vai influenciar nos tempos de início e fim de pega durante a aplicação dos revestimentos. Deve-se destacar que nas especificações constantes da NBR 13207 (ABNT, 1994) não é apresentada nenhuma orientação com relação à temperatura ambiente para a aplicação das pastas de gesso em canteiros de obra.

4.3.1 – Curvas de Evolução de Temperatura

O conhecimento do calor de hidratação e sua evolução em função do tempo são de interesse do ponto de vista científico auxiliando na compreensão dos processos de hidratação que ocorrem nos aglomerantes e do ponto de vista tecnológico auxilia no processo de desenvolvimento de novos materiais que serão utilizados na cadeia produtiva da construção civil, pois o calor de hidratação permite um controle rápido da qualidade e velocidade de reação dos gessos (MURAT; JEANDOT, 1973 *apud* HINCAPIE, 1997; JOHN; CINCOTTO, 2007).

O conhecimento da quantidade de energia liberada pelo aglomerante, na forma de calor durante a sua hidratação (reação exotérmica), fornece um parâmetro de controle da qualidade dos materiais por meio da sua reatividade, já que essa reatividade pode ser quantificada pela velocidade com que a reação de hidratação ocorre (HUDSON-LAMB; STRYDOM; POTGIETER, 1996; HINCAPIE, 1997; ANTUNES, 1999).

Nas Figuras 4.9 até a 4.16 estão apresentadas todas as curvas de evolução de temperatura das pastas de gesso (comercial e reciclado) obtidas em condições semi-adiabáticas (item 3.5.1, Capítulo 3). Deve-se destacar que para a obtenção da curva da cinética de temperatura, as pastas de gesso foram misturadas em uma argamassadeira (na argamassadeira primeiramente se colocou a água e em seguida o gesso em pó foi polvilhado sobre a água para se realizar a mistura da pasta por um minuto). Imediatamente após a mistura das pastas, o gesso fluido foi colocado dentro de um recipiente apropriado, revestido com isopor, onde foram colocados os termopares para coleta da temperatura de hidratação.

Dessa forma, os tempos apresentados nos gráficos de evolução de temperatura das Figuras 4.9 até 4.16 foram medidos a partir da colocação dos termopares nas pastas de gesso (após a mistura das pastas), conforme apresentado na Figura 3.4 – Capítulo 3. Nesse

instante os termopares começaram a medir a temperatura da pasta durante o processo de hidratação).

a) Pastas Produzidas com a Mesma Relação Água/Gesso ($a/g = 0,70$)

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas da quantidade de calor liberado durante o processo de hidratação dos gessos comerciais (GC1 e GC2). Nesta Figura pode-se observar que os gessos comerciais (GC1 e GC2) apresentam praticamente o mesmo comportamento (as curvas de evolução de temperatura de ambos os gessos praticamente se sobrepõem).

Assim, para os gessos comerciais os períodos de indução, nucleação e de endurecimento foram os mesmos quando comparados entre si.



Figura 4.9 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Comercial (GC1 e GC2) - Rel. água/Gesso = 0,70.

As temperaturas máximas atingidas no final do período de nucleação foram praticamente idênticas (aproximadamente 49 °C). Deve-se observar também que os picos de temperatura máxima ocorreram em períodos idênticos, sendo aproximadamente aos 41 minutos após o início da medição das temperaturas de hidratação.

O fato das curvas de evolução de temperatura dos gessos GC1 e GC2 serem similares é um indicativo de que a composição desses gessos (hemi-hidrato e anidrita) também é similar, conforme já observado na análise das propriedades químicas e mineralógicas (itens 4.1.1, e 4.1.2).

Dessa forma, como não ocorreram acentuados picos de liberação de calor nos instantes iniciais da hidratação, tanto do GC1 quanto do GC2, isso é um indicativo de que esses gessos são compostos essencialmente por hemi-hidrato, pois a velocidade das reações do hemi-hidrato logo que entra em contato com a água é mais lenta do que a da anidrita III (sulfato anidro solúvel) (LE COVEC, 1978 *apud* JOHN; CINCOTTO, 2007).

Por meio da calorimetria também é possível medir os tempos de início e fim de pega das pastas de gesso. Assim, o tempo de início de pega é determinado pelo instante em que a taxa de elevação de temperatura ultrapassa 0,1 °C/min e o tempo de fim de pega é o instante em que a temperatura máxima é atingida (RIDGE, 1959 *apud* HENAO, 1997; RIDGE, 1959 *apud* HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; RIDGE, 1959; THOLE, 1994 *apud* ANTUNES, 1999).

Na Figura 4.9, tanto para o GC1 quanto para o GC2, nas curvas de evolução de temperatura de ambos os gessos, é possível identificar o tempo de início de pega como sendo em torno de 11 minutos após o início da medição do calor de hidratação e o tempo de fim de pega no período aproximado de 33 minutos após o início da medição do calor de hidratação.

Quando se comparam as curvas de liberação de calor (Figura 4.9) com os resultados encontrados para o início e fim de pega por meio da utilização do Aparelho de Vicat (Quadro 4.8) fica evidente que os resultados fornecidos pelo Aparelho de Vicat podem apresentar variações decorrentes do próprio mecanismo de realização do ensaio e também por influência do operador do equipamento, pois para o gesso GC1 os resultados encontrados por calorimetria e pelo Aparelho de Vicat foram semelhantes somente para o tempo de fim de pega e para o GC2 esses resultados foram semelhantes somente para o tempo de início de pega.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam, respectivamente, as curvas calorimétricas de pastas produzidas com os gessos reciclados calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C todos com a mesma relação água/gesso (0,70).

Observa-se que os gessos reciclados calcinados respectivamente nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C apresentam maior quantidade de anidrita III (anidrita solúvel) em sua composição, quando comparados aos gessos comerciais. Isso fica evidenciado pelo surgimento de picos de elevação de temperatura logo que os termopares são colocados na pasta de gesso (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12), pois uma maior porcentagem de anidrita III acarreta maior liberação de calor nos instantes iniciais da hidratação do gesso (MAKSOUND; ASHOUR, 1981; HINCAPIE et al.,1996a). Esses picos de evolução de temperatura inicial

foram mais acentuados para os gessos reciclados nas temperaturas de 180 °C e 200 °C (Figuras 4.11 e 4.12) quando comparados com os gessos comerciais (Figura 4.9) e os gessos reciclados na temperatura de 150 °C (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 150 °C - Rel. Água/Gesso = 0,70.

Esse fato corrobora com as informações apresentadas na revisão bibliográfica em que há diferenças na composição dos gessos quando desidratados em diferentes temperaturas. Temperaturas de calcinação superiores a 180 °C ocasionam o surgimento de uma quantidade maior de anidrita III - sulfato anidro solúvel, que é mais reativo do que o hemi-hidrato quando em contato com a água (LE COVEC, 1978 *apud* JOHN; CINCOTTO, 2007; HUDSON-LAMB; STRYDOM; POTGIETER, 1996; HENAO, 1997; HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; ANTUNES, 1999; DE MILITO, 2001; DE MILITO, 2007).



Figura 4.11 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 180 °C - Rel. Água/Gesso = 0,70.

As informações obtidas pelas curvas de evolução de temperatura indicam que os gessos comerciais (GC1 e GC2) são constituídos essencialmente por hemi-hidrato (com uma pequena quantidade de anidrita solúvel em sua composição); e os gessos reciclados são compostos por hemi-hidrato e anidrita (sendo que a quantidade de anidrita presente na composição dos gessos reciclados calcinados nas temperaturas 180 °C e 200 °C são superiores as do gesso calcinado a 150 °C).

Deve-se destacar, entretanto, que a quantidade de calor liberada logo que os termopares iniciaram a coleta do calor de hidratação nas pastas produzidas com os gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C) não foram muito elevadas, indicando uma quantidade pequena de teores de anidrita III (anidrita solúvel) em suas composições (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

Isso pode ser atribuído ao processo de estabilização do gesso, onde após algumas horas de armazenamento do gesso em atmosfera de 80% de umidade relativa do ar, a anidrita solúvel por conter um teor de água de cristalização variável e por ser muito reativa, transforma-se em hemi-hidrato. Entretanto, uma parcela dessa fase pode estar presente no gesso na ocasião do consumo (JOHN; CINCOTTO, 2007).

As temperaturas máximas alcançadas pelos gessos reciclados nas três temperaturas de calcinação observadas (para pastas com mesma relação água/gesso = 0,70), tanto para os gessos reciclados finos quanto para os gessos reciclados grossos ficaram com valores em torno de 44 °C a exceção foi o gesso reciclado fino calcinado na temperatura de 180 °C

que alcançou a temperatura máxima de 47 °C, sendo próximos aos valores apresentados pelos gessos comerciais (49 °C) (Figuras 4.9 a 4.12). Portanto, em termos gerais, pode-se dizer que para os gessos reciclados, a temperatura máxima alcançada foi cerca de 5 °C inferior à obtida para os gessos comerciais. Entretanto, os períodos de indução, nucleação e endurecimento encontrados para os gessos reciclados e gessos comerciais foram diferentes para as várias pastas estudadas (Figuras 4.10 a 4.12). Isso é um indicativo de que as temperaturas de calcinação e o processo de produção do gesso influenciam na cinética de hidratação das pastas (CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995).

A curva de evolução de temperatura indica para o gesso grosso reciclado calcinado na temperatura de 150 °C valores de aproximadamente, 17 minutos e 58 minutos para o tempo de início e fim de pega, e para o gesso fino os tempos de início e fim de pega de 27 minutos e 75 minutos, respectivamente (Figura 4.10).

Nos gessos reciclados com temperatura de calcinação de 180 °C foi observado, respectivamente, para o tempo de início e fim de pega, valores próximos a 53 minutos e 135 minutos para o gesso fino e 46 minutos e 136 minutos para o gesso grosso (Figura 4.11).

No gesso fino reciclado a 200 °C os tempos de início e fim de pega apresentaram, respectivamente, 23 minutos e 66 minutos; e 15 minutos e 67 minutos para o gesso grosso (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 200 °C - Rel. Água/Gesso = 0,70.

Como já observado para as pastas produzidas com gessos comerciais (GC1 e GC2), os resultados encontrados para o início e fim de pega por meio da utilização do Aparelho de Vicat (Quadro 4.8) quando comparados com os resultados obtidos para início e fim de pega por meio das curvas de evolução de temperatura, também apresentaram valores diferenciados para as pastas produzidas com gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C) (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12). Portanto, os tempos de início e fim de pega obtidos utilizando-se o Aparelho de Vicat e por meio das curvas de evolução de temperatura são diferentes quando comparados entre si. De acordo com Antunes (1999) isso acontece, pois o ensaio realizado utilizando-se o aparelho de Vicat é efetuado por meio de uma analogia ao ensaio empregado para cimentos, e, por este motivo, apresenta algumas limitações, uma vez que foi concebido para um aglomerante que possui intervalo de utilização diferente do gesso. As pastas produzidas com cimento são utilizadas antes que sua pega se inicie. Assim, o tempo disponível para o transporte e aplicação é o tempo de início de pega, manuseá-las após esse tempo implica em perda de resistência devido à destruição da microestrutura em formação.

Para as pastas de gesso aplicadas manualmente, esse princípio não corresponde à realidade, pois nas obras, as relações água/gesso utilizadas são elevadas, o que ocasiona a produção de pastas extremamente fluidas, não sendo possível a sua aplicação imediata. Para que a sua aplicação tenha início é necessário aguardar que as pastas de gesso atinjam uma faixa de consistência adequada, que é determinada empiricamente pelo gesseiro (Antunes, 1999).

A consistência adequada, da pasta só começa a ser alterada no final do período de indução, ou seja, pouco antes do início da pega por calorimetria. Somente após este instante é possível o início de sua utilização. Até o final do período de indução não há elevação de temperatura além da ocasionada pela molhagem dos grãos, e, conseqüentemente, ainda não há di-hidrato formado. Desta forma, no início da pega determinado pela calorimetria a quantidade de di-hidrato precipitado é aproximadamente igual a 0%, enquanto no início de pega determinado pela agulha de Vicat, aproximadamente 10% de di-hidrato já está formado (CLIFTON, 1973; MAGNAN, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; STAV; BENTUR, 1995 *apud* ANTUNES, 1999).

Portanto, no geral, para o calor de hidratação dos gessos comerciais (GC1 e GC2) foram encontrados valores praticamente idênticos para as temperaturas máximas, os picos de temperatura máxima também ocorreram em períodos idênticos. Para os gessos

reciclados, finos e grossos, a temperatura máxima alcançada apresentou valores cerca de 5 °C inferior à obtida para os gessos comerciais. Deve-se destacar que os picos de temperatura máxima ocorreram em períodos diferentes aos observados para os gessos comerciais.

b) Pastas Produzidas com a Mesma Consistência (Consistência Normal)

A Figura 4.13 apresenta as curvas de elevação de temperatura das pastas de gessos comerciais (GC1 e GC2) produzidas com relação água/gesso 0,53 (pasta de consistência normal). Verifica-se que os gessos comerciais (GC1 e GC2) são compostos essencialmente por hemi-hidrato, pois nas curvas calorimétricas tanto do GC1 quanto do GC2 o calor de hidratação apresentou temperaturas similares com desenvolvimento em sequência das etapas de hidratação dos gessos (período de indução, período de nucleação e período de endurecimento).



Figura 4.13 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Comercial (GC1 e GC2). Pasta de Consistência Normal.

As temperaturas apresentadas para o calor de hidratação do gesso GC1 foram ligeiramente menores do que as do GC2 até 11 minutos, a partir desse instante as temperaturas obtidas para o GC1 foram um pouco mais elevadas do que as temperaturas apresentadas pelo GC2. O GC1 atingiu uma temperatura máxima de aproximadamente 54 °C e o GC2 uma temperatura máxima de aproximadamente 52 °C (Figura 4.13).

Deve-se destacar que as temperaturas máximas do GC1 foram atingidas por volta de 36 minutos e as temperaturas máximas do GC2 foram atingidas por volta dos 41 minutos. Dessa forma, os tempos de início e fim de pega (obtidos através das curvas de evolução de temperatura) do gesso GC1 foram, respectivamente, 5 minutos e 36 minutos, e para o GC2 6 minutos e 41 minutos (Figura 4.13).

As Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam, respectivamente, as curvas de evolução de temperatura de pastas de gesso reciclado calcinados a 150 °C, 180 °C e 200 °C todos com a mesma consistência (pasta de consistência normal). Os gessos finos apresentaram para a consistência normal uma relação água/gesso de valor 0,80 e os gessos grossos apresentaram para a consistência normal uma relação água/gesso de valor 0,75.

Assim, as considerações efetuadas para as pastas de gesso com relação água/gesso 0,70 também podem ser atribuídas para as pastas de gesso com mesma consistência (consistência normal). Deve-se considerar ainda que, devido a valores diferentes para as relações água/gesso nas pastas de consistência normal dos gessos comerciais (GC1 e GC2) e também nos gessos reciclados finos e grossos, observaram-se variações nos valores obtidos para as temperaturas de hidratação entre os gessos comerciais, gessos reciclados finos e gessos reciclados grossos.

Essa variação na liberação de calor durante a hidratação está relacionada com a quantidade de água (relação água/gesso) adicionada na mistura das respectivas pastas, pois maior quantidade de água de amassamento causa a ampliação do período de indução retardando o início da precipitação dos cristais de di-hidrato. Isso ocorre, pois as distâncias entre as partículas aumentam com o aumento da relação água/gesso. Assim, quanto maior a relação água/gesso, menor a velocidade da reação, maior o tempo de pega, menor a liberação de calor durante a hidratação; e ao diminuir a quantidade de água tem-se a ocorrência do oposto dessa situação (maior a velocidade da reação, menor o tempo de pega e maior liberação de calor (NOLHIER, 1986; LEWRY; WILLIAMSON, 1994a; KARNI; KARNI, 1995).



Figura 4.14 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 150 °C. Pasta de Consistência Normal.

No caso das curvas apresentadas nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, o efeito de aumento da relação água/gesso se refletiu em menor valor de temperatura máxima em relação às respectivas pastas apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.12.

Deve-se salientar também que o gesso reciclado grosso, por apresentar dimensões de partículas maiores do que as do gesso reciclado fino também pode ter contribuído na menor liberação de calor quando comparado ao gesso reciclado fino. Isso é atribuído ao mecanismo de hidratação das pastas de gesso, pois a hidratação do gesso ocorre por indução e nucleação, dessa forma, partículas com dimensões maiores tem a sua velocidade de hidratação mais lenta quando comparadas a partículas de dimensões menores.

Assim, o gesso fino reciclado com temperatura de calcinação de 150 °C apresentou, respectivamente, para os tempos de início e fim de pega valores de 20 minutos e 67 minutos (relação água/gesso 0,80) e, respectivamente, 27 minutos e 87 minutos para o gesso reciclado grosso (relação água/gesso 0,75) (Figura 4.14). O gesso fino reciclado a 180 °C apresentou tempos de início e fim de pega valores de 50 minutos e 133 minutos, respectivamente, (relação água/gesso 0,80) e 53 minutos e 154 minutos para o gesso grosso (relação água/gesso 0,75) (Figura 4.15). A 200 °C os tempos de início e fim de pega apresentaram, respectivamente, 23 minutos e 73 minutos para o gesso fino e 13 minutos e 66 minutos para o gesso grosso (Figura 4.16).

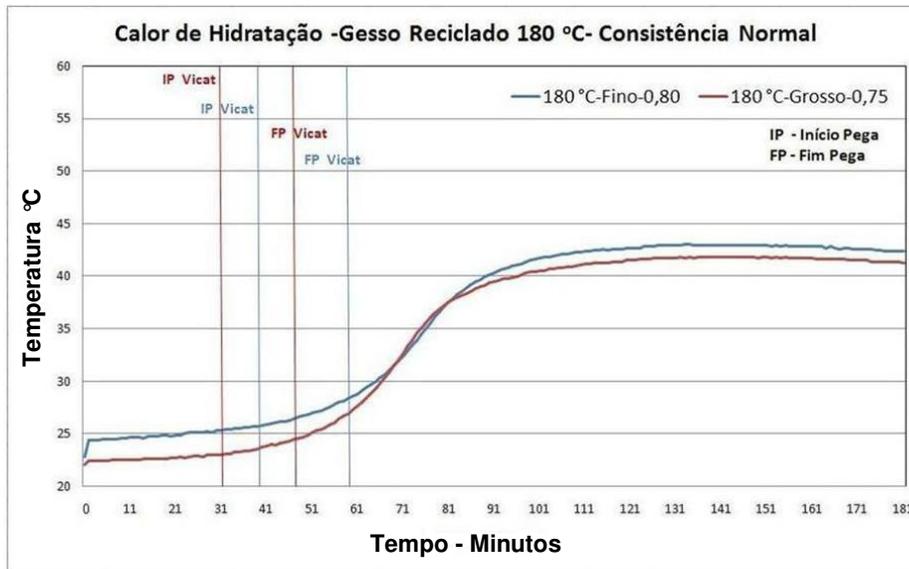


Figura 4.15 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 180 °C. Pasta de Consistência Normal.



Figura 4.16 – Curva de Evolução de Temperatura - Gesso Reciclado 200 °C. Pasta de Consistência Normal.

4.4. – Propriedades Físicas das Pastas no Estado Endurecido

As propriedades físicas das pastas no estado endurecido, estudadas neste trabalho experimental, foram: a resistência à compressão, resistência à tração na flexão, a dureza e também a resistência de aderência de pastas de gesso aplicadas em blocos cerâmicos

estruturais. Da mesma forma, foram observadas as propriedades mecânicas de gessos produzidos utilizando-se a pasta de consistência normal. Nesse caso foram avaliadas somente a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza.

4.4.1 – Propriedades Mecânicas

A NBR 13207 (ABNT, 2004) estabelece para as propriedades mecânicas do gesso a exigência de valores maiores do que 8,40 MPa para a resistência à compressão e maior do que 30 N/mm² para a dureza. De acordo com as Especificações Padrão de Gessos para Revestimento – ASTM C28/C28M-00 (ASTM, 2000b), a resistência à compressão para gessos aplicados como revestimento em paredes de alvenaria deve ser igual ou superior a 2,2 MPa. Deve-se destacar que nenhuma dessas normas fixa em qual idade devem ser realizados os ensaios para aferir essas propriedades.

Em estudo realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT – SP) no final da década de 1980 em 15 marcas de gesso comercial, foi constatado que somente 20% dos gessos analisados apresentaram valores que atenderiam hoje aos critérios de resistência mecânica da NBR 13207 (ABNT, 1994) (HINCAPIE et al., 1996).

a) Pastas Produzidas com a Mesma Relação Água/Gesso (a/g 0,70)

a.1) Resistência à Compressão

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os resultados obtidos para a resistência à compressão nas pastas de gesso produzidas com a mesma relação água/gesso (0,70) em diferentes idades. São apresentados, respectivamente, os resultados de resistência à compressão para os gessos comerciais (GC1 e GC2) e gessos finos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C), e gessos comerciais (GC1 e GC2) e gessos grossos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C).

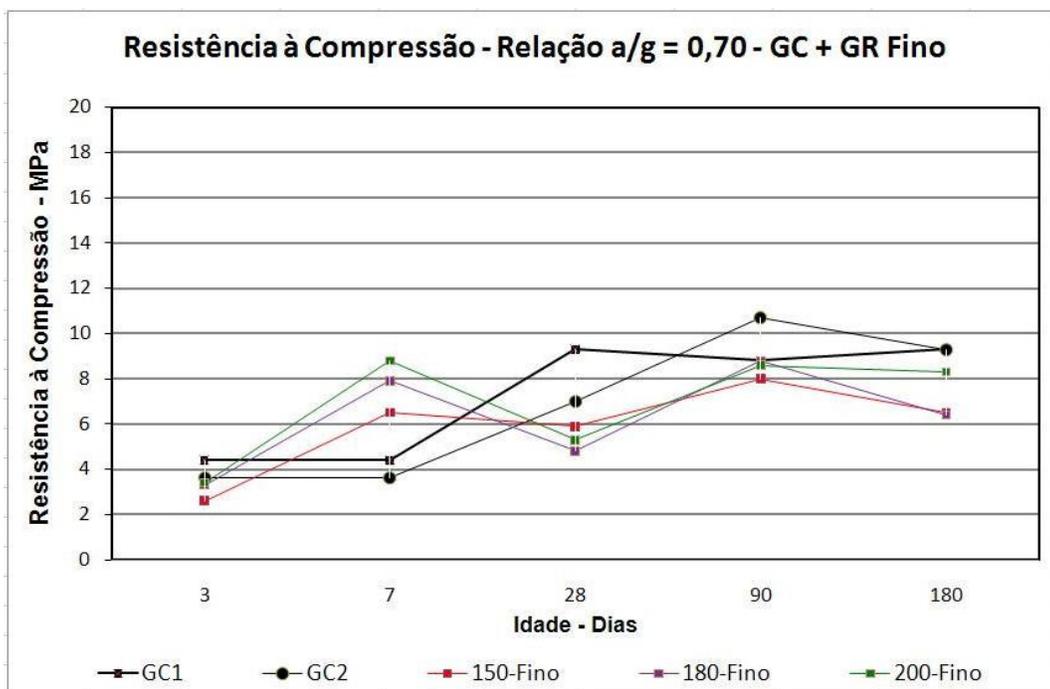


Figura 4.17 – Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.

A análise da resistência à compressão realizada pelas médias dos resultados encontrados (Método de Tukey), dos gessos comerciais e gessos reciclados, está apresentada no Apêndice A1.

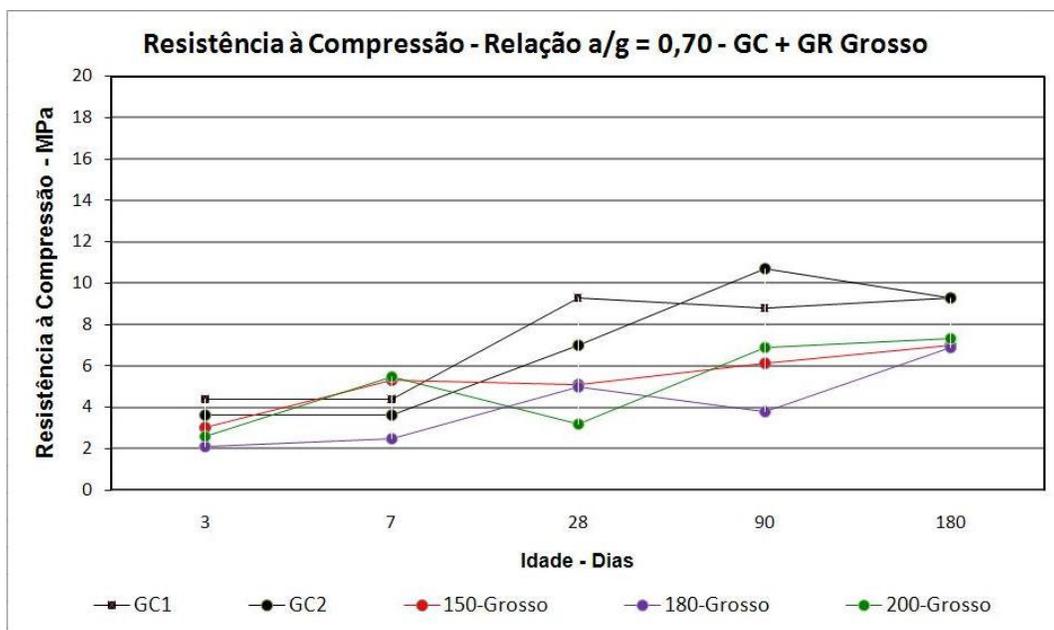


Figura 4.18 – Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.

Por meio dessa análise se constatou que os resultados encontrados para a resistência à compressão das pastas de gessos comerciais indicam ser diferentes e superiores à maioria das pastas de gessos reciclados, quando comparados com pastas produzidas com a mesma relação água/gesso, nesse caso a/g 0,70.

Os valores obtidos para a resistência à compressão dos gessos reciclados independente da temperatura de calcinação e da finura, apresentaram semelhanças, principalmente nas idades superiores a 28 dias. (Apêndice A1).

As variações expressivas de resultados entre as pastas em diferentes idades são atribuídas a diferenças de moldagem, cura e procedimentos de ensaio.

Desta forma, como os gessos reciclados são bem mais grossos do que os gessos comerciais, constata-se uma conformidade com a literatura técnica que trata do assunto para justificar a maior resistência à compressão alcançada pelos gessos comerciais. A forma e a distribuição do tamanho das partículas dos gessos têm influência na cinética da reação de hidratação das pastas de gesso (WITKAMP; VAN DER ERDEN; VAN ROSMALEN, 1990; HAND, 1994; KARNI; KARNI, 1995; RIDGE, 1961 *apud* HENAO, 1997). Como o gesso comercial estudado é bem mais fino do que os gessos reciclados, a taxa de hidratação aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, que aumenta a área específica do material.

a.2) Resistência à Tração na Flexão

As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam os resultados obtidos para a resistência à tração na flexão das pastas de gesso estudadas nesta pesquisa experimental.

As determinações das resistências à tração na flexão foram efetuadas com o objetivo de se obter um critério comparativo entre os resultados encontrados para as pastas produzidas com gessos comerciais (GC1 e GC2) e as produzidas com os gessos reciclados (fino e grosso).

Os resultados dos gessos reciclados foram superiores aos encontrados para os gessos comerciais em algumas idades (28 e 90 dias) (Figuras 4.19 e 4.20). Entretanto, essa diferença pode ser atribuída à variabilidade nos ensaios (moldagem, cura e aplicações do carregamento).

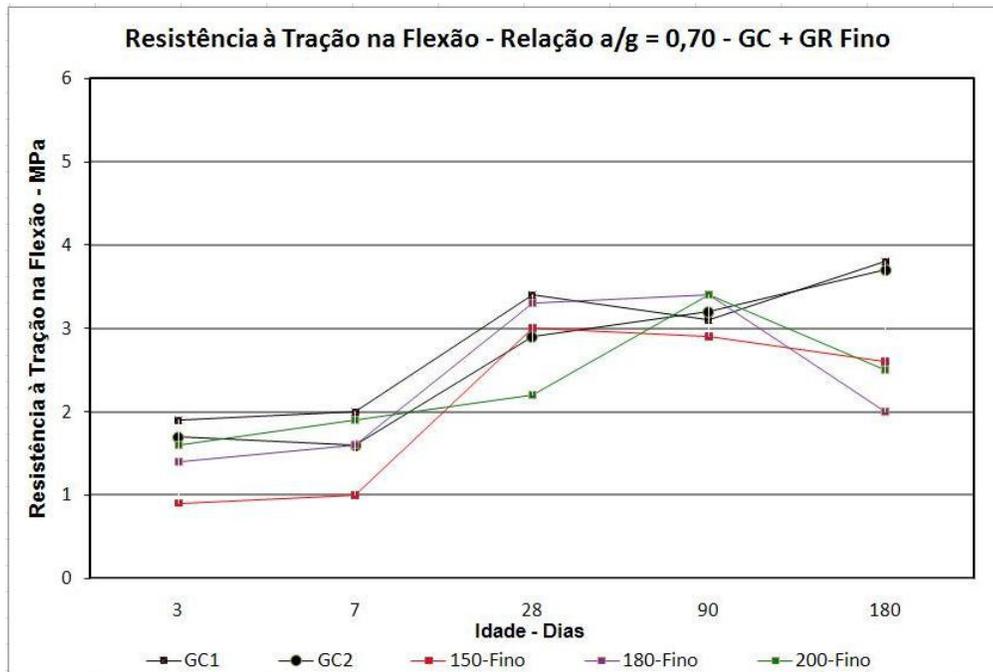


Figura 4.19 – Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.

Para os gessos reciclados, da análise estatística (Apêndice A2), foi observado que os valores alcançados foram, na sua maioria, similares entre si para todos os gessos reciclados, independentes da granulometria, temperaturas de calcinação, e idade.

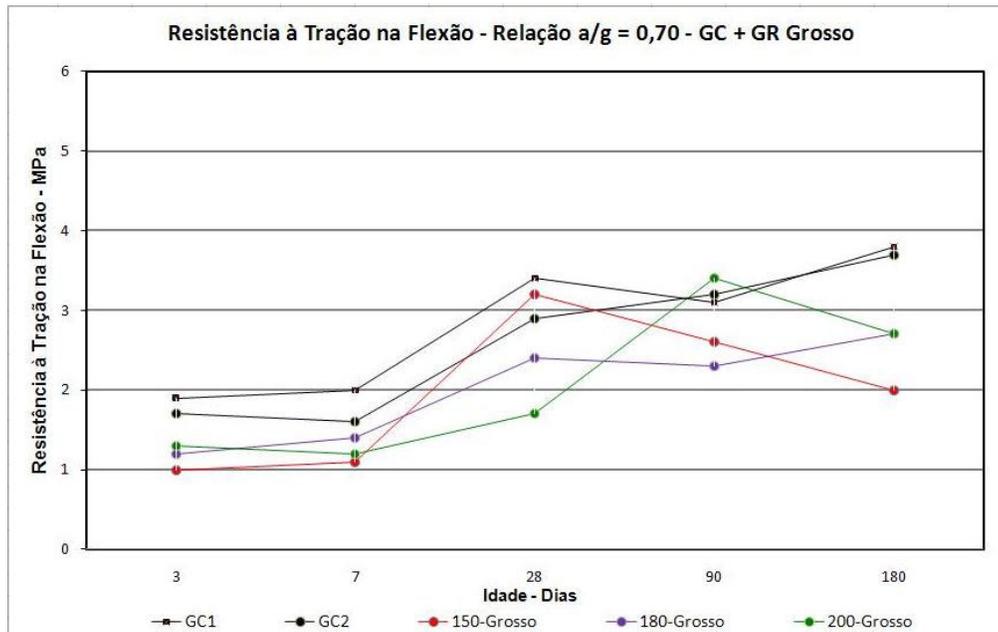


Figura 4.20 – Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.

Em relação à resistência à tração na flexão, a NBR 13207 (ABNT, 1994) não estabelece nenhuma exigência para os valores mínimos que devem ser alcançados. Entretanto, na resistência à tração na flexão de placas de gesso e de chapas de gesso acartonado, as normas brasileiras estabelecem a verificação dessa propriedade utilizando-se corpos de prova extraídos diretamente das placas de gesso para forros – NBR 12775 (ABNT, 1992) e também nas chapas de gesso acartonado – NBR 14715 (ABNT, 2001a), NBR 14716 (ABNT, 2001b) e NBR 14717 (ABNT, 2001c), pois as dimensões dos corpos de prova extraídos (comprimento, largura e espessura) vão influenciar no valor obtido para a resistência à tração na flexão.

a.3) Dureza

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam os resultados obtidos para a dureza nas pastas de gesso produzidas com a mesma relação água/gesso (0,70) em diferentes idades. A análise comparativa entre as médias dos resultados alcançados (Método de Tukey) está detalhada no Apêndice A3.

A dureza inicial aos 3 dias e depois aos 90 dias foi estatisticamente diferente para os gessos comerciais em relação aos reciclados. Aos 180 dias, cinco das seis pastas de gesso reciclado estudadas não mostraram diferença de dureza em relação a uma das pastas de gesso comercial (GC1) (Apêndice A3).

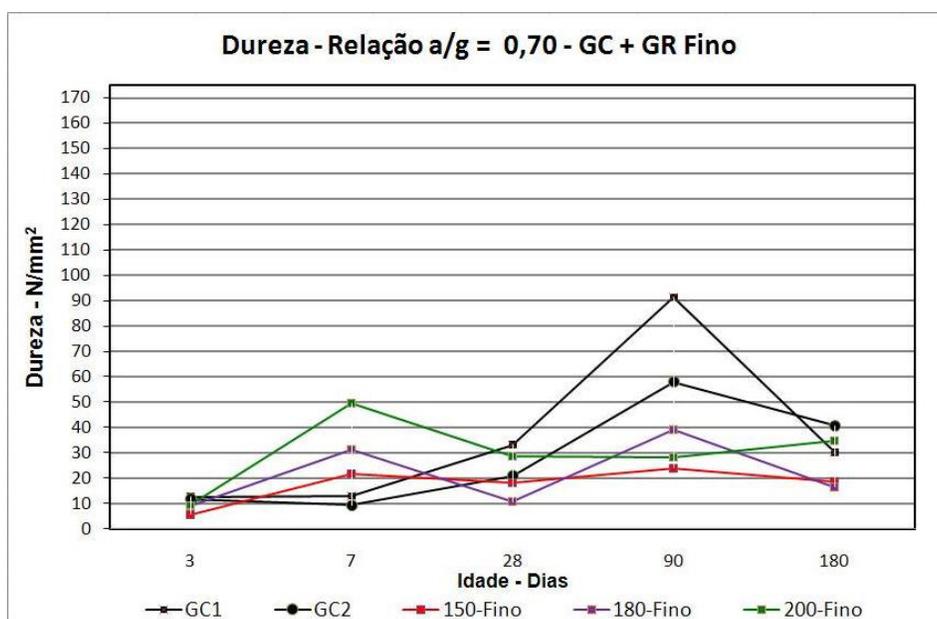


Figura 4.21 – Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Relação água/gesso 0,70.

As variações nos resultados podem ser atribuídas a falhas de moldagem e procedimentos de ensaio.

Na comparação somente entre os gessos reciclados, foi observado que não ocorreu diferenças estatisticamente significativas para a maioria dos valores encontrados, principalmente nas idades de 28 e 90 dias. Isso ocorreu independente da granulometria e da temperatura de calcinação utilizada.

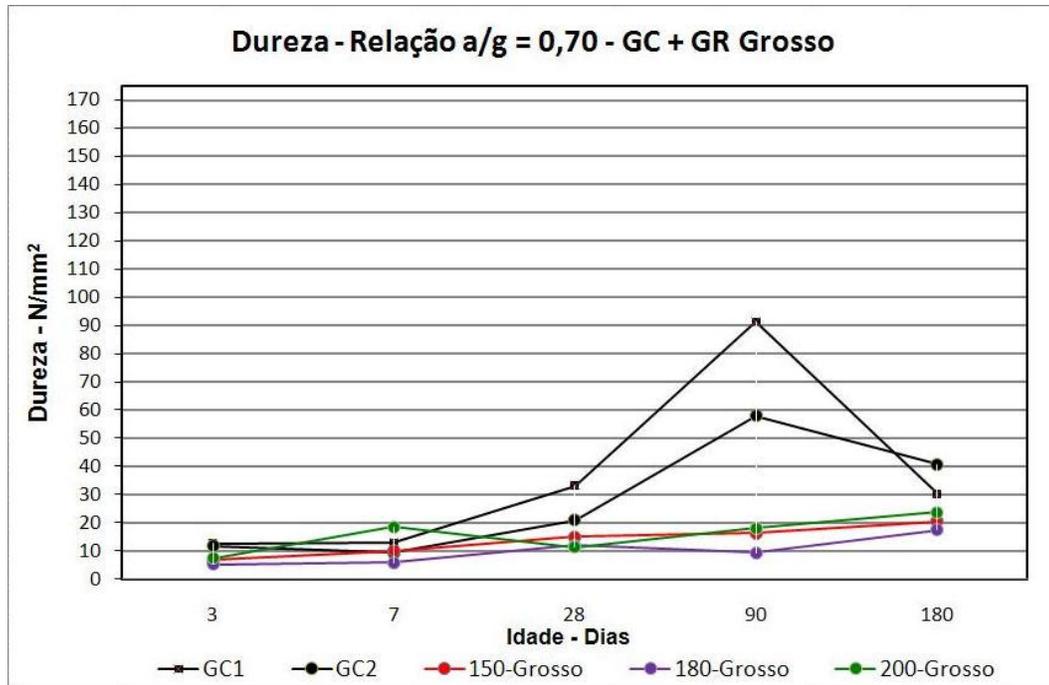


Figura 4.22 – Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Relação água/gesso 0,70.

b) Pastas Produzidas com a Mesma Consistência (Consistência Normal)

Nas pastas de gesso produzidas com mesma consistência, para a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e para a dureza, dos gessos comerciais e dos gessos reciclados (Figuras 4.23 a 4.28), fica evidente que, apesar de todas as misturas apresentarem a mesma trabalhabilidade (mesma consistência), a variação da relação água/gesso afetou significativamente os valores encontrados para todas as propriedades mecânicas analisadas.

Os resultados de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza apresentaram melhor desempenho para as pastas produzidas com gesso comercial (GC1 e

GC2) em todas as idades ensaiadas. Isso ocorreu, pois os gessos comerciais apresentaram uma menor relação água/gesso (a/g 0,53) quando comparados com os gessos reciclados (fino - a/g 0,80 e grosso - a/g 0,75).

Tal fato apresentou concordância com as informações encontradas na revisão bibliográfica que trata sobre o assunto, pois um aumento da relação água/gesso provoca a queda nas propriedades mecânicas devido ao teor de água da pasta (influencia a cinética da reação de hidratação da pasta no estado fresco) e a porosidade resultante (porosidade total da pasta no estado endurecido) (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995).

A análise comparativa entre a média dos resultados (Método de Tukey) das pastas de consistência normal, produzidas com gessos comerciais (GC1 e GC2) e gessos reciclados (finos e grossos) estão apresentados no Apêndice B.

b.1) Resistência à Compressão

As Figuras 4.23 e 4.24 apresentam os resultados obtidos para a resistência à compressão dos gessos produzidos com pasta de consistência normal (gessos comerciais e gessos reciclados).

A Figura 4.23 apresenta os valores obtidos para a resistência à compressão dos gessos comerciais (GC1 e GC2) com a resistência à compressão encontrada para as pastas produzidas com os gessos reciclados finos, calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C.

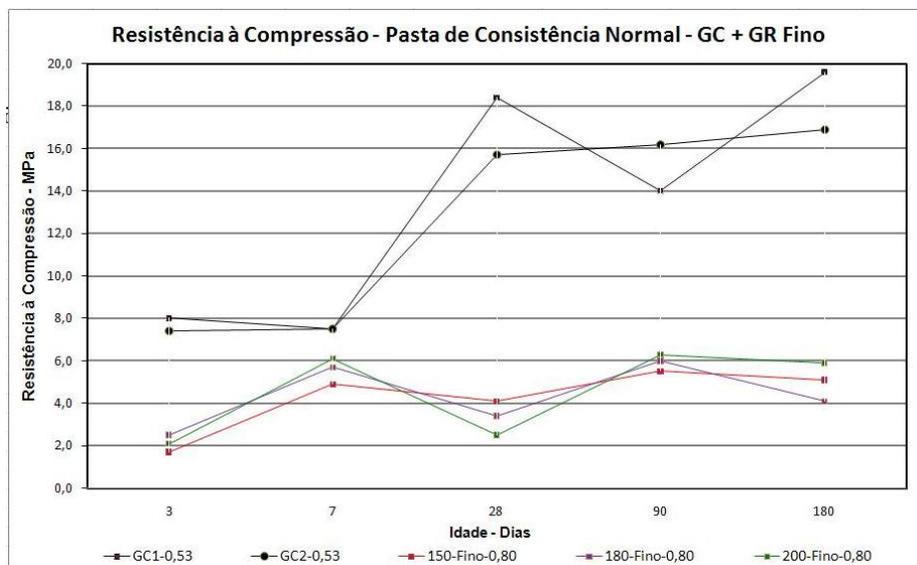


Figura 4.23 – Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.

Os gessos comerciais (GC1 e GC2) nas pastas produzidas com a relação água/gesso 0,53, apresentaram valores similares entre si para a resistência à compressão somente até a idade de 3 dias, a partir da idade de 7 dias o GC1 apresentou resultados mais elevados do que os resultados de resistência à compressão do GC2, sendo esses valores estatisticamente significativos (Apêndice B1). Na comparação entre GC1 e GC2 na idade de 90 (Figuras 4.22 e 4.23), atribui-se uma variabilidade ocorrida no ensaio para justificar a perda de resistência ocorrida para o GC1. Nessas misturas, a evolução na resistência à compressão ocorrida a partir da idade de 7 dias é atribuída a cura e a perda de água (secagem) dos corpos de prova.

A maioria dos resultados encontrados para a resistência à compressão dos gessos reciclados foram estatisticamente similares entre si, principalmente aos 28, 90 e 180 dias, independente do grau de moagem, relação água/gesso e temperatura de calcinação (Apêndice B1).

As Figuras 4.23 e 4.24, e também os resultados constantes do Apêndice B1 mostram que os resultados encontrados para a resistência à compressão nas pastas produzidas com gessos reciclados finos e grossos foram praticamente as mesmas em todas as idades estudadas, mesmo tendo relações água/gesso e granulometrias diferentes. Isso ocorreu devido à diferença na relação água/gesso ser pequena entre as duas pastas e também pelo fato das partículas de gesso presentes no gesso reciclado grosso não serem muito maiores do que as partículas presentes no gesso reciclado fino.

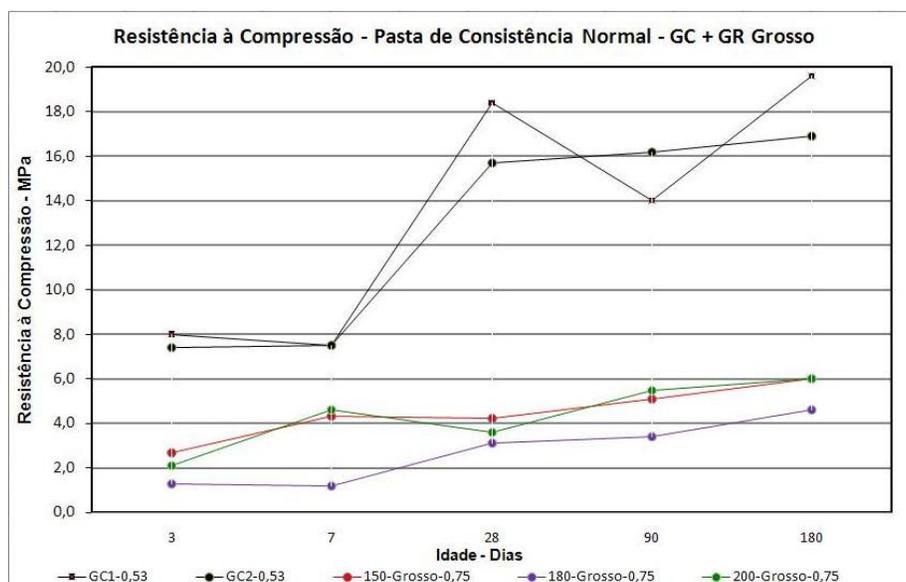


Figura 4.24 – Resistência à compressão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 se observa que o gesso reciclado grosso calcinado na temperatura de 180 °C apresentou valores para a resistência à compressão menores nas idades iniciais (3 e 7 dias) quando comparados aos resultados encontrados nessas mesmas idades para o gesso reciclado fino (180 °C), entretanto, na idade de 28 e 180 dias os resultados encontrados foram praticamente os mesmos, o que aponta para variabilidade por fatores de ensaio. Nesse caso constatou-se que a diferença na granulometria entre os gessos reciclados finos e grossos influenciou nos valores alcançados apenas nas idades iniciais.

b.2) Resistência à Tração na Flexão

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam as comparações dos resultados encontrados para a resistência à tração na flexão dos gessos comerciais (GC1 e GC2) com os gessos reciclados finos (GR2, GR4 e GR6) e gessos reciclados grossos (GR1, GR3 e GR5), calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C, respectivamente.

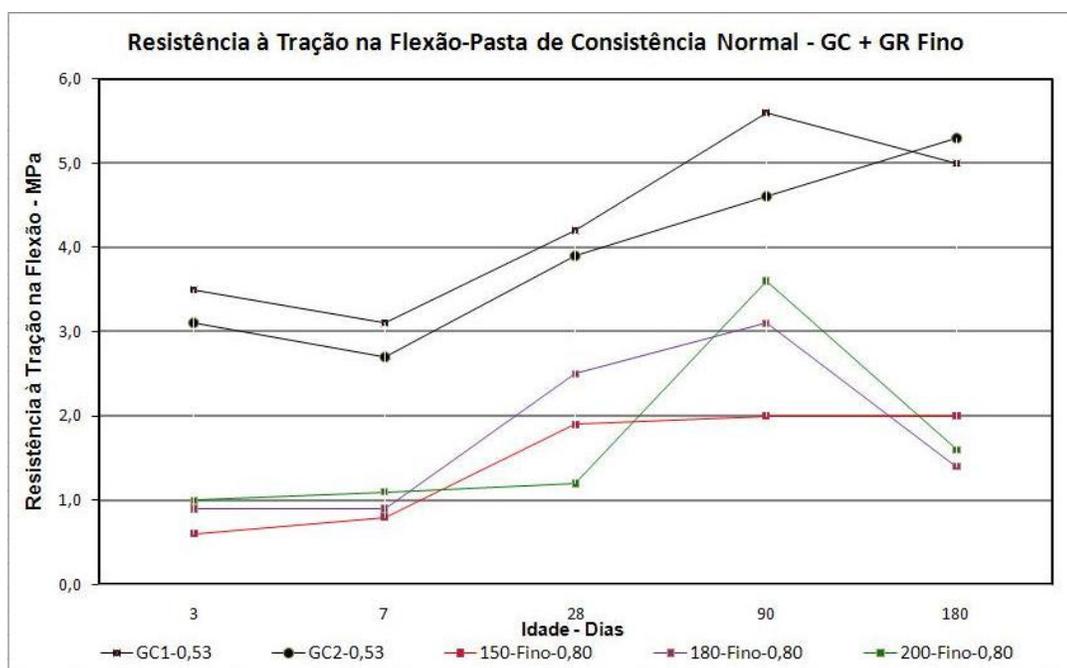


Figura 4.25 – Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.

Da mesma forma que se constatou para os resultados obtidos para a resistência à compressão, nos resultados encontrados para a resistência à tração na flexão apresentados nas Figuras 4.25 e 4.26 também fica evidente a influência da relação água/gesso nos valores alcançados para os gessos comerciais (a/g 0,53) e para os gessos reciclados (a/g 0,80 – fino e a/g 0,75 – grosso).

Como a relação água/gesso das pastas produzidas com GC1 e GC2 foram menores do que as das pastas com gesso reciclado, foram constatados resultados mais elevados para os gessos comerciais quando comparados aos gessos reciclados (diferença estatisticamente significativa) (Apêndice B2).

A Figura 4.25 apresenta as curvas de evolução das resistências à tração na flexão das pastas de consistência normal produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) e dos gessos reciclados finos (GR2, GR4 e GR6) (a/g 0,80).

Da análise da Figura 4.25 constata-se que os valores encontrados para a resistência à tração na flexão das pastas produzidas nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C apresentaram valores próximos entre si nas idades de 3, 7 e 180 dias. Na idade de 90 dias a grande diferença encontrada no resultado da resistência à tração na flexão do gesso calcinado na temperatura de 150 °C quando comparado aos obtidos para os gessos calcinados a 180 °C e 200 °C é atribuída à variabilidade ocorrida na moldagem dos corpos de prova ensaiados nessa idade.

Na Figura 4.26 estão apresentadas as curvas de evolução das resistências à tração na flexão das pastas de consistência normal produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) e dos gessos reciclados grossos (GR1, GR3 e GR5) (a/g 0,75).

Nas idades de 3 e 7 dias os resultados da resistência à tração na flexão foram praticamente os mesmos para os gessos calcinados nas três temperaturas estudadas. Percebe-se que o comportamento dos gessos reciclados GR1 (150 °C) e GR3 (180 °C), com relação a resistência à tração na flexão, são similares entre si, apresentando resultados parecidos, independente da temperatura de calcinação adotada, as variações ocorridas nos valores encontrados para a idade de 180 dias são atribuídas a variações no ensaio dos corpos de prova rompidos nessa idade.

Para o GR5 (200 °C) as diferenças encontradas nos resultados alcançados na idade de 28 dias e 180 dias são atribuídas à variabilidade ocorrida no ensaio.

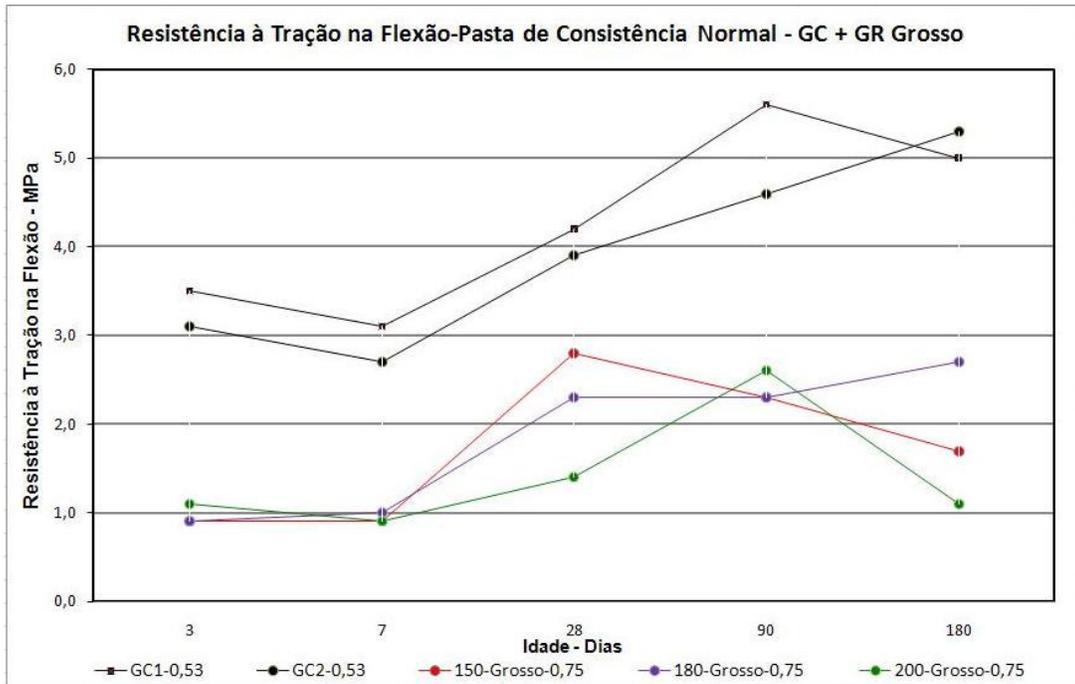


Figura 4.26 – Resistência à tração na flexão de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.

b.3) Dureza

Para as Figuras 4.27 e 4.28 tem-se as comparações dos resultados encontrados para a dureza dos gessos comerciais (GC1 e GC2) (a/g 0,53) com os gessos reciclados finos (GR2, GR4 e GR6) (a/g = 0,80) e gessos reciclados grossos (GR1, GR3 e GR5) (a/g = 0,75), calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C, respectivamente.

Nas Figuras 4.27 e 4.28 os resultados alcançados para a dureza nas pastas produzidas com os gessos comerciais são bem superiores aos obtidos para os gessos reciclados, pois a relação água/gesso foi menor para as pastas produzidas com os gessos comerciais.

Na comparação dos valores alcançados para a dureza nas pastas produzidas com os gessos reciclados finos (Figura 4.27) e com os gessos reciclados grossos (Figura 4.28) foram encontrados valores similares para a dureza em todas as idades ensaiadas.

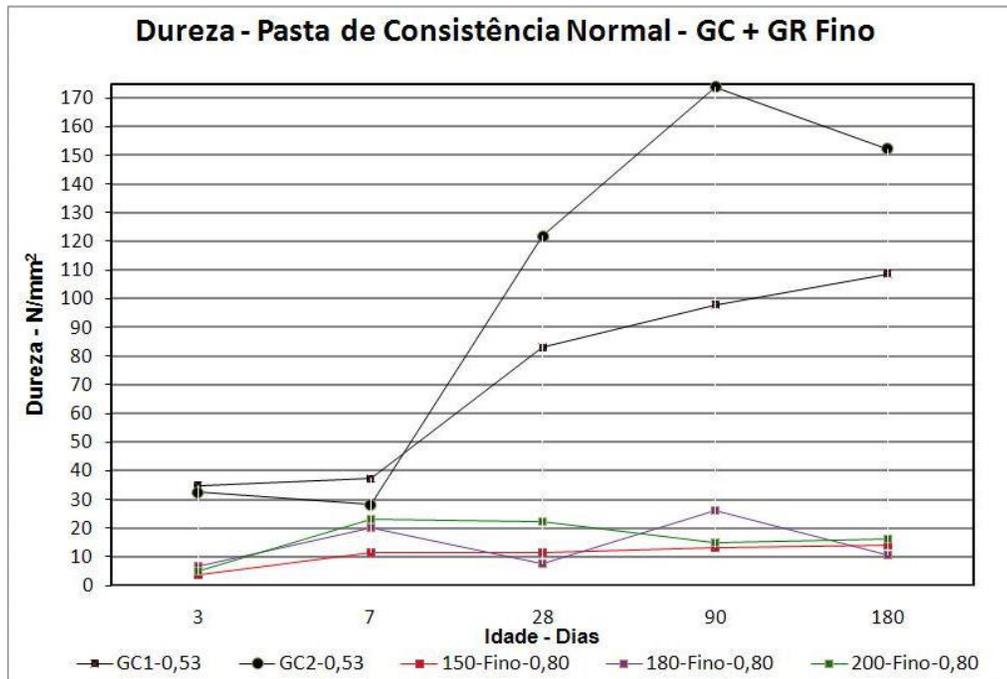


Figura 4.27 – Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) fino – Pasta de consistência normal.

Os gráficos obtidos na análise comparativa entre as médias encontradas (Método de Tukey), para a dureza das pastas produzidas com gessos comerciais e gessos reciclados, estão apresentados no Apêndice B3.

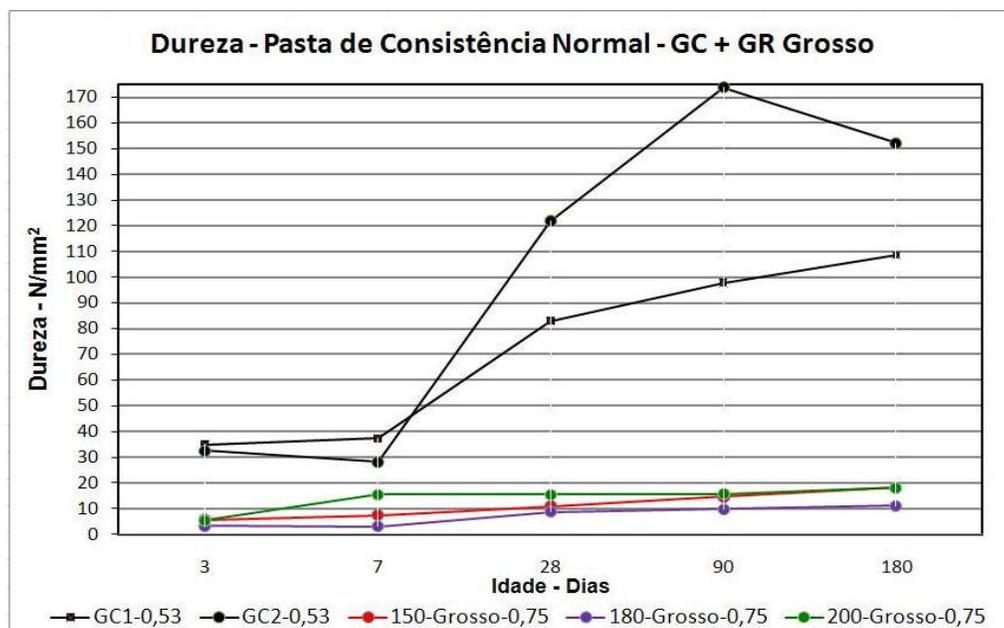


Figura 4.28 – Dureza de pastas de gesso comercial (GC) e gesso reciclado (GR) grosso – Pasta de consistência normal.

Assim, para os resultados de dureza nas pastas de consistência normal produzida com os gessos reciclados não se verificou variação significativa nos resultados para pastas produzidas com diferentes granulometrias e com gessos produzidos em diferentes temperaturas de calcinação (Figuras 4.27 e 4.28).

Portanto, a totalidade dos gessos reciclados estudados, utilizando a pasta de consistência normal, mesmo apresentando uma relação água/gesso diferente para os gessos grossos e finos (0,75 e 0,80 respectivamente), apresentaram para a resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza resultados parecidos quando se compara os resultados para cada propriedade estudada nas três temperaturas de calcinação analisadas e em todas as idades observadas.

c) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial e 50% de Gesso Reciclado

As Figuras 4.29 a 4.32 apresentam os resultados obtidos para a resistência à compressão e para a dureza de pastas de gesso produzidas utilizando-se 50% de gesso comercial e 50% de gesso reciclado fino e grosso nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C, ensaiados nas idades de 3, 7 e 28 dias. Todas as pastas foram analisadas com a relação água/gesso de 0,70 por ser frequentemente utilizada nas obras de construção civil.

c.1) Resistência à Compressão

As Figuras 4.29 e 4.30 apresentam os valores obtidos para as resistências à compressão de pastas de gesso produzidas somente com gesso comercial (GC1 e GC2) e pastas produzidas com 50% de gesso comercial e 50% de gessos reciclados finos calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C.

A Figura 4.29 apresenta os valores obtidos para as pastas produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) e pastas produzidas com 50% de gessos reciclados finos e 50% de gesso comercial GC1 (GM1, GM2 e GM3), e na Figura 4.30 tem-se os resultados obtidos para as pastas produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) e as pastas produzidas com 50% de gessos reciclados finos e 50% de gesso comercial GC2 (GM7, GM8 e GM9).

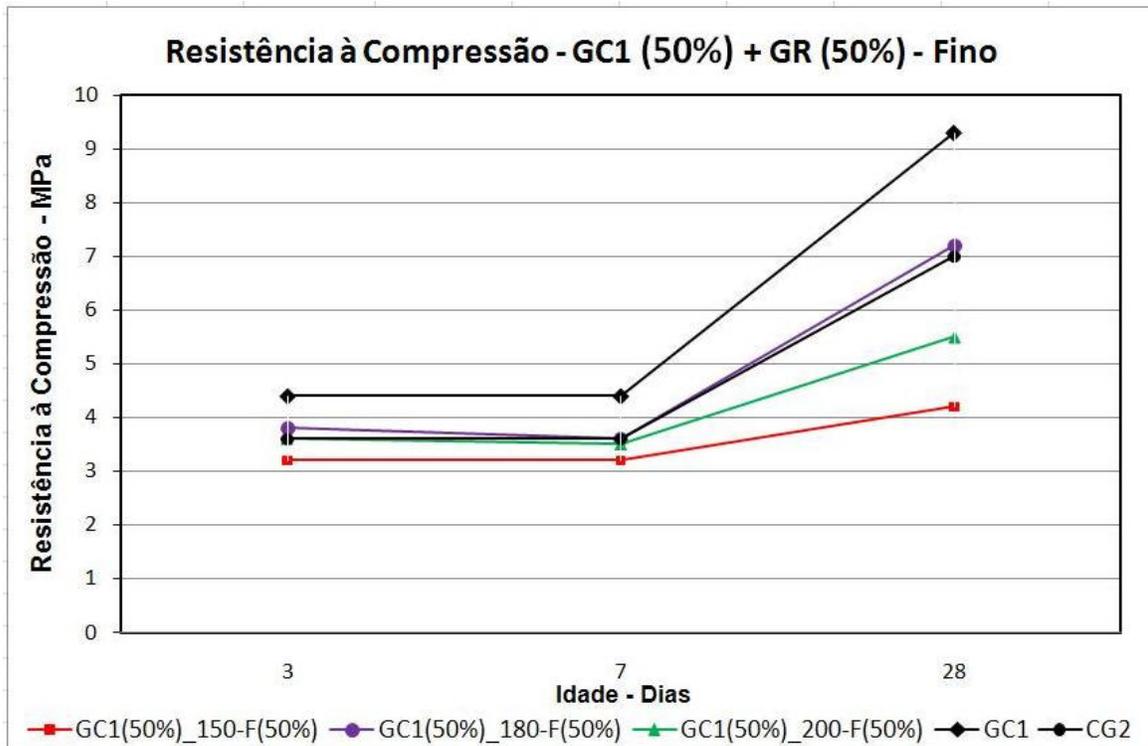


Figura 4.29 – Resistência à compressão – Misturas de GC1 (50%) com gessos reciclados finos (50%).

Na análise dos resultados apresentados nas Figuras 4.29 e 4.30 verifica-se que a resistência à compressão dos gessos comerciais (GC1 e CG2) não apresentaram evolução em seus valores desde a idade de 3 dias até a idade de 7 dias.

A partir da idade de 7 dias ocorreu evolução nos valores encontrados para a resistência à compressão dos gessos comerciais (GC1 e GC2). O GC1 apresentou na idade de 28 dias um valor duas vezes superior ao obtido para a idade de 7 dias, o GC2 também dobrou o valor encontrado na idade de 28 dias quando comparado com o resultado de 7 dias. Essa evolução nas resistências dos gessos comerciais é atribuída à cura e a perda de umidade (secagem) dos corpos de prova.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam uma comparação entre os valores obtidos para as resistências à compressão de pastas de gesso produzidas somente com gesso comercial (GC1 e GC2) e pastas produzidas com as misturas de 50% de gesso comercial e 50% de gessos reciclados grossos calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C (GM4, GM5, GM6 e GM10, GM11, GM12).

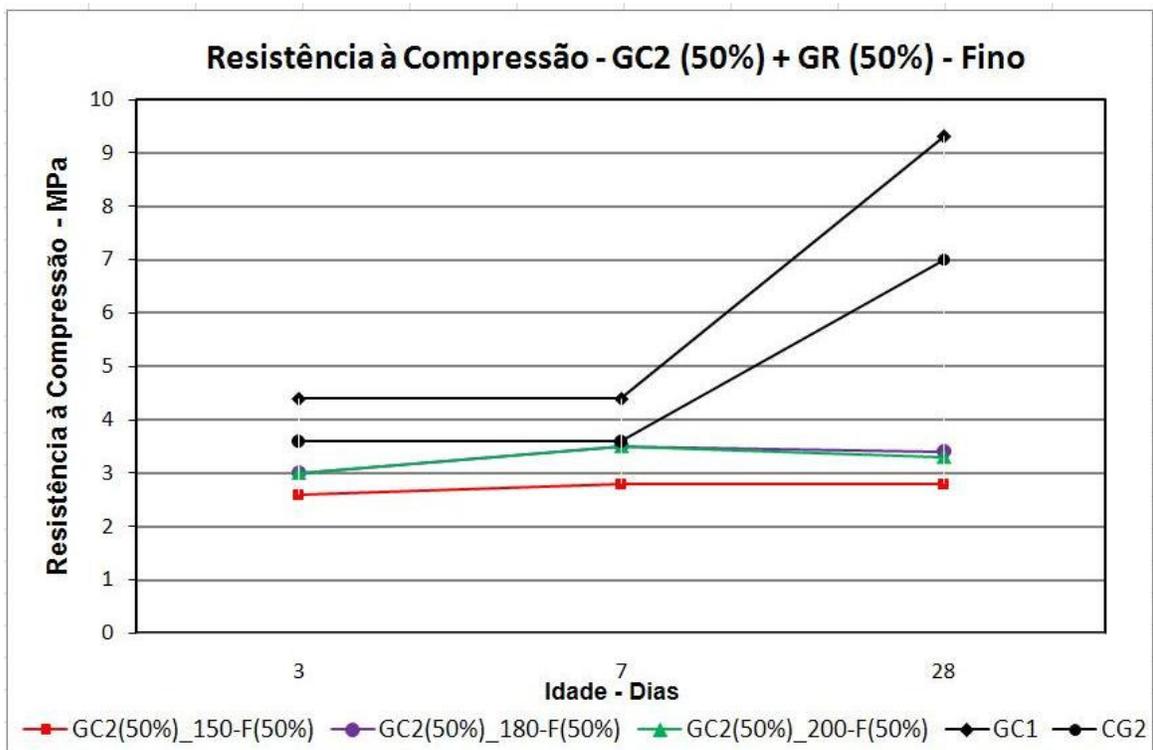


Figura 4.30 – Resistência à compressão – Misturas de GC2 (50%) com gessos reciclados finos (50%).

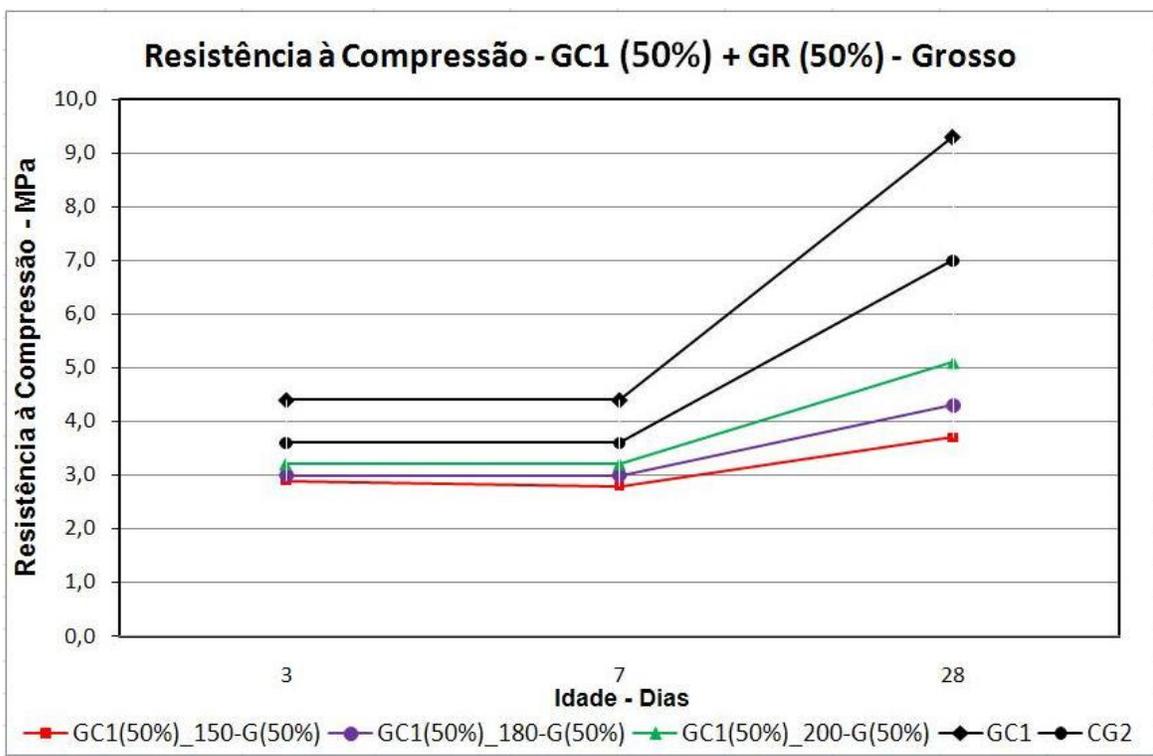


Figura 4.31 – Resistência à compressão – Misturas de GC1 (50%) com Gessos reciclados grossos (50%).

Os valores alcançados pelas pastas produzidas com as misturas de gessos comerciais (50%) (GC1 e GC2) com gessos reciclados (50%) grossos (150 °C, 180 °C e 200 °C) foram menores do que os atingidos pelas pastas produzidas com as mesmas misturas, mas com gesso reciclado fino (Figuras 4.29 e 4.30).

Essa diferença encontrada nos resultados é atribuída ao tamanho das partículas que compõem os gessos (finos e grossos). Pastas de gesso de menor granulometria apresentam maior resistência mecânica (WITKAMP; VAN DER ERDEN; VAN ROSMALEN, 1990; HAND, 1994; KARNI; KARNI, 1995; RIDGE, 1961 *apud* HENAO, 1997). Entretanto essa diferença não foi estatisticamente significativa (Apêndice C1).

As pastas produzidas com a mistura de 50% de gesso reciclado (grosso) e 50% de gesso GC1 (GM4, GM5 e GM6) apresentaram melhor desempenho do que as pastas produzidas com 50% de GC2 e os gessos reciclados grossos (50%) (GM10, GM11 e GM12) (Figuras 4.31 e 4.32).

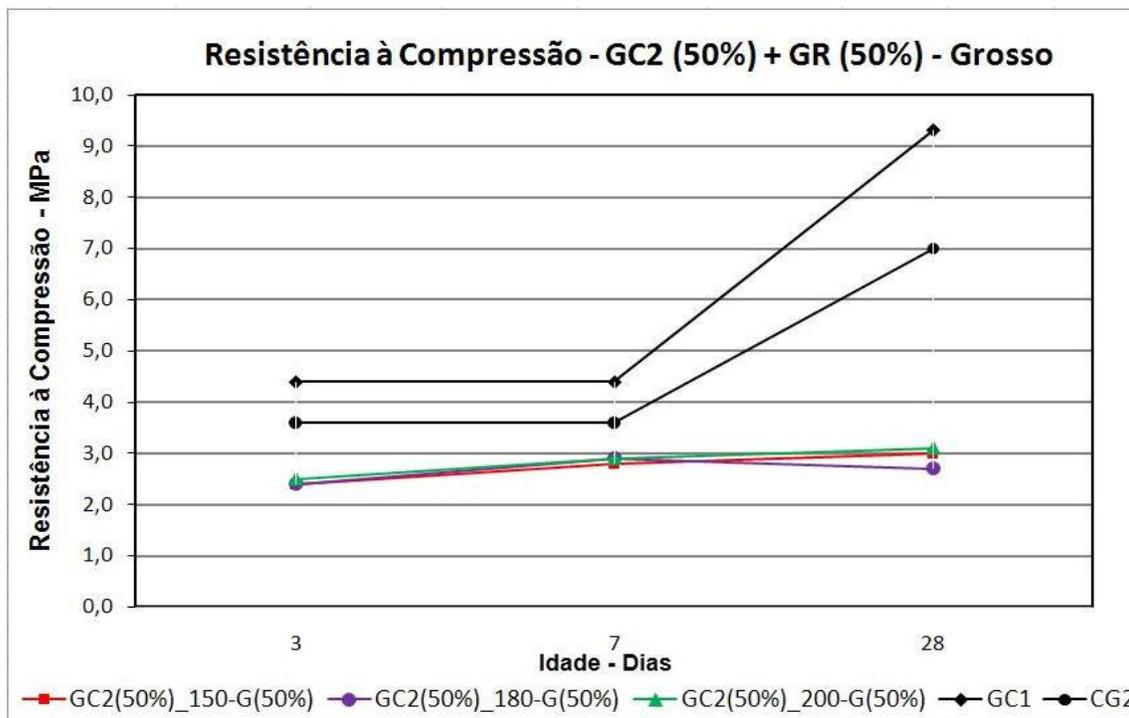


Figura 4.32 – Resistência à compressão – Misturas de GC2 (50%) com Gessos reciclados grosso (50%).

O melhor desempenho para a resistência à compressão nas pastas com 50% de GC1 é atribuído a maior finura do GC1 quando comparado ao GC2, já que em termos de composição química e hidratação esses gessos (gessos comerciais) não apresentaram diferenças significativas entre si.

Nas comparações das pastas mistas produzidas com 50% de gesso reciclado, nas duas finuras estudadas e nas três temperaturas de calcinação utilizadas não se observaram diferenças estatisticamente significativas na maioria dos resultados comparados (Apêndice C1). Isso é um indicativo de que todo o resultado independente do grau de moagem, da idade e da temperatura de calcinação pode ser considerado semelhante entre si.

Dessa forma, esse resultado gera uma expectativa otimista quanto à utilização do gesso reciclado, pois na substituição da metade da quantidade de um gesso comercial por um gesso reciclado se atingiu, nas idades iniciais, resistência à compressão próxima a da pasta de gesso comercial. Isso traz um benefício ambiental, pois esse resíduo reutilizado não está sendo descartado no meio ambiente. Evidentemente, essa substituição do produto original por um produto reciclado também pode acarretar uma redução nos custos financeiros de produção, desde que o valor do gesso reciclado seja menor do que o gesso comercial.

Atribui-se a diferença nos resultados alcançados para as pastas mistas de gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C) (50%) com gessos comerciais (50%), e as pastas produzidas somente com gessos comerciais, à composição química dos gessos e ao tamanho das partículas que compõem esses gessos. Isso ocorre porque na cinética de hidratação dos gessos, as pastas com gessos de menor granulometria apresentam maior resistência mecânica (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; WITKAMP; VAN DER ERDEN; VAN ROSMALEN, 1990; HAND, 1994; PAPADAKIS ; VENUAT, 1970 *apud* DIAS, 1994; JEULIN; MONNAIE; PÈRONNET, 2001; HILL; PLANK, 2004; REYNAUD *et al.*, 2006; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

c.2) Dureza

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam os resultados obtidos para a dureza de pastas de gesso produzidas com gesso comercial GC1 (50%) e gessos reciclados (50%) (fino e grosso) (GM1, GM2, GM3 e GM4, GM5, GM6, respectivamente) e pastas com gesso comercial GC2 (50%) e gessos reciclados (50%) (fino e grosso), (GM7, GM8, GM9 e GM10, GM11, GM12, respectivamente).

Os gessos reciclados foram produzidos em diferentes temperaturas de calcinação (150 °C, 180 °C e 200 °C) e todas as pastas foram analisadas com a relação água/gesso de 0,70, por ser uma relação frequentemente utilizada nas obras de construção civil.

Os gráficos obtidos na análise estatística (Método de Tukey) para a dureza estão apresentados no Apêndice C2.

Da observação dos resultados alcançados para a dureza constata-se que as pastas mistas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si, na maioria das três idades observadas (3, 7 e 28 dias), independente do gesso comercial utilizado, do grau de moagem e da temperatura de calcinação. Dessa forma, os resultados obtidos para a dureza das pastas mistas podem ser considerados semelhantes entre si.

Algumas variações encontradas entre os resultados (Figura 4.33) são atribuídas às condições de produção e cura dos corpos de prova e durante os ensaios (falhas de moldagem, cura, secagem dos corpos de prova e procedimentos de ensaio).

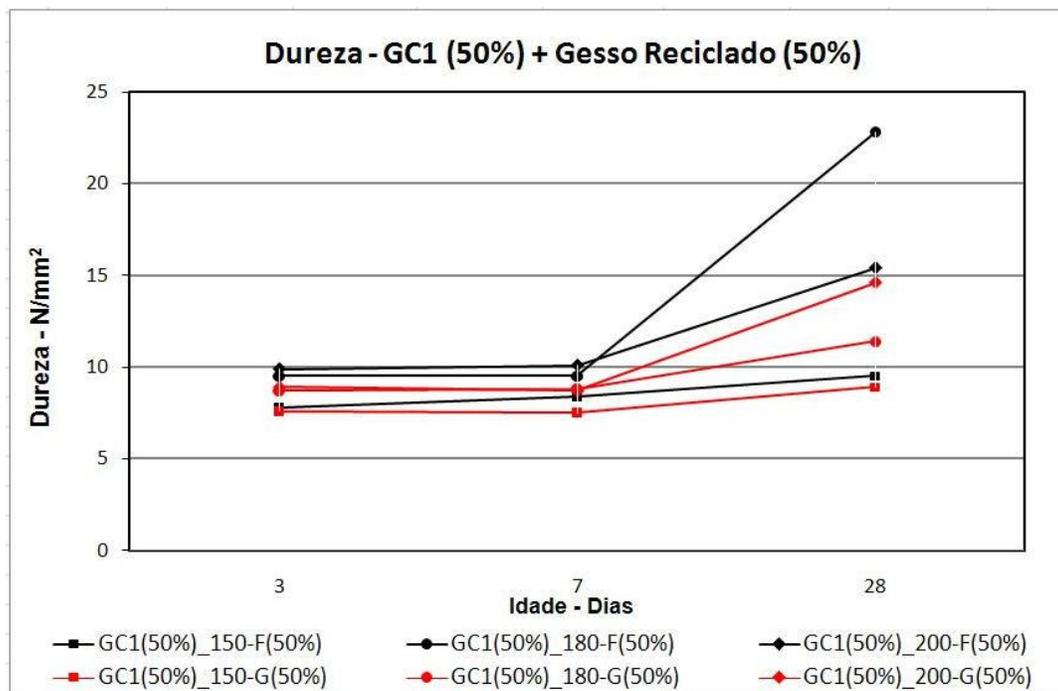


Figura 4.33 – Dureza – Misturas de GC1 (50%) com gessos reciclados (Finos e Grossos) (50%).

Na Figura 4.34 (pastas mistas produzidas com gesso GC2 e gessos reciclados) se observa que todas as misturas analisadas, além de apresentarem resultados similares entre si, não apresentaram variação nos resultados obtidos individualmente para as idades de 3, 7 e 28 dias.

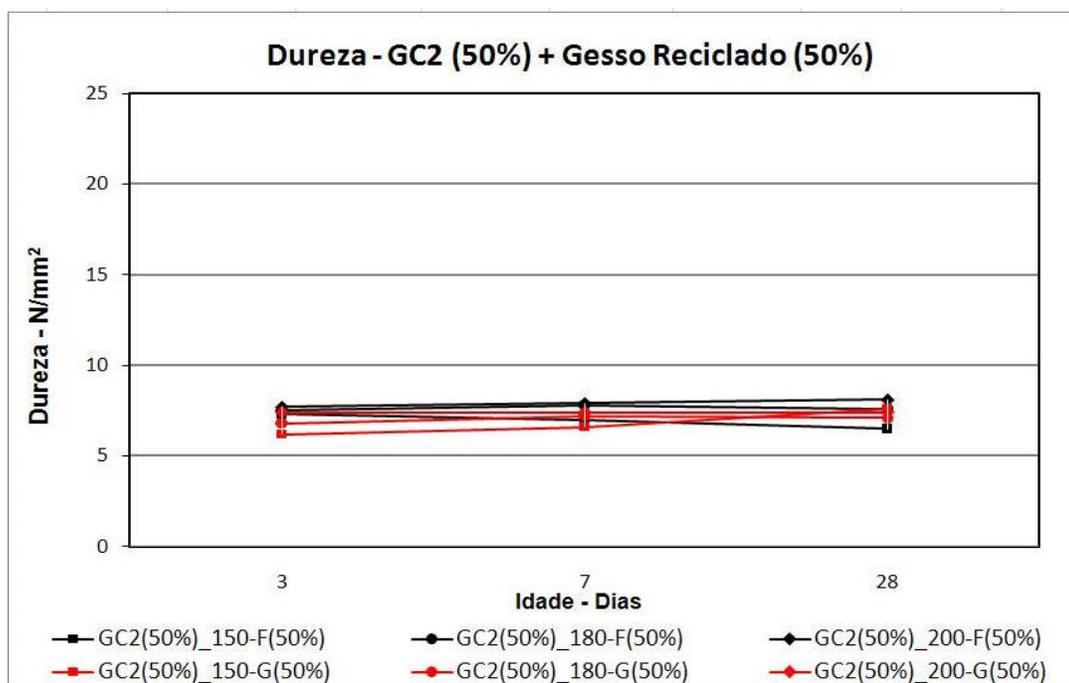


Figura 4.34 – Dureza – Misturas de GC2 (50%) com gessos reciclados (Finos e Grossos) (50%).

4.5. – Análise de Imagens - Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Nas Figuras 4.35 até 4.59 estão apresentadas as microscopias das pastas de gessos comerciais (GC1 e GC2); dos gessos reciclados (calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C), com duas granulometrias (Fino e Grosso); e também de misturas de gessos comercial (GC1 ou GC2) (50%) e gesso reciclado (50%) (Fino ou Grosso).

Nesta pesquisa experimental, a análise da microestrutura nas pastas de gesso consistiu na observação da formação e distribuição dos cristais formados durante o processo de hidratação e da estrutura porosa das pastas produzidas com diferentes relações água/gesso (a/g 0,70, e a/g pastas de consistência normal). As pastas de gesso avaliadas foram: pastas de gesso comercial (GC1 e GC2), pastas de gessos reciclados (Fino e Grosso) calcinados nas três temperaturas.

Deve-se observar que as dimensões dos cristais de hemi-hidrato, tanto dos gessos comerciais quanto dos gessos reciclados, (comprimento, largura e diâmetro da estrutura porosa das pastas) foram medidas nas microscopias originais obtidas no microscópio eletrônico de varredura. As microscopias apresentadas nas Figuras 4.35 até 4.59 tiveram as suas dimensões reduzidas quando comparadas às imagens originais e, portanto, não apresentam as proporções adequadas para a medição das dimensões dos cristais.

4.5.1 – Pastas Produzidas com a Mesma Relação Água/Gesso (a/g 0,70)

As Figuras 4.35 até 4.41 apresentam as micrografias obtidas para os gessos produzidos com a mesma relação água/gesso (0,70) nas idades de 28 dias e 180 dias.

No Quadro 4.10 é feita a apresentação de um resumo das dimensões (comprimento, largura e diâmetro da abertura dos poros) encontradas para os cristais de di-hidrato (gessos comerciais e gessos reciclados) das pastas estudadas com relação água/gesso 0,70, nas idades de 28 e 180 dias.

Quadro 4.10 – Resumo das dimensões dos cristais de gipsita encontrados nas microscopias para cada um dos gessos estudados (comerciais e reciclados) – a/g 0,70.

Gessos	Idade (dias)	Forma do Cristal	Comprimento (μm)			Largura (μm)			Diâmetro dos Poros (μm)		
			Máx	Médio	Mín	Máx	Médio	Mín	Máx	Médio	Mín
GC1	28	Acicular	22	10 a 12	-	-	3	-	-	3 a 3,5	-
GC1	180	Acicular	-	7 a 12	-	-	4	-	-	3	-
GC2	28	Acicular	20	10 a 11	-	-	3 à 6	-	-	3 a 5	-
GC2	180	Acicular	17	10 a 12	-	-	5	-	-	4	-
150-F	28	Acicular	14	10	-	-	4	-	-	6	-
150-F	180	Acicular	20	12,5 a 15	7,5	-	3 a 4	-	-	1,7 a 6,5	-
150-G	28	Acicular	-	10 a 17	4	-	2 a 4	-	-	2 a 6,5	-
150-G	180	Acicular	-	12,5 a 20	4	14	4 a 5	-	-	2 a 4	-
180-F	28	Acicular	-	8 a 14	3	-	4	-	11	4 a 6	2
180-F	180	Acicular	-	10 a 16,5	5	-	2,5 a 6	-	-	2 a 6	-
180-G	28	Acicular	-	10 a 16,5	3	-	4	-	20	2,5 a 8	1
180-G	180	Acicular	-	11 a 20	5	8	4	-	-	2,5 a 5	-
200-F	28	Acicular	-	10 a 15	4	-	4	-	12,5	2,5 a 6,5	-
200-F	180	Acicular	6	12,5 a 18	-	-	4	-	13	1,5 a 6	-
200-G	28	Acicular	-	12,5 a 21	-	-	3,5 a 4	-	-	1,5 a 4	-
200-G	180	Acicular	-	10 a 17,5	-	-	2,5 a 5	-	6	2,5 a 4	-

F = fino

G = grosso

a) Pastas Produzidas com Gessos Comerciais – GC1 e GC2

Na Figura 4.35 pode ser observada a formação cristalina de uma pasta produzida com gesso comercial (GC1 e GC2) na idade de 28 dias. E na Figura 4.36 tem-se a formação cristalina da mesma pasta (GC1 e GC2) na idade de 180 dias.

Na microscopia apresentada na Figura 4.35 (a), observa-se uma estrutura cristalina formada na sua maior parte por cristais em forma de agulhas entrelaçadas, apresentando comprimento médio em torno de 10 μm a 12 μm , com algumas agulhas chegando até o comprimento de 22 μm . A largura dos cristais é de aproximadamente 3 μm e os poros presentes na pasta apresentam aberturas com diâmetros de 3 μm a 3,5 μm (Quadro 4.10).

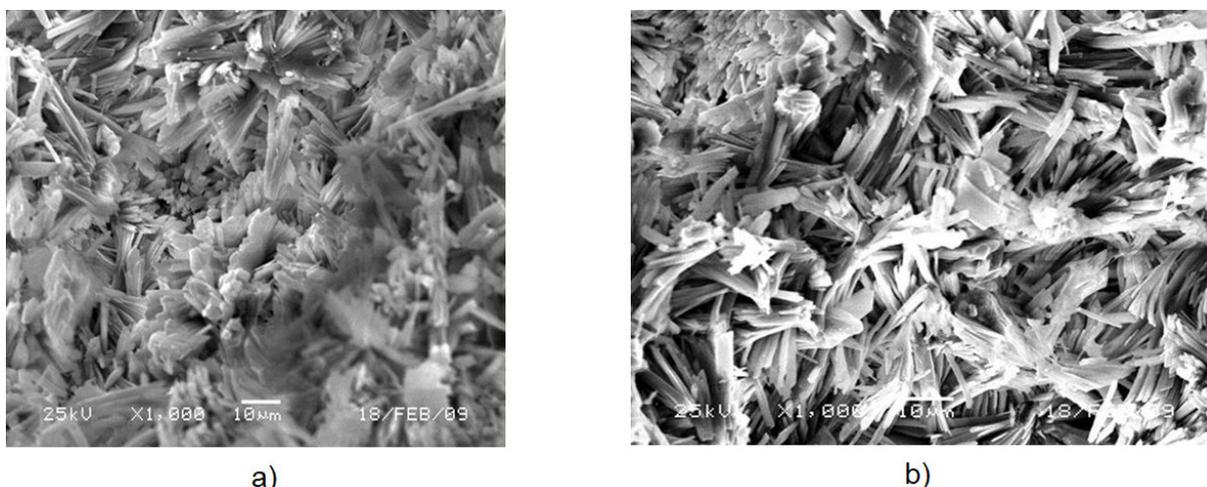
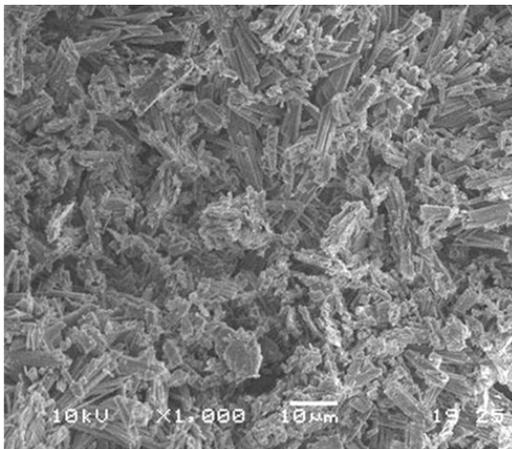


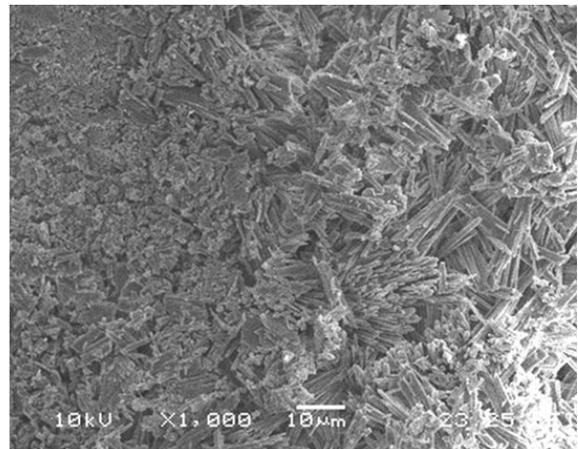
Figura 4.35 – Microscopia – 28 dias – Pastas de GC1 (a) e GC2 (b) – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes.

Na Figura 4.35 (b), foi observada a formação de cristais em forma de agulhas entrelaçadas (similares às do GC1) com comprimento médio de 10 μm a 11 μm , com algumas agulhas chegando até o comprimento de 20 μm . A largura dos cristais variou de 3 μm até 6 μm e os poros presentes na pasta apresentam aberturas com diâmetros de 3 μm a 5 μm (Quadro 4.10).

Portanto, na idade de 28 dias, tanto o GC1 quanto o GC2, apresentaram cristais de gipsita com pouca variação em suas dimensões, estando distribuídos por toda a pasta (Figura 4.35). Essa constatação também foi verificada por De Milito (2007) e Gartner (2009) em estudo realizado em microscopias de pastas de gesso comercial com relação água/gesso 0,70.



a)



b)

Figura 4.36 – Microscopia – 180 dias – Pastas de GC1 (a) e GC2 (b) – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes.

Na Figura 4.36 foi encontrada formação cristalina semelhante à observada para a idade de 28 dias, tanto para o GC1 quanto para o GC2, o comprimento médio dos cristais gerados na hidratação foi de 7 μm a 12 μm , com largura de 4 μm a 5 μm e diâmetro aproximado dos poros com valor de 3 μm a 4 μm (Quadro 4.10).

Dessa forma, as estruturas cristalinas encontradas para o GC1 e GC2 nas idades de 28 e 180 dias, foram praticamente as mesmas, apresentando tamanhos de agulhas e abertura dos poros contidos nas pastas com dimensões similares.

Como a estrutura cristalina das pastas de gesso tem influência nas propriedades mecânicas, o fato das pastas produzidas com o gesso comercial (GC1 e GC2) apresentarem estruturas cristalinas similares nas idades de 28 dias e 180 dias indica que não ocorreu um desenvolvimento significativo de produtos de hidratação (estrutura cristalina) entre essas duas idades (AMATHIEU; BOISTELLE, 1988; KARNI; KARNI, 1995; BADENS, VEESLER; BOISTELLE, 1999; GMOUH et *al.*, 2003; CAVALCANTI, 2006).

Assim, isso pode ser uma justificativa para os resultados alcançados pela resistência mecânica (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza) das pastas produzidas com os gessos comerciais, pois, não se observou aumento significativo para as propriedades mecânicas destas pastas desde a idade de 28 dias até a idade de 180 dias (Apêndices A1, A2 e A3).

A porosidade nas pastas (Figuras 4.35 e 4.36) pode ser observada nas micrografias por meio das áreas escuras produzidas pela evaporação da água de amassamento durante a secagem do material. Essa situação também foi observada por Henaó (1997), Hincapie; Cincotto (1997) e De Milito (2007) em estudos realizados com gessos comerciais (a/g 0,70).

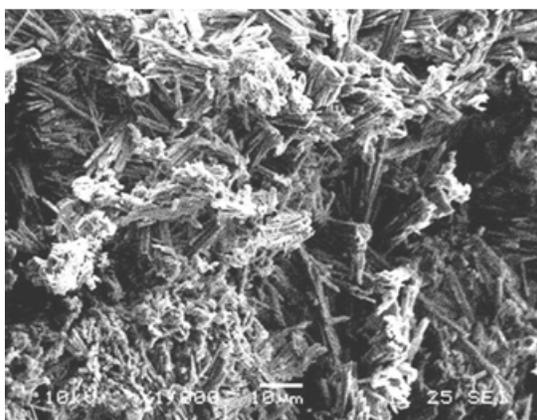
Para os gessos GC1 e GC2, as estruturas cristalinas encontradas (estrutura porosa, comprimento médio e largura dos cristais de di-hidrato) foram similares às encontradas por outros pesquisadores em estudos de microscopia realizados com pastas utilizando-se gesso comercial na relação água/gesso de 0,70 (HENAO, 1997; HINCAPIE; CINCOTTO, 1997; DE MILITO, 2007; SINGH; MIDDENDORF, 2007; GARTNER 2009). São essas estruturas de agulhas entrelaçadas aos núcleos de cristalização que dão origem aos arranjos aciculares formando uma estrutura mais compacta quando ocorre o endurecimento das pastas de gesso (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Esse entrelaçamento entre os cristais foi observado também por Bardella e Camarini (2007a), em estudos com pastas produzidas com gesso comercial e gesso reciclado calcinado na temperatura de 200 °C.

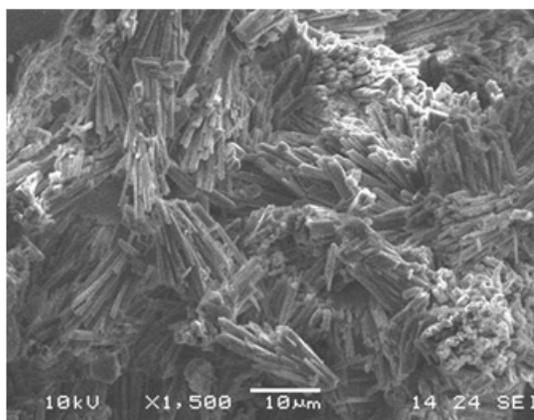
b) Pastas Produzidas com Gesso Reciclado (150 °C, 180 °C e 200 °C)

Nas Figuras 4.37 a 4.41 é feita a apresentação das pastas produzidas com os gessos reciclados estudados neste trabalho experimental (relação água/gesso 0,70). Foi observado que tanto para os gessos comerciais (GC1 e GC2) (Figuras 4.35 e 4.36) quanto para os gessos reciclados calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C e 200 °C, os produtos de hidratação formaram cristais de di-hidrato em forma de agulhas entrelaçadas por toda a pasta.

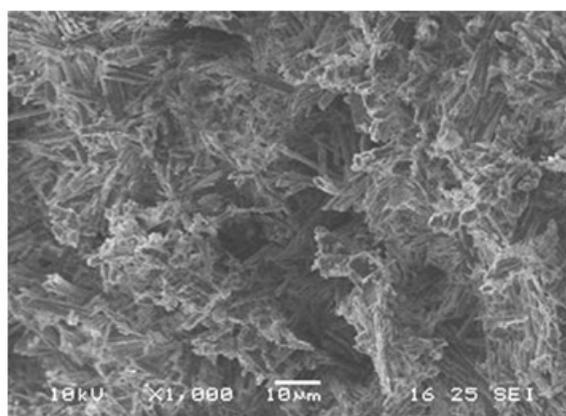
A Figura 4.37 apresenta as microscopias de pastas de gessos reciclados finos na idade de 28 dias calcinados nas temperaturas de 150 °C (a), 180 °C (b) e 200 °C (c) e na Figura 4.38 é feita a apresentação das microscopias de pastas de gessos reciclados finos na idade de 180 dias nas temperaturas de 150 °C (a), 180 °C (b) e 200 °C (c).



a)



b)



c)

Figura 4.37 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes (a) e (c) e 1500 vezes (b).

Da análise da Figura 4.37 foi observado que os comprimentos médios dos cristais em forma de agulhas (aciculares) dos gessos reciclados finos calcinados nas três temperaturas, na idade de 28 dias, foram similares (comprimento, largura e dimensão dos poros) (Quadro 4.10).

Da mesma forma, da análise da Figura 4.38, observa-se que na idade de 180 dias, as estruturas cristalinas das pastas de gessos reciclados finos (150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c)) também foram similares entre si, com relação ao comprimento, largura e dimensões dos poros.

Entretanto, na idade de 180 dias as pastas produzidas com gessos reciclados (fino) apresentou diminuição da porosidade e aumento do comprimento dos cristais quando comparada a mesma pasta na idade de 28 dias (Quadro 4.10).

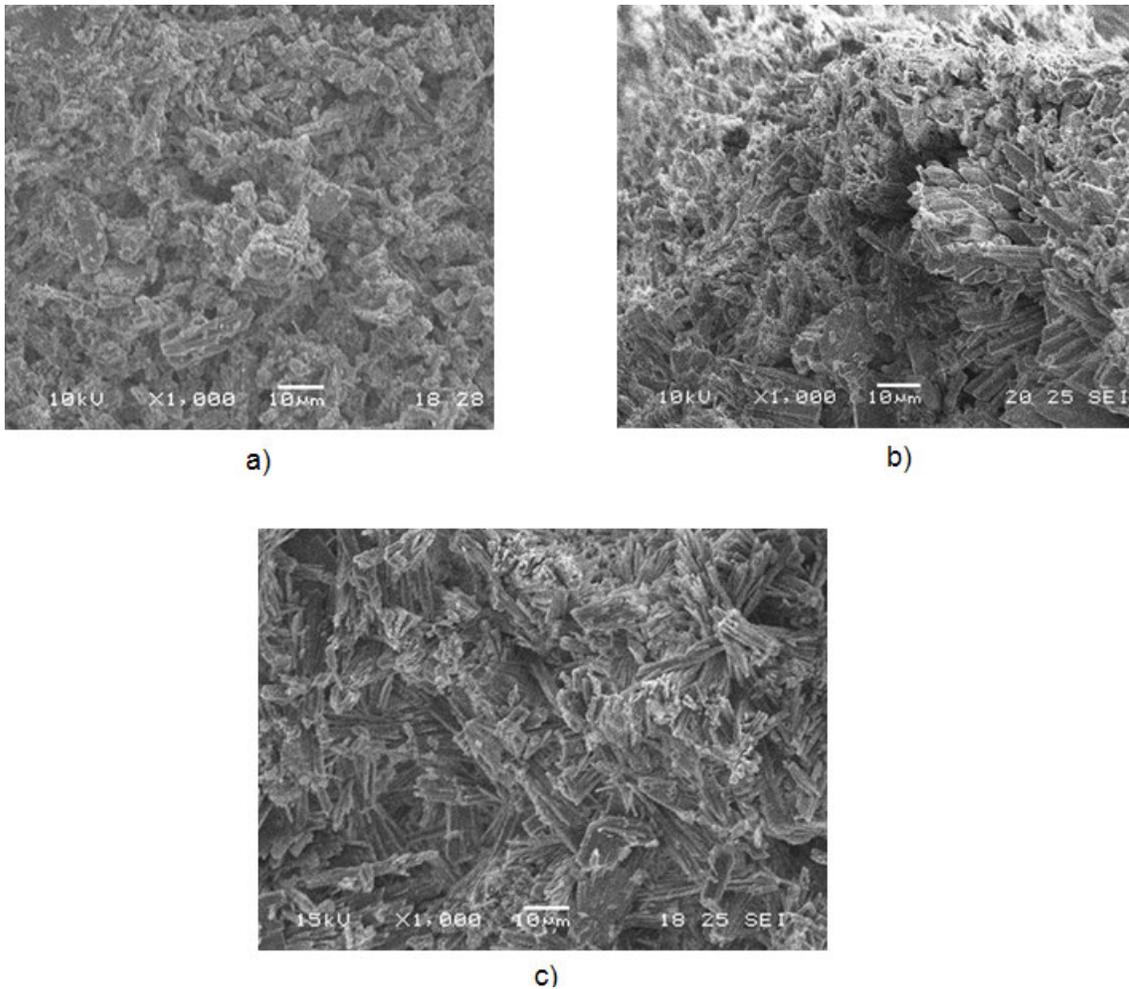


Figura 4.38 – Microscopia – Pastas de gessos reciclados finos - 180 dias – Relação água/gesso 0,70 – 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.

Esse fato pode ser atribuído à amostra utilizada para o ensaio de microscopia, já que foi realizada com materiais retirados em diferentes regiões do corpo de prova. Essa diminuição da estrutura porosa também foi identificada por um aumento de resistência à compressão. Entretanto, essa variação ocorrida para os valores da resistência à compressão entre a idade de 28 e 180 dias não foi estatisticamente significativa (Apêndice A1).

Na Figura 4.39 é feita a apresentação das microscopias das pastas produzidas com gessos reciclados grossos na idade de 28 dias.

Para a idade de 28 dias a pasta produzida com os gessos reciclados grossos (Figura 4.39), apresentou comprimento dos cristais (aciculares) com valores médios de 10 µm a 21 µm apresentando ainda alguns cristais menores com comprimento de 4 µm. A largura dos

cristais foi a mesma para as três temperaturas de calcinação e o diâmetro da abertura dos poros variou de 1,5 μm a 8 μm .

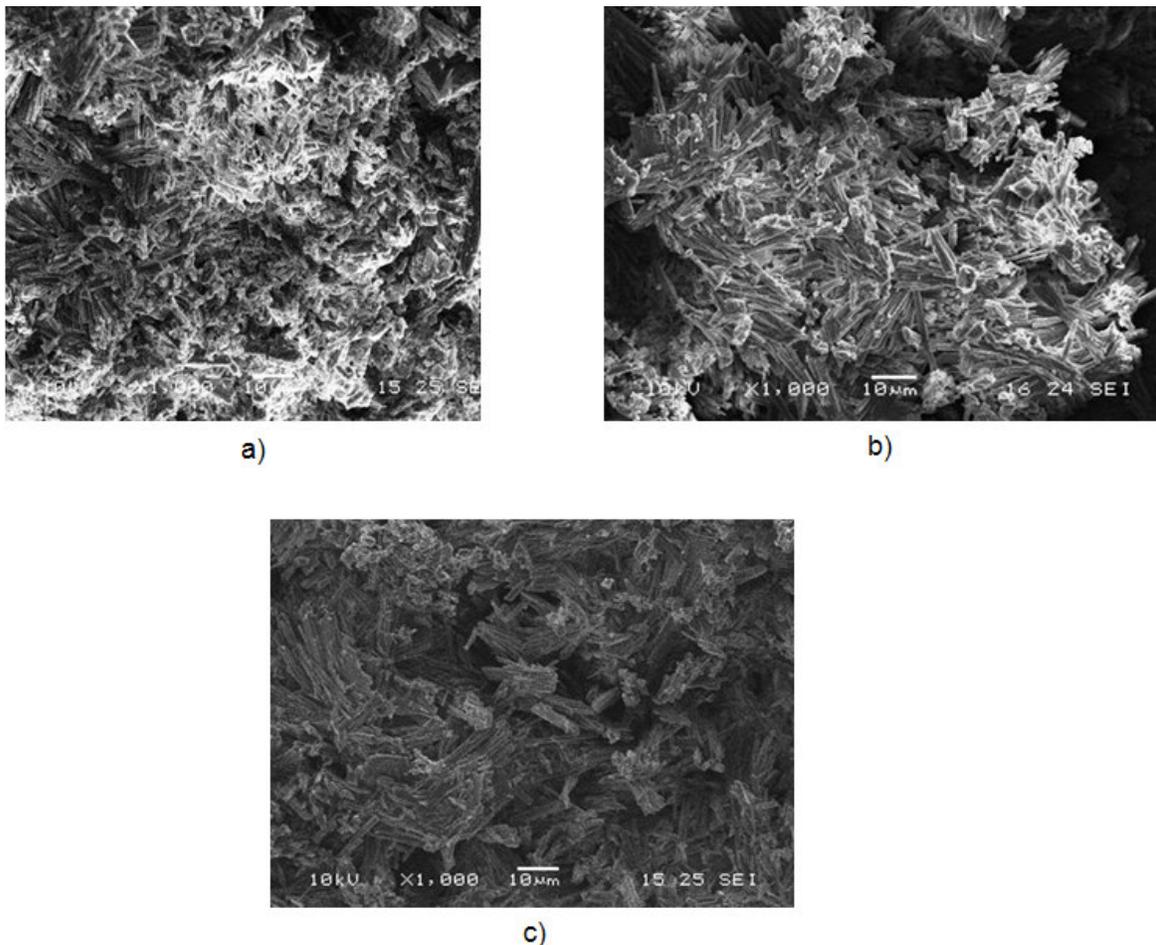
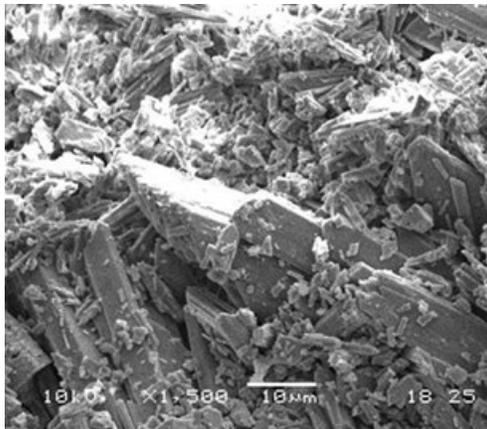


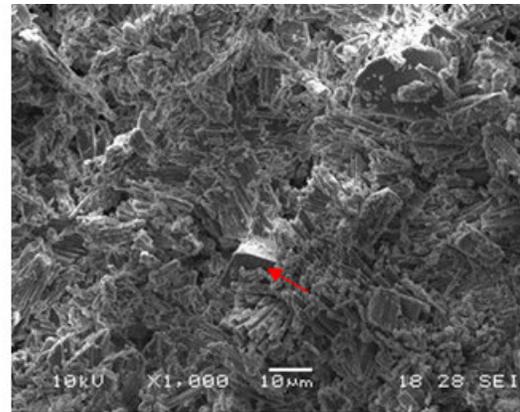
Figura 4.39 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.

Na Figura 4.40 é feita a apresentação das microscopias das pastas de gesso reciclado grosso na idade de 180 dias (150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c)) Nessa idade, as estruturas cristalinas produzidas durante a hidratação foram semelhantes para as três temperaturas de calcinação estudadas (Quadro 4.10).

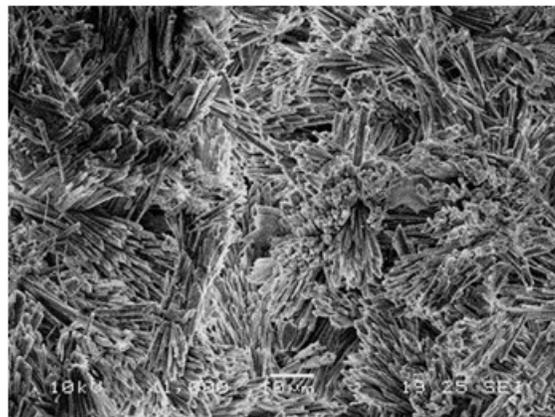
Deve-se destacar que os gessos reciclados finos e grossos, independente da finura e temperatura de calcinação, não apresentaram diferenças significativas para a estrutura cristalina para a idade de 28 dias e 180 dias (Quadro 4.10).



a)



b)



c)

Figura 4.40 – Microscopia – Pastas de gessos reciclados grossos - 180 dias – Relação água/gesso 0,70 – 150 °C (a) 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1500 vezes (a) e 1000 vezes (b) e (c).

Entre os cristais de sulfato de cálcio di-hidratado (Figura 4.40 (b)) observa-se uma estrutura cristalina diferente das demais. Pelo seu aspecto e forma pode ser um cristal de carbonato de cálcio (CaCO_3) provavelmente presente como uma pequena fração de impureza na amostra analisada.

Comparando-se a estrutura cristalina entre as pastas com gessos comerciais e com gessos reciclados atribui-se, para a diferença encontrada entre os resultados das propriedades mecânicas dos gessos comerciais e dos gessos reciclados finos e grossos (150 °C, 180 °C e 200 °C), em parte, à granulometria diferenciada entre os gessos reciclados e gessos comerciais e também à morfologia dos cristais. Outra parcela referente à diferença obtida entre as propriedades mecânicas dos gessos comerciais e gessos reciclados (Finos e Grossos) pode estar relacionada com algumas impurezas contidas nos gessos reciclados

(LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995; CLIFTON, 1973 *apud* ANTUNES, 1999; GMOUH *et al.*, 2003).

Ressalta-se que na comparação das microscopias produzidas por pastas de gesso com a mesma relação água/gesso (0,70), de gessos comerciais (Figuras 4.35 e 4.36) com as microscopias dos gessos reciclados (Figuras 4.37 e 4.40) foi observado que os gessos reciclados apresentam, na sua fase cristalina, material composto por cristais com agulhas não tão desenvolvidas quanto às observadas para os gessos comerciais, sendo na sua maioria, pequenos cristais (Figura 4.41).

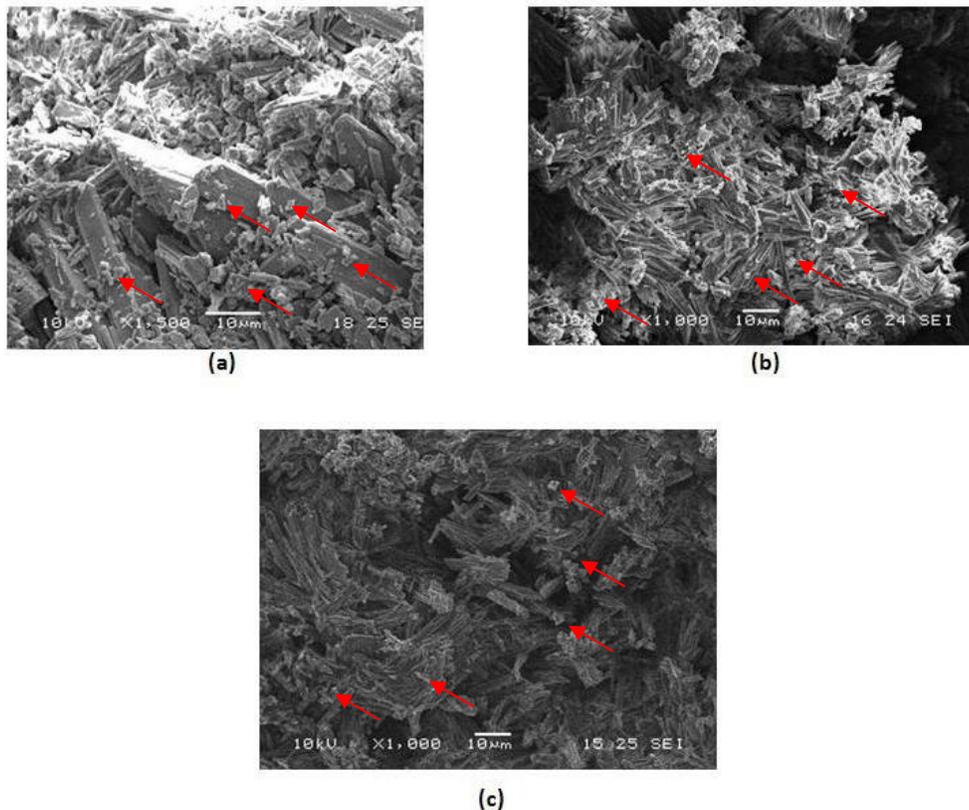


Figura 4.41 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado 150 °C (a), 180 °C (b) e 200 °C (c) – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes.

Essa heterogeneidade apresentada pela estrutura cristalina dos gessos reciclados quando comparados aos gessos comerciais (presença de cristais pequenos e de aspecto quebradiço) também foi observada por Carvalho (2005) em estudo de reciclagem de gesso de construção que foi moído na mesma finura do gesso comercial utilizado como referência em seu trabalho. Portanto, para os gessos comerciais (GC1 e GC2) foi observada uma distribuição cristalina bem mais homogênea, com agulhas bem definidas, do que a

encontrada para os gessos reciclados, podendo ser responsáveis pelas propriedades que lhes conferem maior resistência mecânica.

4.5.2 – Pastas Produzidas com a Mesma Consistência (Consistência Normal)

As Figuras 4.42 até 4.47 apresentam as micrografias obtidas para os gessos comerciais (GC1 e GC2) e gessos reciclados (Fino e Grosso) (calcinados nas três temperaturas: 150 °C, 180 °C e 200 °C). As pastas desses gessos apresentam a mesma consistência (pasta de consistência normal) nas idades de 28 dias e 180 dias.

O Quadro 4.11 apresenta um resumo das dimensões (comprimento, largura e diâmetro da abertura dos poros) encontradas para os cristais de gesso (comercial e reciclado) nas idades de 28 e 180 dias, para as pastas produzidas com relação água/gesso = consistência normal.

Quadro 4.11 – Resumo das dimensões dos cristais de gipsita encontrados nas microscopias para cada um dos gessos estudados (comerciais e reciclados) pasta de consistência normal.

Gessos	Idade (dias)	Forma do Cristal	Comprimento (μm)			Largura (μm)			Diâmetro dos Poros (μm)		
			Máx	Médio	Mín	Máx	Médio	Mín	Máx	Médio	Mín
GC1	28	Acicular		16,5 a 22			5 a 8,5			1,3 a 1,7	
GC1	180	Acicular		12,5 a 21			3,5 a 4			2,5	
GC2	28	Acicular		12,5 a 21			5 a 6,5			1 a 2,5	
GC2	180	Acicular		10 a 16,5			4 a 7,5			1 a 1,5	
150-F	28	Acicular		12,5 a 21			2,4 a 4			3,5 a 8,5	
150-F	180	Acicular		11,5 a 19			4 a 6			3,5 a 6	
150-G	28	Acicular		14 a 16			6			5 a 10	
150-G	180	Acicular		12,5 a 14			5			2,5 a 5	
180-F	28	Acicular		13,5 a 21	8,5		5			3,5 a 10	
180-F	180	Acicular		12,5 a 16			3,5 a 6			1,7 a 7,5	
180-G	28	Acicular		10 a 16,5	6		2,5 a 5			1,7 a 7	
180-G	180	Acicular		10 a 14			2,5 a 4			2,5 a 7,5	
200-F	28	Acicular		10 a 16,5			2,5 a 3,5			2,5 a 5,5	
200-F	180	Acicular		12,5 a 19			4			2,5 a 7	
200-G	28	Acicular		10 a 21			3,5 a 5			2,5 a 8,5	
200-G	180	Acicular		8,5 a 17			4 a 5			1,7 a 4	

F = fino

G = Grosso

A consistência normal, dos gessos comerciais (GC1 e GC2) e dos gessos reciclados foram obtidas com diferentes relações água/gesso, pois os gessos comerciais utilizados tinham finura maior (maior superfície específica) do que os gessos reciclados (menor superfície específica).

a) Pastas Produzidas com Gesso Comercial – (GC1 e GC2)

A Figura 4.42 apresenta as microscopias de pastas produzidas com gesso comercial na idade de 28 dias, GC1 (Figura 4.42 (a)) e GC2 (Figura 4.42 (b)), de consistência normal e relação água/gesso 0,53. Constata-se que o gesso comercial GC1 (Figura 4.42 (a)), apresentou cristais de di-hidrato com comprimento dos cristais variando de 16,5 μm até 22 μm , largura dos cristais entre 5 μm e 8,5 μm e diâmetro de abertura da estrutura porosa variando entre 1,3 μm até 1,7 μm . Da mesma forma, o gesso comercial GC2 (Figura 4.42 (b)) apresentou cristais em forma de agulhas entrelaçadas com comprimento médio variando de 12,5 μm a 21 μm . A largura média dos cristais atingiu valores de 5 μm a 6,5 μm e o diâmetro dos poros alcançou dimensões de 1 μm até 2,5 μm (Quadro 4.11).



Figura 4.42 – Microscopia – 28 dias – Pastas de relação água/gesso 0,53 – Ampliação 1000 vezes - GC1 (a) e GC2 (b).

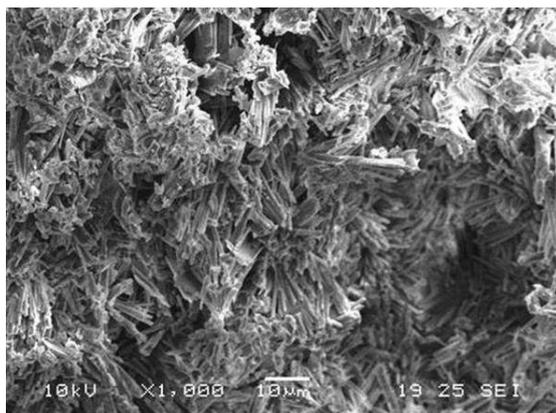
Em ambas as pastas, os cristais formados foram mais compactos quando comparados às pastas de gessos comerciais produzidas com relação água/gesso 0,70 (item 4.5.1). Isso acontece devido à utilização de uma quantidade menor de água na mistura. Neste caso, as reações de hidratação ocorrem sem que as partículas do aglomerante se afastem muito umas das outras, ocorrendo o entrelaçamento dos cristais próximos entre si, acarretando

uma estrutura menos porosa e aumento da resistência mecânica da pasta (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995).

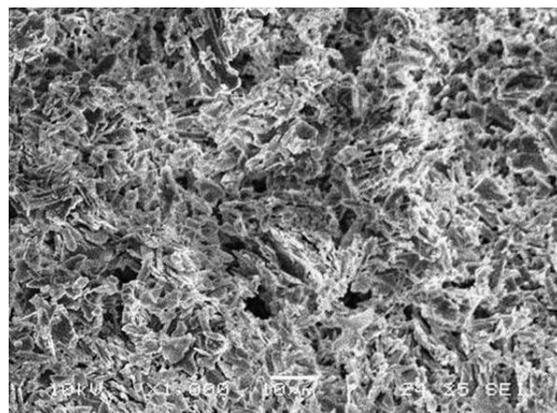
Assim, com uma menor distância entre os cristais a evaporação da água de amassamento durante a secagem do material formou uma estrutura interna com diâmetros menores o que contribui significativamente para o aumento da resistência mecânica da pasta quando comparada a misturas com uma maior relação água/gesso (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

As estruturas cristalinas obtidas nas microscopias da Figura 4.42 são similares às apresentadas por Singh e Middendorf (2007) em pastas produzidas com gesso comercial e relação água/gesso 0,60 na idade de 28 dias.

A Figura 4.43 apresenta pastas de gesso comercial GC1 (Figura 4.43 (a)) e GC2 (Figura 4.43 (b)) na idade de 180 dias, com relação água/gesso 0,53 (pasta de consistência normal). Para o GC1 (Figura 4.43 (a)) constata-se uma estrutura cristalina formada na sua maior parte por cristais em forma de agulhas, similares às obtidas na idade de 28 dias, apresentando comprimento médio de cristais variando de 12,5 μm a 21 μm , com algumas agulhas menores, apresentando comprimento de 6,5 μm a 8,5 μm . A largura dos cristais é de 3,5 μm a 4 μm e os poros presentes na pasta apresentam aberturas com diâmetro médio de 2,5 μm .



(a)



(b)

Figura 4.43 – Microscopia – 180 dias – Relação água/gesso = 0,53 – Ampliação 1000 vezes (a) GC1 e (b) GC2.

A pasta produzida com gesso comercial GC2 (Figura 4.43 (b)), também apresentou cristais em forma de agulhas entrelaçadas, similares às obtidas para a idade de 28 dias, com comprimento médio variando de 10 μm a 16,5 μm . A largura média dos cristais atingiu

valores de 4 μm a 7,5 μm e o diâmetro dos poros alcançou dimensões de 1 μm até 1,5 μm (Quadro 4.11).

Na Figura 4.43 (a) foi observado um detalhe interessante em que as agulhas de gipsita se agrupam em torno de um ponto, esse agrupamento é responsável pela formação de uma estrutura mais compacta. Esse arranjo também foi encontrado por Gmouh et al. (2003), De Milito (2007) e Singh e Middendorf (2007).

Na microscopia da pasta de GC1 (Figura 4.43 (a)) também podem ser observados poros maiores com dimensões em torno de 5,8 μm (Quadro 4.11). Esses poros maiores são atribuídos a um adensamento deficiente sofrido pela pasta durante a moldagem. No entanto, essa situação não afetou os resultados obtidos para as propriedades mecânicas da pasta, pois a formação cristalina alcançada na maior parte da pasta apresenta uma estrutura de agulhas bem definida, contribuindo para o bom comportamento mecânico apresentado pelo material.

Portanto, nas idades de 28 dias e 180 dias, as pastas produzidas com gessos comerciais (GC1 e GC2) com a mesma consistência (pasta de consistência normal) e relação água/gesso 0,53 apresentaram estrutura cristalina e tamanho de agulhas parecidas. Mas, a resistência mecânica alcançada para as pastas produzidas separadamente com cada tipo de gesso comercial (GC1 e GC2) não apresentou o mesmo desempenho para as idades mais avançadas (a partir dos 28 dias o GC1 apresentou valores mais elevados para as propriedades mecânicas: resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza, do que os encontrados para o GC2 (Apêndice B)).

Assim, fica evidenciado que gessos comerciais produzidos por diferentes fabricantes podem atingir valores diferenciados para as propriedades mecânicas mesmo quando manuseados com os mesmos critérios. Isso pode ser atribuído a diferenças de granulometria e de hidratação, responsáveis pela microestrutura resultante.

b) Pastas Produzidas com Gesso Reciclado (150 °C, 180 °C e 200 °C)

As Figuras 4.44 a 4.47 apresentam pastas de gesso com a mesma consistência (pastas de consistência normal) utilizando gessos reciclados.

A Figura 4.44 apresenta as microscopias de pastas de gesso reciclado (Fino) na idade de 28 dias calcinados nas temperaturas de 150 °C. A pasta de consistência normal foi obtida com relação água/gesso 0,80.

A estrutura do gesso calcinado a 150 °C (Figura 4.44 (a)) é formada por cristais em forma de agulhas entrelaçados apresentando comprimento de 12,5 μm a 21 μm , com largura

média dos cristais com valores atingindo de 2,5 μm até 4 μm e uma estrutura porosa com diâmetros de 3,5 μm até 8,5 μm . Para o gesso calcinado na temperatura de 180 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.44 (b)) encontraram-se cristais em forma de agulhas entrelaçadas com comprimento entre 13,5 μm e 21 μm , com alguns cristais de comprimento 8,5 μm , a largura média dos cristais apresentou dimensões de 5 μm e diâmetros da abertura dos poros variando de 3,5 μm até 10 μm . Para o gesso calcinado a 200 $^{\circ}\text{C}$ Figura 4.44 (c), pode-se observar agulhas entrelaçadas com comprimento médio dos cristais com valores de 10 μm a 16,5 μm , a largura com dimensões variando de 2,5 μm a 3,5 μm e diâmetros da abertura dos poros variando entre 2,5 μm e 5,5 μm (Quadro 4.11).

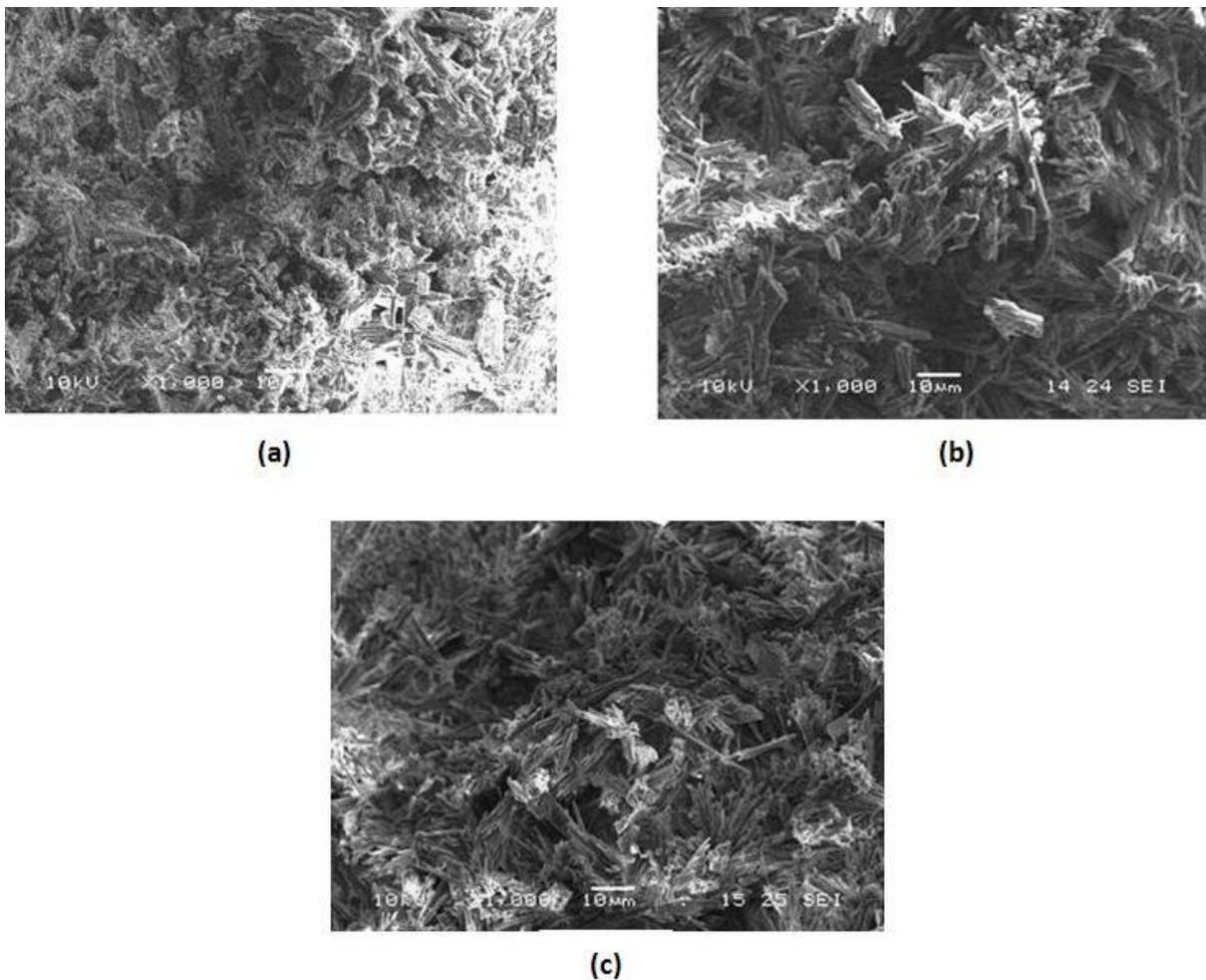


Figura 4.44 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,80 – 150 $^{\circ}\text{C}$ (a), 180 $^{\circ}\text{C}$ (b) e 200 $^{\circ}\text{C}$ (c). Ampliação 1000 vezes.

Na Figura 4.45 tem-se a apresentação das microscopias das pastas de gesso reciclado (Fino) com relação água/gesso 0,80 (pasta de consistência normal), na idade de 180 dias

calcinados nas temperaturas de 150 °C (Figura 4.45 (a)), 180 °C (Figura 4.45 (b)) e 200 °C (Figura 4.45 (c)). As estruturas das pastas indicaram uma formação típica dos cristais em forma de agulhas entrelaçadas.

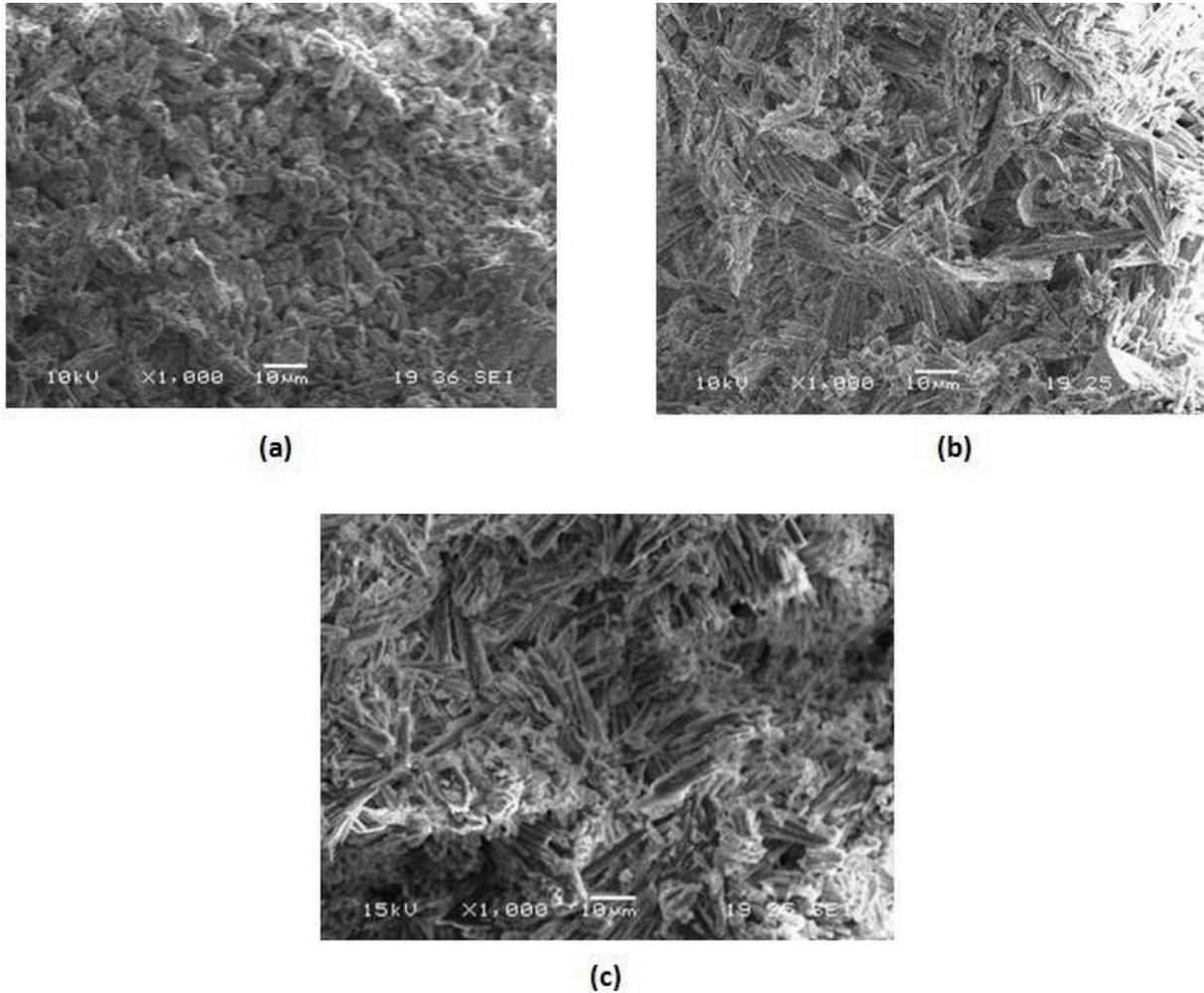


Figura 4.45 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado fino - 180 dias – Relação água/gesso 0,80 – 150 °C (a), 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.

A pasta de gesso reciclado calcinado a 150 °C (Figura 4.45 (a)) apresentou cristais com comprimentos de 11,5 µm a 19 µm. A largura dos cristais variou de 4 µm a 6 µm e as dimensões dos poros formados na pasta endurecida apresentou diâmetros de 3,5 µm até 6 µm. A pasta de gesso reciclado calcinado a 180 °C (Figura 4.45 (b)) os cristais também eram em forma de agulhas entrelaçadas com comprimento entre 12,5 µm e 16 µm. A largura dos cristais variou entre 3,5 µm e 6 µm e diâmetros da abertura dos poros variando de 1,7 µm até 7,5 µm. E na pasta produzida com gesso calcinado a 200 °C (Figura 4.45 (c)) o

comprimento médio dos cristais teve valores variando de 12,5 μm a 19 μm , com largura dos cristais com dimensões média de 4 μm e diâmetros da abertura dos poros variando de 2,5 μm até 7 μm (Quadro 4.11).

Na análise das Figuras 4.44 e 4.45 foi observado aumento nas dimensões dos cristais (largura) e fechamento da estrutura porosa entre a idade de 28 dias e 180 dias. Esse fato pode ser atribuído a amostra utilizada para o ensaio de microscopia, já que foi realizada com materiais retirados em diferentes regiões do corpo de prova.

A microscopia apresentada na Figura 4.46 mostra a estrutura cristalina de pastas produzidas com gesso reciclado grosso, 150 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.46 a), 180 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.46 b) e 200 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.46 c), com relação água/gesso 0,75 (pasta de consistência normal) na idade de 28 dias.

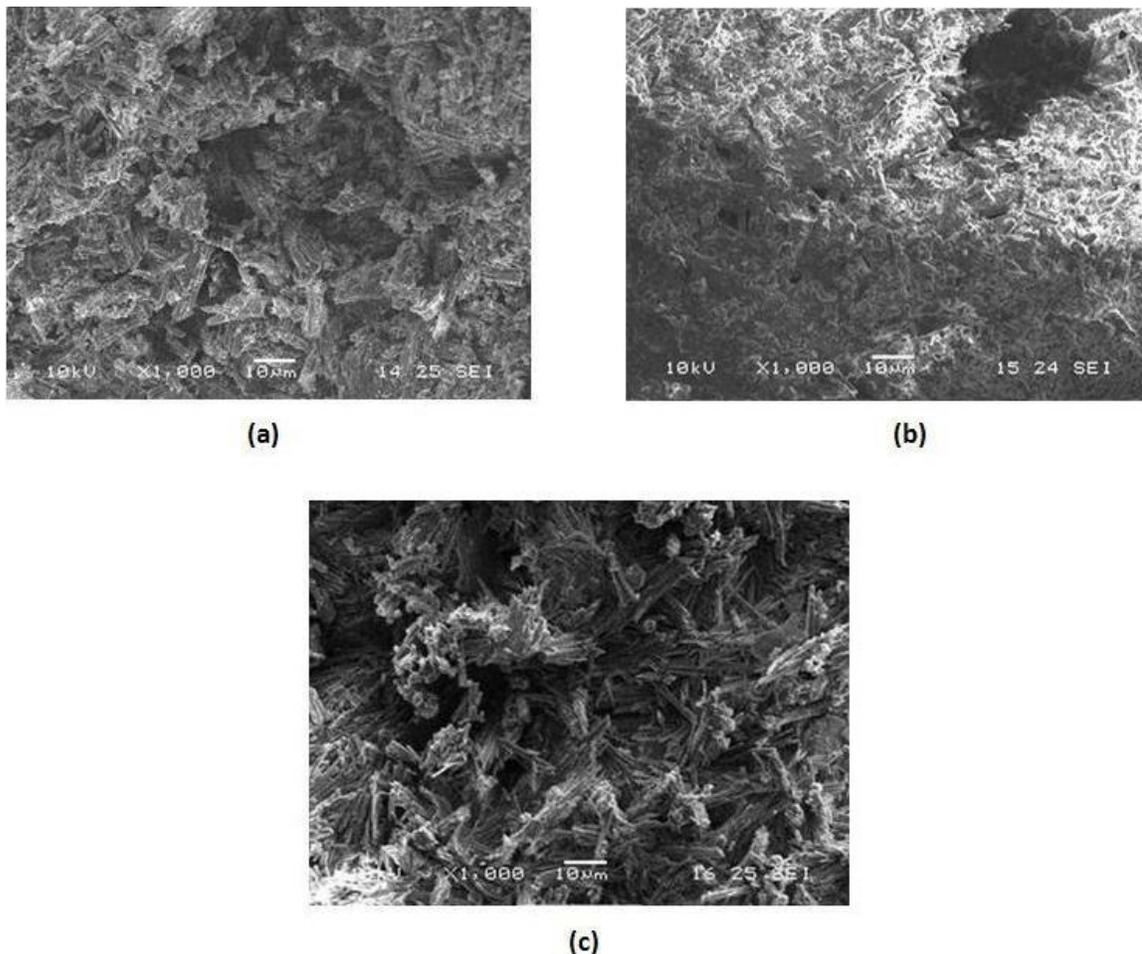


Figura 4.46 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,75 – 150 $^{\circ}\text{C}$ (a), 180 $^{\circ}\text{C}$ (b) e 200 $^{\circ}\text{C}$ (c). Ampliação 1000 vezes.

Da observação da estrutura cristalina da Figura 4.46 (a) (150 °C) constata-se a formação de agulhas entrelaçadas com comprimento dos cristais entre 14 µm e 16 µm, largura média dos cristais de 6 µm e diâmetros da abertura dos poros variando de 5 µm até 10 µm (Quadro 4.11).

Na Figura 4.46 (b) (180 °C) a formação cristalina observada apresentou agulhas entrelaçadas com comprimento dos cristais entre 10 µm e 16,5 µm, com alguns cristais apresentando dimensões de 6 µm, 7,5 µm e 8,5 µm, a largura dos cristais apresentou dimensões variando de 2,5 µm a 5 µm e diâmetros da abertura dos poros variando de 1,7 µm até 7,0 µm (Quadro 4.11).

E para a Figura 4.46 (c) (200 °C) a microscopia apresenta uma formação típica de agulhas entrelaçadas com comprimento dos cristais atingindo valores de 10 µm a 21 µm, a largura dos cristais atingiu dimensões de 3,5 µm à 5 µm e os diâmetros da abertura dos poros variando de 2,5 µm até 8,5 µm (Quadro 4.11).

Na Figura 4.47 tem-se a microscopia da estrutura cristalina de pastas produzidas com gesso reciclado grosso, 150 °C (Figura 4.47 (a)), 180 °C (Figura 4.47 (b)) e 200 °C (Figura 4.47 (c)), produzidas com relação água/gesso 0,75 (pasta de consistência normal) na idade de 180 dias. A estrutura cristalina das pastas é formada por cristais entrelaçados em forma de agulhas.

Para a pasta produzida com gesso reciclado calcinado a 150 °C (Figura 4.47 (a)), os comprimentos dos cristais alcançaram dimensões de 12,5 µm a 14 µm, com largura média dos cristais de 5 µm, as dimensões dos poros formados na pasta endurecida apresentaram diâmetros de 2,5 µm até 5 µm (Quadro 4.11).

Na pasta produzida com gesso reciclado a 180 °C (Figura 4.47 (b)) a formação cristalina teve comprimento médio dos cristais com valores de 10 µm a 14 µm, a largura dos cristais apresentou dimensões variando de 2,5 µm à 4 µm e diâmetros da abertura dos poros variando de 2,5 µm até 7,5 µm (Quadro 4.11).

Para a Figura 4.47 (c) (200 °C) observa-se uma microscopia com comprimento dos cristais atingindo valores de 8,5 µm até 17 µm, a largura dos cristais atingiu dimensões de 4 µm a 5 µm e os diâmetros da abertura dos poros variando de 1,7 µm até 4 µm (Quadro 4.11).

Portanto, da idade de 28 dias até a idade de 180 dias pode-se supor uma influência referente à amostra utilizada para o ensaio de microscopia, pois os corpos de prova foram retirados em diferentes regiões da pasta de gesso endurecida. Isso foi observado devido a uma menor estrutura porosa das pastas alcançada na idade de 180 dias (quando

comparadas com as pastas na idade de 28 dias) e também por dimensões similares observadas para os cristais de di-hidrato nessa idade (180 dias) (Quadro 4.11).

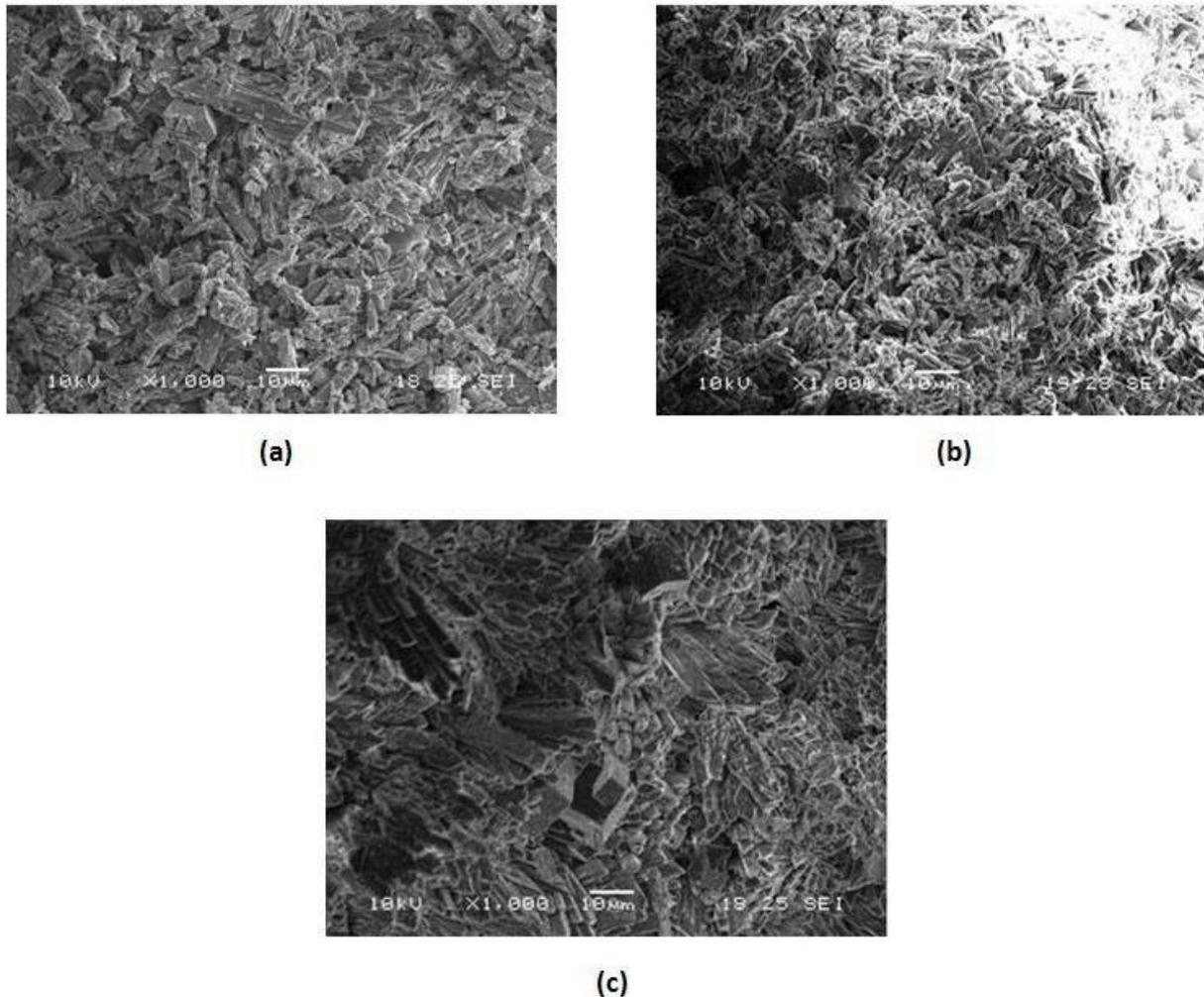


Figura 4.47 – Microscopia – Pastas de gesso reciclado grosso - 180 dias – Relação água/gesso 0,75 – 150 °C (a), 180 °C (b) e 200 °C (c). Ampliação 1000 vezes.

Por apresentarem granulometrias diferentes, conseqüentemente superfícies específicas diferenciadas, a consistência das pastas produzidas com os gessos comerciais e as produzidas com os gessos reciclados (Finos e Grossos) foram diferentes, apresentando diferentes relações água/gesso para os gessos comerciais e para os gessos reciclados (Finos e Grossos).

Portanto, na comparação entre as estruturas cristalinas das pastas produzidas exclusivamente com gessos comerciais e as pastas de gessos reciclados (Fino e Grosso) (nas três temperaturas de calcinação e mesma consistência) ficou evidenciado que para as pastas de consistência normal produzidas com os gessos comerciais (GC1 e GC2) (a/g 0,53)

a estrutura cristalina é mais compacta, com menor quantidade de poros, quando comparadas com as pastas de consistência normal produzidas com os gessos reciclados (Fino com a/g 0,80 e Grosso com a/g 0,75) (Quadro 4.11).

Isso vem realçar resultados já encontrados na literatura onde se destaca que as dimensões das partículas têm muita influência na quantidade de água utilizada na mistura, e que, por sua vez, influem proporcionalmente nos resultados obtidos para as propriedades mecânicas. A relação água/gesso influencia de maneira discreta no tamanho dos cristais de di-hidrato, sem influenciar sua forma. O aumento da relação água/gesso altera a distribuição dos poros, ou seja, a adição de água faz com que a pasta passe a ter mais poros com maiores diâmetros (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b). Essa quantidade de água excedente evapora e confere porosidade ao gesso, o que aumenta a sua capacidade de deformação (HINCAPIE *et al.*, 1996b).

Com o aumento da relação água/gesso a estrutura da pasta de gesso modifica o contato entre os cristais, o que ocasiona a queda da resistência mecânica. (LEWRY; WILLIAMSON, 1994a; KARNI; KARNI, 1995; BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999).

Embora, de acordo com Dias (1994), as condições de calcinação (condições de tratamento térmico) apresentem influência na estrutura cristalina do gesso endurecido, da análise das Figuras 4.44 até 4.47 constatou-se que nos gessos reciclados produzidos com pasta de consistência normal não ocorram diferenças significativas na estrutura cristalina.

4.5.3 – Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial e 50% de Gesso Reciclado

As Figuras 4.48 até 4.59 apresentam as micrografias obtidas para pastas de gesso produzidas com uma mesma relação água/gesso (a/g 0,70), utilizando-se nessas misturas 50% de gesso comercial (GC1 ou GC2) juntamente com 50% de gesso reciclado, fino ou grosso (calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C ou 200 °C). Essas pastas foram analisadas somente na idade de 28 dias.

a) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC1) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 150 °C (Fino e Grosso)

Na microscopia apresentada na Figura 4.48 (28 dias de idade com a/g 0,70) pode-se observar a estrutura cristalina da pasta endurecida, produzida com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado fino calcinado na temperatura de 150 °C.

Constata-se a formação de agulhas entrelaçadas possuindo comprimento dos cristais com variação de 10 μm até 18 μm ; entretanto, cabe ressaltar que entre os cristais com essas dimensões verifica-se a existência de diversos cristais com comprimentos menores (1,7 μm até 6 μm , indicados pelas setas vermelhas na Figura 4.48 (a)). A largura dos cristais apresentou dimensões variando de 1,7 μm a 6 μm e o diâmetro de abertura dos poros variou de 3,5 μm até 6 μm .

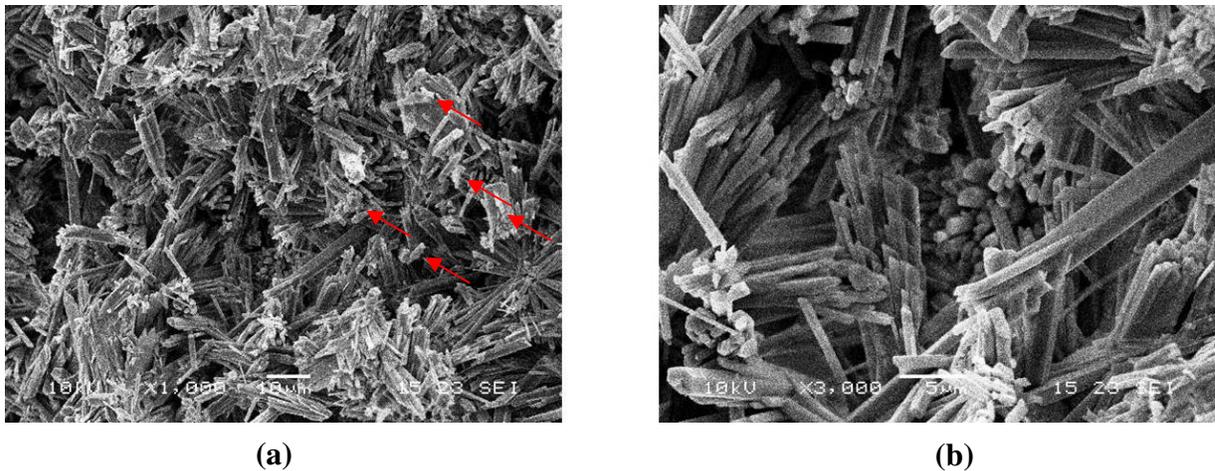


Figura 4.48 – Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 150 $^{\circ}\text{C}$ (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 3000 vezes (b).

Na Figura 4.49 observa-se a estrutura cristalina da pasta de gesso produzida com 50% de gesso comercial (GC1) e 50% de gesso reciclado grosso (150 $^{\circ}\text{C}$).

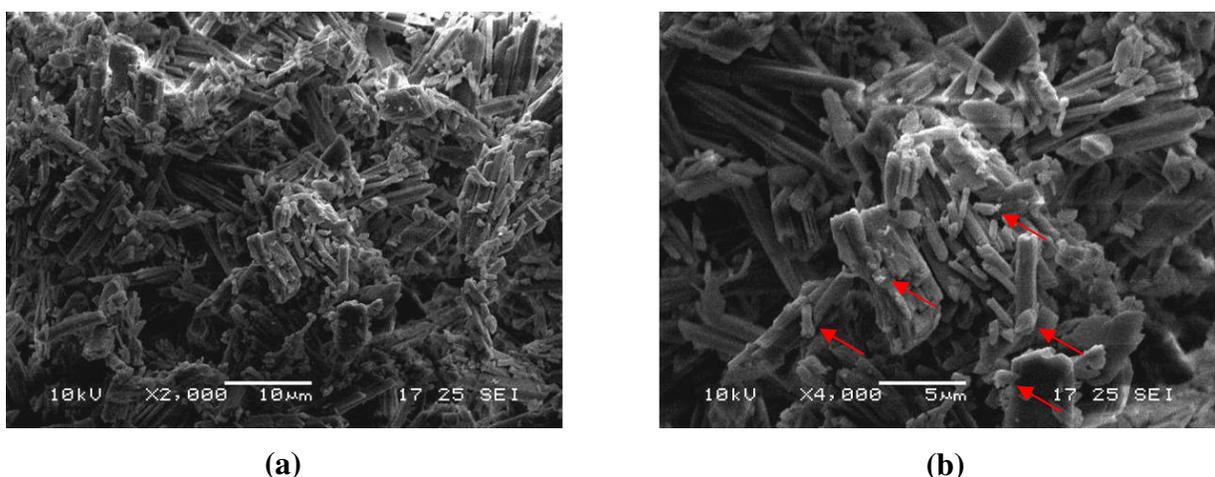


Figura 4.49 – Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 150 $^{\circ}\text{C}$ (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 2000 vezes (a) e 4000 vezes (b).

A estrutura cristalina apresenta cristais em forma de agulhas entrelaçadas possuindo comprimento variando de 8,5 μm até 18 μm . Apresenta, ainda, entre os cristais maiores e também sobre esses cristais, diversos outros cristais menores com comprimento de 1,7 μm até 3,5 μm (indicados pelas setas vermelhas na Figura 4.49 (b)). A largura dos cristais tem dimensões variando de 1,7 μm a 6,5 μm e diâmetro médio de abertura dos poros entre 2,5 μm até 5 μm ; entretanto, alguns poros da pasta chegaram a atingir dimensões de até 8,5 μm (Figura 4.49).

Da análise das Figuras 4.48 e 4.49 evidenciaram-se a existência de cristais menores depositados sobre os cristais maiores, apresentado dessa forma, uma estrutura cristalina com a aparência de pequenos cristais sobre cristais bem formados. De acordo com Monção Junior (2008), isso é um indicativo da formação de uma estrutura cristalina heterogênea conferindo menor resistência mecânica à pasta.

Na comparação entre as Figuras 4.48 e 4.49, em termos de microestrutura, não foram observadas modificações expressivas entre as misturas com 50% de gesso reciclado fino e 50% do gesso reciclado grosso.

Isso também foi identificado em termos de propriedades mecânicas (Resistência à Compressão e Dureza) obtidas para cada uma dessas misturas (Apêndice C). Com relação à resistência à compressão verificou-se que com a utilização de 50% de gesso reciclado fino ocorreu um ligeiro aumento dos valores obtidos quando comparados aos resultados encontrados para as misturas com 50% de gesso reciclado grosso, isso pode ser um indicativo de que a finura do gesso reciclado teve influência na cinética de hidratação e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas alcançadas (KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007). Entretanto, a diferença alcançada entre os valores da resistência à compressão para as pastas com utilização de 50% de GC1 e de 50% de gesso reciclado fino (150 °C) ou 50% de gesso reciclado grosso (150 °C) não foram estatisticamente significativas (Apêndice C1).

Ressalta-se que as pastas produzidas somente com o gesso comercial (GC1 – 100%) atingiram resultados bem superiores para a resistência à compressão quando comparados aos valores obtidos pelas pastas com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado calcinado na temperatura de 150 °C (Fino e Grosso), pois a estrutura cristalina da mistura efetuada somente com GC1 apresentou uma estrutura porosa menor quando comparada à estrutura porosa encontrada para as misturas com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado (150 °C). Atribui-se tal fato ao aumento da taxa de hidratação que ocorre devido à diminuição do tamanho das partículas gerando uma quantidade maior de produtos de hidratação e

diminuindo a estrutura porosa da pasta (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995).

Isso também pode ser atribuído a uma malha cristalina bem formada para os gessos comerciais, que são responsáveis pelas propriedades mecânicas. Essa estrutura cristalina bem definida alcançada durante a hidratação da pasta é favorecida quando ocorre um controle adequado no processo de fabricação e na temperatura de calcinação dos gessos (MONÇÃO JUNIOR, 2008).

Com relação à dureza não foi obtida diferença nos resultados para as pastas produzidas com o gesso comercial (CG1 – 50%) e gesso reciclado fino (50%) ou grosso (50%) ambos calcinados na temperatura de 150 °C (Apêndice C2). Nessas pastas os valores encontrados para as idades de 3, 7 e 28 dias foram praticamente os mesmos com a utilização de 50% de gesso reciclado fino e 50% de gesso reciclado grosso.

b) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC2) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 150 °C (Fino e Grosso)

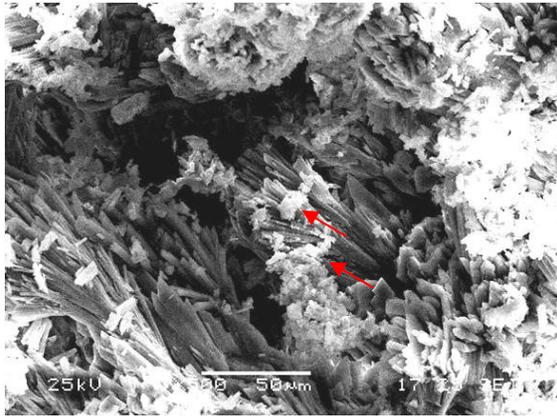
A Figura 4.50 apresenta a microscopia de uma pasta onde se analisou a estrutura cristalina gerada com a utilização de 50% de gesso comercial GC2 e 50 % de gesso reciclado fino calcinado na temperatura de 150 °C.

Essa estrutura cristalina apresenta cristais em forma de agulhas entrelaçadas com comprimento variando de 8,5 µm até 18 µm, apresentando também, entre e sobre os cristais maiores, cristais distribuídos com comprimento de 2,5 µm até 5 µm (similares aos observados nas Figuras 4.48 e 4.49).

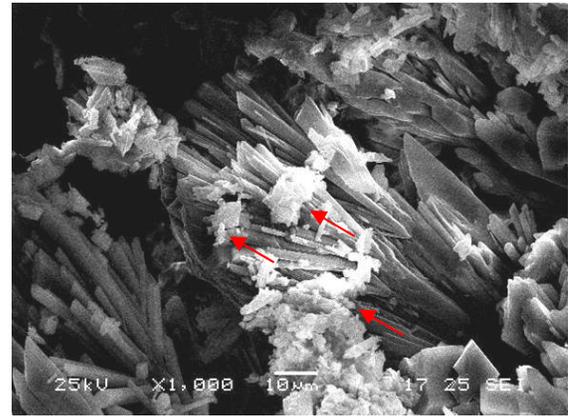
A largura dos cristais variou de 4 µm a 6 µm; entretanto, alguns cristais apresentaram largura superior medindo até 10 µm. Com relação a estrutura porosa constata-se que o diâmetro médio de abertura dos poros alcançou valores de 5 µm até 6,5 µm e com alguns poros atingindo dimensões de até 8,5 µm. Essa porosidade, produzida pela evaporação da água de amassamento durante a secagem do material, pode ser vista por meio das áreas escuras apresentadas na microscopia (Figura 4.50) (KARNI; KARNI, 1995; DE MILITO, 2007; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Da análise da Figura 4.50 podem ser observados cristais menores depositados sobre os cristais maiores, apresentando aspecto heterogêneo (indicados pelas setas vermelhas na Figura 4.50), sendo um indicativo da formação de estrutura cristalina heterogênea que conferem uma menor resistência mecânica à pasta (MONÇÃO JUNIOR, 2008). Esses

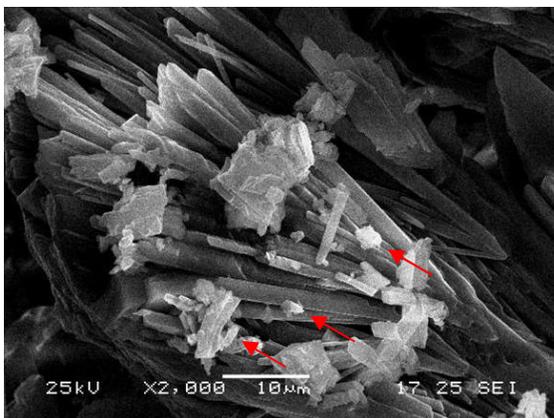
cristais menores estão mais detalhados nas microscopias ampliadas Figura 4.50 (c) e Figura 4.50 (d). Nessa microscopia verificam-se também alguns pontos de nucleação devido à formação da estrutura cristalina da pasta (SINGH; MIDDENDORF, 2007).



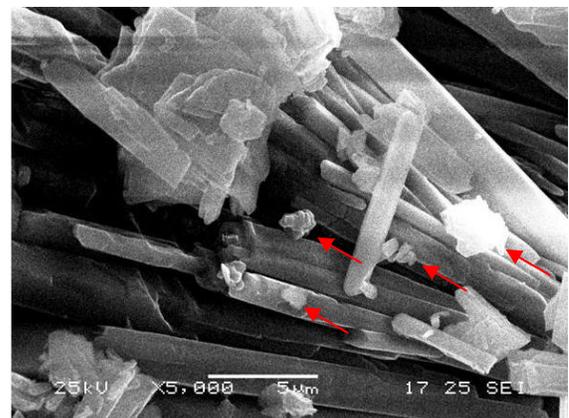
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.50 – Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a), 1000 vezes (b), 2000 vezes (c) e 5000 vezes (d).

Na Figura 4.51 tem-se a microscopia de uma pasta com 50% de gesso reciclado grosso calcinado na temperatura de 150 °C. Observam-se cristais em forma de agulhas entrelaçadas de comprimento variando de 10 µm até 21 µm, e também, entre e sobre os cristais maiores, há cristais menores distribuídos pela pasta com comprimento de 4 µm até 6 µm (indicados pelas setas vermelhas na Figura 4.51). A largura dos cristais teve dimensões de 3,5 µm a 4 µm, com alguns cristais apresentando largura de até 8,5 µm. A pasta de gesso

apresentou abertura dos poros variando entre 3,5 μm até 4 μm ; entretanto, alguns poros da pasta chegaram a atingir dimensões de até 7,5 μm (Figura 4.51).

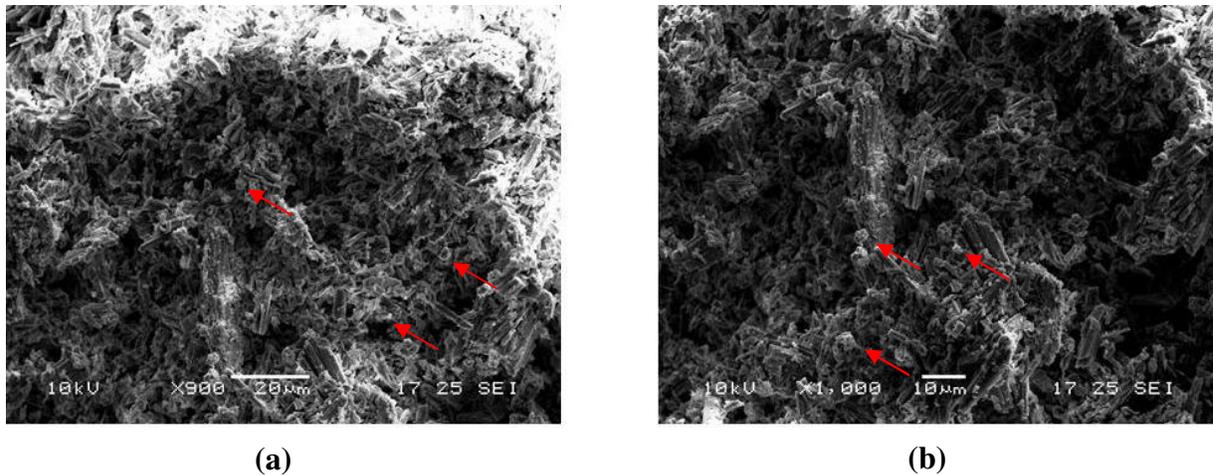


Figura 4.51 – Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 150 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 900 vezes (a) e 1000 vezes (b).

Apesar das pastas produzidas com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado fino (Figura 4.50) e 50% de GC2 com 50% de gesso reciclado grosso (Figura 4.51) apresentarem pequenas diferenças com relação à estrutura cristalina (tamanhos dos cristais e estrutura porosa), observa-se que essa diferença não foi significativa. Assim, as pastas podem ser consideradas como sendo semelhantes.

Na comparação das pastas produzidas com 50% de GC1 e gessos reciclados finos e grossos (Figuras 4.48 e 4.49) com as pastas produzidas com 50% de GC2 e gessos reciclados finos e grossos (Figuras 4.50 e 4.51), ambas utilizando-se gesso reciclado calcinado na temperatura de 150 °C percebe-se que a estrutura cristalina formada pelas pastas é semelhante.

c) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC1) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 180 °C (Fino e Grosso)

A microscopia da pasta de gesso produzida com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado fino calcinado a 180 °C está apresentada na Figura 4.52.

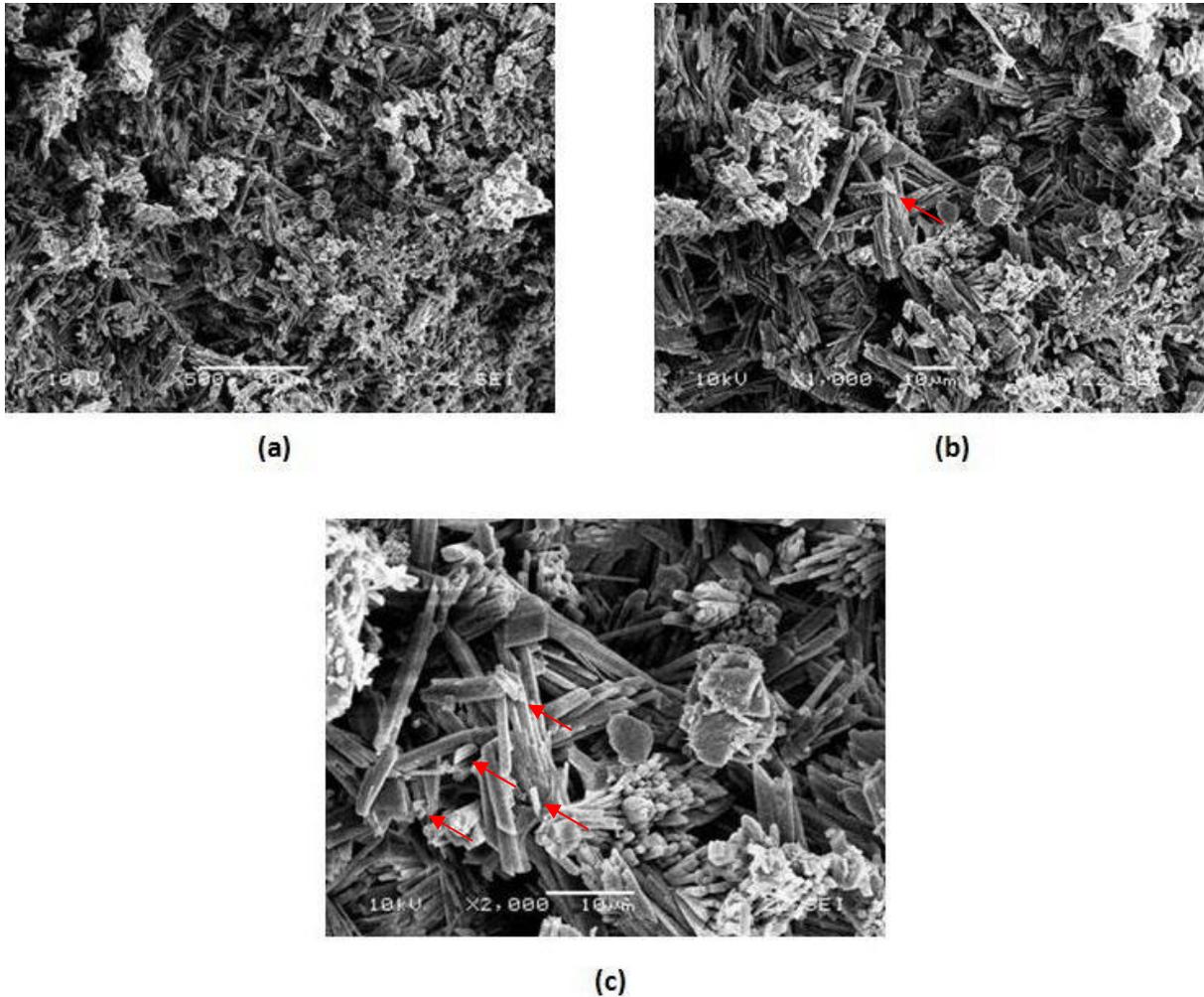


Figura 4.52 – Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) gesso reciclado 180 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a), 1000 vezes (b) e 2000 vezes (c).

Da Figura 4.52 observa-se o entrelaçamento dos cristais de di-hidrato gerados durante as reações de hidratação da pasta. A água que ficou acumulada entre os cristais, ao se evaporar, gerou a estrutura porosa que se apresenta bem evidente entre os diversos pontos de nucleação da pasta endurecida (KARNI; KARNI, 1995; DE MILITO, 2007; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

O comprimento dos cristais em forma de agulhas variou de 10 µm até 18,5 µm. Foram encontrados, também, entre e sobre os cristais maiores, cristais menores de di-hidrato distribuídos pela pasta. A largura dos cristais apresentou dimensões de 4 µm a 6 µm e a estrutura porosa da pasta de gesso endurecida teve diâmetro de poros variando entre 4 µm e 6 µm (Figura 4.52).

A Figura 4.52 (c) apresenta uma maior ampliação da microscopia da pasta endurecida com destaque para o entrelaçamento dos cristais de di-hidrato em forma de agulhas, e pontos de nucleação de formação dos cristais de di-hidrato, destacando também, os cristais menores posicionados sobre cristais maiores de di-hidrato (indicados pelas setas vermelhas).

Na Figura 4.53, observa-se a estrutura cristalina gerada durante a hidratação de uma pasta de gesso produzida com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado grosso calcinado na temperatura de 180 °C.

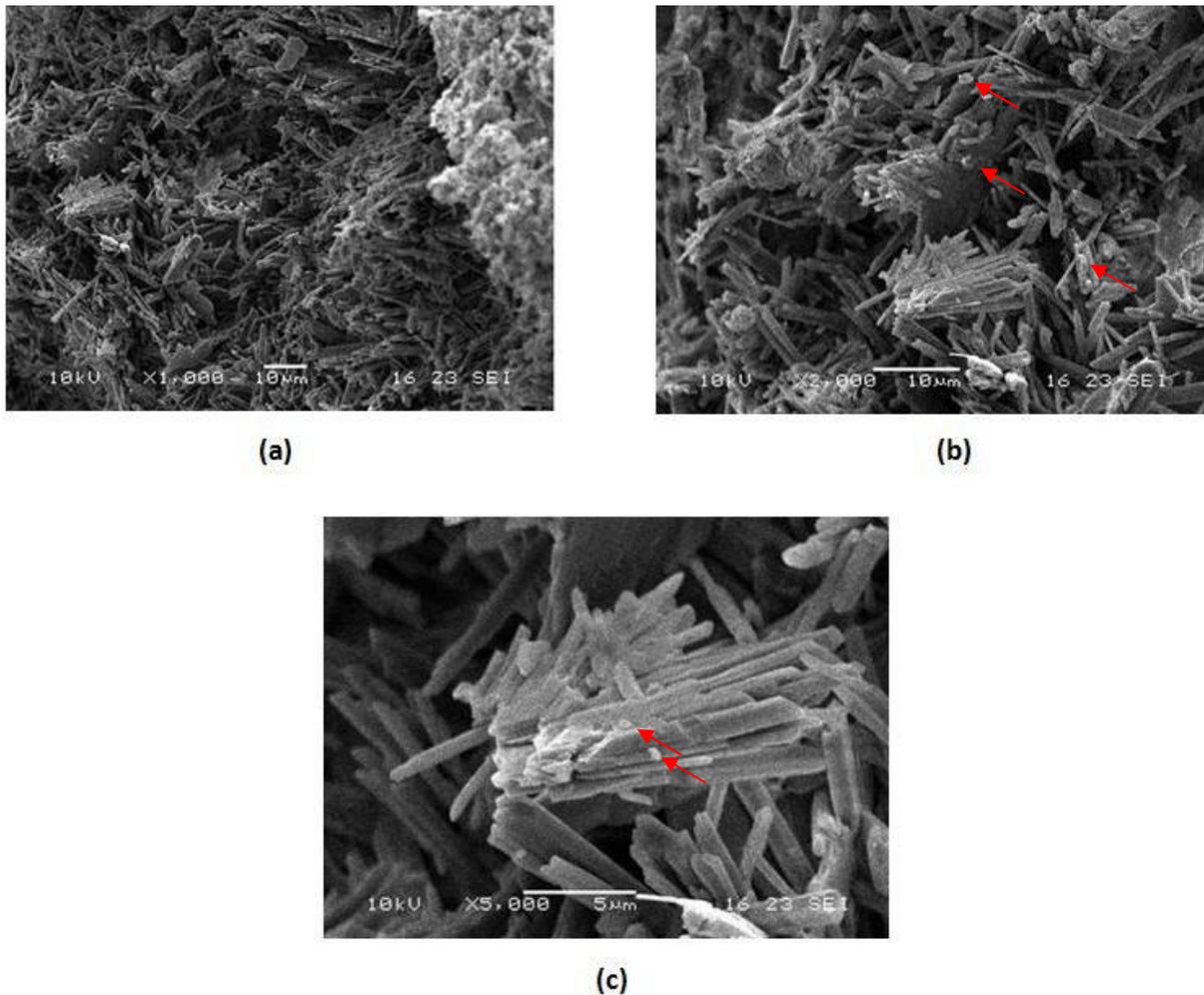


Figura 4.53 – Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) 2000 vezes (b) e 5000 vezes (c).

Entre os cristais entrelaçados, constata-se a estrutura porosa da pasta formada após a evaporação da água excedente utilizada na mistura e que ficou acumulada entre os cristais de di-hidrato. Também podem ser visualizados os pontos de formação dos cristais espalhados pela pasta endurecida (Figura 4.53).

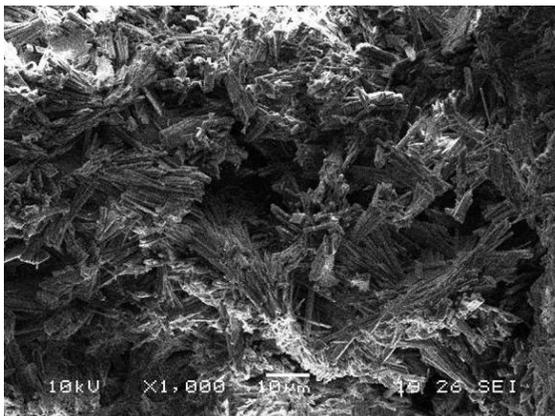
A estrutura cristalina apresentou cristais entrelaçados em forma de agulhas, com comprimento variando de 10 μm até 18,5 μm . A largura dos cristais variou de 3,5 μm a 5 μm e o diâmetro médio de abertura dos poros variou de 2,5 μm até 4 μm (Figura 4.53).

Na comparação da estrutura cristalina formada na hidratação da pasta mista produzida com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado fino (180 °C) (Figura 4.52) com a pasta produzida com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado grosso (180 °C) (Figura 4.53) não ocorreu diferenciação acentuada com relação às dimensões dos cristais de di-hidrato formados.

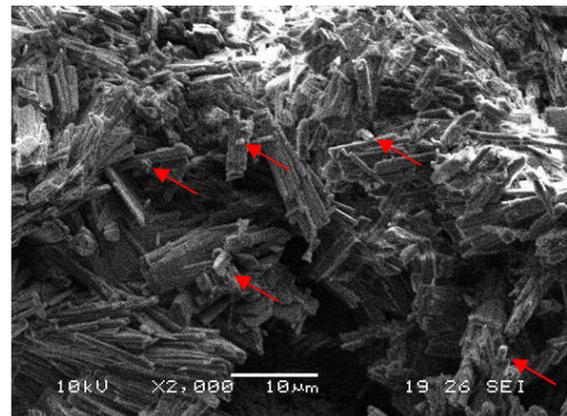
d) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC2) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 180 °C (Fino e Grosso)

A Figura 4.54 apresenta a microscopia de uma pasta de gesso endurecida, produzida com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado fino (180 °C).

Na pasta endurecida tem-se cristais em forma de agulhas entrelaçadas, com comprimento variando de 8,5 μm até 18,5 μm , a largura dos cristais com dimensões médias variando de 3,5 μm a 4 μm e estrutura porosa com diâmetro de poros variando de 5 μm até 6 μm .



(a)



(b)

Figura 4.54 – Microscopia – Pasta da mistura de GC2 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).

Na microscopia da Figura 4.54 (b) é possível ver mais detalhadamente a estrutura porosa formada após a evaporação da água de amassamento e também alguns pontos de nucleação de cristais de di-hidrato. Verifica-se também a existência de pequenos cristais de di-hidrato com comprimento médio de 5 μm , entre e sobre os cristais maiores (indicados pelas setas vermelhas).

Para a Figura 4.55 se tem a microscopia de uma pasta de gesso mista, produzida com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado grosso (180 °C). Na Figura 4.55 (b) tem-se uma ampliação dos pontos de nucleação de onde surgem os cristais de di-hidrato.

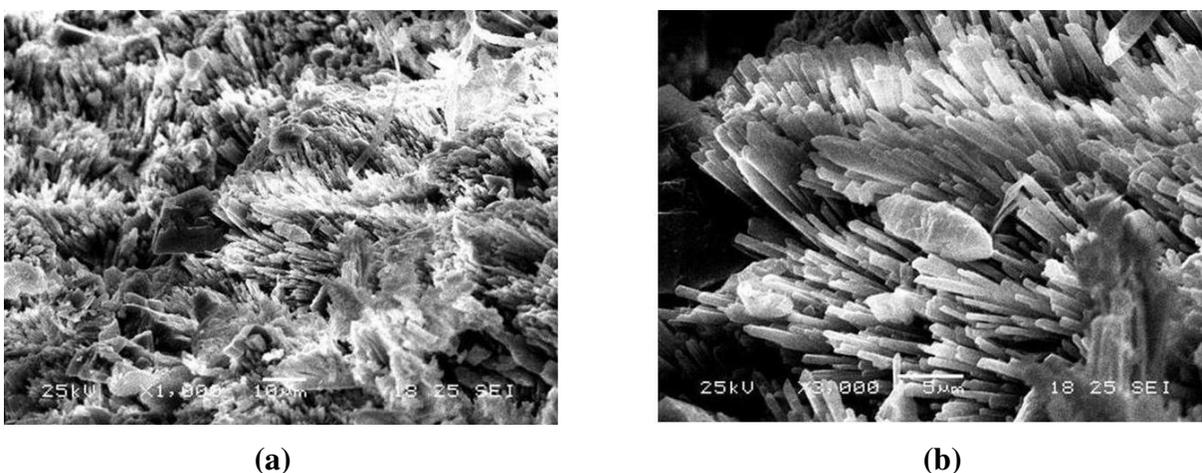


Figura 4.55 – Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 180 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso = 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 3000 vezes (b).

A estrutura cristalina apresenta cristais entrelaçados em forma de agulhas, com comprimento variando de 8,5 μm até 17 μm . A largura dos cristais tem dimensão média de 4 μm e o diâmetro médio de abertura dos poros com valor de 6 μm (Figura 4.55). Dessa forma, as pastas produzidas com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado fino (180 °C) ou 50% de gesso reciclado grosso (180 °C) apresentaram estruturas cristalinas similares entre si.

Com relação às propriedades mecânicas, as pastas com 50% de gesso fino e 50% de gesso grosso (180 °C) apresentaram resultados semelhantes para a resistência à compressão (Apêndice C1), entretanto a dureza apresentou valores quase idênticos para ambas as pastas (Apêndice C2).

As pastas produzidas com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado (180 °C) (Fino ou Grosso) apresentaram resultados mais elevados para as propriedades mecânicas quando

comparados aos resultados obtidos para as pastas produzidas com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado (180 °C) (Fino ou Grosso) (Apêndice C). Tal fato é atribuído à diferença na granulometria existente entre o GC1 e o GC2 (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

e) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC1) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 200 °C (Fino e Grosso)

Na Figura 4.56 é feita a apresentação de uma pasta de gesso endurecida (pasta mista), produzida com 50% de gesso GC1 e 50% de gesso reciclado fino (200 °C).

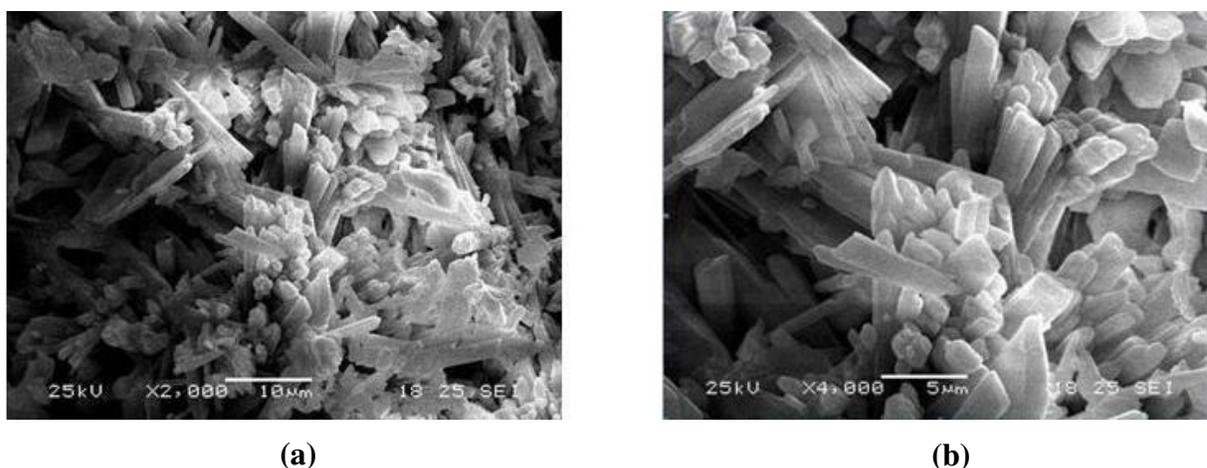


Figura 4.56 – Microscopia – Pasta da Mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 2000 vezes (a) e 4000 vezes (b).

Nessa figura podem ser vistos com mais clareza pontos de nucleação onde surgem os cristais de di-hidrato, e também as dimensões da estrutura porosa da pasta. Entretanto, não se verificou a existência de uma grande quantidade de cristais de di-hidrato com comprimentos menores entre e sobre os cristais de comprimentos maiores, conforme foi observado para as pastas com gesso reciclado nas temperaturas de 150 °C e 180 °C. Portanto, isso pode ser um indicativo de que a temperatura de calcinação apresentou alguma influência na estrutura cristalina do gesso, isso também foi verificado por Cavalcanti (2006) e Monção Junior (2008) em estudo com pastas de gesso reciclado produzido com controle de pressão e temperatura de calcinação.

Dessa forma, constatou-se uma estrutura cristalina com cristais em forma de agulhas entrelaçadas, com comprimento variando de 8,5 μm até 20 μm , a largura dos cristais apresentou dimensões médias variando de 2,5 μm a 5 μm e a estrutura porosa atingiu o diâmetro médio de abertura dos poros com valores variando de 4 μm até 6,5 μm (Figura 4.56).

A Figura 4.57 apresenta a estrutura cristalina gerada durante a hidratação de uma mistura de 50% de GC1 com 50% de gesso reciclado grosso calcinado na temperatura de 200 $^{\circ}\text{C}$.

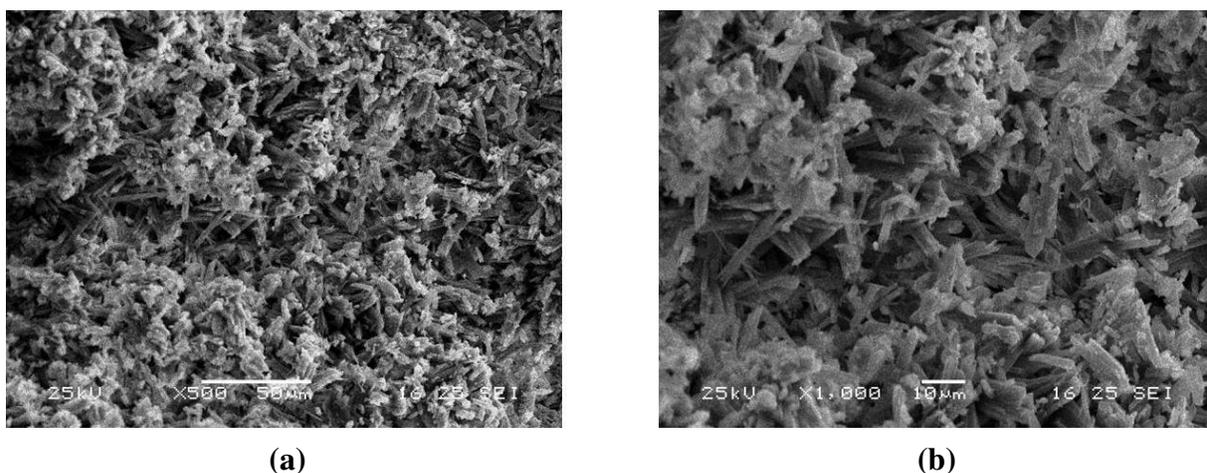


Figura 4.57 – Microscopia – Pasta da mistura do GC1 (50%) com o gesso reciclado 200 $^{\circ}\text{C}$ (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 500 vezes (a) e 1000 vezes (b).

Para a pasta mista da Figura 4.57 o comprimento dos cristais variou de 8,5 μm até 18,5 μm . A largura dos cristais apresentou dimensões de 3,5 μm a 6 μm e a estrutura porosa da pasta de gesso endurecida apresentou diâmetro dos poros variando entre 3,5 μm até 6 μm .

Para as propriedades mecânicas (resistência à compressão e dureza) das pastas produzidas com 50% de GC1 com 50% de gesso reciclado fino (200 $^{\circ}\text{C}$), foram alcançados resultados mais elevados quando comparados aos valores obtidos para a pasta com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado grosso (200 $^{\circ}\text{C}$). Entretanto, a diferença entre esses valores não foi estatisticamente significativa (Apêndice C). A estrutura cristalina de ambas as pastas (Figuras 4.56 e 4.57) foram similares.

f) Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial (GC2) e 50% de Gesso Reciclado Calcinado na Temperatura de 200 °C (Fino e Grosso)

Na Figura 4.58 tem-se a microscopia de uma pasta de gesso, produzida com a utilização de 50% de gesso comercial (GC2) e 50% de gesso reciclado fino calcinado na temperatura de 200 °C.

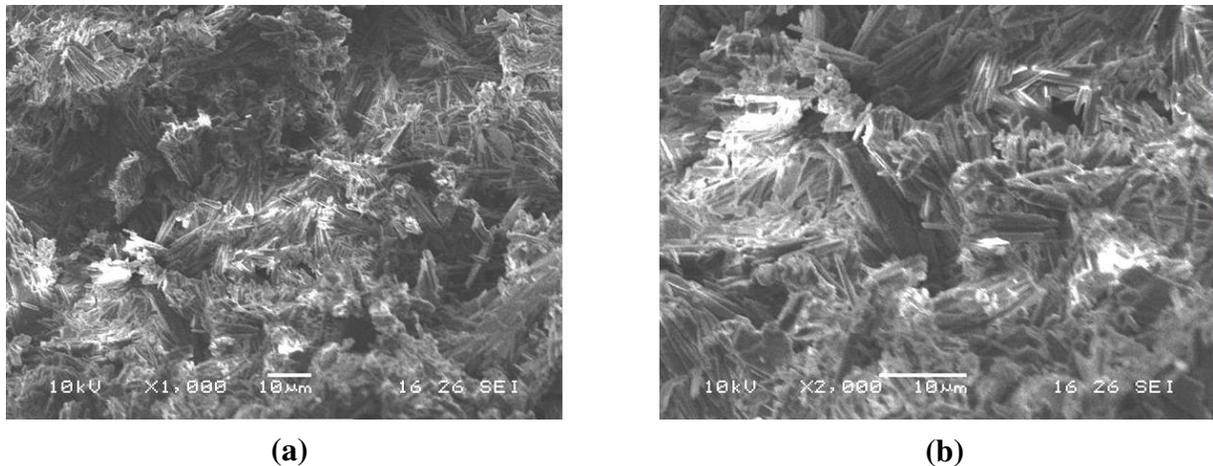


Figura 4.58 – Microscopia – Pasta da mistura do GC2 (50%) com o gesso reciclado 200 °C (50%) - Fino - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).

Os cristais de di-hidrato em forma de agulhas se aglomeram em núcleos de cristalização que são separados pela abertura dos poros da pasta endurecida. O comprimento dos cristais de di-hidrato gerados pela hidratação variaram de 10 µm a 22,5 µm apresentando também uma pequena quantidade de cristais com comprimentos de 4 µm até 7,5 µm. Esses cristais de comprimento menor estão localizados entre e sobre os cristais maiores. A largura média dos cristais foi de 4 µm e o diâmetro da abertura dos poros teve variação de 2,5 µm até 4 µm (Figura 4.58).

A Figura 4.59 apresenta a microscopia da estrutura cristalina formada por uma pasta de gesso endurecido, produzida com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado grosso (200 °C).

Constata-se uma formação cristalina em forma de agulhas (aciculares) entrelaçadas com comprimento médio dos cristais variando de 8,5 µm até 14 µm, apresentando ainda cristais menores com comprimentos de 2,5 µm até 5 µm localizados entre e sobre os cristais

maiores. A largura média encontrada para os cristais foi de 2,5 μm e o diâmetro dos poros na pasta endurecida variou de 1,7 μm até 4 μm .

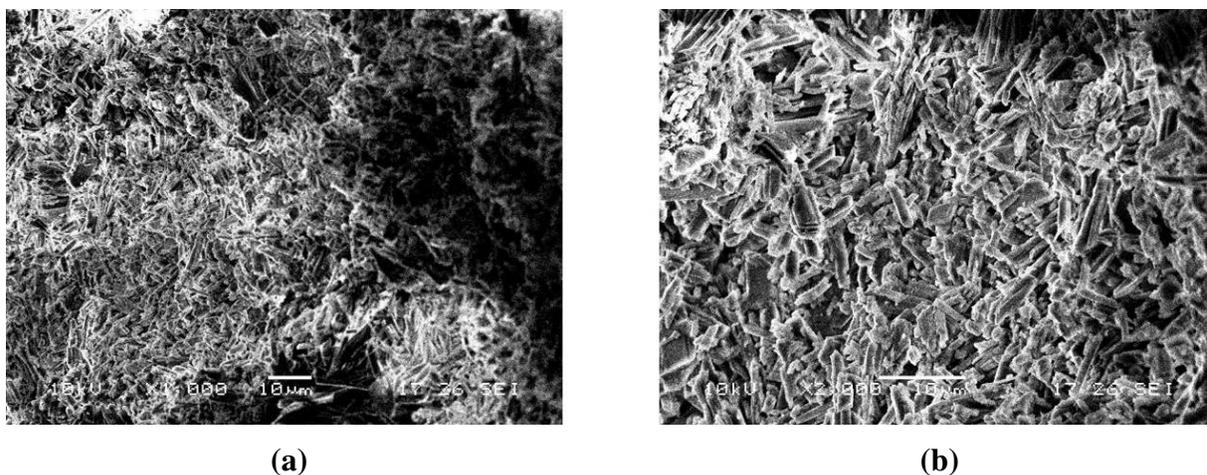


Figura 4.59 – Microscopia – Pasta da mistura de GC2 (50%) com o Gesso reciclado 200 °C (50%) - Grosso - 28 dias – Relação água/gesso 0,70 – Ampliação 1000 vezes (a) e 2000 vezes (b).

A estrutura cristalina das pastas apresentadas nas Figuras 4.58 e 4.59 foram semelhantes, com algumas variações com relação ao comprimento dos cristais, que alcançaram comprimentos ligeiramente menores para as pastas produzidas com 50% de gesso reciclado grosso (200 °C). A estrutura porosa da pasta produzida com 50% de gesso reciclado fino teve diâmetros menores. Isso é atribuído à cinética de hidratação do gesso, pois partículas menores apresentam uma maior velocidade de hidratação o que acarreta em um ganho de resistência mecânica mais rapidamente nas idades iniciais de hidratação da pasta (KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Da mesma forma que se destacou anteriormente, para as pastas mistas produzidas com 50% de GC1 ou 50% de GC2 (quando comparadas entre si) juntamente com 50% dos gessos reciclados (Fino e Grosso) calcinados nas temperaturas de 150 °C ou 180 °C destaca-se também que para as pastas mistas produzidas com 50% de GC1 e 50% de gesso reciclado (200 °C) (Fino ou Grosso) foram encontrados resultados um pouco mais elevados para as propriedades mecânicas, quando comparados aos resultados obtidos para as pastas mistas produzidas com 50% de GC2 e 50% de gesso reciclado (200 °C) (Fino ou Grosso) (Apêndice C) (LEWRY; WILLIAMSON, 1994b; KARNI; KARNI, 1995; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

g) Análise Comparativa entre as Microscopias de Gessos Comerciais, Gessos Reciclados e Pastas Produzidas com 50% de Gesso Comercial e 50% de Gesso Reciclado

Em termos gerais, quando se compara as microscopias das pastas de gesso endurecidas produzidas somente com relação água/gesso 0,70, utilizando-se exclusivamente gessos comerciais (GC1 ou GC2) e pastas produzidas exclusivamente com os gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C) com as microscopias das pastas de gesso mistas, produzidas com 50% de gesso comercial (GC1 ou GC2) juntamente com 50% de gessos reciclados (Finos ou Grossos), calcinados nas temperaturas de 150 °C, 180 °C ou 200 °C constata-se que tanto para as misturas produzidas exclusivamente com os gessos comerciais e as produzidas exclusivamente com os gessos reciclados quanto as misturas mistas produzidas com 50% de gesso comercial e 50% de gesso reciclado, apresentam uma estrutura cristalina em forma de agulhas, bem definida, que contribui para a obtenção do comportamento mecânico do material.

Assim, efetuando-se uma análise comparativa entre todas as pastas produzidas com relação água/gesso 0,70, pastas produzidas exclusivamente com gesso comercial (GC1 ou GC2), pastas produzidas exclusivamente com gesso reciclado (150 °C, 180 °C ou 200 °C) e pastas mistas (produzidas com 50% de gesso comercial e 50% de gesso reciclado) foi observado que a geometria dos cristais formados durante a hidratação das pastas e a estrutura porosa das pastas dos gessos comerciais (GC1 e GC2), dos gessos reciclados (Finos e Grossos) (150 °C, 180 °C e 200 °C) e das pastas mistas é parecida, apresentando taxas de nucleação e dimensões dos cristais similares às dimensões típicas dos cristais de di-hidrato puro encontrado por outros pesquisadores em estudos com pastas de gesso comercial (variação entre 10 μm e 20 μm de comprimento e 1 μm e 1,6 μm) (ODLER; ROSSLER, 1989 *apud* ANTUNES, 1999; HENAO, 1997).

Todavia, nas pastas de gesso mistas, com utilização de 50% de gesso comercial com 50% de gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C), observaram-se cristais em forma de agulhas com comprimento similares ao di-hidrato puro, cristais com comprimentos menores (agulhas não tão desenvolvidas com comprimento médio variando de 4 μm a 6 μm), na sua maioria cristais pequenos localizados entre e sobre os cristais de maior comprimento (aspecto pulverulento). Esses cristais apresentando um menor comprimento também foram identificados nas pastas produzidas somente com os gessos reciclados.

Ressalta-se que esses cristais de menor comprimento, presentes entre e sobre os cristais maiores, foram mais evidentes nas pastas com utilização de gesso reciclado calcinado na temperatura de 150 °C (Finos e Grossos), tanto para pastas mistas quanto para as pastas produzidas exclusivamente com gesso reciclado. Essa constatação representa um indicativo de que a temperatura de calcinação do gesso reciclado teve influência na formação dos cristais de di-hidrato (CAVALCANTI, 2006; MONÇÃO JUNIOR, 2008).

Embora as pastas produzidas exclusivamente com gessos comerciais e as pastas mistas tenham apresentado estrutura cristalina similar, com relação às propriedades mecânicas na idade de 28 dias, as pastas produzidas exclusivamente com os gessos comerciais (GC1 ou GC2) apresentaram resistência à compressão até 4,3 vezes superiores aos valores alcançados pelas pastas mistas (50% gesso comercial e 50% gesso reciclado) (Apêndice A).

4.6 – Avaliação da Superfície dos Revestimentos de Gesso em Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural

Para a observação do desempenho das pastas de gesso empregadas como revestimento de blocos cerâmicos foram estudadas somente as pastas com relação água/gesso 0,70 por ser uma relação frequentemente utilizada em obras na aplicação de gesso como revestimento interno de paredes (Quadro 3.1 – Capítulo 3). Essas pastas foram aplicadas na superfície de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural conforme descrito no item 3.5.2 do Capítulo 3.

O desempenho dessas pastas foi analisado observando-se o comportamento com relação ao tempo de aplicação, acabamento superficial final e facilidade de aplicação das pastas (Figuras 4.60 a 4.70).

4.6.1 – Pastas produzidas com gessos comerciais (GC1 e GC2)

As constatações foram:

- Ao término da mistura da pasta no misturador, já se tinha uma consistência adequada para a aplicação dessa pasta como revestimento.
- Devido ao curto período de manutenção de consistência adequada para a aplicação das pastas produzidas com os gessos comerciais (aproximadamente 5 minutos desde o

término da mistura das pastas no misturador), foi necessário aplicar rapidamente o revestimento de gesso nos blocos cerâmicos, pois a perda de consistência foi rápida. Se a aplicação não fosse realizada rapidamente a pasta teria endurecido e não apresentaria mais condições de ser aplicada como revestimento.

- O acabamento superficial ficou plano e liso, entretanto foram observadas algumas irregularidades na superfície do acabamento final, as quais podem ser atribuídas à inexperiência do aplicador (Figura 4.60).
- Após o endurecimento do revestimento de gesso, não foram observadas fissuras superficiais decorrentes de retração até a idade de 150 dias.



Figura 4.60 – Blocos cerâmicos de alvenaria depois da aplicação das pastas de gesso comercial como revestimento (Bloco esquerdo – GC1, Bloco direito GC2).

4.6.2 – Pastas produzidas com gessos reciclados grossos (GR1, GR3, GR5) e finos (GR2, GR4, GR6)

As considerações foram:

- Com relação à consistência, tanto para as pastas produzidas com gesso reciclado grosso quanto para as produzidas com gesso reciclado fino, ao término da mistura mecânica elas ainda não apresentavam uma consistência que permitisse sua imediata aplicação como revestimento nos blocos cerâmicos. As pastas estavam muito fluidas ao término da mistura, sendo necessário, portanto, aguardar um período de 3 a 5 minutos para que atingissem uma consistência satisfatória para a aplicação como revestimento.

- Durante a aplicação foi mais fácil aplicar e espalhar as pastas produzidas com os gessos reciclados em comparação às pastas produzidas com os gessos comerciais. Foi constatado, também, um maior período de manutenção de uma consistência adequada para a aplicação da pasta como revestimento possibilitando assim um maior tempo para a aplicação do revestimento.
- Comparando-se a facilidade de aplicação entre o gesso reciclado grosso e fino, destaca-se que o gesso fino apresentou uma maior facilidade de aplicação quando comparado ao gesso grosso. O acabamento superficial de ambos os gessos reciclados (fino e grosso), nas 3 (três) temperaturas de calcinação estudadas, foi plano e liso, não apresentando irregularidades ao final da aplicação (Figura 4.61).



Figura 4.61 – Blocos cerâmicos de alvenaria estrutural depois da aplicação de pasta de gesso reciclado grosso (direita) e fino (esquerda) calcinado a 180 °C como revestimento.

- As pastas produzidas com gessos reciclados (fino e grosso) calcinadas a 180 °C foram melhores de se aplicar do que as pastas produzidas com gessos calcinados nas temperaturas de 150 °C e 200 °C.

- Durante o endurecimento dos revestimentos produzidos com os gessos reciclados (fino e grosso) nas 3 (três) temperaturas de calcinação estudadas houve o aparecimento de fissuras de retração. Isso ocorreu logo após a aplicação das pastas devido à perda por provável efeito de sucção pelos blocos cerâmicos da água contida na mistura. Essas fissuras de retração foram bem mais expressivas nas pastas produzidas com os gessos reciclados calcinados na temperatura de 150 °C (fino), 180 °C (grosso) e 200 °C (fino), embora tenham aparecido também nas demais pastas, mas em menor intensidade (Figuras 4.62 a 4.70).



Figura 4.62 – Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação do revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 150 °C.



Figura 4.63 – Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 150 °C.



Figura 4.64– Blocos cerâmicos de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 180 °C.

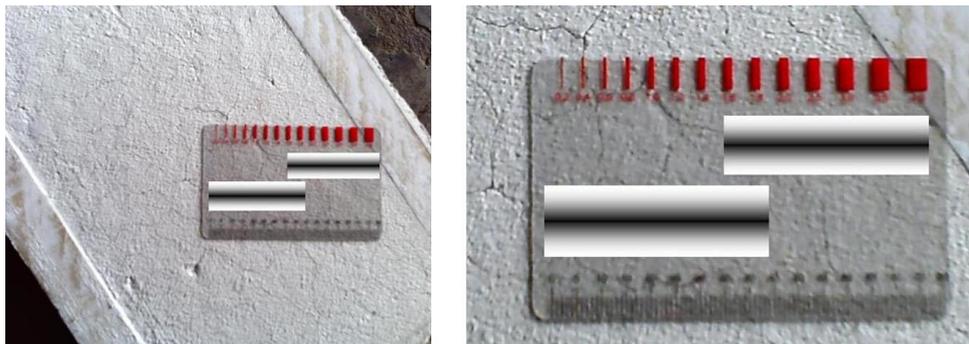


Figura 4.65 – Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 180 °C.



Figura 4.66 – Detalhe - Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 150 °C.



Figura 4.67 – Bloco cerâmico de alvenaria estrutural depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 200 °C.



Figura 4.68 - Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso reciclado grosso calcinado a 200 °C.



Figura 4.69 – Bloco cerâmico de alvenaria depois da aplicação de revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 200 °C.



Figura 4.70 - Detalhes de fissuras de retração em revestimento de pasta de gesso reciclado fino calcinado a 200 °C.

Portanto, o tamanho das partículas dos gessos reciclados (granulometria) e a sua velocidade de hidratação foram fatores de fundamental importância no desempenho de revestimentos. Antes mesmo do endurecimento final dos revestimentos, surgiram fissuras de retração em toda superfície de aplicação dos blocos. Quando os revestimentos atingiram o fim de pega a superfície dos mesmos estava totalmente fissurada e permaneceram assim, sem que ocorresse aumento de fissuras, até a idade de 150 dias, quando se efetuou a observação final e os ensaios de aderência.

4.7 – Resistência de Aderência

A Figura 4.71 apresenta os resultados para a resistência de aderência obtida na idade de 150 dias em pastas produzidas com relação água/gesso 0,70.

A NBR 13207 (ABNT, 1994), que fixa as condições exigíveis para o gesso a ser utilizado na construção civil, tanto para fundição quanto para revestimento, não estabelece nenhuma exigência com relação a valores mínimos que devem ser alcançados para a resistência de aderência.

Segundo os critérios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a tensão mínima de tração na aderência do revestimento novo de gesso deve ser igual ou superior a 0,5 MPa (DIAS, 1994). Entretanto, nesse mesmo critério não é estabelecido claramente o que vem a ser gesso novo, pois considerando que uma edificação tem sua vida útil em um período medido por décadas, o termo “*gesso novo*” juridicamente deveria ser mais detalhado, pois poderia se tratar de dias, de meses ou até mesmo de anos.

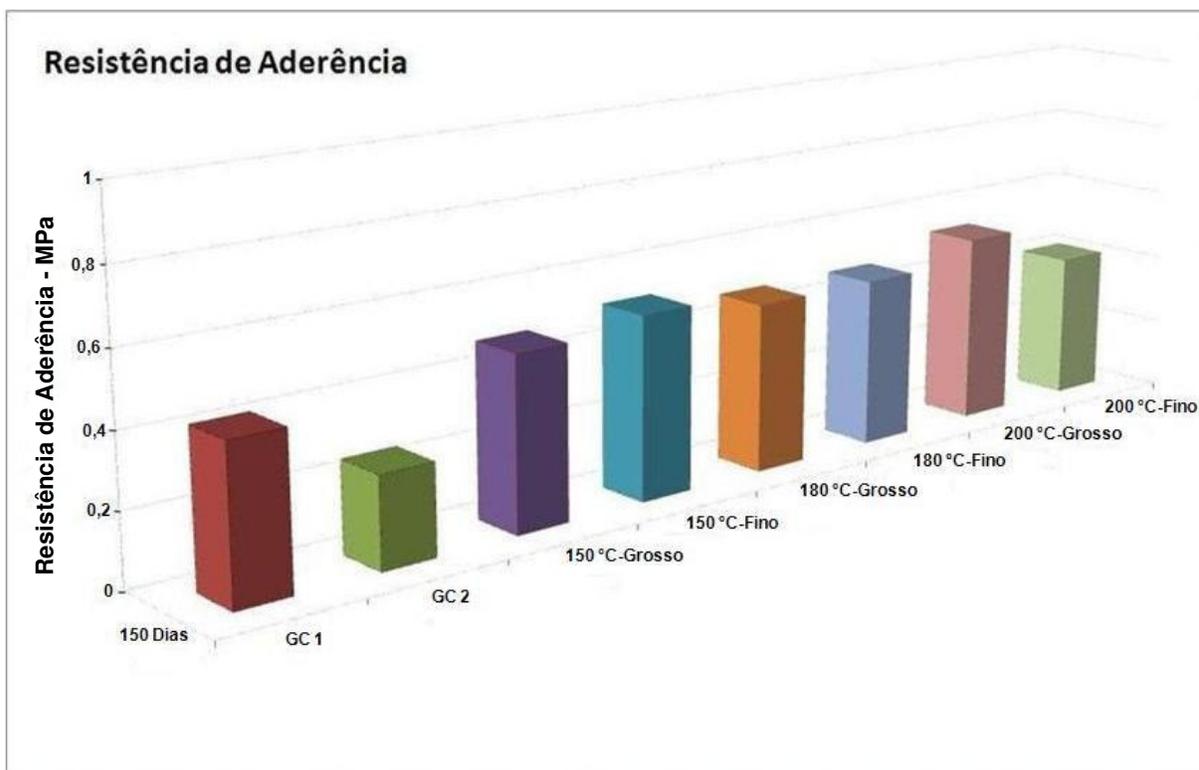


Figura 4.71 – Resistência de aderência (150 dias) de pastas de gesso (comercial e reciclado) Relação água/gesso 0,70.

As pastas apresentaram, na idade de 150 dias, valores próximos a 0,50 MPa, com exceção da pasta produzida com o GC2 que apresentou valor 50% abaixo de 0,50 MPa. Por se tratar de um resultado que se distanciou dentre 7 (sete) outros valores obtidos, que ficaram próximos de uma tendência, considera-se esse desvio uma variabilidade no ensaio (Figura 4.71).

Realizando-se um arredondamento dos resultados para as resistências de aderência da Figura 4.71 para uma casa decimal (de acordo com o estabelecido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil), das 8 (oito) misturas estudadas apenas 3 (três) delas não apresentam valor de 0,5 MPa. Dessas 3 (três), 2 (duas) apresentam valores de 0,4 MPa (valor bem próximo ao estabelecido como mínimo) e apenas um resultado ficou abaixo de 0,4 MPa.

Cabe ressaltar que das 3 (três) misturas que ficaram abaixo do valor mínimo estabelecido (0,5 MPa) se encontram as duas misturas feitas com os gessos comerciais encontrados no mercado (GC1 e GC2). Dessa forma, no critério resistência de aderência as

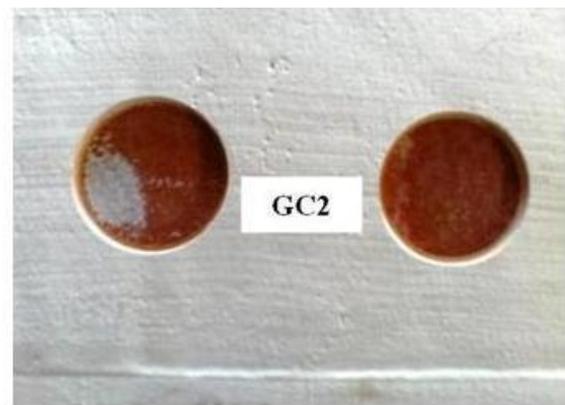
pastas produzidas com os gessos reciclados apresentaram um melhor desempenho na comparação com as pastas produzidas com os gessos comerciais (gessos de referência) (Figura 4.71).

O gráfico obtido para a análise estatística, para a resistência de aderência na idade de 150 dias das pastas produzidas com gessos comerciais e gessos reciclados, está apresentado no Apêndice A4. Com exceção do GC2, todos os demais resultados não foram estatisticamente significativos, ou seja, os resultados encontrados podem ser tratados como semelhantes.

Ressalta-se que em todas as pastas, tanto nas de gesso comercial quanto nas de gesso reciclado, a ruptura do revestimento de gesso ocorreu na interface entre a pasta de gesso e o bloco cerâmico (Figura 4.72).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.72 - Substrato cerâmico (bloco cerâmico) com revestimento de gesso (gesso comercial – GC1 (a), GC2 (b) e (gesso reciclado 150 °C – (c)) após realização de ensaio de aderência.

De acordo com Barbosa *et al.* (2004) a superfície da interface de aplicação das pastas de gesso tem influência significativa na resistência de aderência dos revestimentos de gesso, pois um material mais permeável proporciona uma microancoragem mais resistente com maior penetração do gesso nos poros.

A face dos blocos cerâmicos utilizados como base dos revestimentos das pastas de gesso, por serem de cerâmica vermelha obtida por queima, apresenta a face vidrada diminuindo a permeabilidade do substrato cerâmico e dificultando assim uma melhoria na microancoragem.

Os resultados para a aderência das pastas de gesso foram obtidos com a relação água/gesso 0,70. Entretanto, embora todas as pastas de gesso tenham sido produzidas com a mesma relação água/gesso (0,70), as consistências (trabalhabilidade) apresentadas pelas pastas foram diferentes. Isso ocorreu devido à diferença no tamanho das partículas (finura e forma dos grãos) existente entre os gessos estudados (gessos comerciais e gessos reciclados).

As pastas produzidas com o gesso comercial (GC1 e GC2) apresentaram uma melhor trabalhabilidade quando comparadas às pastas produzidas utilizando-se os gessos reciclados (finos e grossos).

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo investigar as características e potencialidades para o reaproveitamento do resíduo de gesso de construção como material reciclado (gesso reciclado); com isso, reinserí-lo na cadeia produtiva da construção civil, pois as condições inadequadas de deposição do resíduo de gesso o torna um material altamente nocivo ao meio ambiente.

Cabe salientar que entidades públicas e privadas manifestam uma crescente preocupação com relação à destinação desse resíduo de construção, pois segundo a resolução CONAMA nº 307 (2002) cabe ao gerador a sua destinação. Como esse resíduo contribui significativamente na poluição do local de deposição, os aterros tem se recusado a receber os resíduos de gesso (puro ou misturado a outros resíduos de construção). Esse fato tem contribuído para um crescente aumento na deposição clandestina em locais públicos e inadequados.

Assim, do estudo realizado apresentam-se as principais conclusões.

Com Relação à Composição dos Gessos Estudados

As análises dos difratogramas obtidos nos ensaios de difração de raios-X (análise qualitativa) indicaram que os compostos presentes nos gessos comerciais foram os mesmos compostos encontrados nos gessos reciclados (hemi-hidrato e anidrita). Entretanto, nos gessos reciclados constatou-se a presença de di-hidrato indicando que na etapa de calcinação nem toda a gipsita se transformou em gesso de construção.

Da análise da composição química provável tem-se um indicativo de que os gessos comerciais (GC1 e GC2) são constituídos essencialmente de hemi-hidrato e os gessos

reciclados, independente da temperatura de calcinação apresentaram em sua composição hemi-hidrato e anidrita solúvel (anidrita III).

As curvas de evolução de temperatura indicaram para os gessos comerciais a presença de hemi-hidrato com uma pequena quantidade de anidrita III em sua composição e para os gessos reciclados a presença de hemi-hidrato e anidrita III. Tal fato se deve a ocorrência de picos de elevação de temperatura nos instantes iniciais de hidratação dos gessos que é um indicativo da presença de anidrita III, para os gessos reciclados (150 °C, 180 °C e 200 °C) esses picos de elevação de temperatura inicial foram mais expressivos do que os observados para os gessos comerciais (GC1 e GC2), indicando uma maior quantidade de anidrita III na sua composição, nos gessos reciclados, esses picos demonstraram ser mais acentuados para as temperaturas de calcinação mais elevadas.

Com Relação às Propriedades em Pó

Nas propriedades físicas em pó dos gessos comerciais e gessos reciclados houve pequenas variações nos resultados de massa específica, massa unitária, módulo de finura e também nas curvas granulométricas, tanto na comparação somente entre os gessos comerciais, quanto na comparação dos gessos reciclados entre si e com os gessos comerciais. Para os gessos comerciais essa variação pode ser atribuída ao processo de produção de diferentes fabricantes e para os gessos reciclados pode ser atribuída à variação do teor de água combinada (água de cristalização), pois com o aumento da temperatura de calcinação para obtenção dos gessos reciclados, ocorreu redução na quantidade de água combinada, reduzindo os valores encontrados para as propriedades físicas desses gessos em pó.

Com Relação às Propriedades das Pastas no Estado Fresco

Para as pastas produzidas com os gessos reciclados, os tempos de pega foram maiores do que os obtidos para as pastas produzidas com os gessos comerciais, independente da relação água/gesso empregada na mistura. Isso pode ser atribuído ao fato do módulo de finura dos gessos reciclados serem diferentes do módulo de finura dos gessos comerciais, o que influencia na cinética de hidratação das pastas. Como os gessos reciclados apresentaram valores de módulo de finura diferentes quando comparados entre si, a mesma consideração pode ser atribuída para justificar a diferença ocorrida entre os tempos de pega nas pastas produzidas com os gessos reciclados.

Na aplicação das pastas de gesso reciclado como revestimento em blocos cerâmicos para alvenaria estrutural, o tamanho das partículas dos gessos teve fundamental importância, pois devido à baixa superfície específica do aglomerante com hidratação muito lenta e à rápida absorção de água pelo substrato formado pelo bloco cerâmico surgiram fissuras de retração no revestimento. Essas fissuras de retração foram mais expressivas nas pastas produzidas com os gessos reciclados grossos, independente da temperatura de calcinação. Nos revestimentos efetuados com os gessos de referência (gessos comerciais) não foram constatadas fissuras.

Com Relação às Propriedades das Pastas no Estado Endurecido

Em termos gerais, para os gessos reciclados, a temperatura de calcinação e a granulometria da matéria prima não influenciou nas propriedades das pastas de gesso no estado endurecido. Isso pode ser atribuído ao período de 24 horas utilizado para calcinação dos gessos reciclados que, por ser prolongado, contribuiu na transformação da gipsita em hemihidrato e anidrita. Entretanto, nas pastas com mesma relação água/gesso (a/g 0,70), ressalta-se que os resultados alcançados pelos gessos comerciais para as propriedades das pastas no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração na flexão e dureza) foram superiores aos alcançados pelos gessos reciclados.

Foi confirmado que a quantidade de água de amassamento é uma variável que influi de forma determinante nas propriedades mecânicas do gesso. Nas pastas de mesma consistência, os gessos comerciais, por terem relação água/gesso menor do que a dos gessos reciclados (finos e grossos), alcançou valores superiores aos alcançados pelos gessos reciclados.

Nas pastas mistas (50% de gesso comercial e 50% de gesso reciclado) as propriedades mecânicas (resistência à compressão e dureza) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas quando comparadas entre si. Entretanto, na comparação das pastas mistas com pastas de gessos comerciais, os valores das propriedades mecânicas das pastas mistas foram inferiores aos alcançados pelas pastas produzidas com gesso comercial. Da mesma forma, na comparação das pastas mistas com pastas produzidas exclusivamente com gessos reciclados, os valores encontrados para as pastas mistas foram menores do que os das pastas dos gessos reciclados.

Essa variação encontrada entre os resultados das propriedades mecânicas entre pastas mistas, pastas de gesso comercial e pastas de gesso reciclado pode ser atribuída, em parte, a uma estrutura cristalina heterogênea nas pastas mistas endurecidas, ocasionando diminuição nas suas propriedades mecânicas. Outra parte dessa variação pode ser atribuída a diferenças de moldagem, cura e procedimentos de ensaio.

Com relação à resistência de aderência dos revestimentos de pastas produzidas com gessos reciclados e com gessos comerciais, aplicados sobre a superfície de blocos cerâmicos para alvenaria estrutural, os valores de resistência de aderência atingidos por todas as pastas estudadas podem ser considerados semelhantes entre si. Após a realização dos ensaios de aderência observou-se que em todas as pastas (gessos comerciais e reciclados) o revestimento se rompeu na interface entre a pasta de gesso e a base do substrato cerâmico.

Com Relação à Microestrutura

Na análise comparativa entre a microestrutura dos gessos comerciais com os gessos reciclados e com os gessos produzidos com pastas mistas foi observado, independente da temperatura de calcinação e da granulometria dos gessos reciclados, que a estrutura porosa e a geometria dos cristais formados durante a hidratação dos gessos (comercial, reciclado e misto) são muito parecidas. Todas as pastas apresentaram as mesmas características típicas dos gessos de construção comerciais. Entretanto, nos gessos comerciais observou-se uma estrutura cristalina bem mais homogênea, com agulhas bem definidas.

Nas pastas produzidas com gessos reciclados e, principalmente, nas pastas mistas, foram identificados cristais de di-hidrato de pequenas dimensões entre e sobre os cristais da pasta endurecida.

5.1 – Sugestões Para Prosseguimento dos Estudos

A partir dos resultados desta pesquisa recomenda-se o prosseguimento de estudos relacionados à reciclagem de gesso para utilização na construção civil.

1. Tempo de calcinação do resíduo de gesso, para observar qual o tempo ideal de permanência no forno para se produzir o gesso reciclado.

2. Em face da fissuração das pastas no revestimento dos blocos cerâmicos, efetuar estudos com pastas mistas de gesso (gesso comercial com gesso reciclado) variando-se os teores percentuais da quantidade de gesso reciclado.
3. Estudar o desempenho do gesso reciclado quanto ao controle de fissuração dos revestimentos no estado plástico, para diversos tipos de substratos.
4. Avaliar com profundidade a influência da granulometria nas características do gesso reciclado.
5. Fazer um estudo de viabilidade energética e econômica para a produção em grande escala de gesso reciclado, avaliando os tipos de fornos mais adequados para a calcinação do resíduo.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12128 – MB 3469**: Gesso para Construção – Determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro: ABNT, 1991a.

_____. **NBR 12127 – MB 3468**: Gesso para Construção – Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro: ABNT, 1991b.

_____. **NBR 12129 – MB 3470**: Gesso para Construção – Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1991c.

_____. **NBR 12775**: Placas Lisas de Gesso para Forro – Determinação das Dimensões e Propriedades Físicas. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 12130 – MB 3471**: Gesso para Construção – Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidro sulfúrico – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 13207**: Gesso para Construção Civil – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

_____. **NBR 14715**: Chapas de Gesso Acartonado – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2001a.

_____. **NBR 14716**: Chapas de Gesso Acartonado – Verificação das características geométricas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001b.

_____. **NBR 14717**: Chapas de Gesso Acartonado – Determinação das características físicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **ASTM C580-85**. Flexural Strength and modulus of Elasticity of chemical-resistant mortars, grouts and monolithic surfacing. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4-05, 1985.

_____. **ASTM C22/C 22M - 00**. Standard Specification for Gypsum. Annual Book of ASTM Standards. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2000a.

_____. **ASTM C28/28M-00**: Standard Specification for Gypsum Plasters. PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428 – 2959, United States, 2000b.

AGOPYAN, A. K.; PILEGGI, R.; SILVA, V. S.; JOHN, V. M. Resíduos de gesso – desafios e oportunidades. In: **SEMINÁRIO GESTÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO – AVANÇOS RECENTES E DESAFIOS FUTUROS**, Anais em CD. São Paulo, EPUSP 2005.

AGUIAR, L. R. **Avaliação da ecoeficiência de programas e projetos ambientais voltados às micro e pequenas empresas do pólo gesseiro do Araripe, Estado de Pernambuco**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2007. 141 p.

AMATHIEU, L.; BOISTELLE R. Growth of gypsum. **Journal of Cristal Growth**. North-Holland – Amsterdam, v.88, 183 – 192, 1988.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo, 2005. 149 p.

ANTUNES, R.P.N.A. **Estudo da influência da cal em pastas de gesso**. 1999. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, 1999. 145 p.

BADENS, E.; VEESLER, S. ; BOISTELLE, R. Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. **Journal of Cristal Growth**. North-Holland- Amsterdam, v.198/199, 704 – 709, 1999.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. “Diagnóstico do pólo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para fabricação de cimento”. Disponível em: http://www.minas.upm.es/catedra-anefa/Consultas/MAGALHAESCarlos_IVIBERMAC.pdf. Acessado em: 15/01/2007.

BARBOSA, D.C., FERREIRA, G.C., PASSOS, A., ALMEIDA, A., CAMARINI, G. “Avaliação da resistência de aderência de pastas de gesso aplicadas em lajotas de concreto”, In: **46º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Anais em CD, Florianópolis, IBRACON, 2004.

BARDELLA, P.S., FERREIRA JR, E.L., CAMARINI, G. Air Permeability, Physical and Mechanical Properties from Recycled Plaster. Anais. **Inter American Conference on Non-Conventional Materials and Technologies in the Eco-Construction and Infrastructure – IAC-NOCMAT 2003**, João Pessoa, 2003.

BARDELLA, P.S., SANTOS, F.M, CAMARINI, G. “Reciclagem de gesso de construção”, **Congresso de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável – ICTR**, 17 a 20 de outubro, Florianópolis, SC, 2004.

BARDELLA, P.S.; CAMARINI, G. “Curvas de hidratação de gesso reciclado para a construção”, **16º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Porto Alegre, RS, 28 novembro a 2 de dezembro de 2004.

BARDELLA, P.S.; CAMARINI, G. “Propriedades de Gesso Reciclado para Utilização na Construção Civil”, **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu, PR, 15 a 19 de novembro, 2006b.

BARDELLA, P.S., CAMARINI, G. Hydration Crystal by Scanning Electron Microscopy (SEM) in Recycled Plaster. **Activity Report 2006 - LNLS (Brazilian Synchrotron Light Laboratory)**, 2007a.

BARDELLA, P.S., CAMARINI, G. X-Ray Powder Diffraction (XPD) in Recycled Plaster. **Activity Report 2006 - LNLS (Brazilian Synchrotron Light Laboratory)**, 2007b.

BARDELLA, P.S.; PEREIRA, V.M.; CAMARINI, G. “Sustentabilidade na Construção Civil”, **VII Encontro Latino americano de Pós-Graduação da UNIVAP 2007 – VII EPG**, São José dos Campos, SP, 18 e 19 de Outubro de 2007.

BUTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos – EESC. Tese de doutorado, São Carlos - SP, 2007. 499 p.

BRANDT, F. ; BOSBACH, D. Bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) dissolution and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) precipitation in the presence of cellulose ethers. **Journal of Cristal Growth**. North-Holland- Amsterdam, v.233, 837 – 845, 2001.

CAMARINI, G. **Difração de raios-x – notas de aula**. Disciplina aglomerantes minerais I – FEC/UNICAMP. Campinas – SP, 2002.

CAMARINI, G.; PIMENTEL, L. L.; SÁ, N. H. R. Assess of the material loss in walls renderings with β -hemihydrate paste. **Applied Mechanics and Materials**. Vols. 71-78, 1242-1245, 2011.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Dissertação de mestrado, Belo Horizonte - MG, 2006. 154 p.

CARVALHO, M.T.M. **Estudo dos resíduos de gesso e suas aplicações na construção civil**. 2005. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 2005. 230 p.

CAVALCANTI, L.B. **Determinação de condições operacionais adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. Dissertação de mestrado – UNICAP – Universidade Católica de Pernambuco, Pernambuco, 2006. 88 p.

CINCOTTO, M. A. C.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção. Composição química 1ª parte. **Revista A Construção São Paulo – Tecnologia de Edificações**. Ed. PINI. São Paulo/SP, 1988a, 4 p.

CINCOTTO, M. A. C.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção. Propriedades físicas e mecânicas 2ª parte. **Revista A Construção São Paulo – Tecnologia de Edificações**. Ed. PINI. São Paulo/SP, 1988b, 4 p.

CONAMA – Conselho Nacional do meio Ambiente. **Resolução nº 307, 5 de Julho de 2002**. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em 18/10/2004.

CONAMA – Conselho Nacional do meio Ambiente. **Resolução nº 431, 24 de Maio de 2011**. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>. Acesso em 02/11/2011.

DE MILITO, J.A. **Avaliação do comportamento de pastas de gesso com cimento portland e sílica ativa para revestimento**. 2001. Dissertação de mestrado - FEC-UNICAMP, Campinas - SP, 2001. 228 p.

DE MILITO, J.A. **Avaliação do desempenho de aglomerante à base de gesso com cimento portland de alto forno e sílica ativa**. 2007. Tese de doutorado - FEC-UNICAMP, Campinas - SP, 2007. 339 p.

DIAS, A.M.N. **Gesso de construção: caracterização do pó, pasta e argamassas e aplicação como revestimento interno**. 1994. Dissertação de mestrado - EPUSP, São Paulo - SP, 1994. 157 p.

EVE, S., GOMINA, M., JERNOT, J. P., OZOUT, J. C., ORANGE, G. Microstructure characterization of polyamide fibre/latex-filled plaster composites. **Journal of the European Ceramic Society**, v.27, p 3517 – 3525, 2007.

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions – The case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, v.39, p 289 – 295, 2009.

GYP SUM RECYCLING INTERNATIONAL – <http://gypsumrecycling.biz/?Side=5508&Udvid=1>
Acesso em 14/08/2007.

GMOUH A., EVE S., SAMDI A., MOUSSA R., HAMEL J., GOMINA M. Changes in plaster microstructure by pre-stressing or by adding gypsum grains: microstructural and mechanical investigations. **Materials Science & Engineering A**. 352 p. 325-332, 2003.

HABITARE : RESULTADOS DE IMPACTO – RELATÓRIO 1995/2007. Rio de Janeiro – RJ, 2008. 50 p. http://habitare.infohab.org.br/programa_resultados.aspx. Acesso em 01/05/2010.

HAND, R. J. The Kinetics of hydration of calcium sulphate hemihydrate: A critical comparison of the models in the literature. **Cement and concrete Research**. V. 24, Nº 5. p. 885-895. 1994.

HENAO, A.M.H. **Efeito de Substâncias Retardadoras de Pega nas Propriedades do Gesso de Construção**. 1997. Dissertação de mestrado – EPUSP, São Paulo - SP, 1997. 172 p.

HILL, JORG-RUDIGER; PLANK, JOHANN. Retardation of setting of plaster of Paris by organic acids: Understanding the mechanism through molecular modeling. **Journal of Computational Chemistry**. v. 25, n. 1438 – 1448, 2004.

HINCAPIE, A. M.; OLIVEIRA, C. T. A.; CINCOTTO, M. A.; SELMO, S. M. Revestimento de Gesso I – **Revista Tecnhe** nº 21, Março/Abril, 1996a.

HINCAPIE, A. M.; OLIVEIRA, C. T. A.; CINCOTTO, M. A.; SELMO, S. M. Revestimento de Gesso II – **Revista Tecnhe** nº 22, Maio/Junho, 1996b.

HINCAPIE, A. M.; CINCOTTO, M.A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Revista Ambiente Construído**. V. 1, Nº 2. p. 07-16. JUL/DEZ, 1997.

HUDSON-LAMB, D. L.; STRYDOM, C.A.; POTGIETER, J.H. The thermal dehydration of natural gypsum and pure calcium sulphate dehydrate (gypsum). **Thermochimica Acta**. 282/283. p. 483-492. 1996.

JEULIN, D., MONNAIE, P., PÈRONNET, F. Gypsum morphological analysis and modeling. **Cement and Concrete Composites**, 23, p 299 – 311, 2001.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de livre docência, São Paulo - SP, 2000. 102 p.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Alternativas de gestão dos resíduos de gesso. Contribuição apresentada a discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307, relativa a gestão do gesso. Julho de 2003. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/artigos1.htm>. Acesso em 13/07/2005.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M. A. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Gesso de Construção Civil. 2007. p 727-760.

JORGENSEN, D. B. Gypsum and anhydrite. In: Industrial Minerals and Rocks, 6th edition. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, Colorado. 1994.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: Origin and Properties. **Materials and Structures**. V. 28, 92-100. 1995.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster – Part I – The hydration of calcium sulphate hemihydrate. **Journal of Materials science**.v.29, 5279-5284, 1994a.

LEWRY, A. J. WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster – Part II – The development of microstructure and strength. **Journal of Materials science**.v.29, 5524-5528, 1994b.

LEWRY, A. J. ; WILLIAMSON, The setting of gypsum plaster – Part III – The effect of additives and impurities. **Journal of Materials science**.v.29, 6085-6090, 1994c.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J.O.C. Sumário Mineral Brasileiro, 2001. DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral.
<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1165>

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J.O.C. Sumário Mineral Brasileiro, 2008. DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral.
<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1165>
Acesso: 08/07/2010. **Balanço Mineral Brasileiro**, 2008.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; DANTAS, J.O.C. Sumário Mineral Brasileiro, 2010. DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral.
<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=1165>
Acesso: 05/01/2011. **Balanço Mineral Brasileiro**, 2010.

MAKSOUH, M. A.; ASHOUR, A. Heat of Hydration as a Method for Determining the Composition of Calcined Gypsum. **Thermochimica Acta**. v. 46, 303 – 308. 1981.

MINDESS, S., YOUNG, J. F. Concrete. Prentice-Hall. New Jersey, 1981. 671 p.

MONÇÃO JÚNIOR, A. R. **Otimização das condições experimentais na desidratação da gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. 2008. Dissertação de mestrado. Universidade Católica de Pernambuco. Recife - PE, 2008. 66 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Editora Pini. São Paulo, 1982. 738 p.

NITA, C., PILEGGI, R.G, CINCOTTO, M. A, JOHN, V. “Estudo da reciclagem do gesso de construção”, **I Conferência Latino Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 18 a 21 de julho, São Paulo, SP, 2004.

NOLHIER, M. **Construire em plâtre**. Paris, L’Harmattan, 1986.

PEREIRA, E. B. Perfil analítico da gipsita. Departamento Nacional da Produção Mineral. 1973, 19 p. Rio de Janeiro.

PETRI, A. V.; BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. “Argamassas produzidas com gesso reciclado”, **VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação**, 18 e 19 de outubro, Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, São José dos Campos, SP, 2007.

PIMENTEL, L. L.; CAMARINI, G. Gypsum plastering: waste evaluation. In: Progress o f recycling in the built environment, Recycle 2009, São Paulo, SP, 2009

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. Tese de doutorado, São Paulo - SP, 1999. 189 p.

PLACO IMPRENSA – Placo reprocessa 100% de água e recicla 100% de resíduos provenientes da fabricação de placas de gesso. 2004.
http://www.placo.com.br/imprensa_preview.php?id=6&key=88 Acesso em 16/07/2007.

RASHAD, M.M.; MAHMOUD, I. A.; IBRAHIM, E. A.; ABDEL-AAL, E. A. Crystallization of calcium sulfate dehydrate under simulated conditions of phosphoric acid production in the presence of aluminum and magnesium ions. **Journal of Cristal Growth**. North-Holland- Amsterdam, v. 267, 372 – 379, 2004.

REYNAUD, P.; SAÂDAOUI, M.; MEILLE, S.; FANTOZZI, G. Water effect on internal friction of set plaster. **Materials Science and Engineering A**. 442, 500 – 503, 2006.

RIBEIRO, A.B. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2006. 86 p.

SINDUSGESSO: O mercado de gipsita e gesso no Brasil. 2004. Disponível em:
<http://www.sindusgesso.org.br/jornal/Mercado%20da%20Gypsita%20e%20do%20gesso%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em 13/07/2005.

SINDUSCON-SP – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo. **Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil – A Experiência do SINDUSCON - SP**. 2005.

SINDUSCON-MG – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Minas Gerais. **Cartilha de Gerenciamento de Resíduos Sólidos para a Construção Civil**. Belo Horizonte – MG. 2005.

SINGH, U. L. Hydration of Hemihydrate of Gypsum and its Supersaturation. **Cement and Concrete Research**. V. 8, 291 – 300, 1978.

SINGH, N. B; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrates hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in crystal growth and characterization of materials**, v. 53, p. 57 – 77, 2007.

SCHIESSI, P. Durability of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 289 – 295, jul. 1996.

WITKAMP, G.J.; VAN DER EERDEN, J. P.; VAN ROSMALEN, G. M. Growth of gypsum. **Journal of Cristal Growth**. North-Holland- Amsterdam, v.102, 281 – 289, 1990.

VÁZQUES, E. **Projeto entulho bom**. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

ZHANG, Q., KASAI, E., SAITO, F. Mechanochemical changes in gypsum when dry ground with hydrated minerals. **Powers Technology**, v. 87, p 67 – 71, july. 1995.

ZORDAN, S.E. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 1997. Dissertação de mestrado - FEC-UNICAMP, Campinas - SP, 1997. 140 p.

ANEXOS

Anexo 1



Central Analítica
Instituto de Química
Universidade Estadual de Campinas

RESULTADO DE ANÁLISE CA - 351/06

EMPRESA : UNICAMP - FEC
Endereço: Campus UNICAMP, s/nr - FEC
Campinas/SP

PROBLEMA ANALÍTICO: Determinação de Cálcio e Magnésio por ICP-OES, determinação de água livre, água de cristalização e anidrido sulfúrico por Gravimetria em duas amostras.

A/C Paulo Sérgio Bardella
Fone: (19) 8166-8032
E-mail: psbardella@iqs.unicamp.br

15 de Fevereiro de 2007

PSB



1. OBJETIVOS :

Determinação de Cálcio e Magnésio por ICP-OES, determinação de água livre, água de cristalização e teor de anidrido sulfúrico por Gravimetria em duas amostras.

2. AMOSTRAS E PADRÕES :

2.1 Amostras

Tabela 1: Legenda de identificação das amostras.

Central Analítica	Cliente
AM 1210/06	GC1
AM 1211/06	GC2

2.2 Padrões

- Solução Padrão de Cálcio TEC LAB rastreável ao material de referência 3109a – NIST – USA, Lote F50737, válido até julho de 2007.
- Solução Padrão de Magnésio TEC LAB rastreável ao material de referência 3131a – NIST – USA, Lote F50803, válido até setembro de 2010.

3. AMOSTRAGEM :

As amostras foram entregues em 29 de Novembro de 2006, sem preservação e à temperatura ambiente.

4. TÉCNICAS UTILIZADAS E EQUIPAMENTOS :

4.1 Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES).

Equipamento: Perkin Elmer - 3000 DV.

4.2 Gravimetria.

Equipamentos: Balança Analítica - OHAUS 200.

Estufa Nova Ética 400 - 3ND.



5. PROCEDIMENTOS :

5.1 **Determinação de água livre:** Procedeu-se conforme norma MB-3417 (nov./1991).

5.2 **Determinação de água de cristalização:** Procedeu-se conforme norma MB-3417 (nov./1991).

5.3 **Determinação de anidrido sulfúrico:** Procedeu-se conforme norma MB-3417 (nov./1991).

5.4 **Determinação de Magnésio, Cálcio, Óxido de Magnésio e Óxido de Cálcio.**

5.4.1 **Preparo de amostra:** Pesou-se 100 mg de amostra com precisão 0,1 mg em béqueres. Adicionou-se 3mL de ácido nítrico e 50 mL de água deionizada. Deixou-se em chapa de aquecimento até redução do volume para 20mL. Avolumou-se para balão de 50 mL de com água deionizada.

5.4.2 **Leitura dos metais:** Efetuou-se leitura em espectrômetro de emissão óptica contra curvas dos padrões descritos no item 2.2. A porcentagem dos óxidos foi calculada por estequiometria.

6. RESULTADOS :

Tabela 2: Resultados analíticos obtidos para as amostras.*

Parâmetros	Unidade	CG-1	CG-2
Água Livre	% (m/m)	1,3 ± 0,3	1,2 ± 0,7
Água de cristalização	% (m/m)	5,6 ± 0,4	6,4 ± 0,2
Anidrido Sulfúrico	% (m/m)	73,4 ± 0,6	66,2 ± 0,6
Cálcio	% (m/m)	24,2 ± 0,5	25,1 ± 0,2
Magnésio	% (m/m)	0,11 ± 0,01	0,10 ± 0,01
Óxido de Cálcio	% (m/m)	33,9 ± 0,6	35,1 ± 0,2
Óxido de Magnésio	% (m/m)	0,18 ± 0,02	0,17 ± 0,01

*Resultados expressos como média e estimativa do desvio padrão.

Obs.1: - Os resultados anexos referem-se exclusivamente à análise em amostras entregues pelo cliente à Central Analítica - IQ/ UNICAMP.

Obs.2: - Fica o cliente notificado que o uso do nome do Instituto de Química da UNICAMP e a reprodução deste resultado de análise somente podem ser feitos sob prévia autorização.

APÊNDICES

A

APÊNDICE A

No **APÊNDICE A**, estão apresentados os gráficos obtidos na análise estatística realizada por comparação entre as médias pelo Teste de Tukey nas misturas produzidas utilizando-se a mesma relação água/gesso (0,70). Os resultados se apresentam em um intervalo de confiança de 95%. Por meio dessa comparação entre as médias apresentam-se as diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos em laboratório durante a etapa experimental da pesquisa. A comparação entre as médias foi realizada utilizando-se o Método de Tukey e adotando-se como ferramenta auxiliar no processamento dos dados o software STATGRAPHICS PLUS versão 4.1 e os gráficos foram montados utilizando-se o EXCEL 2007.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por flexão e dureza das misturas de gessos são apresentados observando se são ou não estatisticamente significativos quando comparados entre si (diferenças estatisticamente significativa são representadas por um asterisco ao lado da sigla dos dois resultados comparados, quando não se coloca o asterisco é porque a diferença não é estatisticamente significativa). A análise foi realizada nas seguintes propriedades:

- APÊNDICE A1 - Resistência à Compressão.
- APÊNDICE A2 - Resistência à Tração na Flexão.
- APÊNDICE A3 - Dureza.
- APÊNDICE A4 – Resistência de Aderência.

A1

APÊNDICE A1

MISTURAS COM MESMA RELAÇÃO ÁGUA/GESSO

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

1 – GC1 – 0,70

2 – GC2 – 0,70

3 – 150 F – 0,70

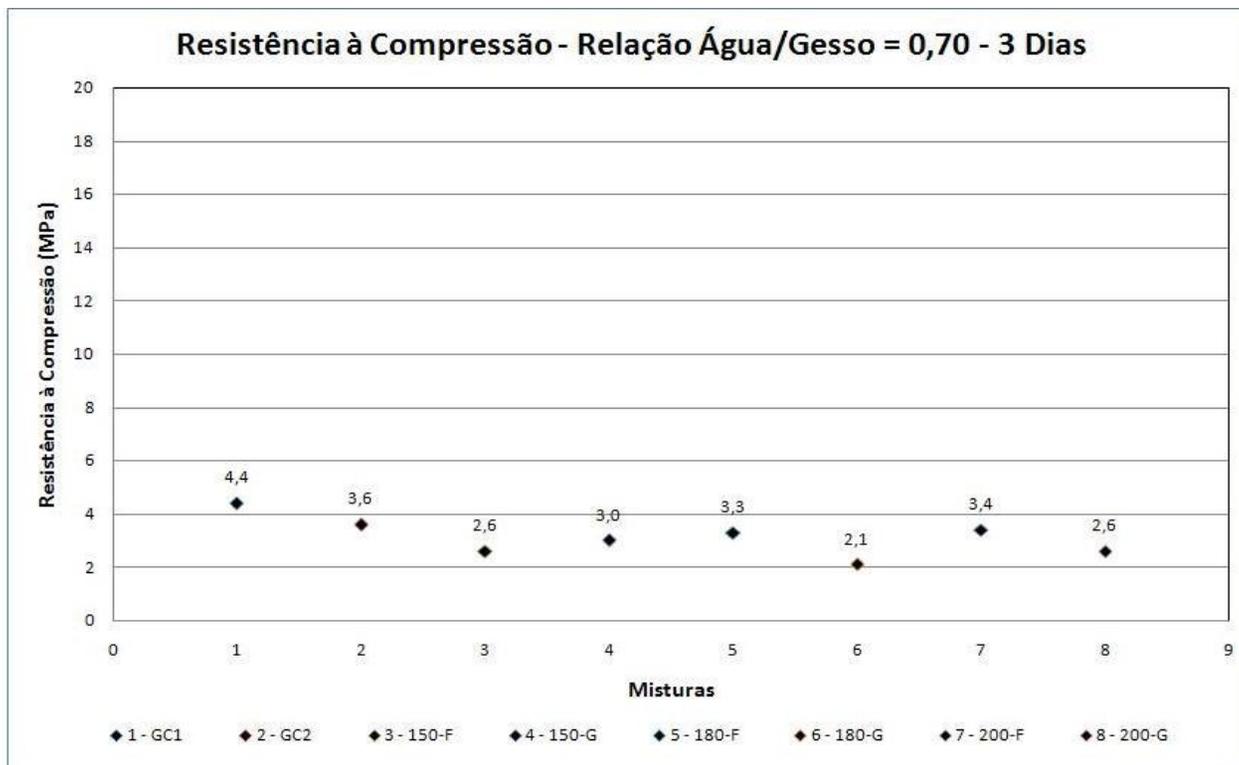
4 – 150 G – 0,70

5 – 180 F – 0,70

6 – 180 G – 0,70

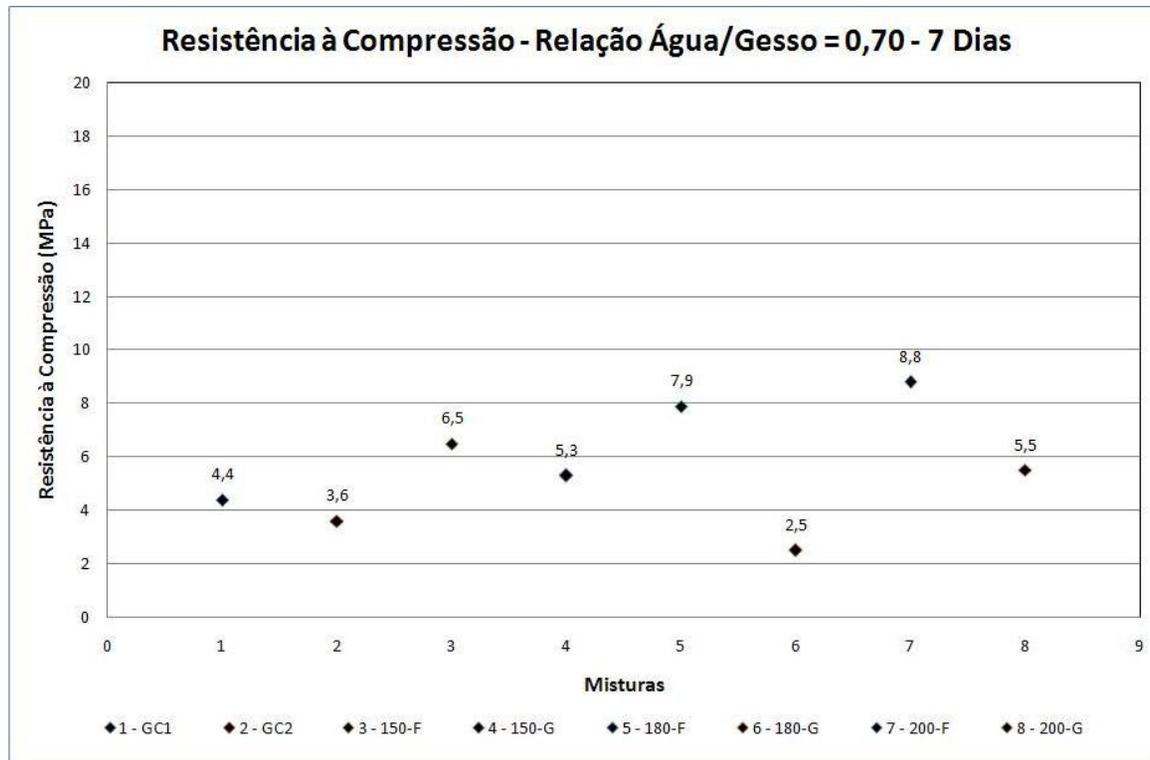
7 – 200 F – 0,70

8 – 200 G – 0,70



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5	2 - 6*	2 - 7	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8
			4 - 5	4 - 6*	4 - 7*	4 - 8
				5 - 6*	5 - 7	5 - 8*
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8*



*** Diferença Estatisticamente Significativa**

1 - 2

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4*

3 - 5*

3 - 6*

3 - 7*

3 - 8*

4 - 5*

4 - 6*

4 - 7*

4 - 8

5 - 6*

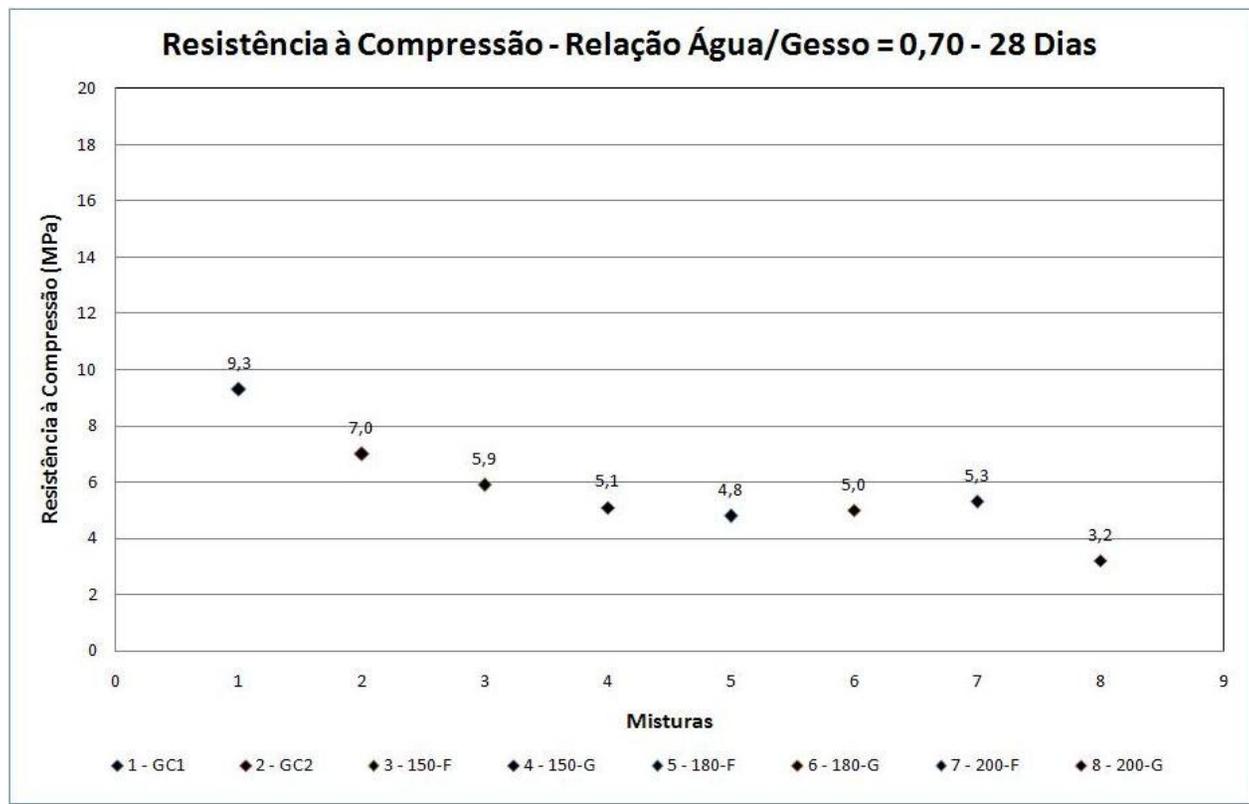
5 - 7*

5 - 8*

6 - 7*

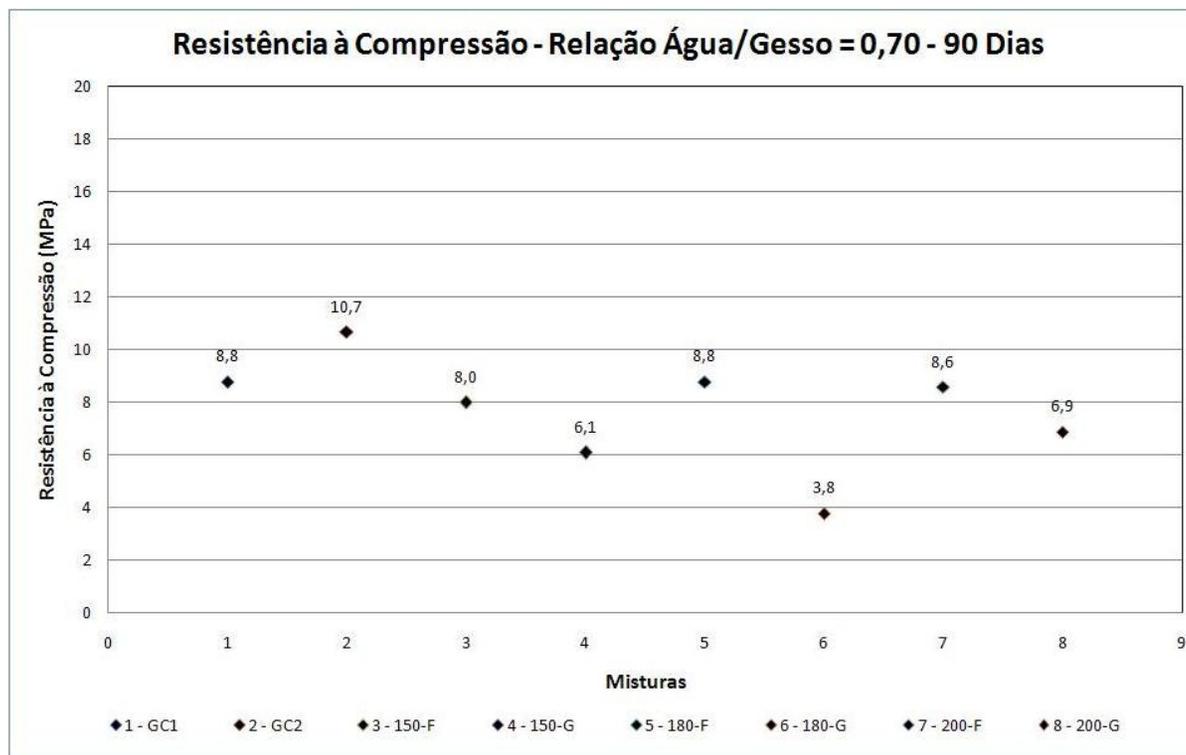
6 - 8*

7 - 8*



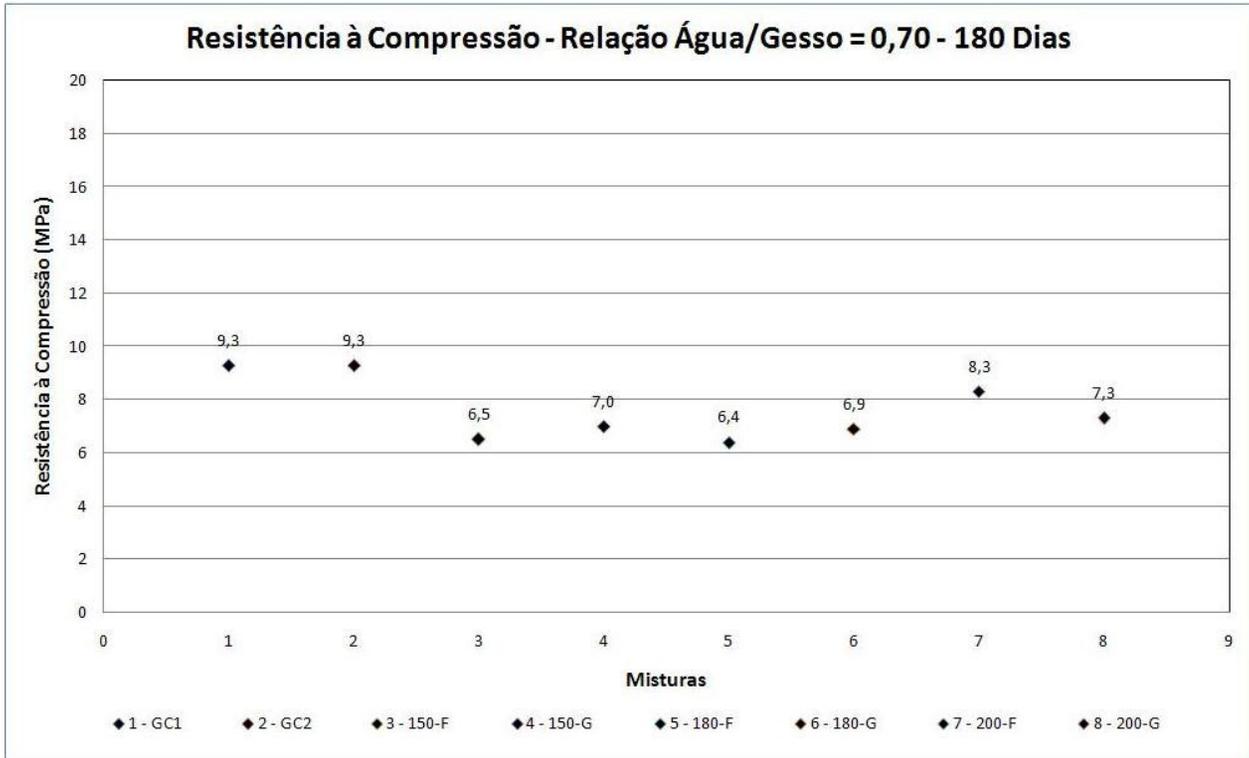
	1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
		2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
			3 - 4	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7	3 - 8*
				4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8*
					5 - 6	5 - 7	5 - 8*
						6 - 7	6 - 8*
							7 - 8*

* Diferença Estatisticamente Significativa



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5	1 - 6*	1 - 7	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4*	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*
			4 - 5*	4 - 6*	4 - 7*	4 - 8*
				5 - 6*	5 - 7	5 - 8*
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8*



	1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
		2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
			3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7*	3 - 8
				4 - 5	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
					5 - 6	5 - 7*	5 - 8
						6 - 7*	6 - 8
							7 - 8*

* Diferença Estatisticamente Significativa

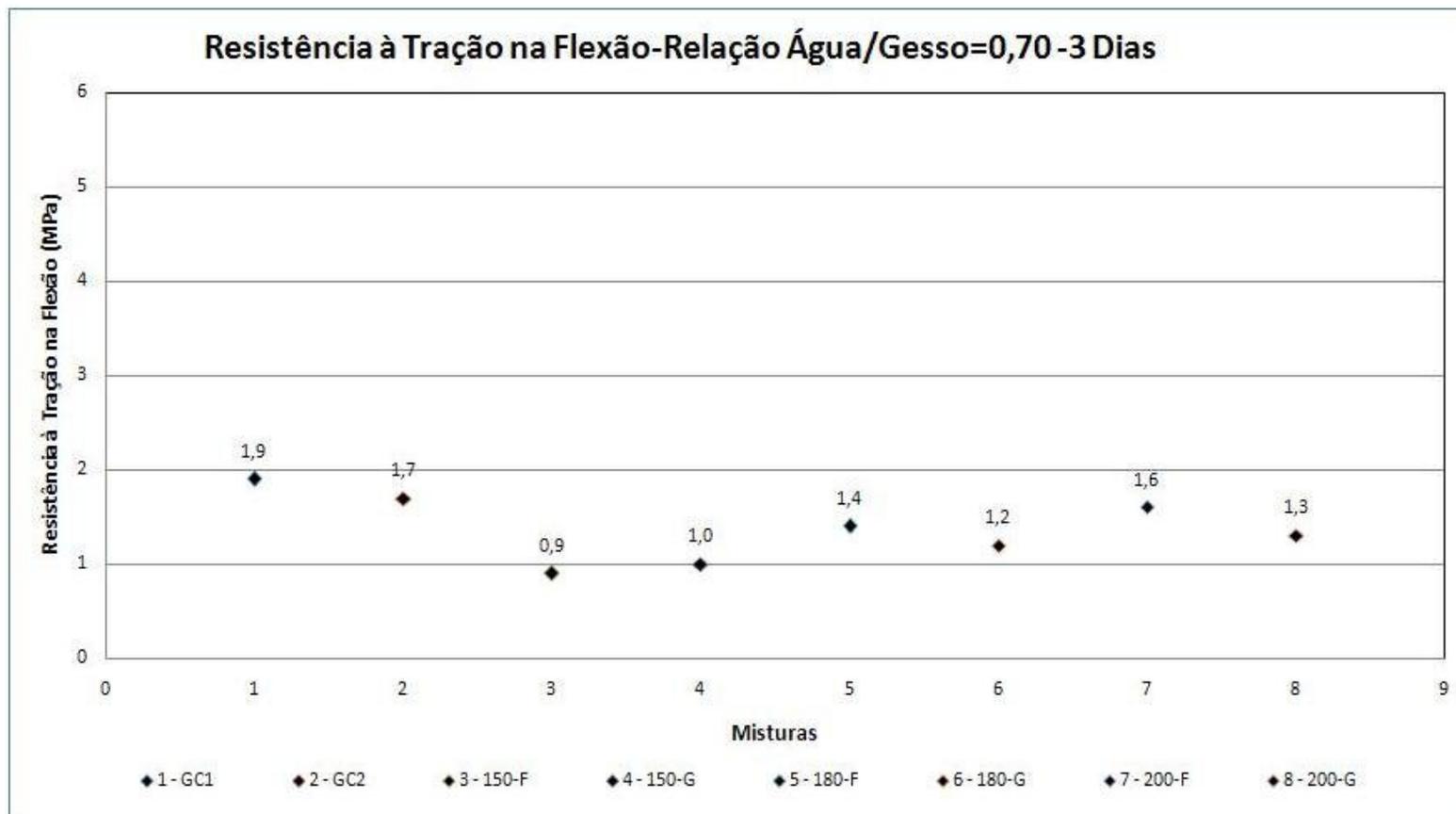
A2

APÊNDICE A2

MISTURAS COM MESMA RELAÇÃO ÁGUA/GESSO

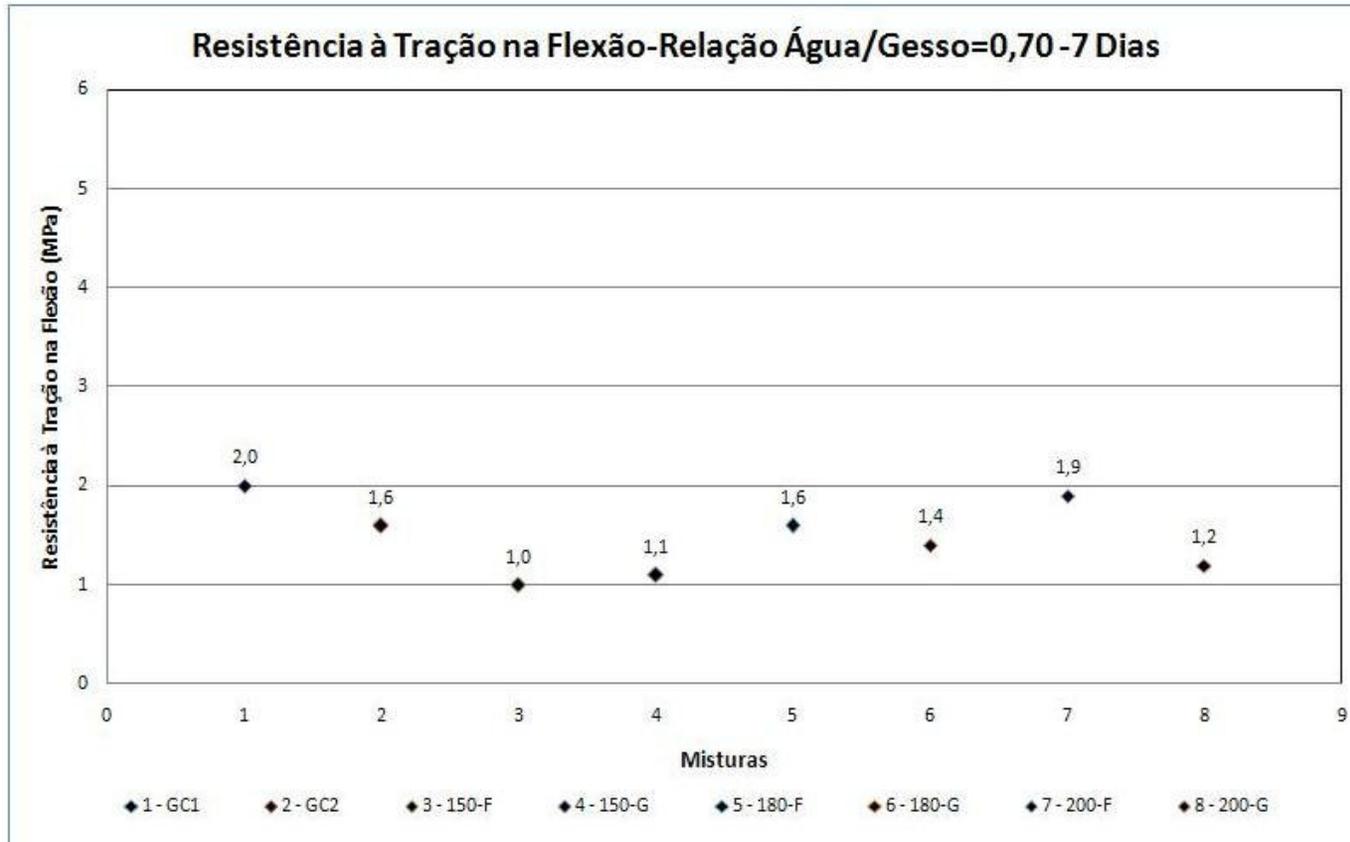
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)

- 1 – GC1 – 0,70
- 2 – GC2 – 0,70
- 3 – 150 F – 0,70
- 4 – 150 G – 0,70
- 5 – 180 F – 0,70
- 6 – 180 G – 0,70
- 7 – 200 F – 0,70
- 8 – 200 G – 0,70



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*
			4 - 5	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8
						7 - 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5

2 - 6

2 - 7

2 - 8*

3 - 4

3 - 5*

3 - 6*

3 - 7*

3 - 8

4 - 5*

4 - 6

4 - 7*

4 - 8

5 - 6*

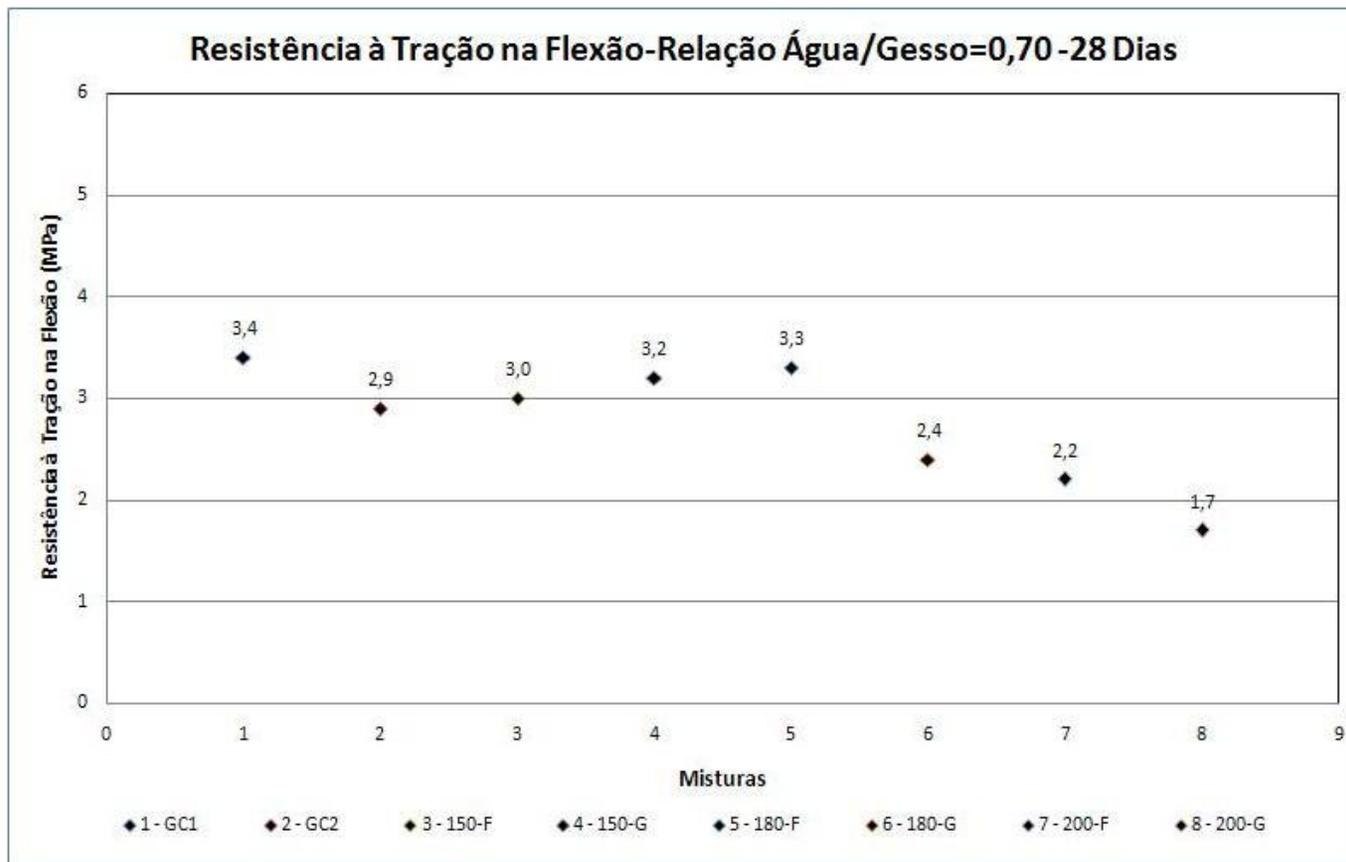
5 - 7

5 - 8*

6 - 7*

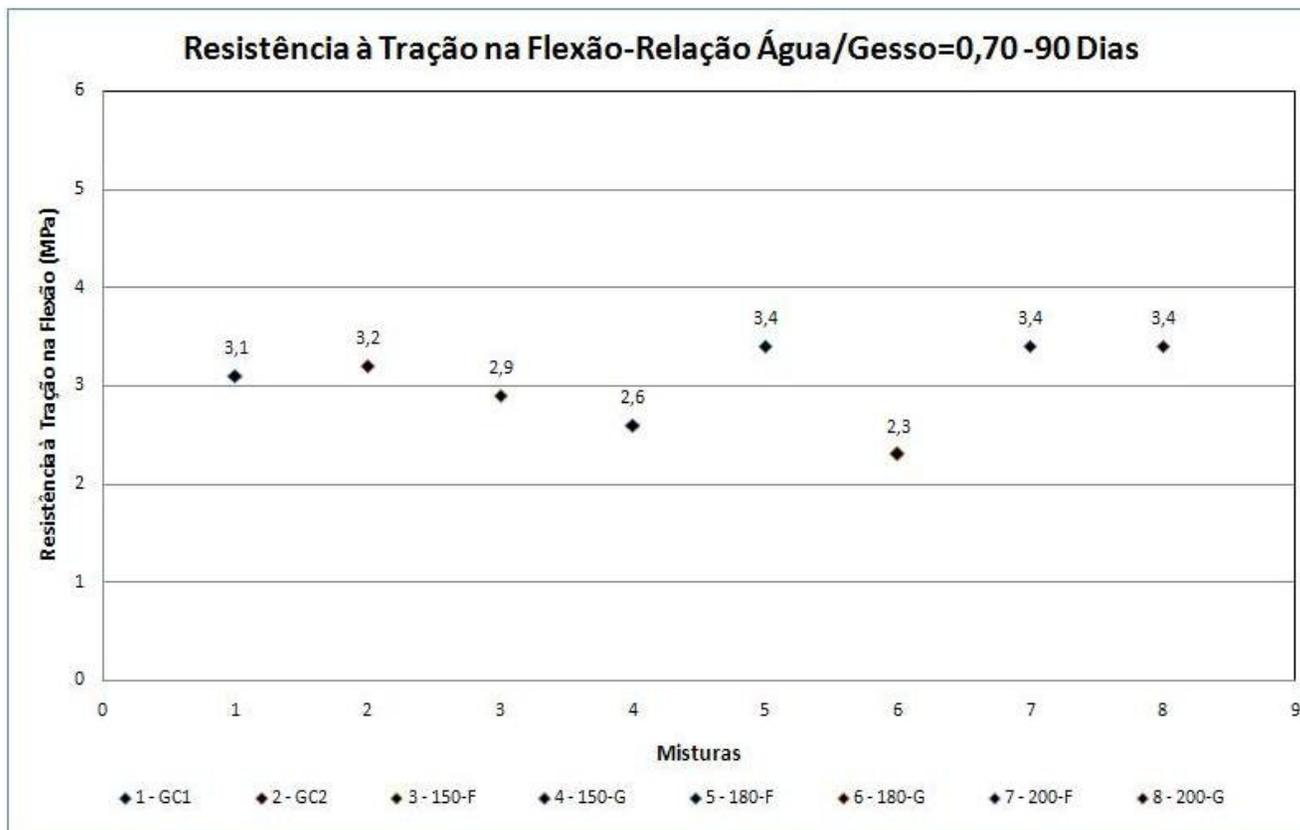
6 - 8

7 - 8*



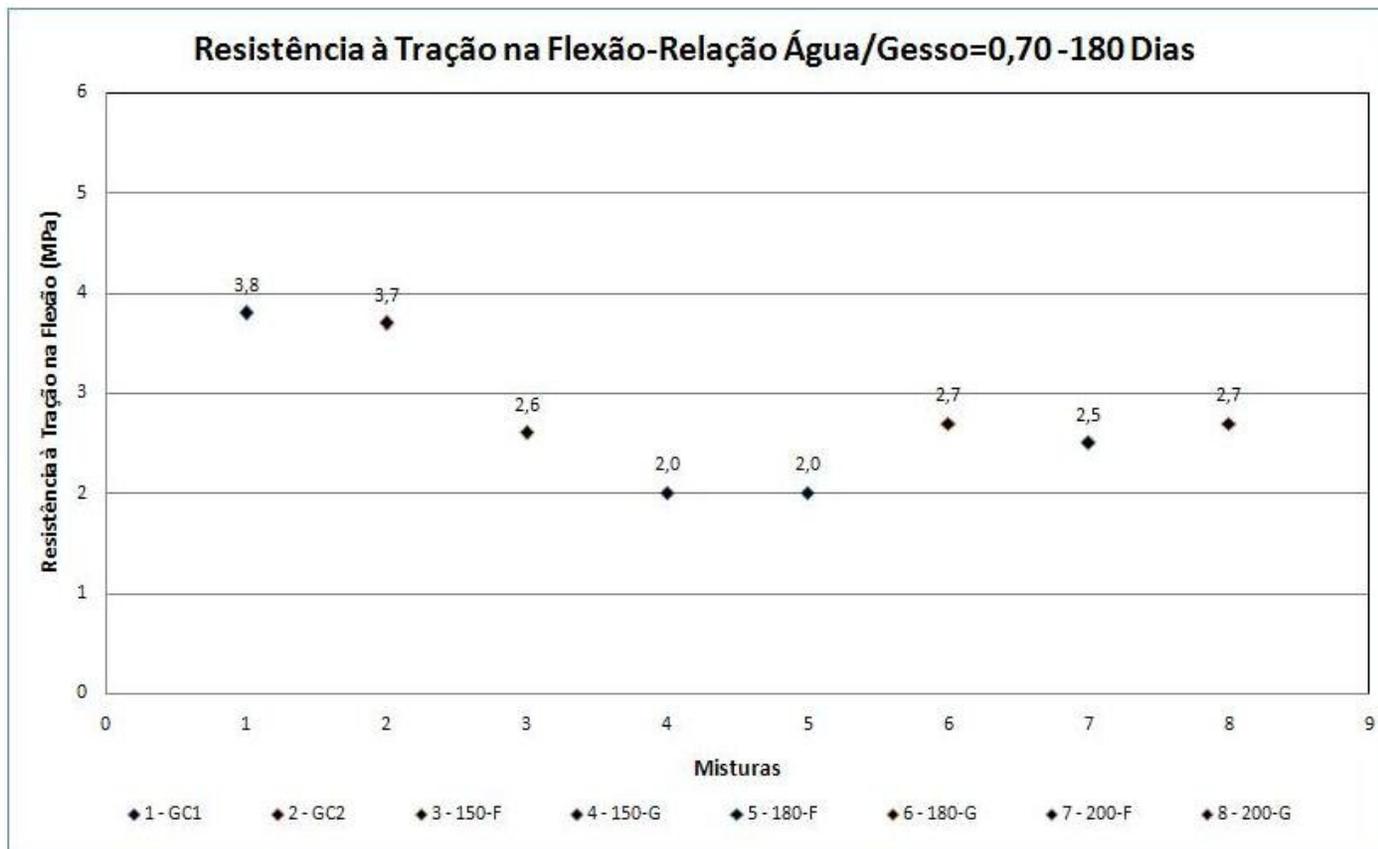
	1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
		2 - 3	2 - 4	2 - 5	2 - 6	2 - 7	2 - 8*
			3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8*
				4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8*
					5 - 6	5 - 7*	5 - 8*
						6 - 7	6 - 8
							7 - 8

* Diferença Estatisticamente Significativa



* **Diferença Estatisticamente Significativa**

1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5	1 - 6	1 - 7	1 - 8
	2 - 3	2 - 4	2 - 5	2 - 6	2 - 7	2 - 8
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6*	5 - 7	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8



1 - 2

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6

3 - 7

3 - 8

4 - 5

4 - 6*

4 - 7

4 - 8*

5 - 6*

5 - 7

5 - 8*

6 - 7

6 - 8

7 - 8

* Diferença Estatisticamente Significativa

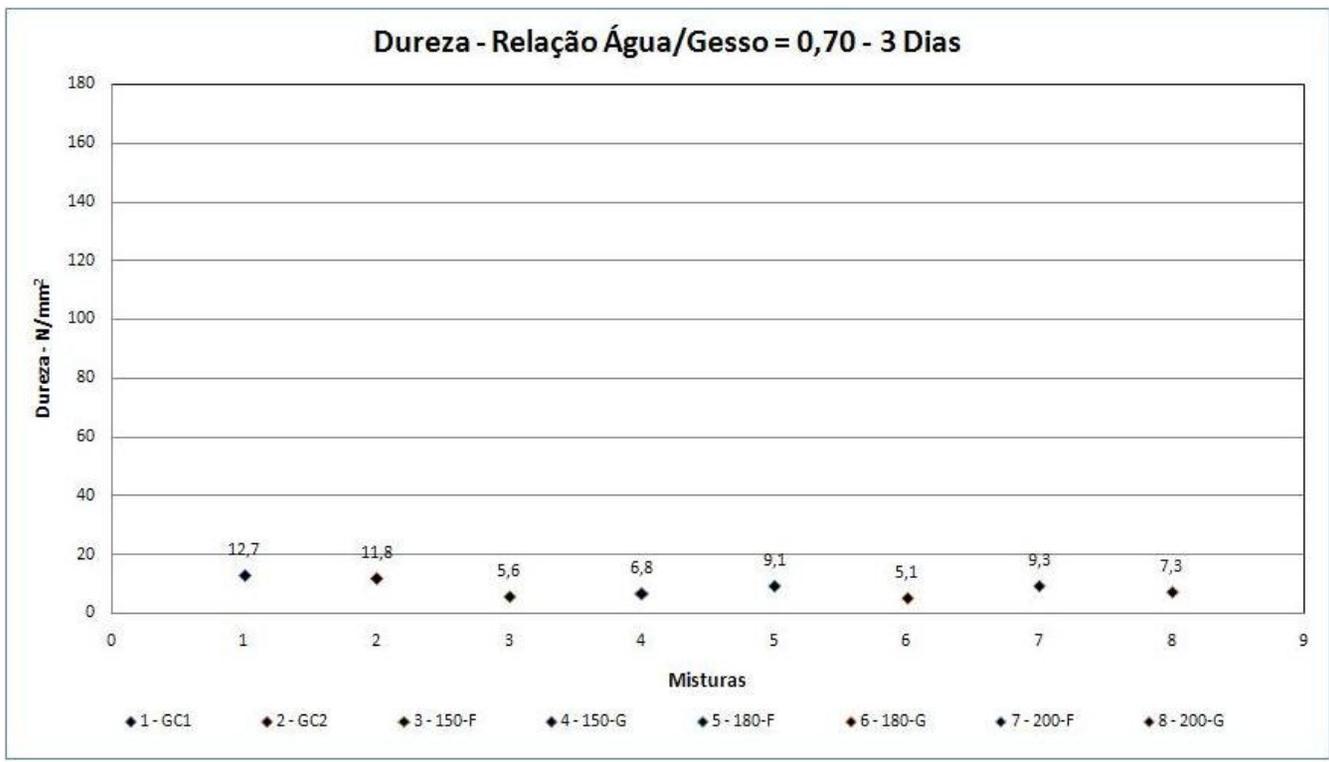
A3

APÊNDICE A3

MISTURAS COM MESMA RELAÇÃO ÁGUA/GESSO

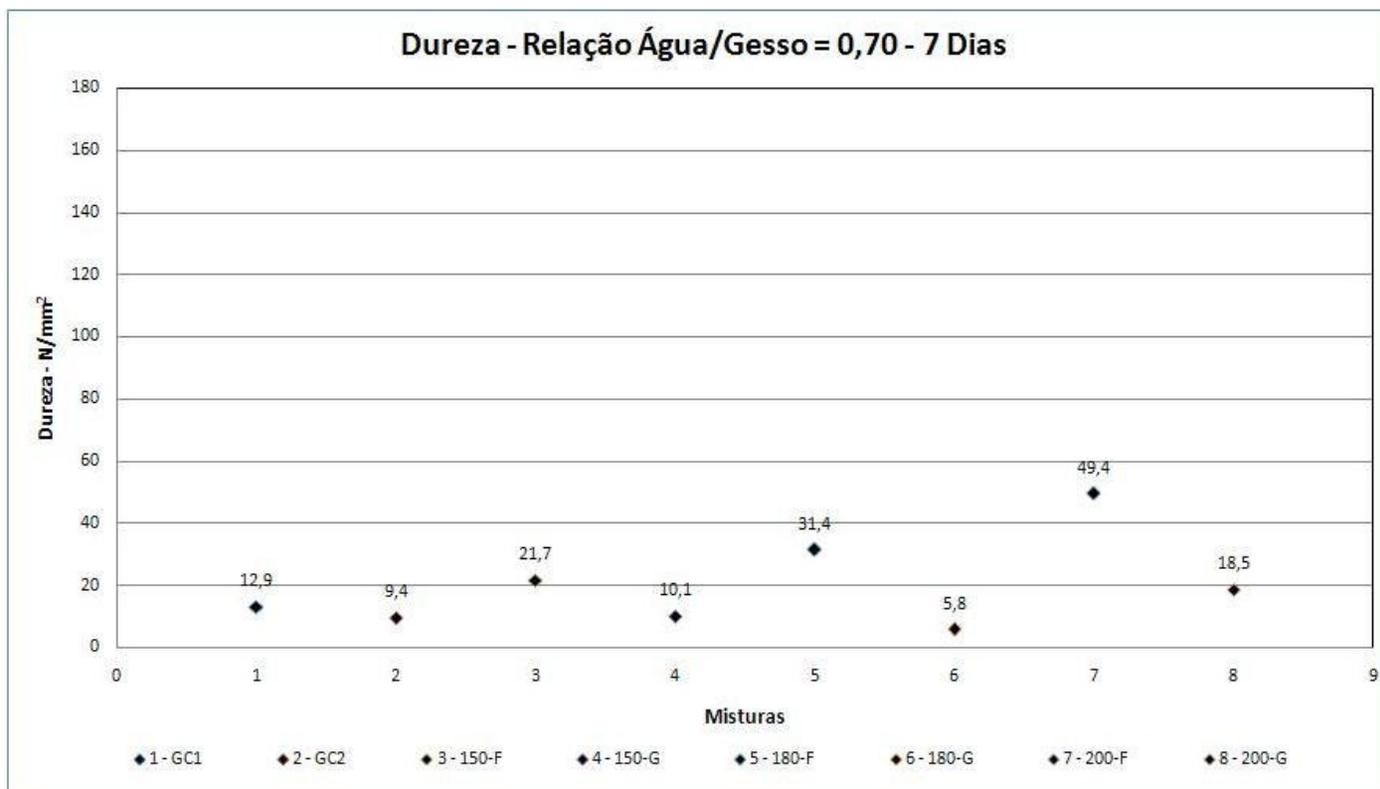
DUREZA (N/mm²)

- 1 – GC1 – 0,70
- 2 – GC2 – 0,70
- 3 – 150 F – 0,70
- 4 – 150 G – 0,70
- 5 – 180 F – 0,70
- 6 – 180 G – 0,70
- 7 – 200 F – 0,70
- 8 – 200 G – 0,70



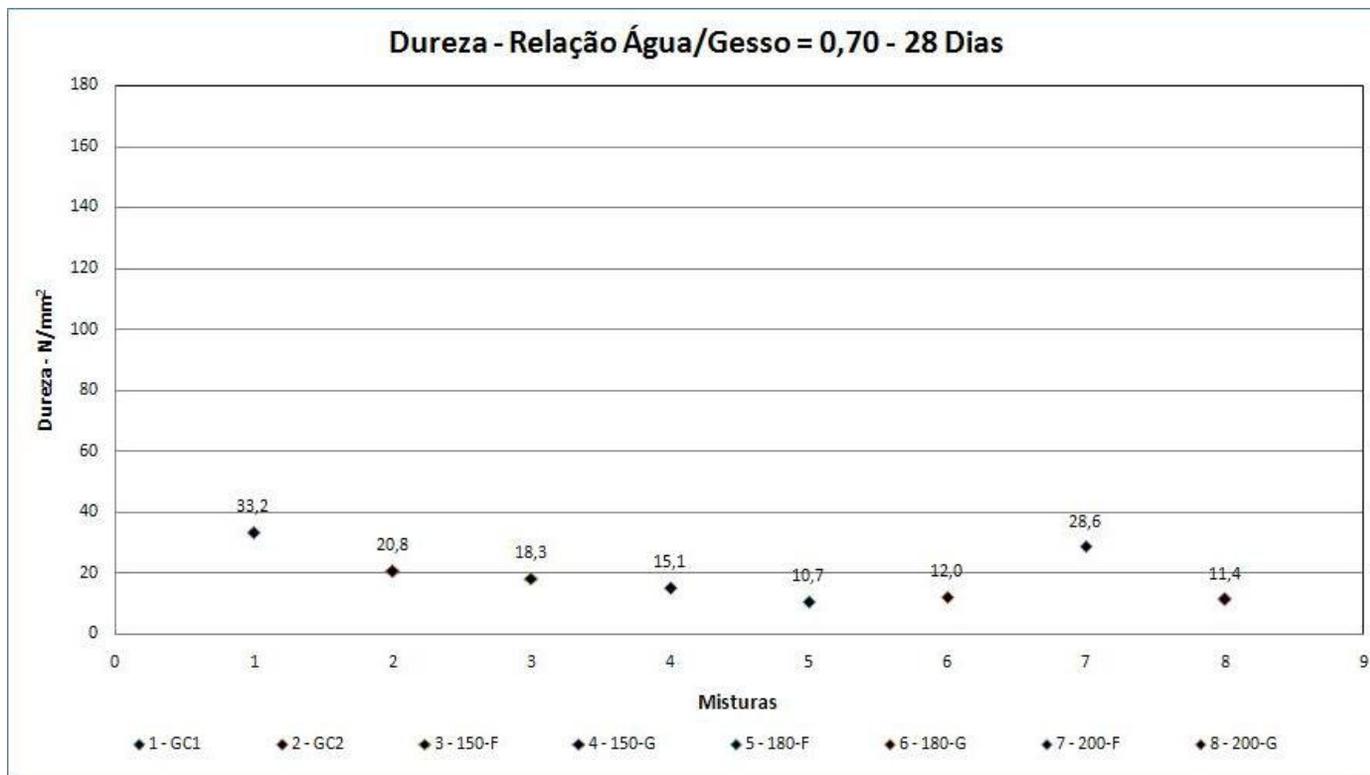
* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8



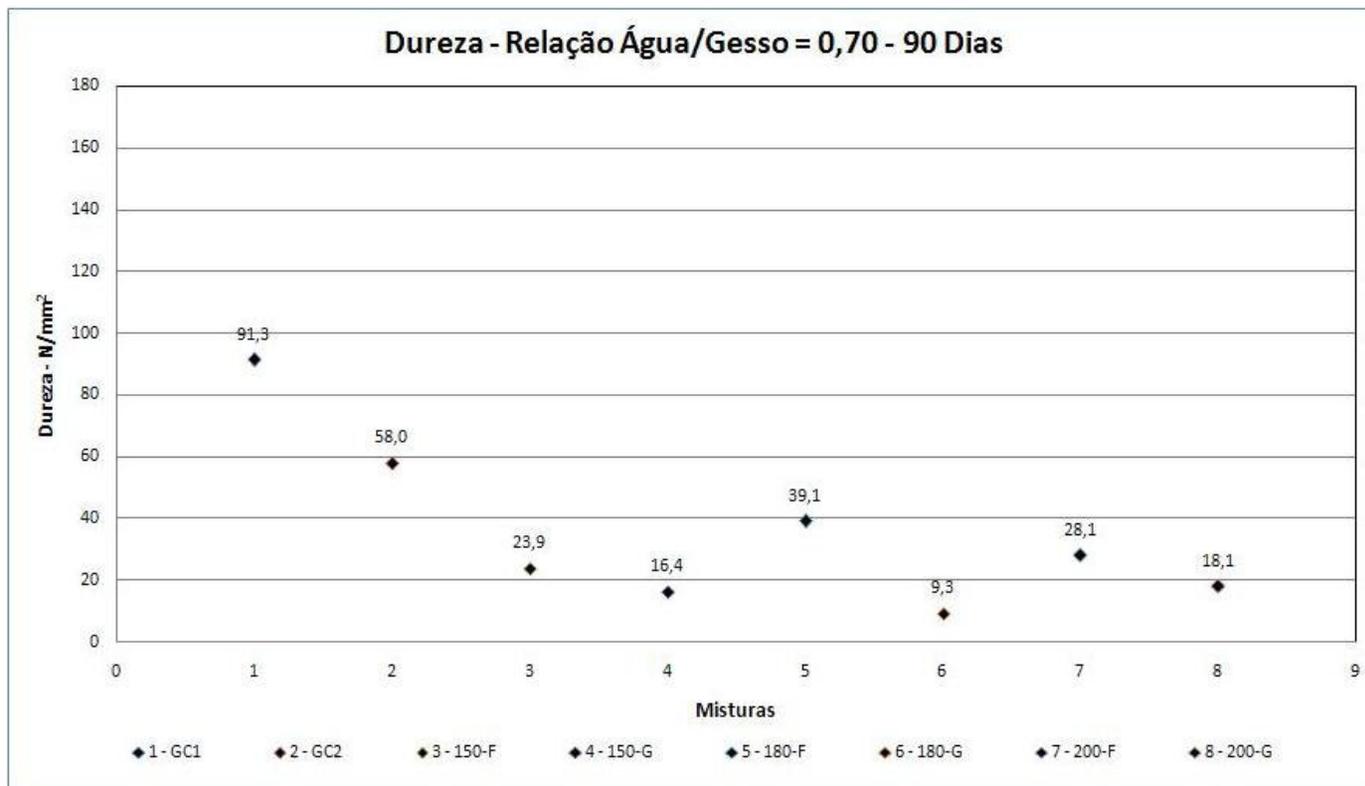
* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5*	1 - 6	1 - 7*	1 - 8
	2 - 3*	2 - 4	2 - 5*	2 - 6	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4*	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
				5 - 6*	5 - 7*	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8*



	1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7	1 - 8*
		2 - 3	2 - 4	2 - 5	2 - 6	2 - 7	2 - 8
			3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
				4 - 5	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
					5 - 6	5 - 7	5 - 8*
						6 - 7*	6 - 8
							7 - 8*

* Diferença Estatisticamente Significativa



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6

3 - 7

3 - 8

4 - 5*

4 - 6

4 - 7

4 - 8

5 - 6*

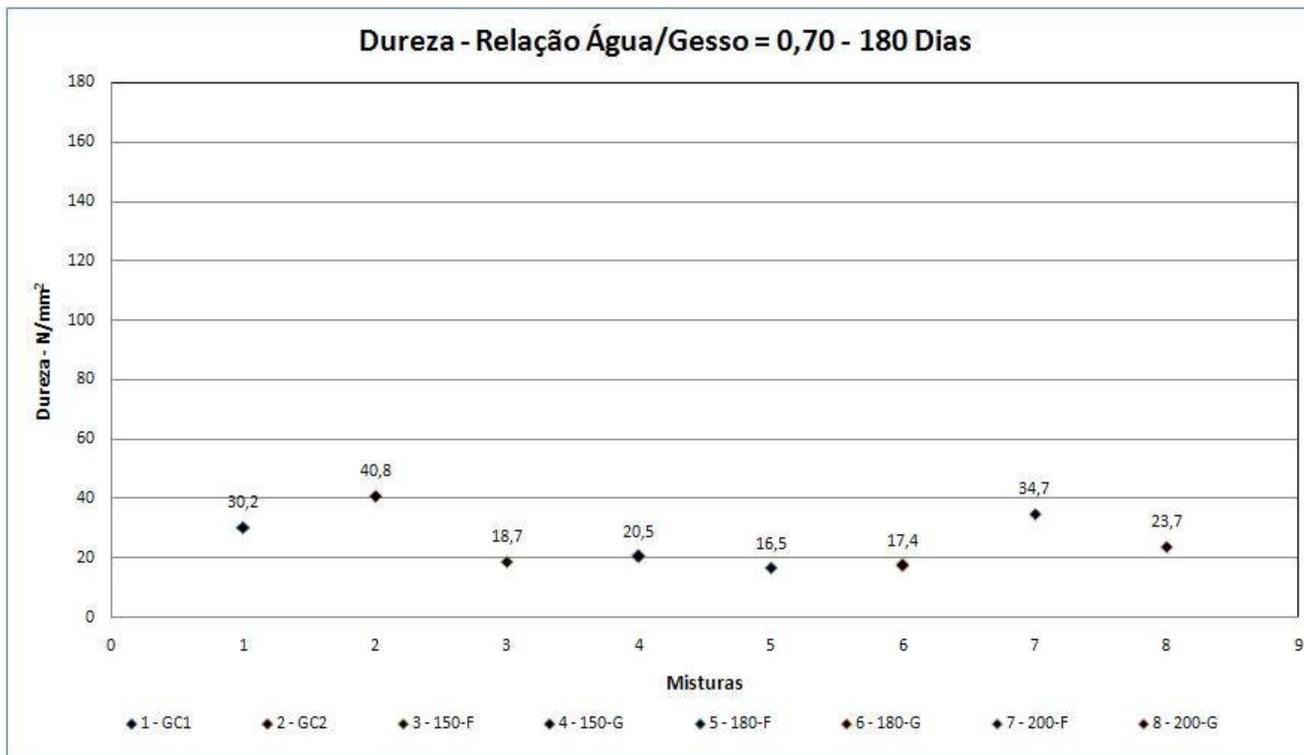
5 - 7

5 - 8*

6 - 7*

6 - 8

7 - 8



	1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7	1 - 8
		2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7	2 - 8*
			3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7*	3 - 8
				4 - 5	4 - 6	4 - 7*	4 - 8
					5 - 6	5 - 7*	5 - 8
						6 - 7*	6 - 8
							7 - 8

* Diferença Estatisticamente Significativa

A4

APÊNDICE A4

MISTURAS COM MESMA RELAÇÃO ÁGUA/GESSO

RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA (MPa)

1 – GC1 – 0,70

2 – GC2 – 0,70

3 – 150 F – 0,70

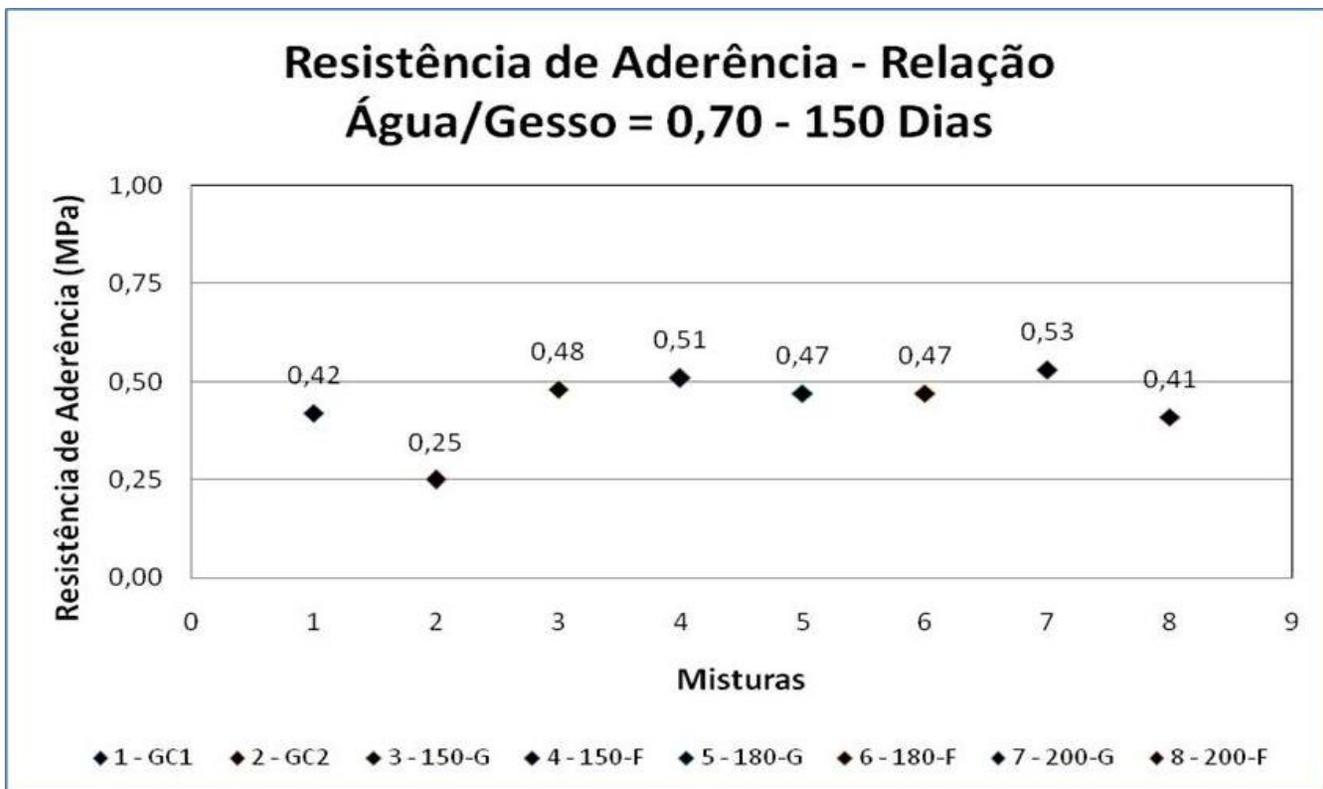
4 – 150 G – 0,70

5 – 180 F – 0,70

6 – 180 G – 0,70

7 – 200 F – 0,70

8 – 200 G – 0,70



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*	1 - 3	1 - 4	1 - 5	1 - 6	1 - 7	1 - 8
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7	6 - 8
						7 - 8

B

APÊNDICE B

No **APÊNDICE B**, estão apresentados os gráficos obtidos na análise estatística realizada por comparação entre as médias pelo Teste de Tukey nas misturas produzidas utilizando-se a mesma consistência nas pastas (pasta de consistência normal) NBR 12128 - MB 3469 (ABNT, 1991a) (0,53 para os gessos comerciais, 0,75 para gesso reciclado com material passante na peneira 3,0 mm e 0,80 para gesso reciclado com material passante na peneira 0,8 mm). Os resultados se apresentam em um intervalo de confiança de 95%. Por meio da comparação entre as médias pelo Método de Tukey apresentam-se as diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos em laboratório durante a etapa experimental da pesquisa. A comparação entre as médias foi realizada adotando-se como ferramenta auxiliar no processamento dos dados o software STATGRAPHICS PLUS versão 4.1 e o EXCEL 2007 para se fazer os gráficos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por flexão e dureza das misturas de gessos são apresentados observando se são ou não estatisticamente significativos quando comparados entre si (diferenças estatisticamente significativa são representadas por um asterisco ao lado da sigla dos dois resultados comparados, quando não se coloca o asterisco é porque a diferença não é estatisticamente significativa). A análise foi realizada nas seguintes propriedades:

- APÊNDICE B1 - Resistência à Compressão.
- APÊNDICE B2 - Resistência à Tração na Flexão.
- APÊNDICE B3 - Dureza.

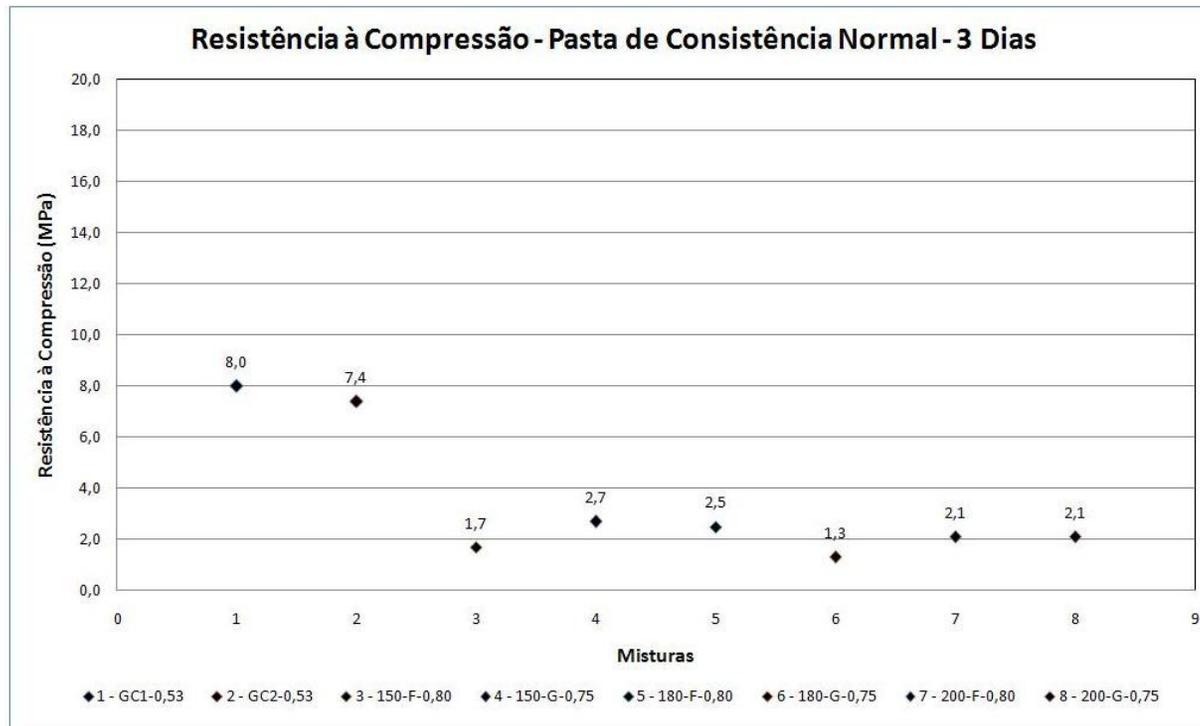
B1

APÊNDICE B1

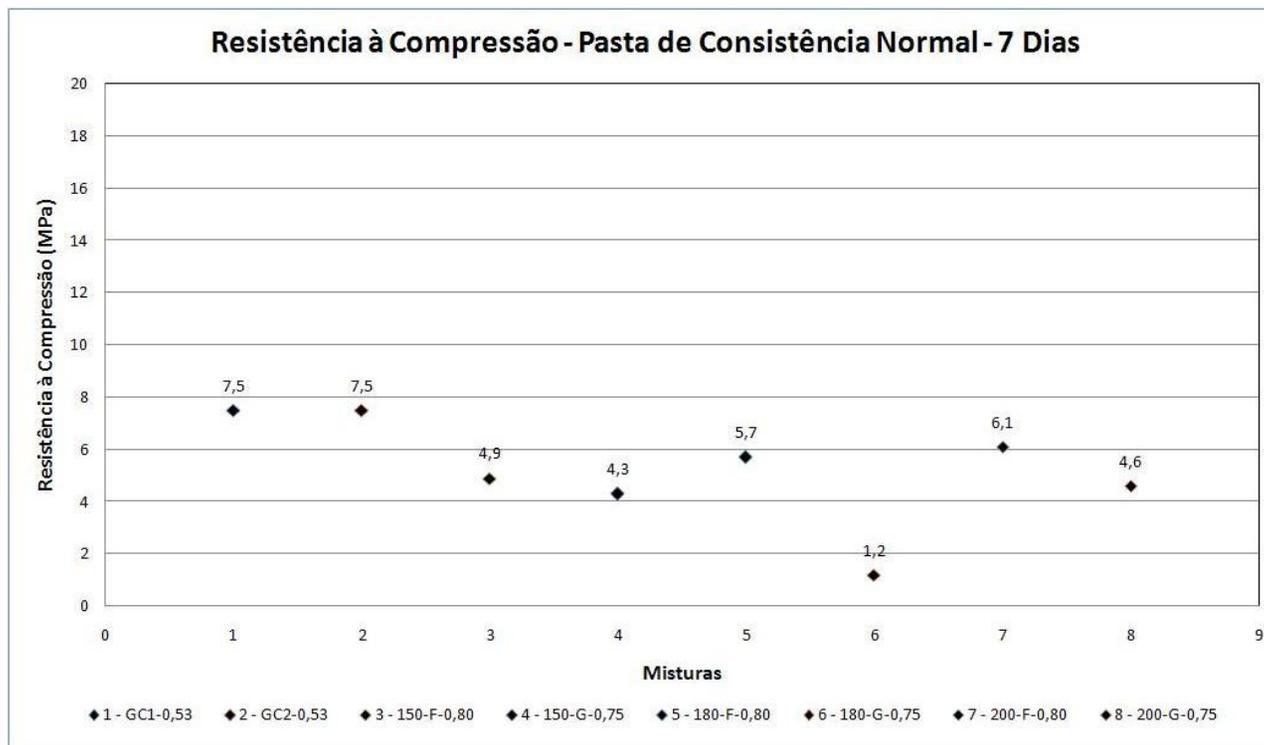
MISTURAS COM MESMA CONSISTÊNCIA – PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

- 1 – GC1 – 0,53
- 2 – GC2 – 0,53
- 3 – 150 F – 0,80
- 4 – 150 G – 0,75
- 5 – 180 F – 0,80
- 6 – 180 G – 0,75
- 7 – 200 F – 0,80
- 8 – 200 G – 0,75



	1 – 2*	1 – 3*	1 – 4*	1 – 5*	1 – 6*	1 – 7*	1 – 8*
* <u>Diferença Estatisticamente Significativa</u>		2 – 3*	2 – 4*	2 – 5*	2 – 6*	2 – 7*	2 – 8*
			3 – 4*	3 – 5*	3 – 6	3 – 7	3 – 8
				4 – 5	4 – 6*	4 – 7*	4 – 8*
					5 – 6*	5 – 7	5 – 8
						6 – 7*	6 – 8*
							7 – 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6*

3 - 7*

3 - 8

4 - 5*

4 - 6*

4 - 7*

4 - 8

5 - 6*

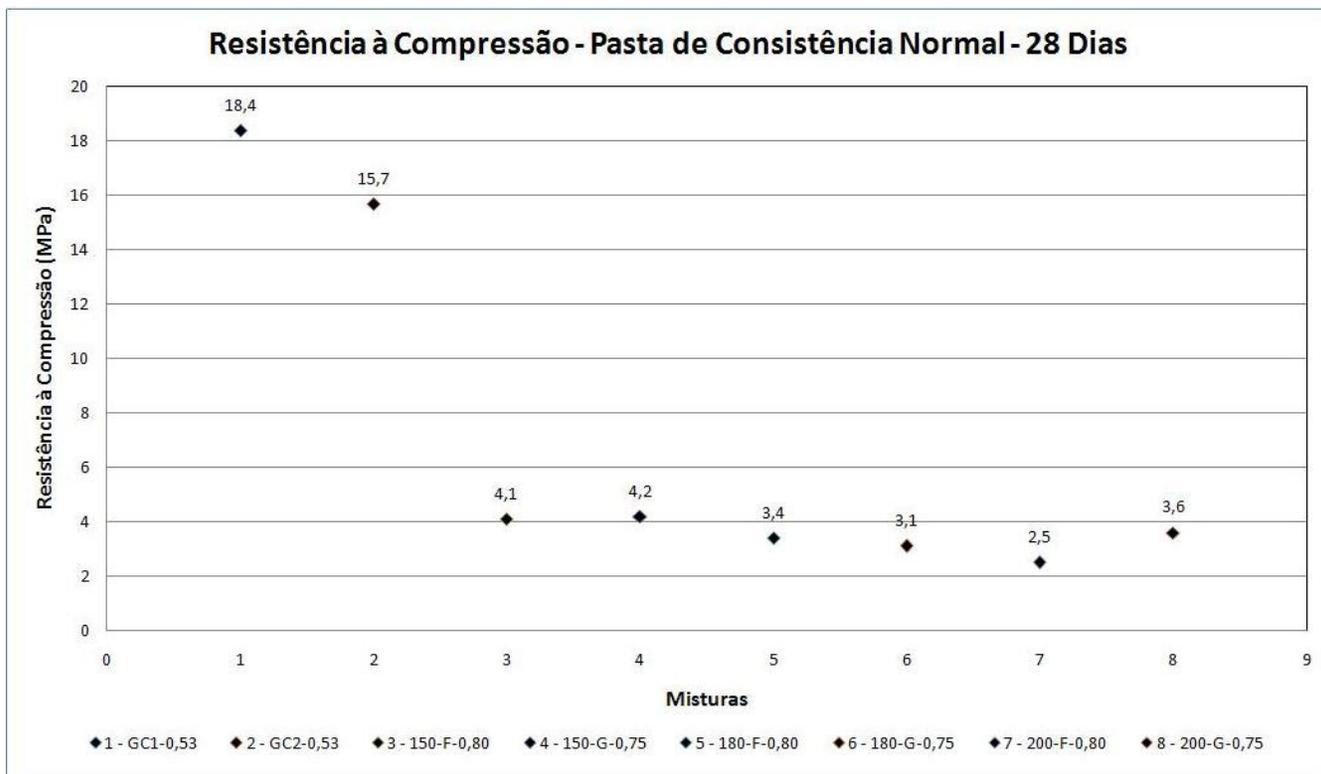
5 - 7

5 - 8*

6 - 7*

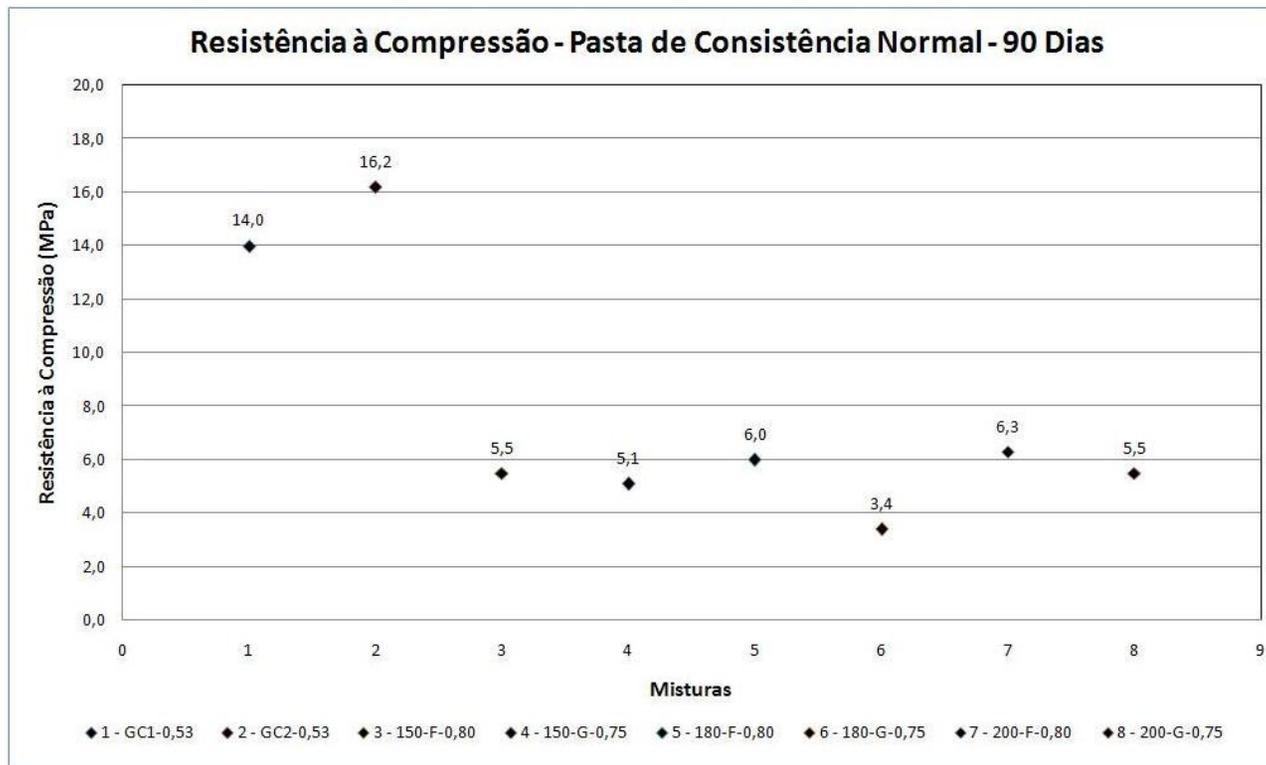
6 - 8*

7 - 8*



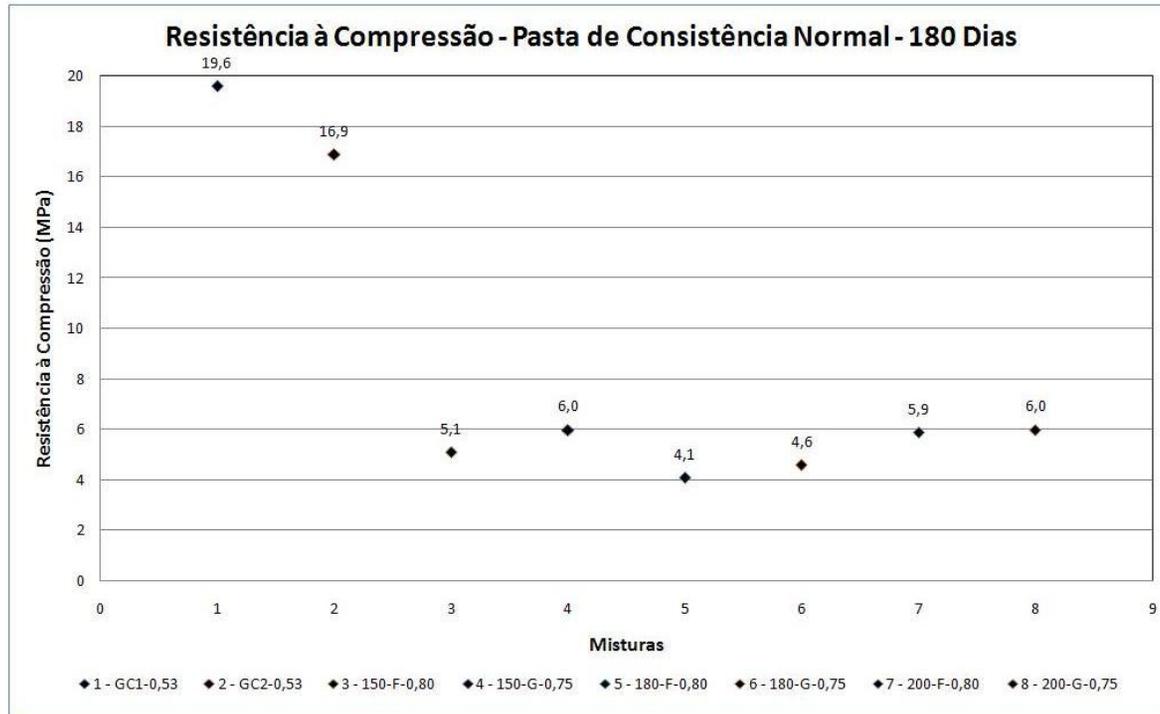
1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7	6 - 8
						7 - 8

* Diferença Estatisticamente Significativa



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5	3 - 6*	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6*	4 - 7*	4 - 8
				5 - 6*	5 - 7	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8*
						7 - 8



	1 - 2*	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
		2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
			3 - 4*	3 - 5*	3 - 6	3 - 7*	3 - 8*
				4 - 5*	4 - 6*	4 - 7	4 - 8
					5 - 6	5 - 7*	5 - 8*
						6 - 7*	6 - 8*
							7 - 8

* Diferença Estatisticamente Significativa

B2

APÊNDICE B2

MISTURAS COM MESMA CONSISTÊNCIA – PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)

1 – GC1 – 0,53

2 – GC2 – 0,53

3 – 150 F – 0,80

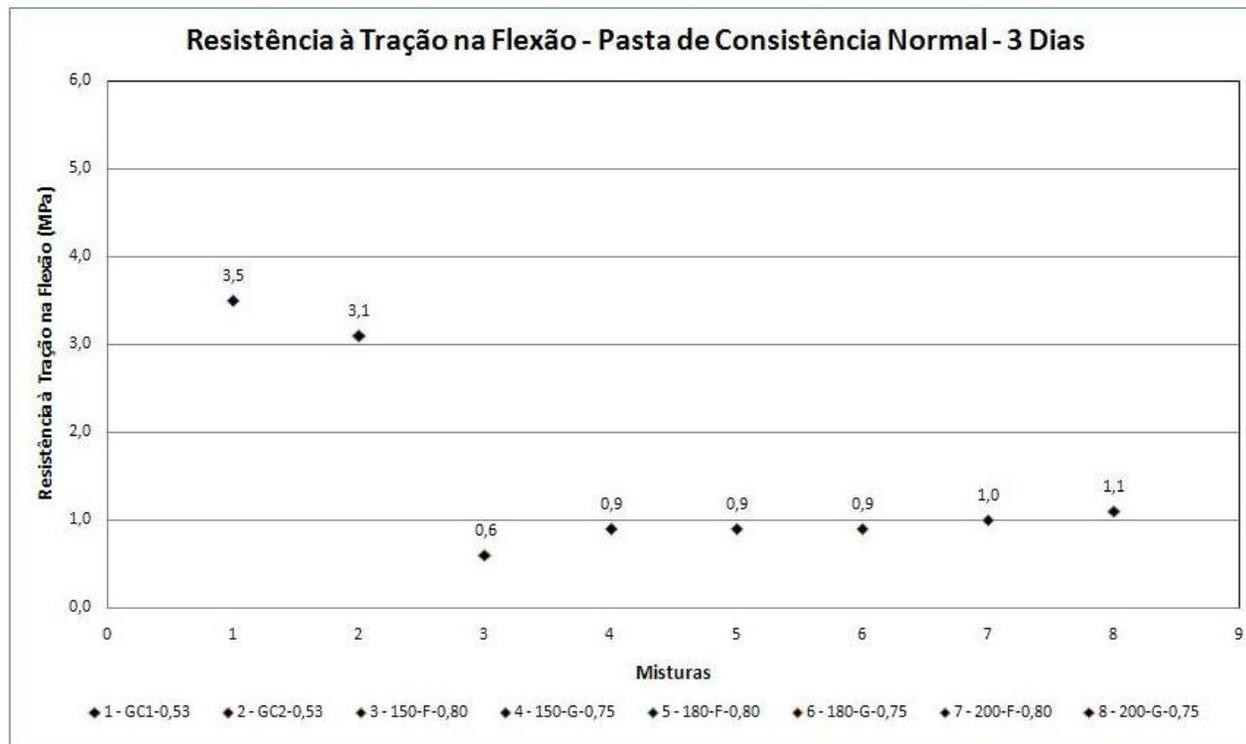
4 – 150 G – 0,75

5 – 180 F – 0,80

6 – 180 G – 0,75

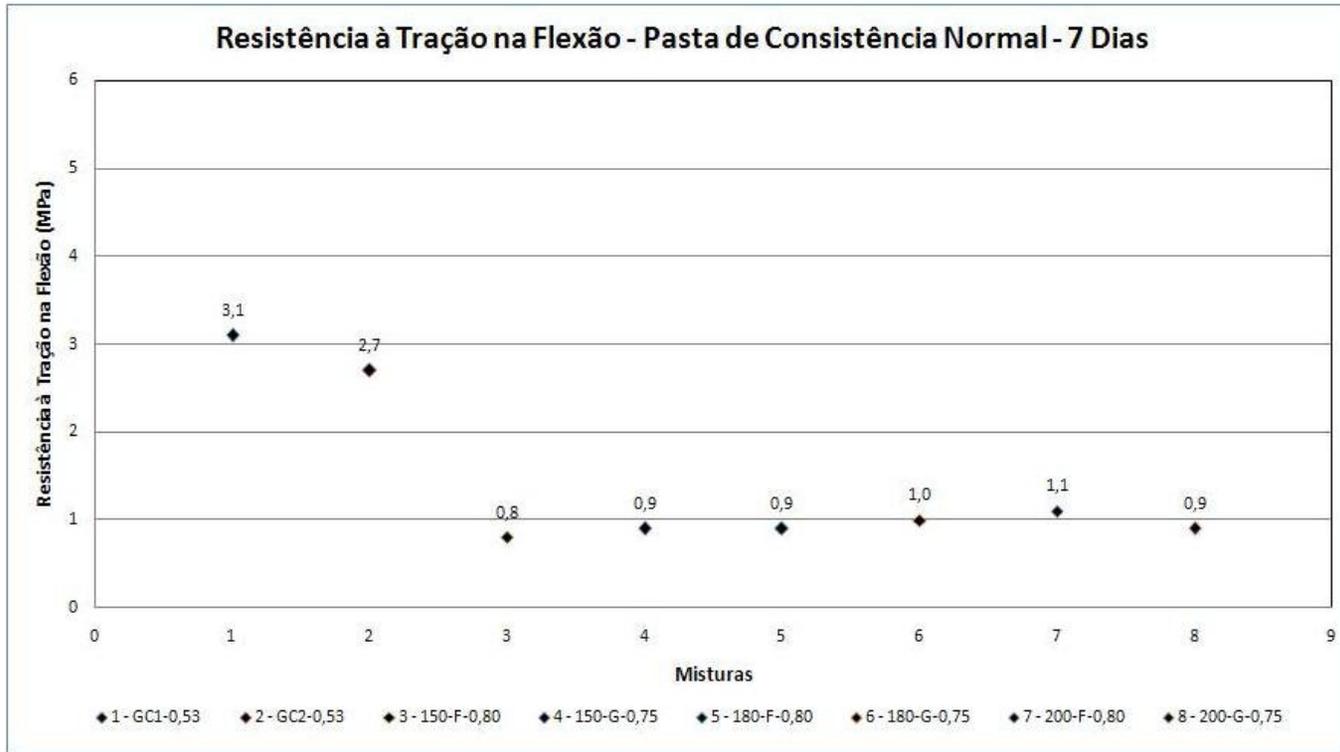
7 – 200 F – 0,80

8 – 200 G – 0,75



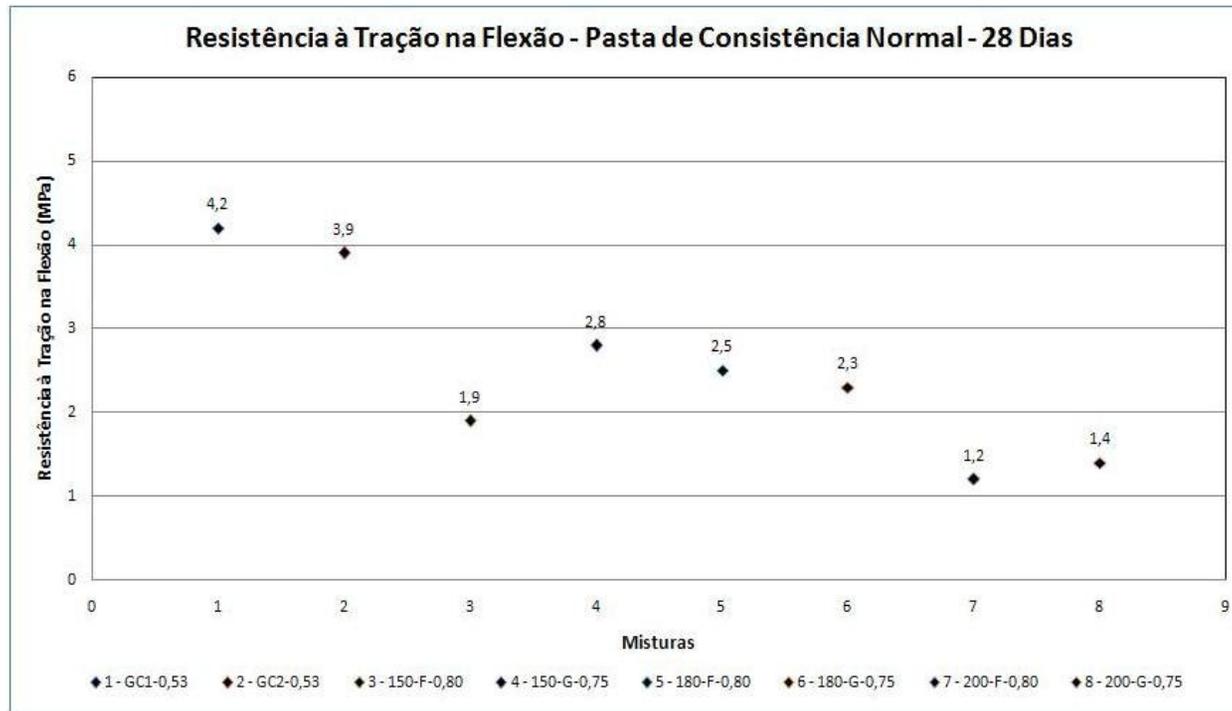
*** Diferença Estatisticamente Significativa**

1 - 2 *	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4*	3 - 5 *	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7	6 - 8*
						7 - 8



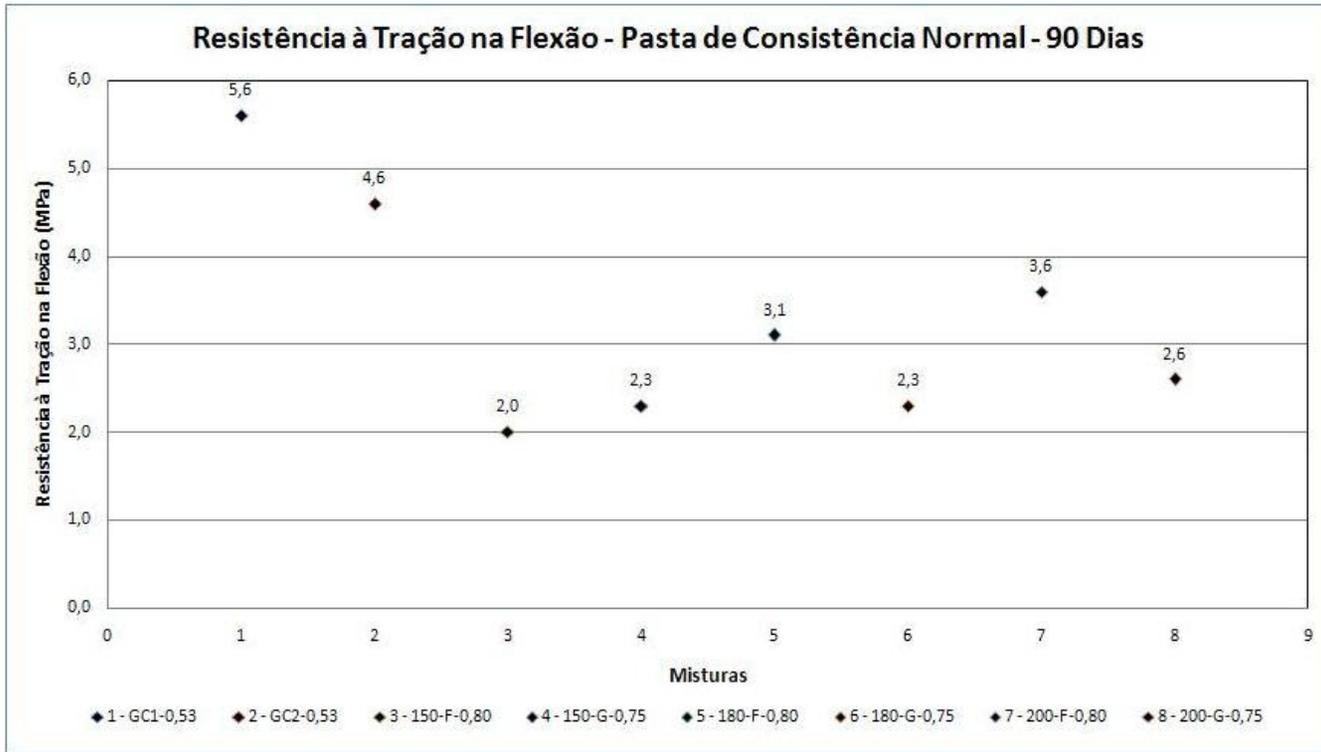
* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2 *	1 - 3 *	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7	6 - 8
						7 - 8



*** Diferença Estatisticamente Significativa**

1 - 2	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5*	1 - 6*	1 - 7*	1 - 8*
	2 - 3*	2 - 4*	2 - 5*	2 - 6*	2 - 7*	2 - 8*
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7*	4 - 8*
				5 - 6	5 - 7*	5 - 8
					6 - 7	6 - 8
						7 - 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 – 2*

1 – 3*

1 – 4*

1 – 5*

1 – 6*

1 – 7*

1 – 8*

2 – 3*

2 – 4*

2 – 5*

2 – 6*

2 – 7*

2 – 8*

3 – 4

3 – 5*

3 – 6

3 – 7*

3 – 8

4 – 5

4 – 6

4 – 7*

4 – 8

5 – 6*

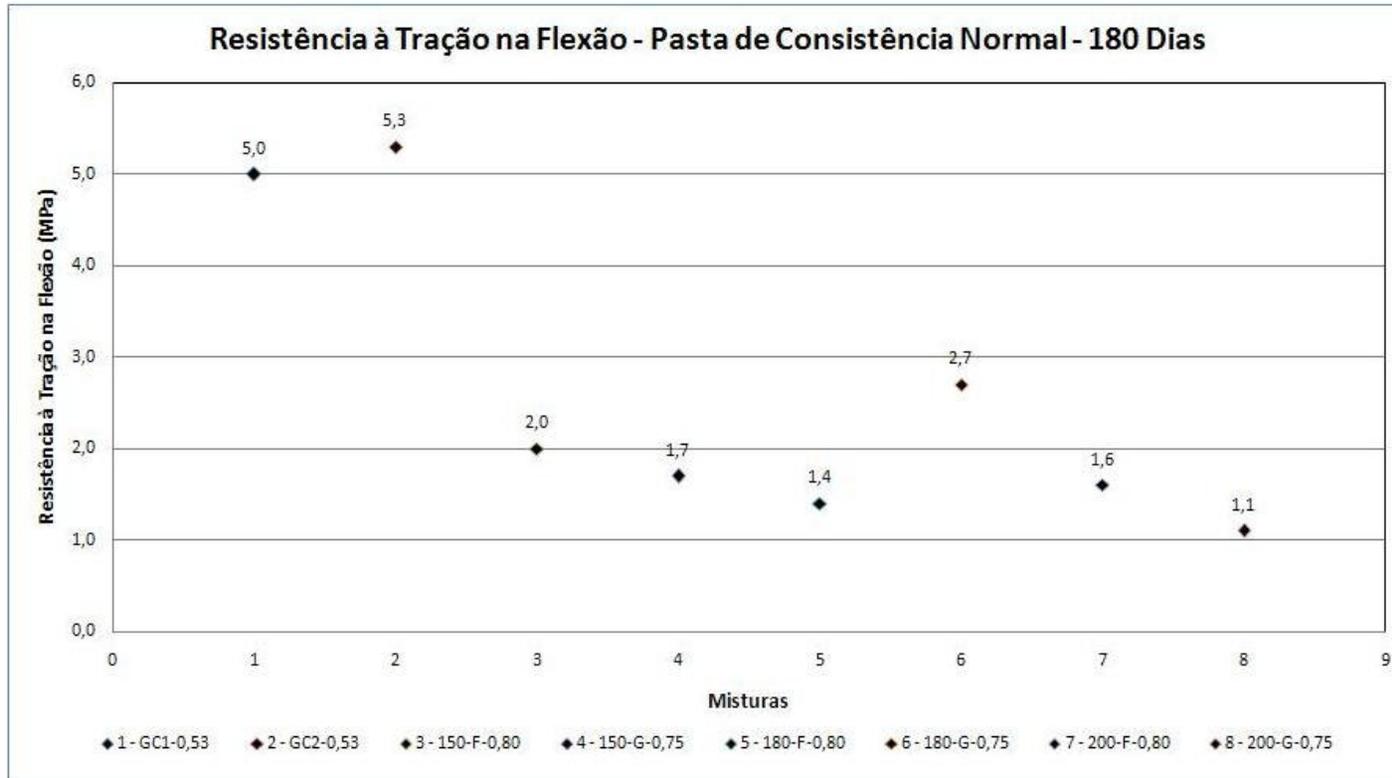
5 – 7

5 – 8

6 – 7*

6 – 8

7 – 8*



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6*

3 - 7

3 - 8*

4 - 5

4 - 6*

4 - 7

4 - 8

5 - 6*

5 - 7

5 - 8

6 - 7*

6 - 8

7 - 8*

B3

APÊNDICE B3

MISTURAS COM MESMA CONSISTÊNCIA – PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

DUREZA (N/mm²)

1 – GC1 – 0,53

2 – GC2 – 0,53

3 – 150 F – 0,80

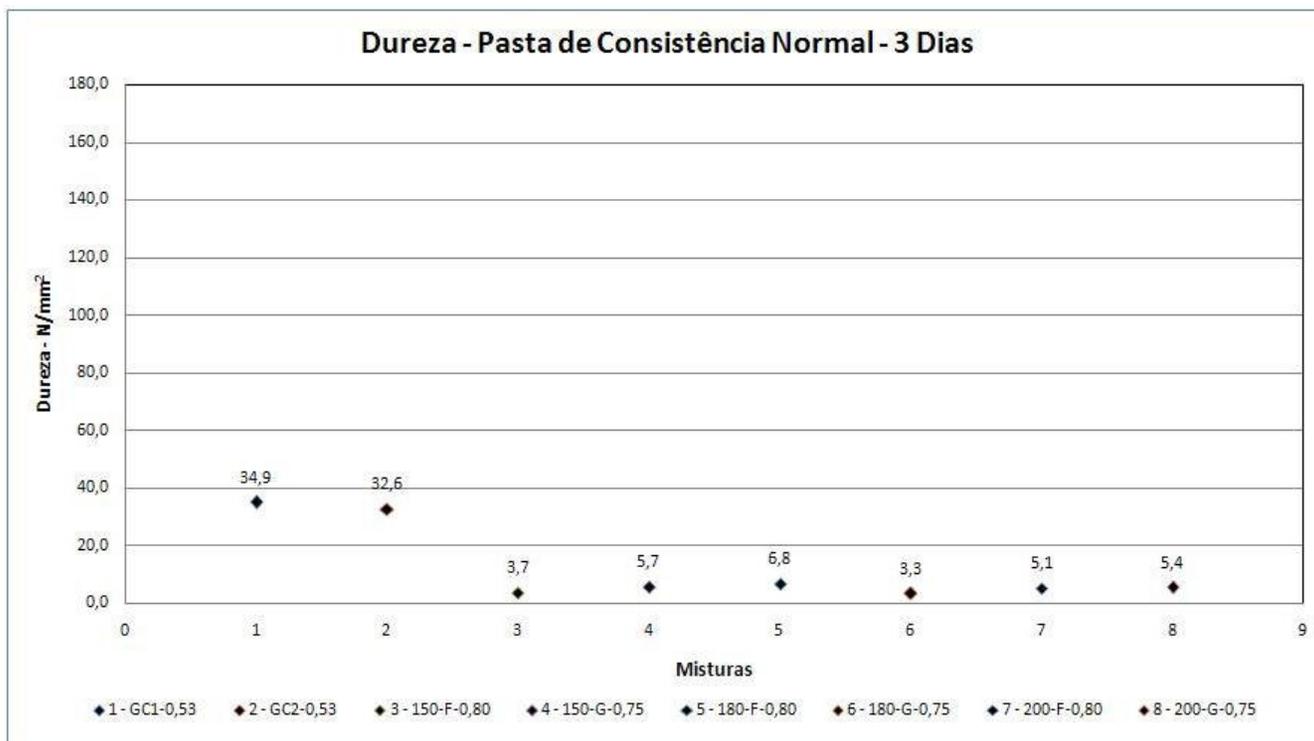
4 – 150 G – 0,75

5 – 180 F – 0,80

6 – 180 G – 0,75

7 – 200 F – 0,80

8 – 200 G – 0,75



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6

3 - 7

3 - 8

4 - 5

4 - 6

4 - 7

4 - 8

5 - 6

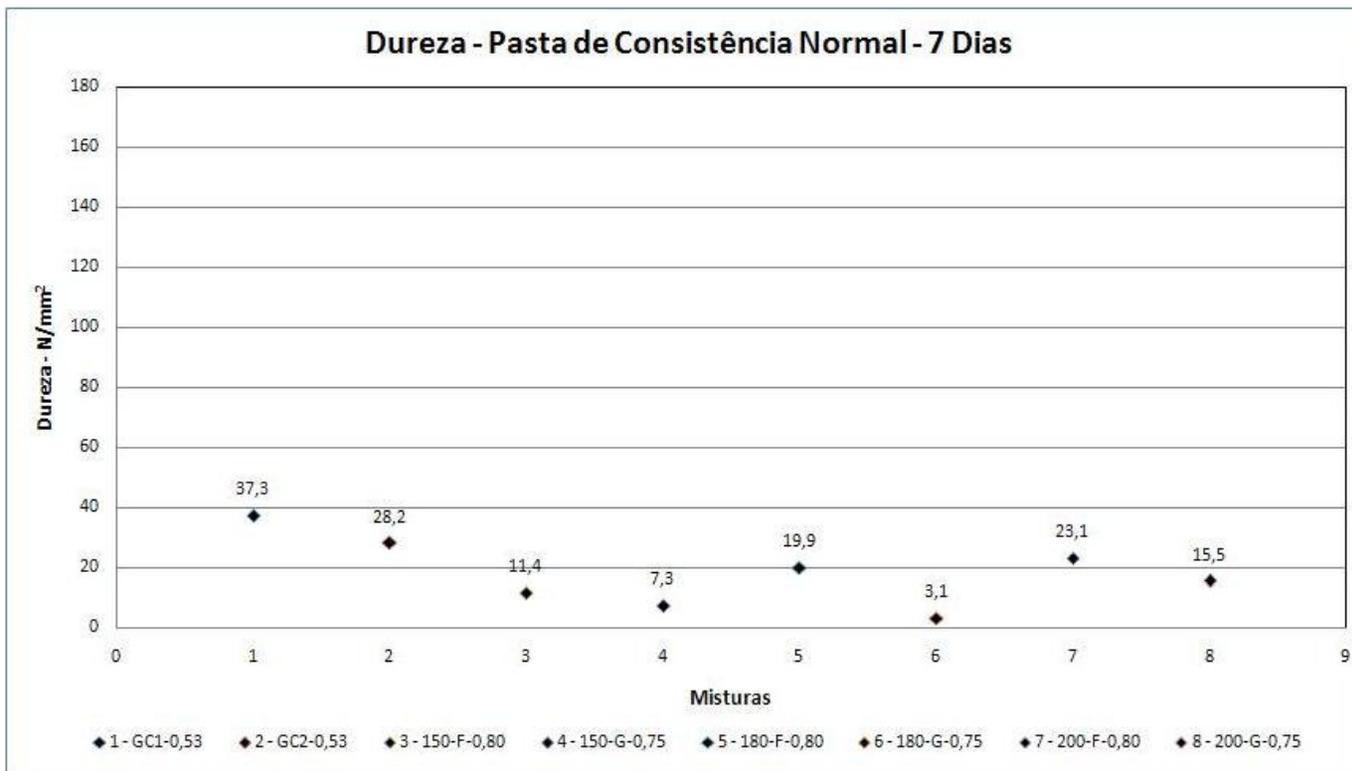
5 - 7

5 - 8

6 - 7

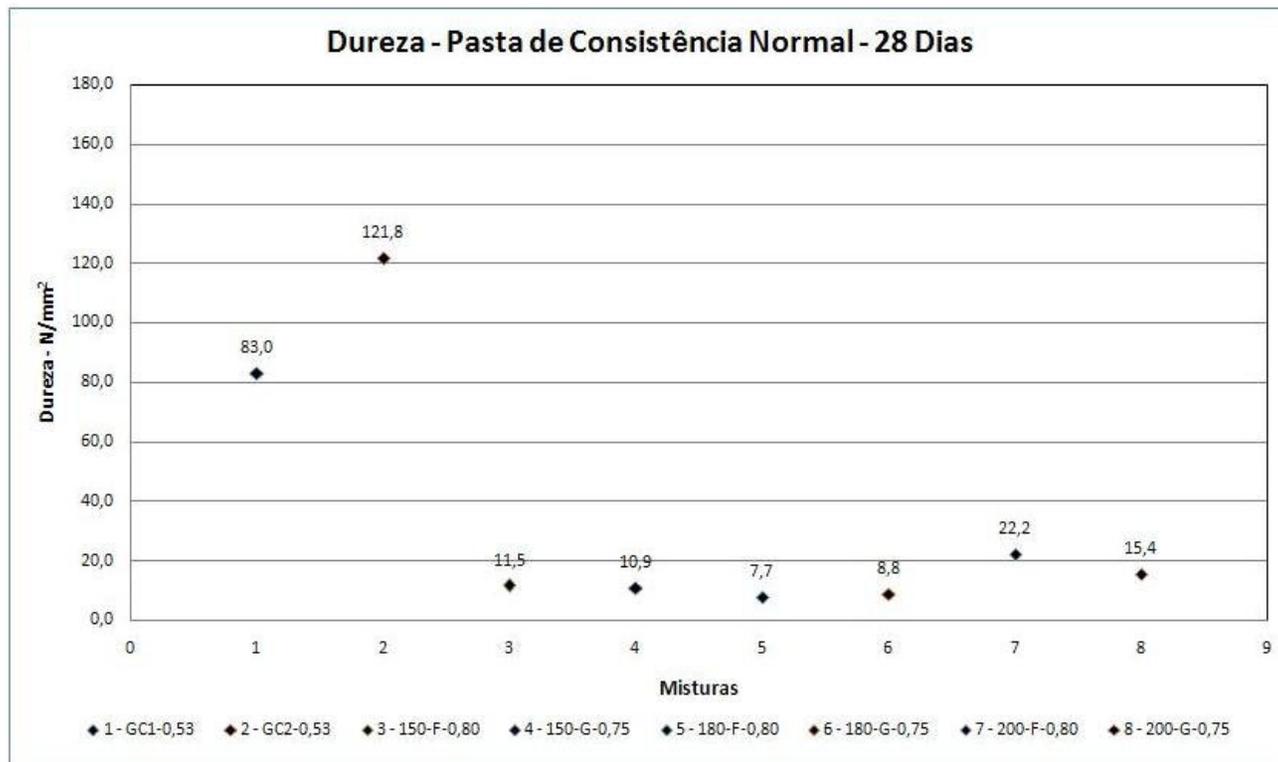
6 - 8

7 - 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2	1 - 3*	1 - 4*	1 - 5	1 - 6*	1 - 7	1 - 8*
	2 - 3	2 - 4*	2 - 5	2 - 6*	2 - 7	2 - 8
		3 - 4	3 - 5	3 - 6	3 - 7	3 - 8
			4 - 5	4 - 6	4 - 7	4 - 8
				5 - 6	5 - 7	5 - 8
					6 - 7*	6 - 8
						7 - 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 - 2

1 - 3*

1 - 4*

1 - 5*

1 - 6*

1 - 7*

1 - 8*

2 - 3*

2 - 4*

2 - 5*

2 - 6*

2 - 7*

2 - 8*

3 - 4

3 - 5

3 - 6

3 - 7

3 - 8

4 - 5

4 - 6

4 - 7

4 - 8

5 - 6

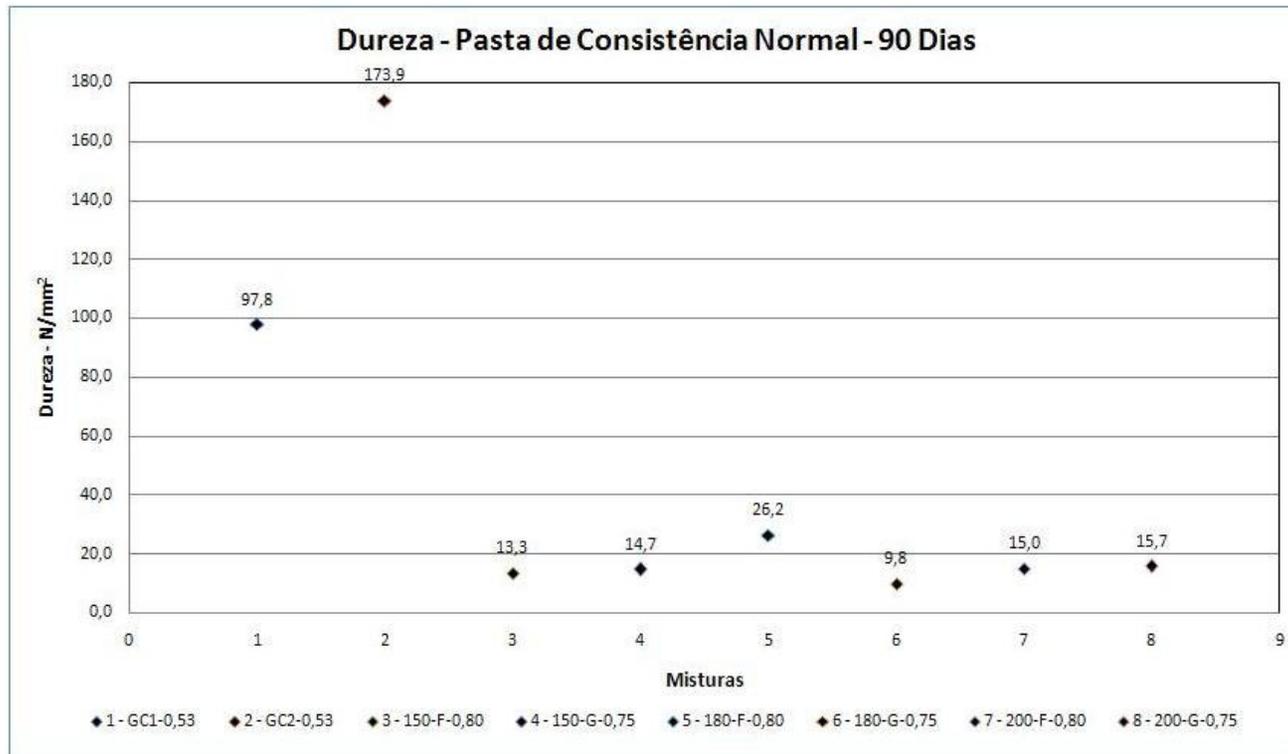
5 - 7

5 - 8

6 - 7

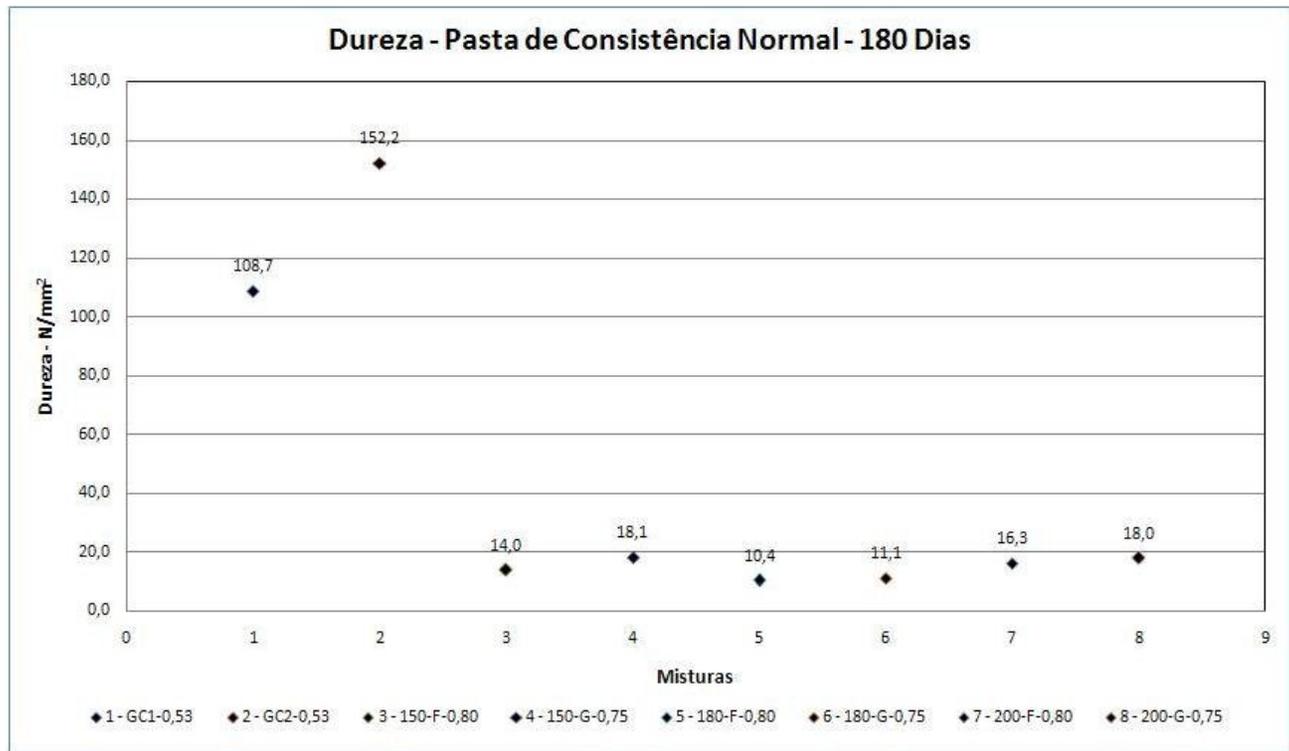
6 - 8

7 - 8



*** Diferença Estatisticamente Significativa**

	1 – 2*	1 – 3*	1 – 4*	1 – 5*	1 – 6*	1 – 7*	1 – 8*
		2 – 3*	2 – 4*	2 – 5*	2 – 6*	2 – 7*	2 – 8*
			3 – 4	3 – 5	3 – 6	3 – 7	3 – 8
				4 – 5	4 – 6	4 – 7	4 – 8
					5 – 6	5 – 7	5 – 8
						6 – 7	6 – 8
							7 – 8



* Diferença Estatisticamente Significativa

1 – 2*

1 – 3*

1 – 4*

1 – 5*

1 – 6*

1 – 7*

1 – 8*

2 – 3*

2 – 4*

2 – 5*

2 – 6*

2 – 7*

2 – 8*

3 – 4

3 – 5

3 – 6

3 – 7

3 – 8

4 – 5

4 – 6

4 – 7

4 – 8

5 – 6

5 – 7

5 – 8

6 – 7

6 – 8

7 – 8

C

APÊNDICE C

No **APÊNDICE C**, estão apresentados os gráficos obtidos na análise estatística realizada por comparação entre as médias pelo Método de Tukey nas misturas mistas produzidas utilizando-se gesso comercial (50%) (GC1 ou GC2) juntamente com gesso reciclado (50%) (Fino ou Grosso), calcinado nas três temperaturas estudadas nessa pesquisa experimental (150 °C, 180 °C e 200 °C). Todas as misturas mistas foram produzidas com relação água/gesso = 0,70 e observadas nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os resultados se apresentam em um intervalo de confiança de 95%. Por meio da comparação entre as médias apresentam-se as diferenças estatisticamente significativas entre os resultados obtidos em laboratório durante a etapa experimental da pesquisa. A comparação entre as médias foi realizada utilizando-se o Método de Tukey e adotando-se como ferramenta auxiliar no processamento dos dados o software STATGRAPHICS PLUS versão 4.1 e o EXCEL 2007 para se fazer os gráficos.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e dureza das misturas mistas dos gessos estudados são apresentados observando se são ou não estatisticamente significativos quando comparados entre si (diferenças estatisticamente significativa são representadas por um asterisco ao lado da sigla dos dois resultados comparados, quando não se coloca o asterisco é porque a diferença não é estatisticamente significativa). A análise foi realizada nas seguintes propriedades:

- APÊNDICE C1 - Resistência à Compressão.
- APÊNDICE C2 - Dureza.

C1

APÊNDICE C1

**MISTURAS COM 50% GC + 50% GR – Relação
ÁGUA/GESSO = 0,70**

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)

1 – GC1_150F

2 – GC2_150F

3 – GC1_180F

4 – GC2_180F

5 – GC1_200F

6 – GC2_200F

7 – GC1_150G

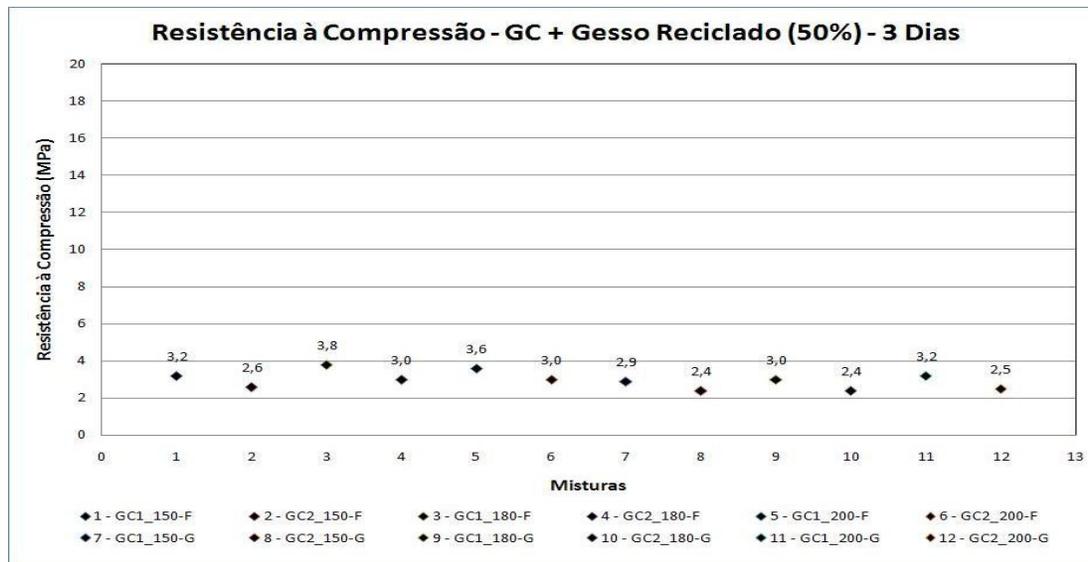
8 – GC2_150G

9 – GC1_180G

10 – GC2_180G

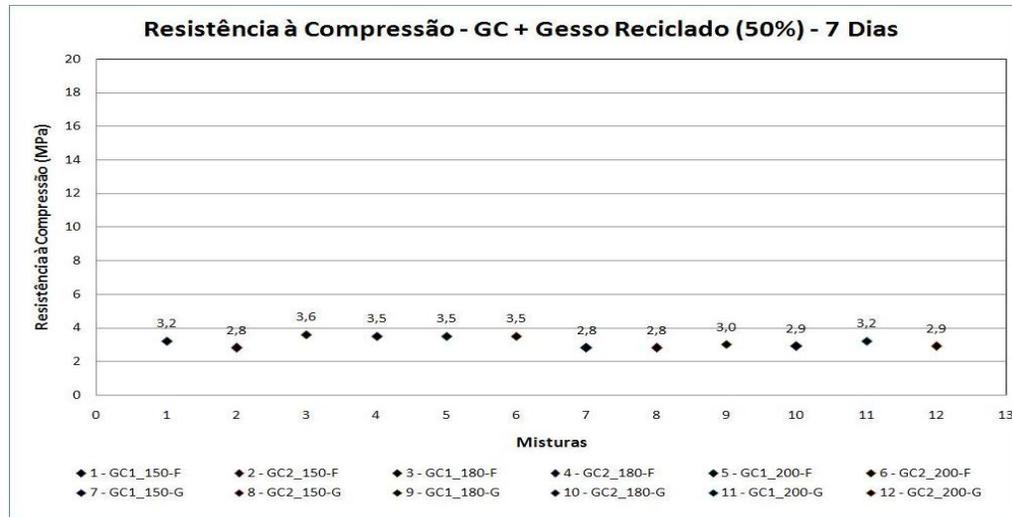
11 – GC1_200G

12 – GC2_200G



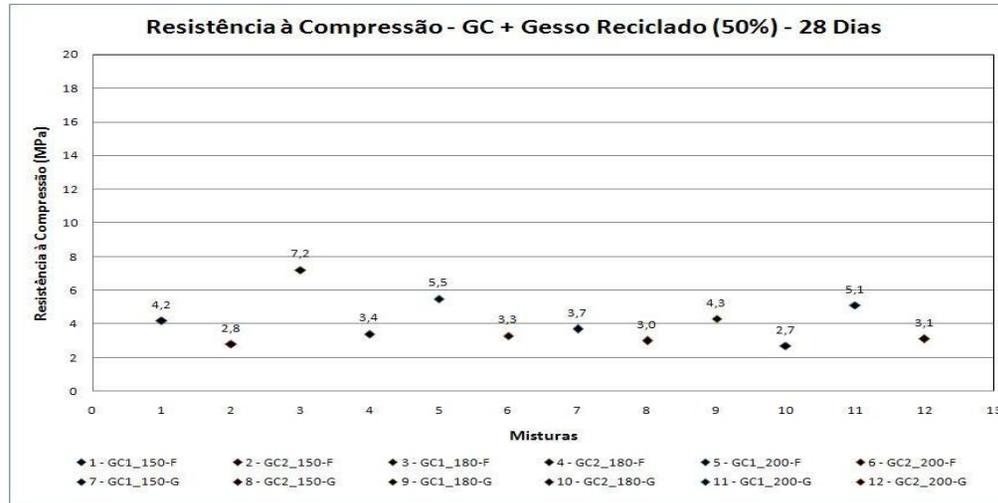
1 - 2*	1 - 3*	1 - 4	1 - 5	1 - 6	1 - 7	1 - 8*	1 - 9	1 - 10*	1 - 11	1 - 12*
	2 - 3*	2 - 4	2 - 5*	2 - 6	2 - 7	2 - 8	2 - 9	2 - 10	2 - 11	2 - 12
		3 - 4*	3 - 5	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*	3 - 9*	3 - 10*	3 - 11*	3 - 12*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7	4 - 8*	4 - 9	4 - 10*	4 - 11	4 - 12
				5 - 6*	5 - 7*	5 - 8*	5 - 9*	5 - 10*	5 - 11	5 - 12*
					6 - 7	6 - 8*	6 - 9	6 - 10*	6 - 11	6 - 12
						7 - 8	7 - 9	7 - 10	7 - 11	7 - 12
							8 - 9*	8 - 10	8 - 11*	8 - 12
								9 - 10*	9 - 11	9 - 12
									10 - 11*	10 - 12
										11 - 12*

* Diferença Estatisticamente Significativa



1 – 2	1 – 3	1 – 4	1 – 5	1 – 6	1 – 7	1 – 8	1 – 9	1 – 10	1 – 11	1 – 12
	2 – 3*	2 – 4*	2 – 5*	2 – 6*	2 – 7	2 – 8	2 – 9	2 – 10	2 – 11*	2 – 12
		3 – 4	3 – 5	3 – 6	3 – 7*	3 – 8*	3 – 9*	3 – 10*	3 – 11	3 – 12*
			4 – 5	4 – 6	4 – 7*	4 – 8	4 – 9*	4 – 10	4 – 11	4 – 12
				5 – 6	5 – 7*	5 – 8*	5 – 9*	5 – 10*	5 – 11	5 – 12*
					6 – 7*	6 – 8*	6 – 9*	6 – 10*	6 – 11	6 – 12*
						7 – 8	7 – 9	7 – 10	7 – 11	7 – 12
							8 – 9	8 – 10	8 – 11	8 – 12
								9 – 10	9 – 11	9 – 12
									10 – 11	10 – 12
										11 – 12

* Diferença Estatisticamente Significativa



1 - 2*	1 - 3*	1 - 4	1 - 5*	1 - 6	1 - 7	1 - 8*	1 - 9	1 - 10*	1 - 11	1 - 12
	2 - 3*	2 - 4	2 - 5*	2 - 6	2 - 7	2 - 8	2 - 9*	2 - 10	2 - 11*	2 - 12
		3 - 4*	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*	3 - 9*	3 - 10*	3 - 11*	3 - 12*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7	4 - 8	4 - 9	4 - 10	4 - 11*	4 - 12
				5 - 6*	5 - 7*	5 - 8*	5 - 9*	5 - 10*	5 - 11	5 - 12*
					6 - 7	6 - 8	6 - 9	6 - 10	6 - 11*	6 - 12
						7 - 8	7 - 9	7 - 10	7 - 11*	7 - 12
							8 - 9*	8 - 10	8 - 11*	8 - 12
								9 - 10*	9 - 11	9 - 12*
									10 - 11*	10 - 12
										11 - 12*

* Diferença Estatisticamente Significativa

C2

APÊNDICE C2

**MISTURAS COM 50% GC + 50% GR – Relação
ÁGUA/GESSO = 0,70**

DUREZA (N/mm²)

1 – GC1_150F

2 – GC2_150F

3 – GC1_180F

4 – GC2_180F

5 – GC1_200F

6 – GC2_200F

7 – GC1_150G

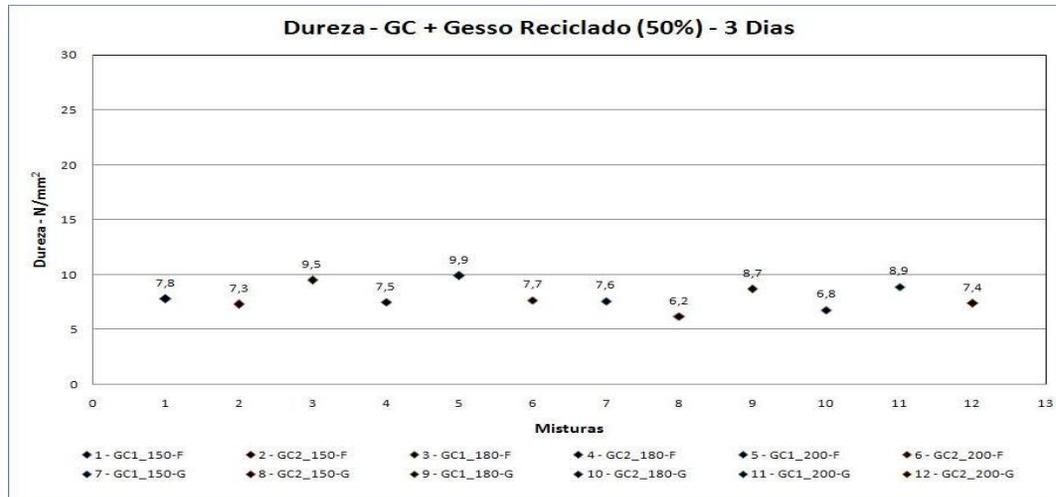
8 – GC2_150G

9 – GC1_180G

10 – GC2_180G

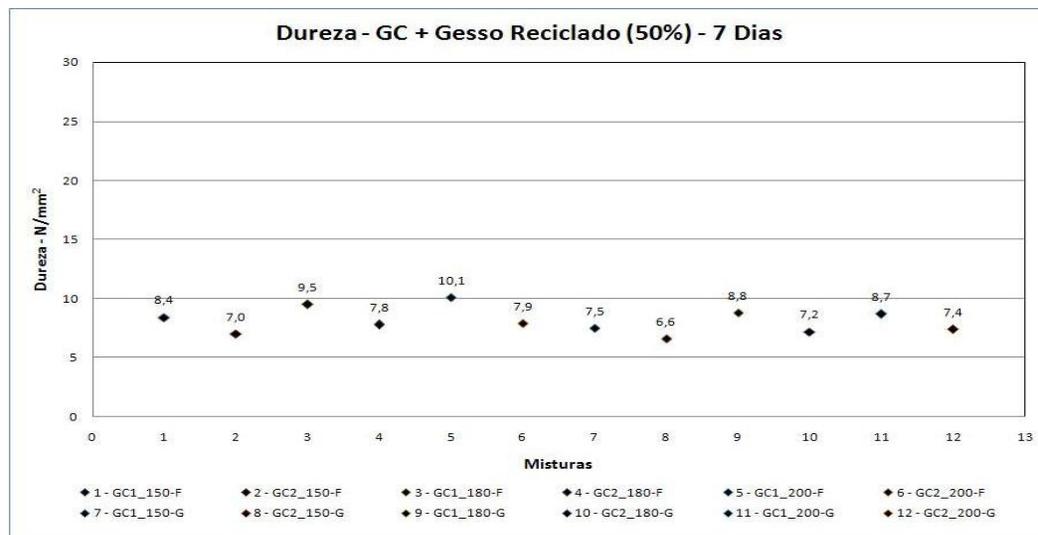
11 – GC1_200G

12 – GC2_200G



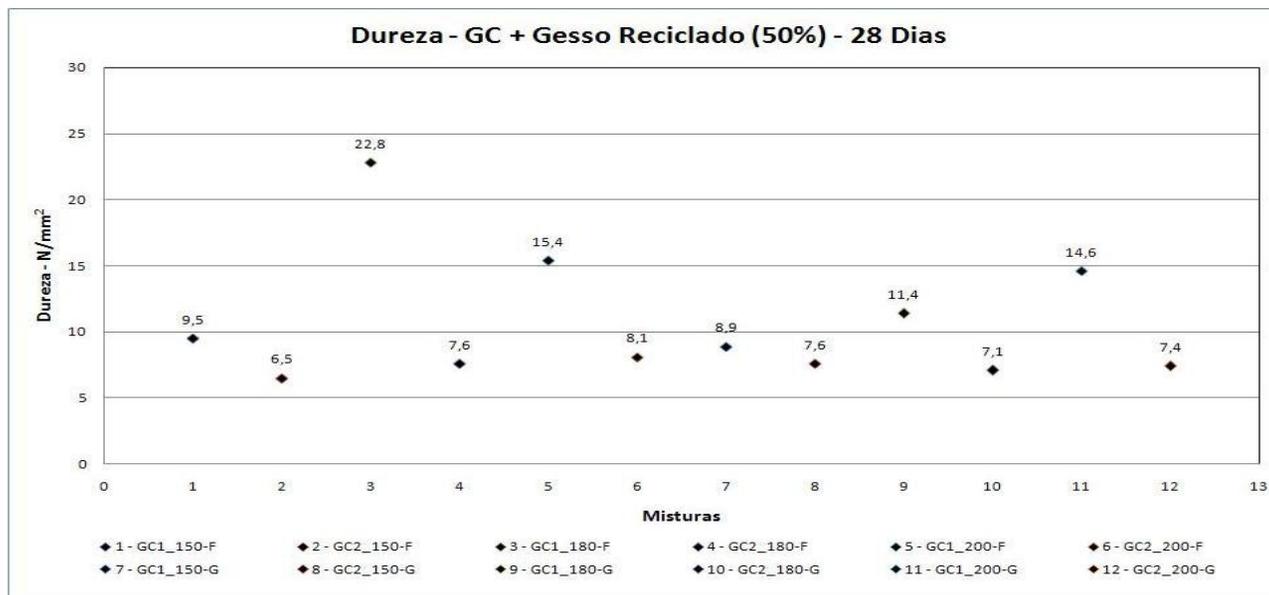
1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5*	1 - 6	1 - 7	1 - 8	1 - 9	1 - 10	1 - 11	1 - 12
	2 - 3*	2 - 4	2 - 5*	2 - 6	2 - 7	2 - 8	2 - 9	2 - 10	2 - 11	2 - 12
		3 - 4*	3 - 5	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*	3 - 9	3 - 10*	3 - 11	3 - 12*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7	4 - 8	4 - 9	4 - 10	4 - 11	4 - 12
				5 - 6*	5 - 7*	5 - 8*	5 - 9	5 - 10*	5 - 11	5 - 12*
					6 - 7	6 - 8	6 - 9	6 - 10	6 - 11	6 - 12
						7 - 8	7 - 9	7 - 10	7 - 11	7 - 12
							8 - 9*	8 - 10	8 - 11*	8 - 12
								9 - 10*	9 - 11	9 - 12
									10 - 11*	10 - 12
										11 - 12

* Diferença Estatisticamente Significativa



1 - 2	1 - 3	1 - 4	1 - 5*	1 - 6	1 - 7	1 - 8*	1 - 9	1 - 10	1 - 11	1 - 12
	2 - 3	2 - 4	2 - 5	2 - 6*	2 - 7	2 - 8	2 - 9*	2 - 10	2 - 11	2 - 12
		3 - 4*	3 - 5	3 - 6	3 - 7*	3 - 8*	3 - 9	3 - 10*	3 - 11	3 - 12*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7	4 - 8	4 - 9	4 - 10	4 - 11	4 - 12
				5 - 6*	5 - 7*	5 - 8*	5 - 9	5 - 10*	5 - 11	5 - 12*
					6 - 7	6 - 8	6 - 9	6 - 10	6 - 11	6 - 12
						7 - 8	7 - 9	7 - 10	7 - 11	7 - 12
							8 - 9*	8 - 10	8 - 11*	8 - 12
								9 - 10	9 - 11	9 - 12
									10 - 11	10 - 12
										11 - 12

* Diferença Estatisticamente Significativa



*** Diferença Estatisticamente Significativa**

1 - 2	1 - 3*	1 - 4	1 - 5	1 - 6	1 - 7	1 - 8	1 - 9	1 - 10	1 - 11	1 - 12
	2 - 3*	2 - 4	2 - 5*	2 - 6	2 - 7	2 - 8	2 - 9*	2 - 10	2 - 11	2 - 12
		3 - 4*	3 - 5*	3 - 6*	3 - 7*	3 - 8*	3 - 9*	3 - 10*	3 - 11*	3 - 12*
			4 - 5*	4 - 6	4 - 7	4 - 8	4 - 9*	4 - 10	4 - 11	4 - 12
				5 - 6*	5 - 7	5 - 8*	5 - 9	5 - 10*	5 - 11	5 - 12*
					6 - 7	6 - 8	6 - 9	6 - 10	6 - 11	6 - 12
						7 - 8	7 - 9	7 - 10	7 - 11	7 - 12
							8 - 9	8 - 10	8 - 11*	8 - 12
								9 - 10	9 - 11	9 - 12
									10 - 11*	10 - 12
										11 - 12

APÊNDICE D

Serviço		Unidade		Custo			
Produção de Gesso Reciclado Calcinado		Kg		42,16			
Insumo	Unidade	Quantidade	Custo Unitário Insumo - R\$	Mat. R\$	M.O R\$	Equipamentos R\$	BDI
Materiais							
Gesso Moído	kg	1,00	0	0,00			
				0,00			
				0,00			
				0,00			
Mão de Obra							
Ajudante - moagem	h	0,02	3,5		0,07		
Ajudante - colocar e retirar gesso estufa	h	0,02	3,5		0,07		
Leis Sociais	%	126,68%			0,18		
Equipamentos							
Energia elétrica triturador	kw	0,06	0,34			0,02	
Energia elétrica estufa	kw	123	0,34			41,82	
BDI	%	0,00%					0,00
TOTAIS				0,00	0,32	41,84	0,00

Para produzir 22 kg de gesso moído pronto para calcinar estima-se um gasto de 0,25 Kw de energia

Para produzir 4,5 kg de gesso calcinado estima-se um gasto de 123 Kw

Valor de 1 Kw = 0,34 - Fonte Aneel (sem incluir encargos)

E

APÊNDICE E

No **APÊNDICE E**, estão apresentados os dados obtidos na análise de variância multifatorial (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95%.

Analysis of Variance for Compressão - Type III Sums of Squares

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Finura	49.9609	1	49.9609	136.53	0.0000
B:Gesso	10.9868	2	5.49339	15.01	0.0000
C:Idade	225.811	4	56.4528	154.27	0.0000
INTERACTIONS					
AB	10.0975	2	5.04877	13.80	0.0000
AC	40.239	4	10.0597	27.49	0.0000
BC	17.6978	8	2.21223	6.05	0.0000
RESIDUAL	24.5177	67	0.365935		
TOTAL (CORRECTED)	378.534	88			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

The StatAdvisor

The ANOVA table decomposes the variability of Compressao into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since 6 P-values are less than 0.05, these factors have a statistically significant effect on Compressao at the 95.0% confidence level.

Analysis of Variance for Tracão - Type III Sums of Squares

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Finura	1.1607	1	1.1607	9.13	0.0036
B:Gesso	0.599412	2	0.299706	2.36	0.1025
C:Idade	47.4404	4	11.8601	93.29	0.0000
INTERACTIONS					
AB	0.322935	2	0.161468	1.27	0.2875
AC	0.681445	4	0.170361	1.34	0.2643
BC	7.17836	8	0.897295	7.06	0.0000
RESIDUAL	8.51754	67	0.127127		
TOTAL (CORRECTED)	65.7598	88			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

The StatAdvisor

The ANOVA table decomposes the variability of Tracao into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since 3 P-values are less than 0.05, these factors have a statistically significant effect on Tracao at the 95.0% confidence level.

Analysis of Variance for Dureza - Type III Sums of Squares

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Finura	1757.29	1	1757.29	79.67	0.0000
B:Gesso	1011.25	2	505.627	22.92	0.0000
C:Idade	3346.2	4	836.55	37.92	0.0000
INTERACTIONS					
AB	370.245	2	185.122	8.39	0.0006
AC	1712.5	4	428.124	19.41	0.0000
BC	908.801	8	113.6	5.15	0.0001
RESIDUAL	1477.89	67	22.0581		
TOTAL (CORRECTED)	10536.1	88			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

The StatAdvisor

The ANOVA table decomposes the variability of Dureza into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since 6 P-values are less than 0.05, these factors have a statistically significant effect on Dureza at the 95.0% confidence level.