

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE ERBS

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO
GESSO RECICLADO PROVENIENTE DE CHAPAS DE GESSO
ACARTONADO E GESSO COMUM AO LONGO DOS CICLOS DE
RECICLAGEM**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2016

ALEXANDRE ERBS

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO
GESSO RECICLADO PROVENIENTE DE CHAPAS DE GESSO
ACARTONADO E GESSO COMUM AO LONGO DOS CICLOS DE
RECICLAGEM**

Dissertação apresentada como requisito parcial de obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. André Nagalli

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

E65d Erbs, Alexandre
2016 Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem / Alexandre Erbs.-- 2016.
127 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2016.
Bibliografia: p. 116-127.

1. Engenharia civil - Dissertações. 2. Gesso. 3. Microestrutura. 4. Reciclagem. 5. Construção civil - Resíduos. 6. Ciclos. I. Nagalli, André. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624



TERMO DE APROVAÇÃO
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO N.º 45

**DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO
RECICLADO PROVENIENTE DE CHAPAS DE GESSO ACARTONADO E GESSO
COMUM AO LONGO DOS CICLOS DE RECICLAGEM**

POR
ALEXANDRE ERBS

Esta dissertação foi apresentada às 09:00 do dia 09 de dezembro de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**, área de Meio Ambiente, Linha de pesquisa Sustentabilidade, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. André Nagalli
(Orientador - UTFPR)

Prof. Dr. Wellington Mazer
(UTFPR)

Prof. Dr. Fernando Hermes Passig
(UTFPR)

Profa. Dra. Stela Fucale Sukar
(UPE)

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
(Coordenador do PPGEC)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem seu poder supremo jamais poderia estar sequer presente neste universo de maravilhas e mistérios a serem explorados. Obrigado pelo dom da vida e por tudo que tem colocado em minha vida na medida ideal, pois só o Senhor pode compreender a real necessidade de cada ser.

À minha esposa, Márcia de Moraes e à minha filha Rafaela, pois serão sempre meu porto seguro, as duas pessoas que estiveram comigo por toda esta jornada, sempre me incentivando e me dando força para ir mais longe a cada dia, se cheguei até aqui, tenham certeza que foi graças ao o amor e a atenção que me deram todos os dias.

Aos meus pais, Oscar e Evarilda Pecharke Erbs, que infelizmente não puderam avançar muito em seus estudos devido à frágil situação financeira, mas puderam inserir um conceito fundamental em minha mente, onde o estudo é a base do sucesso.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Câmpus Curitiba, pelos equipamentos e espaço físico cedido para realização dos ensaios, e principalmente por proporcionar toda minha formação acadêmica, de técnico em edificações, engenharia civil e agora o mestrado em engenharia civil, ao todo foram onze anos como discente, sempre proporcionando ensino público com excelência.

Aos técnicos de laboratório Gustavo, Felipe e Alexandre, que inúmeras vezes despenderam horas de trabalho rompendo ou realizando ensaios com os corpos de prova.

Aos professores do PPGEC pelos ensinamentos e conselhos durante esta jornada, sempre muito solícitos e atenciosos, obrigado por todo o conhecimento transmitido.

Aos componentes da banca de qualificação e defesa final, professores Wellington Mazer, Karina Querne de Carvalho, Stela Fucale Sukar e Fernando Hermes Passig. Obrigado por todas as sugestões e contribuições para o aprimoramento desta pesquisa.

Ao meu orientador, André Nagalli, que sempre esteve disposto a corrigir e sugerir melhorias nesta pesquisa, nos dias e horários mais inesperados. Sempre com muita agilidade e presteza. Direcionando e orientando de uma forma muito eficiente e produtiva.

A todos os amigos e colegas onde inúmeras vezes que de uma maneira ou outra deram forças para continuar a jornada e puderam tornar os dias mais agradáveis.

"Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais terá.
A única segurança verdadeira consiste numa reserva de
sabedoria, de experiência e de competência"

Henry Ford

RESUMO

ERBS, Alexandre. Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem. 2016. 127 f. Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A busca pela viabilidade técnica e econômica da reciclagem de resíduos na cadeia produtiva da construção civil vem atender às necessidades do setor e promover desenvolvimento integrado às necessidades sociais e ambientais. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo investigar o processo de reciclagem de resíduos de gesso acartonado e comum, em escala de bancada, e a qualidade dos materiais gerados ao longo de cinco ciclos de reciclagem. Para tanto, foi desenvolvido um equipamento para a separação entre o papel e a massa de gesso dos resíduos de gesso acartonado, assim como para seu beneficiamento. O experimento abrangeu a trituração, moagem, calcinação, hidratação, formação e rompimento de corpos de prova utilizando os resíduos de gesso. Utilizando-se MEV e EDS, caracterizou-se a microestrutura do gesso reciclado quanto à sua composição química e mineralógica. Determinaram-se as características do pó, as propriedades físicas e mecânicas nos estados fresco e endurecido para cinco proporções de gesso reciclado e do gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem. As amostras moldadas somente com gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado atenderam os critérios do tempo de pega para gesso de revestimento, com início de pega após 10 minutos e fim de pega após 45 minutos, até o quarto ciclo. Os resultados mostraram que é possível atingir valores de 6,5 à 13,10 MPa de resistência à compressão axial até o terceiro ciclo de reciclagem. Obtiveram-se em todas as amostras valores superiores a 30 N mm⁻² para a dureza superficial. A inserção de gesso comum na moldagem dos corpos de prova elevou os valores da resistência à tração na flexão nos segundo, quarto e quinto ciclos, em relação aos corpos de prova moldados somente com gesso reciclado. No primeiro ciclo, somente as amostras que possuíam gesso comum em sua composição atingiram os 8,4 MPa para a resistência à compressão axial. Amostras moldadas com 50% de gesso comum atingiram 66 N mm⁻² no ensaio de dureza superficial, no primeiro ciclo. Visualizaram-se a estrutura cristalina e o entrelaçamento dos cristais de gesso reciclado e gesso comum, concluindo-se que o aumento de resistência à tração na flexão deve-se ao melhor entrelaçamento dos cristais e a redução de vazios, uma vez que os cristais de gesso comum mostraram-se mais alongados, enquanto os de gesso reciclados ortorrômbicos e mais curtos, preenchendo assim o vazios. Foi verificada a reversibilidade das reações durante os ciclos de reciclagem, comprovando a viabilidade técnica do processo utilizado nesta pesquisa até o terceiro ciclo de reciclagem.

Palavras-chave: Gesso; Microestrutura; Reciclagem; Resíduos de Construção; Ciclos.

ABSTRACT

ERBS, Alexandre. Determination of the physical and mechanical properties of recycled gypsum from plasterboards sheets and common gypsum through recycling cycles. 2016. 127 f. Master's Degree – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The search for technical and economic feasibility of waste recycling in the production chain of construction, come meet the changing industry needs to promote an integrated economic growth to social and environmental needs. In this sense, the objective of this research was to investigate the recycling process of gypsum from the plasterboard sheets and common gypsum residue, on bench scale, and the quality of the materials generated during five cycles of recycling. For this purpose, an equipment was developed to separate the paper and the plaster mass from the gypsum plasterboard sheet residues, as well as for their processing. The experiment covered the grinding, milling, calcination, hydration, formation and rupture of test bodies using gypsum waste. Using MEV and EDS, the microstructure of recycled gypsum was characterized as to its chemical and mineralogical composition. The characteristics of the powder, the physical and mechanical properties in the fresh and hardened states were determined for five proportions of recycled gypsum and the common gypsum throughout the recycling cycles. The samples molded only with recycled gypsum from the gypsum plasterboard sheets met the criteria of the time of picking for plaster of coating, with the beginning of the handle after 10 minutes and the end of the handle after 45 minutes, until the fourth cycle. The results showed that it is possible to reach values of 6.5 to 13.10 MPa of axial compressive strength up to the third recycling cycle. Values above 30 N mm⁻² for surface hardness were obtained in all samples. The insertion of common gypsum in the molding of the specimens increased the values of the tensile strength in the flexion in the second, fourth and fifth cycles, in relation to the test pieces molded only with recycled plaster. In the first cycle, only the samples that had common gypsum in their composition reached 8.4 MPa for the axial compressive strength. Samples molded with 50% of common gypsum reached 66 N mm⁻² in the surface hardness test, in the first cycle. The crystalline structure and the interlacing of the recycled gypsum crystals and common gypsum were visualized, concluding that the increase of the tensile strength in the flexion is due to the better interlacing of the crystals and the reduction of voids, since the crystals of common plaster showed to be more elongated, while the plaster of recycled orthorhombic and shorter, thus filling the voids. It was verified the reversibility of the reactions during the recycling cycles, proving the technical feasibility of the process used in this research until the third cycle of recycling.

Palavras-chave: Plaster; Microstructure; Recycling; Construction Waste; Cycles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria do cristal de hemi-hidrato	25
Figura 2 - (a) Estrutura do pó de gesso comum ampliado 1500 vezes; (b) gesso comum ampliado 2500 vezes; (c) micrografia dos cristais de gesso com ampliação de 1500 vezes	26
Figura 3 - Fotomicrografia dos cristais de gesso di-hidratados	26
Figura 4 - Fotomicrografia da Gipsita calcinada a 200 °C	27
Figura 5 - Fluxograma básico referente ao ciclo de reciclagem do gesso.....	29
Figura 6 - Fotomicrografia de gesso reciclado no microscópio eletrônico de varredura	30
Figura 7 - Fotomicrografia do gesso reciclado. (a) 1º ciclo, (b) 2º ciclo, (c) 3º ciclo, (d) 4º ciclo, (e) 5º ciclo, (f) 6º ciclo, (g) 7º ciclo, (h) 8º ciclo	31
Figura 8 - Processo de produção das placas de gesso acartonado	33
Figura 9 - Histórico de consumo de chapas de gesso acartonado no Brasil (em milhões)	35
Figura 10 - Consumo mundial de m ² de chapas de gesso acartonado por habitante/ano	35
Figura 11 - Unidade de reciclagem de chapas de gesso acartonado móvel	39
Figura 12 - Polvilhamento do pó de gesso	45
Figura 13 - Ciclo de reciclagem dos resíduos de chapa de gesso acartonado e gesso comum	53
Figura 14 - Filetes de resíduos de chapas de gesso coletadas de obras da região de Curitiba	55
Figura 15 - Separação manual da massa de gesso do cartão.....	56
Figura 16 - Descolamento mecânico do cartão aderido no gesso após a passagem no cilindro manual	56
Figura 17 - Gesso ainda aderido no cartão após a segunda passagem no cilindro manual	57
Figura 18 - Projeto do triturador eletro-mecânico	58
Figura 19 - Cilindro eletro-mecânico desenvolvido para trituração do gesso a) vista frontal b) vista lateral	59
Figura 20 - a) Granulometria do resíduo de gesso no início do processo e b) ao final do trituração eletromecânica	60
Figura 21 - Moinho de bolas de porcelana com esferas de ágata	61
Figura 22 - Resíduo de gesso calcinado repousando para diminuição da temperatura	62
Figura 23 - Agitador de peneiras eletromagnético	63
Figura 24 - Recipiente utilizado para ensaio da massa unitária	65
Figura 25 - Pasta GR-3C, relação a/g 0,7.....	68
Figura 26 - Ensaio de tempo de pega do resíduo de gesso	69

Figura 27 - Molde padronizado com dimensões 4 x 4 x 16 cm untado com cera	70
Figura 28 - Corpos de prova moldados com gesso reciclado	71
Figura 29 - Corpos de prova armazenados e identificados aguardando data para ensaio	71
Figura 30 - Ensaio de tração na flexão realizado no corpo de prova prismático	73
Figura 31 - Ensaio de compressão axial	74
Figura 32 - Ensaio de dureza superficial	75
Figura 33 - Marca da esfera de aço do ensaio de dureza superficial	76
Figura 34 - Vaporizador de Ouro e Carbono	77
Figura 35 - Microscópio eletrônico de varredura	78
Figura 36 - Soquete de concreto para desfragmentação no final de cada ciclo de reciclagem	79
Figura 37 - Fotomicrografia que demonstra a presença de papel na amostra GR-3C	82
Figura 38 - Regulagem da distância entre os cilindros e rolamento livre blindado.....	85
Figura 39 - Resíduo de gesso após a trituração no moinho de bolas	86
Figura 40 - Curva granulométrica dos gessos no primeiro ciclo e a amostra de gesso comum	88
Figura 41 - a) Curva granulométrica dos gesso reciclados e b) curva granulométrica dos gessos comuns reciclados	89
Figura 42 - Fotomicrografia do gesso comum e do gesso reciclado primeiro ciclo	92
Figura 43 - Pasta de gesso reciclado: a) amostra GR-1C, b) amostra GR-5C, c) amostra GC, d) amostra GC-5C	93
Figura 44 - Intervalos de início e fim de pega do gesso para fundição descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994)	95
Figura 45 - Tempo de início e fim de pega dos gessos de revestimento	96
Figura 46 - a) amostra GR-3C no início do ensaio, b) amostra GR-3C no fim do ensaio de tempo de pega	97
Figura 47 - Resistência à tração na flexão dos gessos reciclados	99
Figura 48 - Resistência à tração na flexão dos gessos reciclados x misturas experimentais	99
Figura 49 - Resistência à compressão dos gessos reciclados	101
Figura 50 - Pastas de GR-1C e GC apresentando excesso de água	101
Figura 51 - a) porosidade interior do corpo de prova GR-1C b) corpos de prova de GC apresentando porosidade	102
Figura 52 - Resistência à compressão dos gessos reciclados x misturas experimentais	103
Figura 53 - Resistência à dureza superficial dos gessos reciclados	104
Figura 54 - Resistência à dureza superficial dos gessos reciclados x misturas experimentais	105

Figura 55 - Fotomicrografia do gesso comum ampliado 15000 vezes	106
Figura 56 - Fotomicrografia do gesso comum reciclado ao longo dos ciclos de reciclagem ampliado 15000 vezes a) 1º ciclo, b) 2º ciclo, c) 3º ciclo, d) 4º ciclo e e) 5º ciclo	107
Figura 57 - Fotomicrografia através de MEV do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado ao longo dos ciclos de reciclagem ampliado 15000 vezes a) 1º ciclo, b) 2º ciclo, c) 3º ciclo, d) 4º ciclo e e) 5º ciclo	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Influência das impurezas presentes no minério de gipsita nas propriedades do gesso	22
Quadro 2 – Sistema cristalino do gesso	25
Quadro 3 – Módulo de finura normatizado pela NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a)	42
Quadro 4 – Tempo de pega normatizado pela NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a)	47
Quadro 5 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre os ensaios realizados relacionados com os autores abordados	51
Quadro 6 – Laboratórios utilizado para realização dos experimentos.....	54
Quadro 7 – Legenda dos materiais estimados para fabricação do cilindro eletro-mecânico	58
Quadro 8 – Ensaio realizados para determinação das propriedades.....	63
Quadro 9 – Misturas propostas nos experimentos	67
Quadro 10 – Relação de corpos de prova moldados para cada ensaio.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química teórica das espécies químicas do gesso	21
Tabela 2 – Composição química do gesso determinado através do EDS	28
Tabela 3 – Composição química das chapas de gesso acartonado	34
Tabela 4 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre temperatura relacionada com o tempo de permanência em estufa	41
Tabela 5 – Módulo de finura do gesso reciclado	43
Tabela 6 – Massa unitária do gesso comum e do gesso reciclado	44
Tabela 7 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso reciclado	44
Tabela 8 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tempo de pega do gesso comum e com adição de resíduos	48
Tabela 9 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre resistência a compressão em ensaios com gesso comum e reciclado	50
Tabela 10 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso reciclado	51

Tabela 11 – Valores aferidos do recipiente para determinação da massa unitária	65
Tabela 12 – Resumo com o custo e horas despendidas em cada etapa do processo	80
Tabela 13 – Perda de material observada durante o processo de trituração do GR	84
Tabela 14 – Perda de material observada durante o processo de trituração do GR	84
Tabela 15 – Módulo de finura dos gesso reciclados	90
Tabela 16 – Massa unitária das amostras analisadas.....	91
Tabela 17 – Composição química do gesso determinado através do ensaio de EDS	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
NBR	Norma Brasileira;
NWGR	<i>New West Gypsum Recycling</i>
PRS	Portal Resíduos Sólidos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
DRX	Difratômetro de Raio-X
a/g	Relação água/gesso
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
EDS	Espectrômetro de dispersão de energia

LISTA DE SÍMBOLOS

R	material retido, em percentagem;
m	resíduo na peneira, em gramas;
M _i	massa inicial, em gramas;
MF	módulo de finura;
$\sum Ra$	somatório do percentual retido acumulado em cada peneira da série padrão;
M_u	massa unitária, em quilogramas por metro cúbico;
M	massa do gesso, em gramas;
V	volume do recipiente, em centímetros cúbicos ;
f_{ctM}	resistência à tração na flexão, em Megapascal;
P	carga máxima aplicada, em Newton;
l	distância entre os cutelos de suporte, em milímetros;
b	largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros;
d ²	altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros;
f_c	resistência à compressão axial, em milímetros;
P	carga que produziu a ruptura do corpo de prova, em Newton;
S	área de seção transversal de aplicação da carga, em milímetros quadrados;
D	dureza superficial, em Newton por milímetro quadrado ;
F	carga, em Newton;
t'	média da profundidade, em milímetros;
ε	intervalo de dados esperados;
h	hora;
kg	quilograma;
MPa	unidade de tensão: MPa;
°C	graus Celsius;
kg m ⁻³	quilograma por metro cúbico;
N mm ⁻²	Newton por milímetro quadrado;
∅	diâmetro, em milímetros.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 AS REAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO DO GESSO.....	21
2.1.1 Composição química do gesso.....	21
2.1.2 Hidratação do gesso.....	22
2.1.3 Calcinação.....	22
2.2 MICROESTRUTURA.....	24
2.2.1 Geometria dos cristais de gesso comum e reciclado.....	25
2.3 RECICLAGEM DO GESSO.....	29
2.3.1 Ciclos de reciclagem do gesso.....	31
2.3.2 Misturas Experimentais.....	32
2.4 CHAPAS DE GESSO ACARTONADO.....	32
2.4.1 Composição das chapas de gesso acartonado.....	33
2.4.2 Mercado do <i>drywall</i>	34
2.4.3 Perdas na construção com <i>drywall</i>	36
2.4.4 Reusos alternativos do resíduo de gesso.....	37
2.4.5 Reciclagem do resíduo de gesso acartonado.....	38
2.5 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO.....	40
2.5.1 Propriedades físicas do pó.....	40
2.5.1.1 Temperatura e tempo de calcinação do resíduo de gesso moído.....	40
2.5.1.2 Granulometria.....	42
2.5.1.3 Módulo de finura.....	42
2.5.1.4 Massa unitária.....	43
2.5.2 Propriedades no Estado Fresco.....	44
2.5.2.1 Preparação da pasta de gesso.....	45
2.5.2.2 Relação água / gesso.....	45
2.5.2.3 Tempo de pega.....	46
2.5.3 Propriedades da pasta no estado endurecido.....	48
2.5.3.1 Resistência à tração na flexão.....	48
2.5.3.2 Resistência à compressão axial.....	49
2.5.3.3 Dureza superficial.....	51
2.5.4 Principais autores e estudos realizados.....	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	55
3.3 TRITURAÇÃO MANUAL.....	55
3.4 TRITURAÇÃO ELETRO-MECÂNICA.....	57
3.5 TRITURAÇÃO NO MOINHO DE BOLAS.....	60
3.6 CALCINAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO.....	61
3.7 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO RECICLADO.....	62
3.7.1 Determinação das propriedades físicas do pó.....	63
3.7.1.1 Granulometria.....	63

3.7.1.2 Módulo de finura	64
3.7.1.3 Massa unitária	65
3.7.1.4 Misturas experimentais	66
3.7.2 Propriedades da pasta no estado fresco	68
3.7.2.1 Preparação da pasta.....	68
3.7.2.2 Tempos de início e fim de pega.....	69
3.7.3 Propriedades no estado endurecido	70
3.7.3.1 Moldagem dos corpos de prova.....	70
3.7.3.2 Resistência à tração na flexão.....	73
3.7.3.3 Resistência à compressão axial	74
3.7.3.4 Dureza superficial	75
3.7.4 Microestrutura e composição química	77
3.7.4.1 Microestrutura.....	77
3.7.4.2 Composição química	78
3.7.5 Desfragmentação dos corpos de prova	78
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	81
4.1 TRITURAÇÃO MANUAL.....	81
4.2 TRITURAÇÃO ELETRO-MECÂNICA	83
4.3 TRITURAÇÃO NO MOINHO DE BOLAS.....	86
4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ	87
4.4.1 Granulometria	87
4.4.2 Módulo de Finura	90
4.4.3 Massa Unitária.....	91
4.5 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	92
4.5.1 Preparação da pasta.....	93
4.5.2 Tempo de pega.....	94
4.6 PROPRIEDADES DA PASTA NO ESTADO ENDURECIDO.....	98
4.6.1 Resistência à tração na flexão.....	98
4.6.2 Resistência à compressão	100
4.6.3 Dureza Superficial.....	103
4.7 MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	105
4.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura	106
4.7.2 Composição química	109
5. CONCLUSÃO	111
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
REFERÊNCIAS.....	116

1. INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento utilizado até o momento tem como base a exploração dos recursos naturais para fabricação dos mais diversos tipos de produtos, estando diretamente ligado às questões ambientais e a tendência de escassez dos recursos naturais. É preciso se adequar a um modelo capaz de satisfazer as necessidades atuais, sem comprometer às necessidades futuras.

Inúmeros são os recursos onde cada vez mais é necessário despende energia para extração ou exploração destes insumos. Desta forma é necessário adotar mecanismos, por meio de novas técnicas, que possibilitem viabilizar a sustentabilidade desta atividade produtiva (RIVEIRO; NAVARRO, 2016).

Diante deste panorama a palavra sustentabilidade deixou de ser utilizada apenas por ambientalistas e se transformou em um tema essencial, evoluindo a um patamar que se tornou uma necessidade, não só de grupos empresariais como também do indivíduo em sua singularidade.

Outro viés que merece análise é o desperdício de materiais nas construções, nas quais o problema é não só a geração de resíduos sólidos, mas também a não reutilização dos mesmos, desperdiçando as potencialidades destes materiais (ROQUE *et al.*, 2005).

Como forma de amenizar este desperdício de matéria-prima, utiliza-se o processo da reciclagem, que visa não só a redução dos resíduos já existentes como também a diminuição do uso de recursos naturais para fabricação de novos produtos (TACHIZAWA; ANDRADE, 2012).

A reciclagem de produtos monofásicos é uma realidade entre a população, como o reaproveitamento de metais, plásticos, papéis e vidros. Insumos como gesso ainda demandam estudos para melhor aproveitamento de suas características (NAGALLI, 2014). Como exemplo é possível citar as chapas de gesso acartonado, também conhecidas como chapas de *drywall*, resultantes da associação de vários tipos de materiais, necessitando de linhas de estudo ainda mais abrangentes, seja na separação das matérias-primas ou análise do reuso (CINCOTTO; JOHN, 2007).

A reciclagem do resíduo de gesso demanda metodologia adequada para obtenção da matéria-prima e desenvolvimento de pesquisas que avaliem o material resultante de sua reciclagem, para que este possa ser corretamente utilizado.

A caracterização do material, do estado pulverulento ao enrijecido é fundamental para direcionar quaisquer ações relacionados ao desenvolvimento de novas tecnologias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é determinar as propriedades físicas e mecânicas do gesso proveniente da cominuição* de chapas de gesso acartonado e de gesso comum, nos estados fresco e endurecido, ao longo de cinco ciclos de reciclagem.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo, propostos para alcançar o objetivo geral são:

- Caracterizar o gesso reciclado quanto à sua composição química e mineralógica;
- Propor um processo de reciclagem do gesso constituído das etapas de moagem e calcinação do resíduo de gesso das chapas de gesso acartonado e de gesso comum;
- Submeter o material a cinco ciclos de reciclagem, avaliando a constância de suas propriedades;
- Determinar a massa unitária, granulometria e módulo de finura do pó proveniente da reciclagem do resíduo de gesso ao longo de cinco ciclos de reciclagem;
- Estudar o tempo de início e fim de pega em pastas de gesso reciclado nos cinco ciclos de reciclagem;

* Cominuição: ato ou efeito de cominuir, de fragmentar.

- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, compressão axial e dureza superficial de corpos de prova moldados com gesso reciclado ao longo dos cinco ciclos de reciclagem;
- Propor misturas entre gesso reciclado e comum com o intuito de alcançar os parâmetros de resistência mecânica descritos na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) e;
- Observar a microestrutura dos cristais e a composição química do gesso reciclado, averiguando variações ao longo dos ciclos.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo foi realizado com o intuito de se tornar parte dos fundamentos básicos para conhecimento das propriedades do material reciclado. O desenvolvimento de novos produtos e tecnologias demanda o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado. Pois se conhecendo as características da matéria-prima é possível desenvolver novos componentes para o mercado da construção.

A viabilidade de utilização do gesso reciclado em diferentes mercados pode incentivar a instalação de usinas de reciclagem específicas. Já a simulação em laboratório com equipamentos de moagem e calcinação do resíduo, pode vir a incentivar empresas do ramo a procurarem soluções não só para destinação do resíduo como também para sua reciclagem (PINHEIRO, 2011).

Apontar alternativas para o descarte dos resíduos de gesso, seja ele proveniente da indústria, de novas ou antigas construções, evitando assim o acúmulo em aterros e também prolongar o ciclo de exploração das jazidas fornecedoras de insumos para fabricação do gesso (BARDELLA, 2011).

Logo, estudar o reaproveitamento do resíduo de gesso é necessário, visando a reutilização de materiais que vem se acumulando nos aterros e nos descartes irregulares (ROQUE *et al.*, 2005).

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

A presente pesquisa está estruturada em seis capítulos. O capítulo 1 é composto pela parte introdutória, apresentando-se a problemática e a justificativa do tema escolhido, bem como os objetivos a serem atingidos. O capítulo 2 consta de revisão da literatura, fornecendo informações sobre o material estudado, como composição química e mineralológica, caracterizações e propriedades. Além disso, o capítulo fornece uma breve revisão sobre a produção, consumo, reuso e seu aproveitamento na produção de novos materiais, abordando os aspectos gerais dos materiais utilizados nesta pesquisa. No capítulo 3 está descrita a metodologia experimental adotada durante a pesquisa, assim como as técnicas, os materiais e os equipamentos empregados durante a execução do trabalho. Já no capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos por meio das técnicas descritas no capítulo anterior. O capítulo 5, por sua vez, contém as principais conclusões deste trabalho de pesquisa. No último capítulo são sugeridos temas para pesquisas futuras.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são abordados os diversos assuntos sobre a matéria-prima utilizada, processo de obtenção do gesso, mecanismo de hidratação e reações químicas do gesso, propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do material reciclado no estado fresco e endurecido.

2.1 AS REAÇÕES DE TRANSFORMAÇÃO DO GESSO

2.1.1 Composição química do gesso

A composição química do gesso pode ter alterações devido à pureza da gipsita e a temperatura de calcinação (CINCOTTO; JOHN 2007). Os principais valores encontrados na literatura são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química teórica das espécies químicas do gesso - 2016

Elementos	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)
CaO	38,63	41,3	38,63
SO ₃	52,08	56	59,15
MgO	-	0,696	-
K ₂ O	-	0,0567	-
Fe ₂ O ₃	0,41	0,22	0,38
Al ₂ O ₃	-	0,35	0,26
SiO ₂	0,65	1,1	1,3
SrO	-	0,183	-
ZrO ₂	-	0,024	-
Referência	Carvalho <i>et al.</i> (2008)	Vasconcelos <i>et al.</i> (2012)	Moura <i>et al.</i> (2014)

A presença de certas impurezas como quartzo, argila, calcita ou dolomita, dependendo de seus teores, pode afetar algumas propriedades do material, como resistência mecânica, consistência, tempo de pega e estabilidade, conforme descrito no Quadro 1 (PINHEIRO, 2011; SCHMITZ; PÓVOAS, 2009).

Mineral	Espécies	Propriedades
solúveis em água	silicosos, calcário, dolomito, anidrita, argilo-minerais	Redução da resistência mecânica do material hidratado
insolúveis em água	halita - NaCl, silvita - KCl	Alteram a temperatura de calcinação, e a consistência e tempo de pega das pastas no estado fresco
hidratados	sais de sulfatos e montmorilonita	Proporcionam instabilidade no produto final, por absorverem água após o endurecimento

Quadro 1 - Influência das impurezas presentes no minério de gipsita nas propriedades do gesso

Fonte: Schmitz; Póvoas (2009); Pinheiro (2011).

Conhecendo a composição química do material, será descrito as reações de hidratação das moléculas de gesso.

2.1.2 Hidratação do gesso

O gesso é um aglomerante que em contato com a água forma uma pasta homogênea, consistente e trabalhável, e que após poucos minutos, tem ganho de viscosidade e endurece, ganhando resistência (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 (CINCOTTO; JOHN, 2007; BARDELLA, 2011).

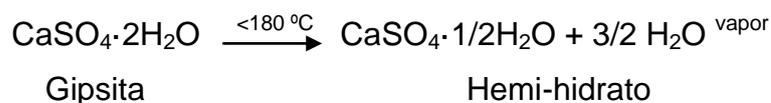
Conhecido o processo de hidratação do gesso, será descrito o processo de calcinação.

2.1.3 Calcinação

O gesso de construção é um aglomerante mineral obtido pela calcinação da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quimicamente denominado Sulfato de Cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), em temperaturas de 150 °C a 200 °C (PINHEIRO, 2011; CUNHA, 2012).

É composto principalmente por Sulfato de Cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) (BALLIRANO; MELIS, 2009; FILHO, 2010; PINHEIRO, 2011; RIBEIRO, 2011; BARDELLA, 2011; MELO, 2012), anidritas solúveis e insolúveis (CaSO_4) e Sulfato de Cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o qual em contato com a água, se hidrata formando, novamente, o di-hidrato ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (LEWRY; WILLIAMSON, 1994; BOISVERT *et al.*, 2000; SIEVERT *et al.*, 2005; REAL, 2009; VASCONCELOS *et al.*, 2012; LEE; OGURA, 2013; FUKAMI *et al.*, 2015; ZUHAIMI *et al.*, 2015).

Durante a calcinação do gesso, o hemi-hidrato de Sulfato de Cálcio é a primeira espécie química da desidratação da gipsita. Nesta etapa se desprende a água fracamente combinada em temperaturas entre 100 °C e 180 °C, conforme representado na Reação 1 (ROQUE *et al.*, 2005; SINGH; MIDDENDORF, 2007; BARDELLA, 2011; PINHEIRO, 2011; BEER *et al.*, 2014).



Reação 1 - Desidratação da gipsita para formação do hemi-hidrato
Fonte: Roque *et al.* (2005); Bardella (2011).

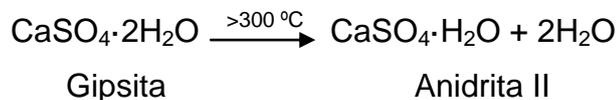
O sulfato anidro solúvel ou anidrita III é formado quando a temperatura atinge o intervalo de 180 °C a 300 °C. A fórmula química deste composto é $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$ e indica que o constituinte teor de água de cristalização é variável de 0,06 a 0,11, conforme apresentado na Reação 2 (ROQUE *et al.*, 2005; CINCOTTO; JOHN, 2007; LOU *et al.*, 2010; PINHEIRO, 2011; BARDELLA, 2011; CUNHA, 2012; NITA *et al.*, 2014).



Reação 2 - Calcinação da gipsita entre 180 °C e 300 °C formando anidrita III
Fonte: Roque *et al.* (2005); NITA *et al.* (2014).

Quando a temperatura ultrapassa 300 °C ocorre formação do sulfato anidro insolúvel ou anidrita II (CaSO_4), conforme apresentado na Reação 3 (SANTOS,

1996; PINHO, 2003; BARDELLA, 2011; AZIMI; PAPAGELAKIS, 2011; MELO, 2012; KANNO, 2009; INAZUMI *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2015).



Reação 3 - Calcinação da gipsita acima de 300 °C formando anidrita II insolúvel
Fonte: Inazumi *et al.* (2014); Zhou *et al.* (2015).

Além do conhecimento das reações de transformação do gesso, outro aspecto relevante é o estudo da microestrutura, para a visualização dos cristais é utilizado o ensaio da microscopia eletrônica de varredura, conforme será descrito no item 2.2.

2.2 MICROESTRUTURA

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica de caracterização microestrutural utilizada em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais. A interação de um fino feixe de elétrons focalizado sobre a área ou o microvolume a ser analisado gera uma série de sinais que podem ser utilizados para caracterizar propriedades da amostra, tais como composição, superfície topográfica e a cristalografia (MELO, 2012).

Na MEV os sinais de maior interesse referem-se usualmente às fotomicrografias de elétrons secundários e de elétrons retroespehados, ao passo que na microsonda eletrônica o sinal de maior interesse corresponde aos raios-X característico, resultante do bombardeamento do feixe de elétrons sobre a amostra, permitindo a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos presentes em um microvolume (DEDAVID *et al.*, 2007; KANNO, 2009; BARDELLA, 2011).

2.2.1 Geometria dos cristais de gesso comum e reciclado

Canut (2006) argumenta que a análise de fotomicrografias oferecem condições para visualizar os fatores que influenciam a formação da microestrutura do gesso. No Quadro 2 é descrita a cristalografia presente na matéria-prima e nos produtos derivados da calcinação do gesso comum.

Mineral	Sistema cristalino	Fórmula
Gipsita	Monoclínico	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Hemi-hidrato	Hexagonal	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
Anidrita III	Hexagonal	$\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$
Anidrita II	Ortorrômbica	CaSO_4

Quadro 2 - Sistema cristalino do gesso

Fonte: Canut (2006).

Lewry; Williamson (1994) relatam que as partículas de hemi-hidrato da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) são formadas por cristais simples, ortorrômbicos, com características uniformes, conforme observado na Figura 1.

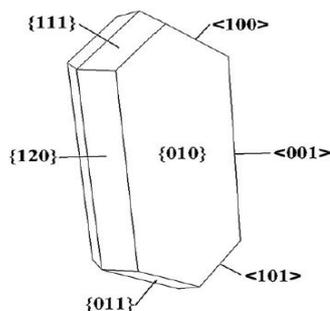


Figura 1 - Geometria do cristal de hemi-hidrato

Fonte: Ballirano; Melis (2009).

A observação sob o MEV registra cristais bem formados, conforme apresentado na Figura 2.

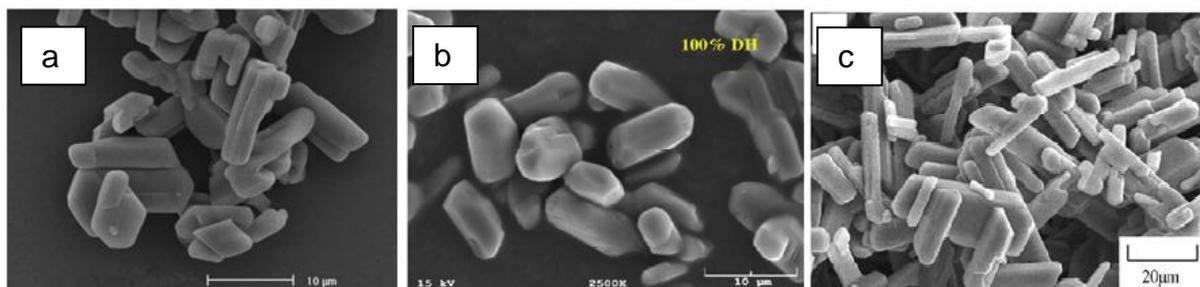


Figura 2 - (a) Estrutura do pó de gesso comum ampliado 15000 vezes; (b) gesso comum ampliado 25000 vezes; (c) micrografia dos cristais de gesso com ampliação de 15000 vezes
Fonte: Ballirano; Melis (2009); Azimi; Papangelakis (2011); Kojima; Yasue (2016).

O Sulfato de Cálcio di-hidratado proveniente da hidratação do gesso apresenta-se na forma de cristais, geralmente bem definidos e na forma de agulhas mais ou menos alongadas (LEWRY; WILLIAMSON, 1994), como pode ser observado na Figura 3.

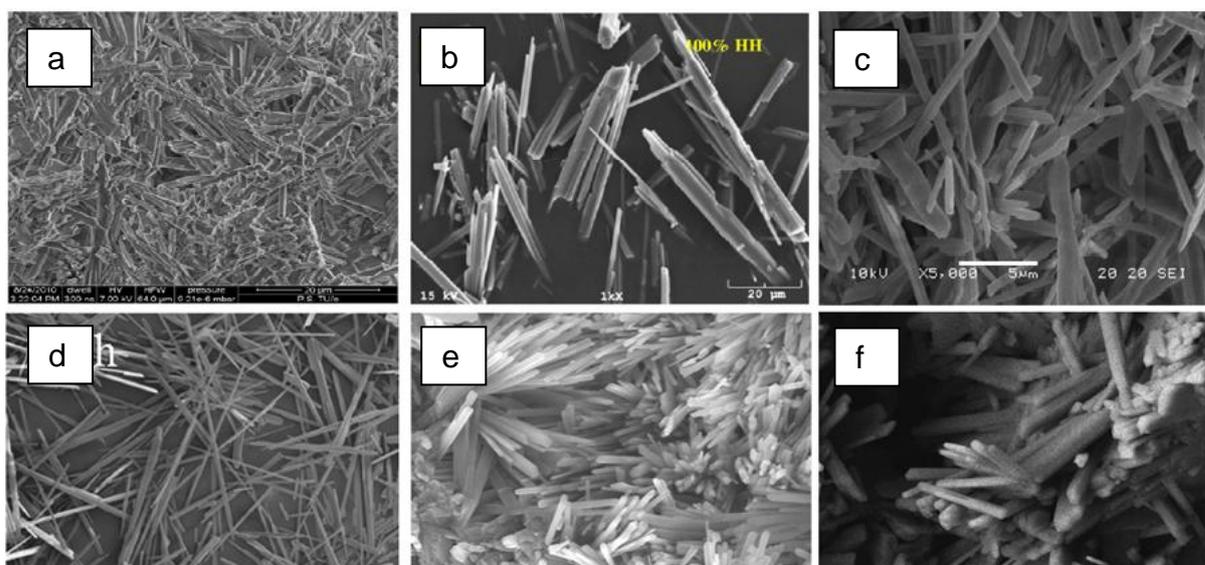


Figura 3 - Fotomicrografia dos cristais de gesso di-hidratados
Fonte: a) Yu; Brouwers (2011); b) Azimi; Papangelakis (2011); c) Soares (2005); d) Miao *et al.* (2015); e) Carvalho *et al.* (2008); f) Yakolev *et al.* (2015).

Por outro lado, a anidrita solúvel é formada por partículas compostas por pequenos cristais com orientação variada. As faces cristalográficas não são uniformes, apresentam fissuras e poros (LEWRY; WILLIAMSON, 1994), como pode ser verificado na Figura 4.

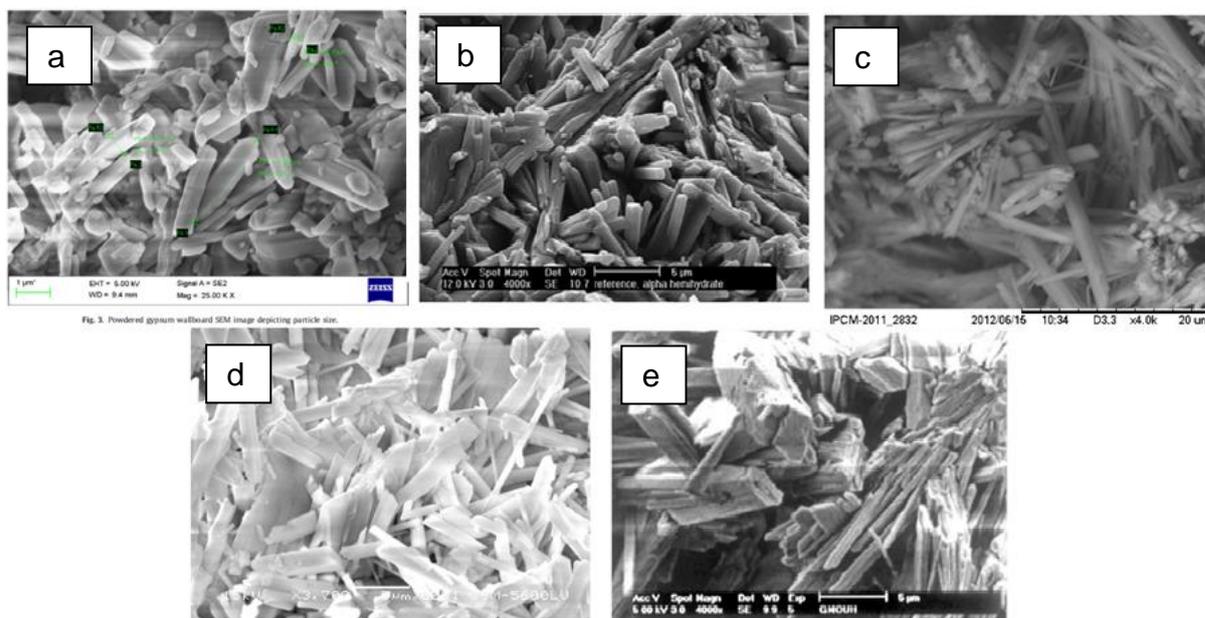


Figura 4 - Fotomicrografia da Gipsita calcinada a 200 °C
Fonte: a) Raghavendra; Udayashankar (2005) b) Singh; Middendorf (2007); c) Real (2009); d) Gmouh *et al.* (2003); e) Guam *et al.* (2011).

Descrito sobre a geometria dos cristais, será abordada no item 2.4.2 a técnica utilizada para determinação da composição química dos gessos reciclados, a microanálise de dispersão de energia.

2.2.2 Microanálise química pelo método de dispersão de energia

A difratometria de raios-X (DRX) corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, sendo aplicada em diversos campos do conhecimento (MELO, 2012).

A DRX é uma técnica que determina a morfologia dos cristais da substância, identificando os materiais quanto às suas características cristalinas e a quantificação de elementos de constituição, desde que em faixa adequada de concentração (BARDELLA, 2011).

Esta técnica consiste na determinação 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 (LOU *et al.*, 2010).

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 (MIAO *et al.*, 2015).

Bortoleto (2007) cita que se utilizando a refração de raios-X foi desenvolvida uma técnica para determinação da microanálise química dos materiais, através do espectrômetro de dispersão de energia (EDS). O espectrômetro realiza a microanálise química para a obtenção dos elementos químicos encontrados na amostra pontualmente ou em uma área pré-determinada pela microscopia eletrônica de varredura (SCREMIM, 2014).

Os sinais utilizados na análise química por EDS são gerados a partir da interação de um feixe de elétrons de alta energia com os elementos químicos da superfície da amostra. Nesse caso, de tal interação são produzidos fótons de raios-X cujos comprimentos de onda são característicos para cada elemento com o qual houve a interação. Os sinais gerados pela amostra são captados por detectores específicos e apresentados na forma de espectros de energia *versus* intensidade relativa dos picos (CHINAGLIA;CORREIA, 1997).

Desta maneira obtém-se a listagem dos compostos presentes na amostra, correspondentes aos ângulos de difração e às intensidades relativas dos picos presentes (BARDELLA, 2011), conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do gesso determinado através do EDS - 2011

Elemento	Total (%)
O	48,86
Mg	0,87
Al	0,8
S	21,46
Si	1,32
Ca	26,68
Total	100

Fonte: Yu; Brouwers (2011).

Os elementos mais abundantes observados no gesso são o Oxigênio, Cálcio, Enxofre e Silício, em quantidades menores podem ser observados o Magnésio e o Alumínio (SONG *et al.*, 2012).

Uma vez estudadas as reações, a composição e a formação dos cristais, o próximo aspecto a ser discutido é a reciclagem do material.

2.3 RECICLAGEM DO GESSO

Para 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 desta calcinação (LOU *et al.*, 2010; BARDELLA, 2011).

Em estudo com gesso reciclado proveniente de resíduos de placas de gesso, Roque *et al.* (2005) observaram que os compostos presentes nos materiais desidratados são os mesmos encontrados nos gessos comerciais.

Sendo assim, é possível utilizar o resíduo de gesso de construção como matéria-prima em processos de reciclagem, constituídos de etapas de moagem associada à calcinação. A reversibilidade das reações de transformação da gipsita em gesso (calcinação) e do gesso em gesso di-hidratado (hidratação) torna possível a reciclagem do resíduo, gerando um aglomerante reciclado, proporcionando a redução do consumo do mineral que lhe deu origem (PINHEIRO, 2011).

Para a reciclagem do material é necessária uma nova calcinação da pasta hidratada de gesso para a formação novamente do hemi-hidrato (Figura 5).

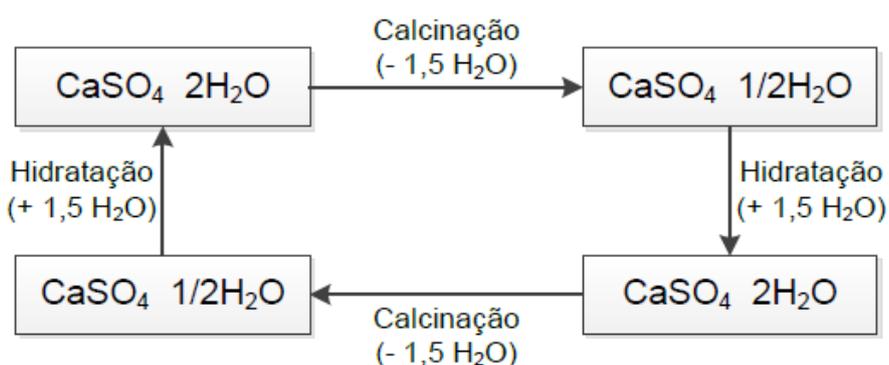


Figura 5 - Fluxograma básico referente ao ciclo de reciclagem do gesso
Fonte: Vasconcelos *et al.* (2012).

No entanto, ao passar pela nova calcinação existe uma tendência de que o tempo de pega do material seja diminuído, provavelmente por uma mudança na sua microestrutura, consistida de cristais entrelaçados em forma de placas e agulhas (FERREIRA; CORDON, 2014).

O resíduo de gesso pode conter, além do Sulfato de Cálcio di-hidratado, teores de hemi-hidratos, anidritas e outras impurezas, alterando sua composição química em relação à gipsita natural. Os cristais de di-hidrato do resíduo de gesso, devido às condições em que foram hidratados, podem apresentar morfologias diferenciadas da gipsita natural, o que pode ser contemplado na Figura 6 (KOJIMA; YASUE, 2016).

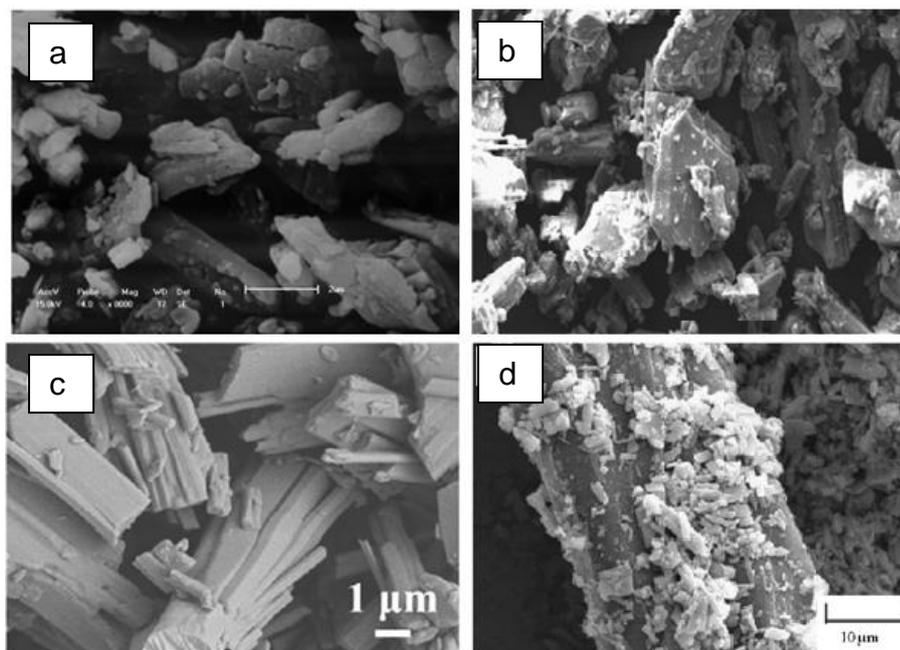


Figura 6 - Fotomicrografia do gesso reciclado no microscópio eletrônico de varredura
Fonte: a) Zuhaimi *et al.* (2015); b) Savi *et al.* (2013); c) Zhou *et al.* (2015); d) Gmouh *et al.* (2003).

As impurezas comumente observadas no gesso reciclado são o Alumínio, o Magnésio e o Ferro, porém, seus teores não representam mais do que 3% da massa observada (PINHEIRO, 2011).

2.3.1 Ciclos de reciclagem do gesso

De uma forma geral, a sequência de hidratação e calcinação do gesso tendem a reduzir parâmetros como a massa unitária, devido à redução da dimensão das moléculas de gesso e acréscimo no volume de vazios (ROSSETO *et al.*, 2015).

Cavalcanti (2006) executou experimentos reciclando gesso comum por três ciclos consecutivos, observando que as propriedades mecânicas tiveram decréscimo em seus valores ao longo dos ciclos de reciclagem.

Pinheiro (2011) realizou ciclos consecutivos de reciclagem de gesso comum, utilizando calcinação a 180 °C por 24 h. As pastas de gesso reciclado apresentaram constância ou aumento da dureza superficial, resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão em todos os ciclos. Mesmo assim nenhum ciclo atingiu os valores estipulados nas normas regulamentadoras específicas.

Guam *et al.* (2011) realizaram oito ciclos de reciclagem de gesso comum, as propriedades do estado fresco e do endurecido reduziram a cada ciclo, porém, os autores observaram que as geometrias dos cristais de gesso eram similares entre os ciclos, como pode ser observado na Figura 7.

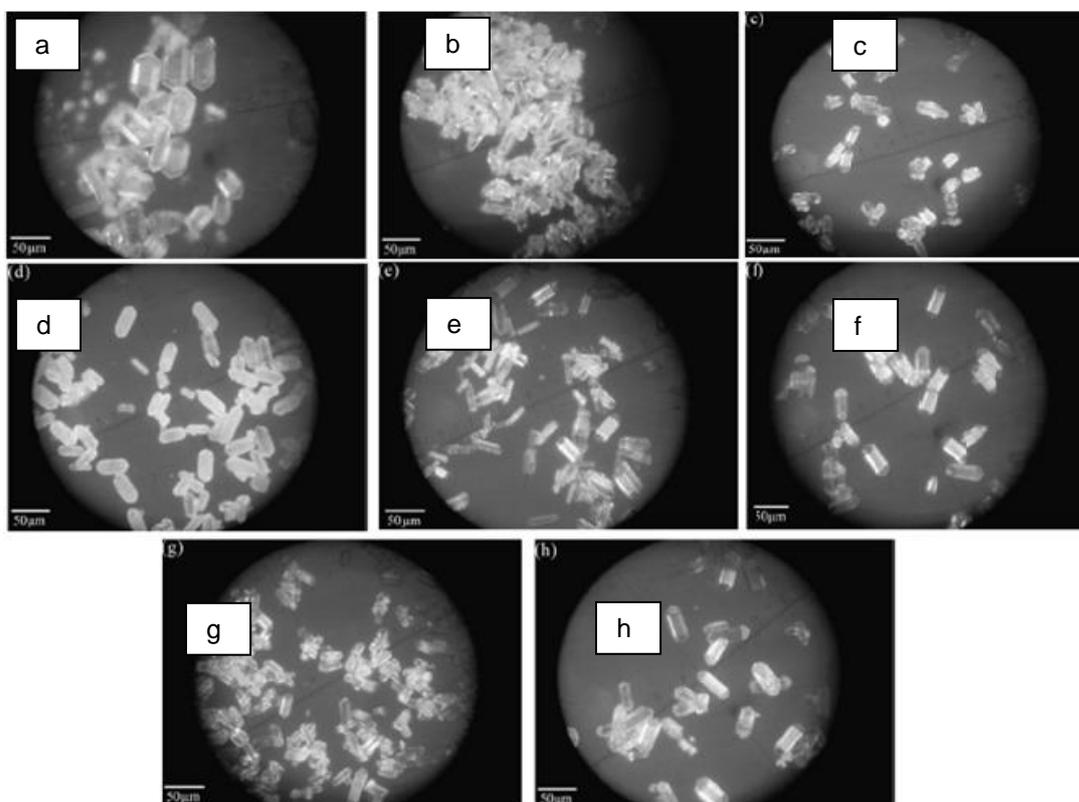


Figura 7 - Fotomicrografia do gesso reciclado. (a) 1º ciclo, (b) 2º ciclo, (c) 3º ciclo, (d) 4º ciclo, (e) 5º ciclo, (f) 6º ciclo, (g) 7º ciclo, (h) 8º ciclo
Fonte: Guam *et al.* (2011).

2.3.2 Misturas Experimentais

O estudo da reciclagem do gesso deve levar em consideração a determinação da porcentagem de mistura entre gesso comum e reciclado, sem que ocorra perda em suas propriedades, ou que estas atinjam os requisitos estipulados na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), seja como material pulverulento, da pasta no estado fresco e no estado endurecido (SAVI, 2012).

Bardella (2011) propôs misturas experimentais compostas com 50% de gesso comum e 50% com gesso reciclado a 180 °C por 24 h com relação água/gesso 0,7. A mistura não obteve os valores mínimos estipulados na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994).

Pinheiro (2011) relata que corpos de prova moldados somente com gesso reciclado não atingiram os parâmetros de compressão axial e dureza superficial apontados na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Porém, utilizando misturas entre o gesso comum e o reciclado foi possível ampliar os valores obtidos nos ensaios de resistência mecânica (PINHEIRO, 2011; SAVI, 2012).

O gesso é um aglomerante aéreo utilizado de diversas formas na construção civil, seja através da simples mistura com água ou como matéria-prima de compostos industrializados, como as chapas de gesso acartonado, assunto abordado no item 2.4.

2.4 CHAPAS DE GESSO ACARTONADO

Drywall é o sistema para construção de paredes e forros mais utilizado na Europa e nos Estados Unidos. Na parte externa a parede é similar a alvenaria. Porém, internamente são combinadas estruturas de aço galvanizado com chapas de gesso acartonadas de alta resistência mecânica e acústica, produzidas com rigoroso padrão de qualidade (SINIAT, 2016).

Segundo a Placo do Brasil (2016), o *drywall* é um sistema para forro ou parede constituído por placas de gesso pré-fabricadas, parafusadas em uma estrutura metálica leve de aço galvanizado, sobre as quais são fixadas as placas de

gesso, em uma ou mais camadas, gerando uma superfície apta a receber o acabamento final.

A preparação da mistura da pasta de gesso é feita pela dosagem de gesso, água e aditivos, que são homogeneizados no misturador, e o resultado é lançado sobre uma lâmina de papel cartão. A seguir, é aplicada, na parte superior, outra lâmina de papel cartão igual, e o componente é submetido a um sistema de calandras que dão a conformidade necessária à peça. As placas são cortadas e conduzidas ao compartimento de secagem, conforme esquema observado na Figura 8 (FREITAS, 2013).

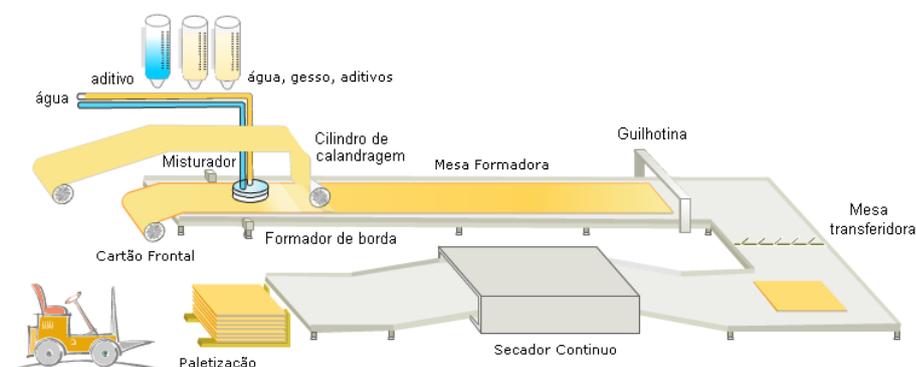


Figura 8 - Processo de produção das placas de gesso acartonado

Fonte: Freitas (2013).

Quando a hidratação é completada, o gesso foi quimicamente restaurado ao composto encontrado na natureza (di-hidrato), formando o núcleo da chapa de gesso, envolto em papel cartão (RIVEIRO *et al.*, 2016).

2.4.1 Composição das chapas de gesso acartonado

A composição típica das placas de gesso acartonado é complexa. A parcela predominante é de gesso natural hidratado (gipsita), papel, fibras de vidro, vermiculita, argilas, amido, potassa cáustica (KOH), agentes espumantes e dispersantes (CINCOTTO; JOHN, 2007).

Cincotto; John (2007) apresentam a composição química das chapas de gesso acartonado mostrada no Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química das chapas de gesso acartonado - 2007

Caracterização Química	Quantidade (%)	Caracterização Química	Quantidade (ppm)
Material seco	96,19	Sódio	161,2
Cinzas	82,89	Manganês	114,4
Nitrogênio	0,15	Fósforo	85,5
Enxofre	17,6	Boro	48,1
Cálcio	23,0	Zinco	40,2
Magnésio	7,4	Cromo	21,7
Potássio	0,1	Cobre	10,3
		Chumbo	3,6

Fonte: Cincotto; John (2007).

As chapas tipo *standart* não apresentaram melhorias na última década, mantendo a mesma composição desde 2013. Chapas com adição de silicone, como as chapas resistentes à umidade, ou adição de barita, auxiliando a retenção de feixes de raio-X, representam somente uma pequena parcela do mercado nacional. Já as chapas *standart* representam 85% de todo volume de chapas de gesso acartonado produzidos no Brasil (FREITAS, 2013).

2.4.2 Mercado do *drywall*

De acordo com dados da Associação Brasileira do *Drywall* (2016) houve consumo de cerca de 54 milhões de m² de chapas de gesso acartonado no Brasil em 2015, frente a 50 milhões de m² consumidos em 2013 (Figura 9).

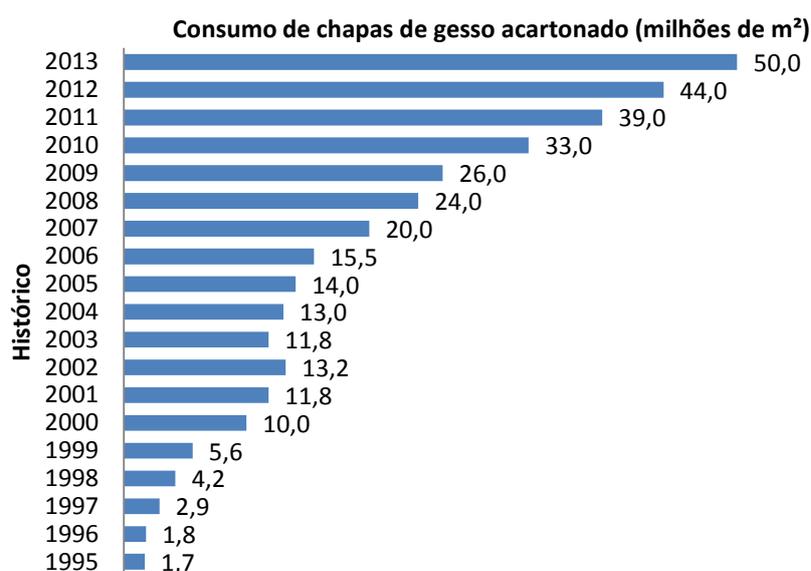


Figura 9 - Histórico de consumo de chapas de gesso acartonado no Brasil (em milhões)

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira do *Drywall* (2016).

De acordo com a Associação Brasileira do *Drywall* (2016), há grande mercado a ser explorado, ao ser observado o consumo americano, conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 10 - Consumo mundial de m² de chapas de gesso acartonado por habitante/ano

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira do *Drywall* (2016).

Bauer (2012) expõe que em 2010 foram fabricados 26,8 bilhões de m² de chapas de gesso acartonado pela rede de fabricantes americana.

Segundo dados da Placo do Brasil (2016) as regiões Sudeste e Sul dominam o mercado de *drywall*, respondendo por mais de 80% do consumo nacional, ficando o restante distribuído entre as regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte. O Estado de São Paulo lidera este segmento com 44% do consumo, seguido dos outros Estados do Sudeste com 21% do consumo e a região Sul com 16% do consumo nacional. As regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte têm participações de 11%, 6% e 2%, respectivamente.

Através de processos industrializados têm-se observado a elevação do nível de qualidade e de produtividade nas obras. O *drywall* tem destaque particular não só na rapidez de execução da sua montagem, o que favorece muito o cronograma físico-financeiro das obras, mas também nas vantagens que oferece no que diz respeito ao isolamento térmico e acústico (SINIAT, 2016).

2.4.3 Perdas na construção com *drywall*

Cincotto; John (2007) apontam as perdas na construção do *drywall*, que se apresentam elevadas devido às atividades de corte da chapa de gesso acartonado. Estima-se que entre 10 a 12% das placas de gesso acartonado são transformadas em resíduos durante a instalação, nos EUA. No Brasil a estimativa de descarte das chapas de gesso acartonado é de 5% (SINIAT, 2016).

Riveiro; Navarro (2016) expõem que somente 2% de todo resíduo de chapas de gesso acartonado são reciclados, sendo que as fábricas são as principais responsáveis pela reciclagem, pois reincorporam os resíduos na fabricação de novas chapas de gesso acartonado.

Executar o projeto de paginação durante a etapa de planejamento reduz o desperdício e o corte indevido de chapas, assim como pode otimizar o uso de recortes e sobras de chapas utilizadas até mesmo em obras anteriores (PLACO DO BRASIL, 2016).

2.4.4 Reusos alternativos do resíduo de gesso

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) instituiu a Resolução 307, estabelecendo as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. A normativa também estabeleceu critérios para classificação dos resíduos da construção civil (CONAMA, 2002).

A Resolução CONAMA n.º 431/2011, por sua vez, alterou a classificação do resíduo de gesso da classe C, que classificava resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias que permitam a sua reciclagem para a Classe B, que engloba os materiais recicláveis para outras destinações (CONAMA, 2011).

Desta forma foram realizados diversos estudos sobre a reutilização dos resíduos de gesso. Como a reincorporação no processo de produção das chapas de gesso acartonado, aditivo retardador de pega do cimento, fertilizantes e corretivos do solo (*NEW WEST GYPSUM RECYCLING*, 2016).

Papailiopolou *et al.* (2016) relata sobre a reincorporação de resíduos de gesso na fabricação de novas chapas de gesso acartonado. O autor cita que é possível inserir até 25 % de resíduo, em massa, sem haver redução dos valores de resistência mecânica. Porém, o gesso deve ser reincorporado sem a presença de papel, pois este material combustível tende a reduzir o valor obtido no ensaio de resistência ao fogo (AHMED *et al.*, 2015).

Outro segmento que tende a reutilizar o resíduo de gesso são as fábricas de cimento. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), a produção brasileira de cimento foi de aproximadamente 70 milhões de toneladas em 2013, cuja fabricação necessita da utilização de 5% de Sulfato de Cálcio (CaSO_4). Este composto utilizado como retardador do tempo de pega é proveniente da gipsita, minério do qual se extrai o gesso (CINCOTTO; JOHN, 2007). Desta forma, este volume que pode ser parcialmente substituído por resíduos do gesso, com efeitos positivos sobre o meio ambiente e assegurando a longevidade das jazidas brasileiras deste minério. (MEDINA *et al.*, 2016; BICINI; ASLAN 2016).

A adição do resíduo de gesso na produção do cimento apresentou menos vazios nos ensaios de microscopia se comparada ao minério de gipsita. Atribui-se esta melhoria de desempenho ao entrelaçamento dos cristais e ao preenchimento

dos vazios pelas partículas de gesso reciclado, geralmente menores que as de gipsita (ZHONG *et al.*, 2016).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1992) publicou um comunicado técnico citando o gesso como um insumo agrícola. Desde então, diversos autores buscam alternativas para suprir esta demanda, como a utilização de gesso reciclado (COSTA *et al.*, 2011). O uso de gesso reciclado promove inúmeros benefícios do solo, como a correção da acidez e dos teores tóxicos de Alumínio (PRACOWNIA, 2016). Atua como fornecedor de Cálcio, Enxofre e auxilia a fixação do Nitrogênio pelas plantas (CARVALHO; NASCENTE, 2014; WOLKOWSKY, 2003).

2.4.5 Reciclagem do resíduo de gesso acartonado

Campbell (2003) e Marvin (2000) relatam que é possível reciclar gesso acartonado, produzindo aglomerantes, desde que sejam removidos contaminantes incorporados no processo de geração de resíduos.

De acordo com dados da Associação Brasileira do *Drywall* (2016) quando o gesso é segregado dos demais resíduos da construção civil, é viável a reinserção do material nos seus processos de fabricação, já que o gesso volta a possuir as características químicas da sua matéria-prima, a gipsita. Entretanto, os resíduos devem estar completamente livres de quaisquer outras impurezas para que sua reutilização seja possível.

A reciclagem do gesso acartonado pode ser dividida em duas partes. Em primeiro lugar, o revestimento de papel cartão é removido do núcleo de gesso. Em segundo lugar, o núcleo de gesso é triturado através de um picador mecânico até que o material apresente a granulometria desejada (BAUER, 2012; RIVEIRO; NAVARRO, 2016).

Estima-se que 4% da produção de chapas de gesso é reciclada e retorna ao processo produtivo devido a avarias durante o processo de produção (LAWRENCE-SANSBURY; BOYLER, 2013; RIVEIRO *et al.*, 2016).

Campbell (2003) relata que uma das primeiras empresas que utilizou gesso acartonado reciclado em sua produção é a BPB do Canadá, que afirma utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho.

Nos Estados Unidos da América, estima-se que entre 10% a 12% do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção. Estas perdas são significativas e ocorrem devido às atividades de corte das placas durante a aplicação do material (CAVALCANTI, 2006; GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL, 2007).

A Knauf possui central de reciclagem em Iphofen na Alemanha, com capacidade de 20 ton h⁻¹ (CINCOTTO; JOHN, 2007). A empresa dinamarquesa *Gipsrecycling* também opera neste mercado e desenvolveu containers especiais onde o resíduo fica protegido da chuva (MARVIN, 2000).

Cavalcanti (2006) cita a empresa canadense *New West Gypsum Recycling*, que desde 1986 recicla placas de gesso acartonado. Esse processo foi desenvolvido na Dinamarca e desde 2001 é amplamente utilizado no país (PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS, 2016).

Alguns países da Escandinávia obtiveram taxa recorde mundial de até 80% de reciclagem de chapas *drywall*, tanto para construções novas ou resíduos de demolição (NWGR, 2016).

A unidade de reciclagem é móvel e compacta, Figura 11. Várias instalações de processamento de pequeno porte situadas perto do local de geração ou o usuário final podem assim ser atendidos pela mesma unidade de reciclagem (NWGR, 2016).



Figura 11 - Unidade de reciclagem de chapas de gesso acartonado móvel
Fonte: NWGR (2016).

A unidade de reciclagem remove eficazmente todos os tipos de contaminantes, como pregos, parafusos e outras impurezas, para então produzir

gesso reciclado que será incorporado nas chapas de gesso, tornando possível aos fabricantes de placas de gesso acartonado substituírem cerca de 30% da matéria-prima pelo material reciclado, desenvolvendo um processo que pulveriza o núcleo de gesso e remove quase todo o papel cartão, deixando o gesso reciclado pronto para uso (NWGR, 2016).

Ainda assim, assume-se que, após o processamento dos resíduos de placas de gesso, 7,5%, em peso, é de uma mistura entre papel cartão com gesso fortemente aderido (RIVEIRO *et al.*, 2014).

Serão abordados no item 2.5 a caracterização do gesso e todos os processos envolvidos que servirão como base para melhor conhecimento do material.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO

Antes mesmo de qualquer ação ou ensaio é importante conhecer o material que será estudado. Neste item serão abordados os assuntos relevantes à caracterização do material.

2.5.1 Propriedades físicas do pó

2.5.1.1 Temperatura e tempo de calcinação do resíduo de gesso moído

A recuperação da capacidade aglomerante do gesso ocorre através do processo de calcinação. Através da calcinação, o resíduo de gesso que se apresenta como di-hidrato de Cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é convertido em gesso reciclado ($\text{CaSO}_4 \cdot 3/2\text{H}_2\text{O} + 1/2\text{H}_2\text{O}$). A calcinação é feita submetendo-se o resíduo de gesso a queima com temperaturas controladas (SAVI, 2012).

A temperatura teórica para que a reação de desidratação ocorra é de 106°C, porém a indústria utiliza temperaturas superiores, entre 145 a 170 °C (RIBEIRO, 2006).

Fiano; Pimentel (2009) destacam que o gesso reciclado calcinado a 180 °C por 24 h atende às especificações físicas de gesso fino para fundição.

Harada; Pimentel (2009) obtiveram resultados na reciclagem de gesso de fundição superiores aos de gesso comum, calcinando-o a temperatura de 160 °C com tempo de queima de 24 h.

Bardella (2011) obteve tempo de início e fim de pega atendeu os limites estabelecidos na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) para temperatura de calcinação de 200 °C por 24 h, encontrando partículas de menores dimensões, apresentando granulometria mais próxima a do gesso comum.

Estudos realizados por Lima; Camarini (2011), com calcinação do gesso a temperatura de 120 °C, 150 °C, e 200 °C, com tempos de permanência em estufa por períodos de 1, 5, 8, 16 e 24 h, demonstram que a calcinação a temperatura de 150 °C e 200 °C, com períodos de permanência de uma hora, apresentam valores de resistência mecânica superiores, equiparando-se com as demais.

Savi (2012) realizou experimentos de reciclagem do gesso, observando que as maiores resistências foram obtidas com calcinação do gesso a temperaturas de 180 °C a 190 °C por 24 h.

Erbs *et al.* (2015) realizaram estudos sobre a calcinação do gesso proveniente das chapas de gesso acartonado e de gesso comum a temperatura de 160 °C, 180 °C, e 200 °C, com tempos de permanência em estufa por períodos de 1, 2, 4, 8, e 24h. Os autores concluíram que a calcinação a temperatura de 180 °C com período de permanência de 24 horas, foi a que obteve os melhores resultados, seja no ensaio de tempo de pega quanto nos ensaios de resistência mecânica de compressão axial, tração na flexão e dureza superficial.

Na Tabela 4 são apresentadas resumidamente as temperaturas e o tempo de permanência na estufa dos principais parâmetros encontrados na literatura.

Tabela 4 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre temperatura relacionada com tempo de permanência em estufa - 2016

Fonte	Calcinação	
	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Ribeiro (2006)	145 °C a 170 °C	½ h
Harada; Pimentel (2009)	160 °C	½ h
Fiano; Pimentel (2009)	180 °C	24 h
Hermes (2011)	150 °C	½ h
Bardella (2011)	200 °C	24 h
Lima; Camarini (2011)	150 °C e 180 °C	1, 5, 8, 16 e 24 h
Savi (2012)	180 °C e 190 °C	24 h
Erbs <i>et al.</i> (2015)	160 °C, 180 °C e 200 °C	1, 2, 4, 8, e 24 h.
Rosseto <i>et al.</i> (2015)	160 °C	1 h

No item 2.5.1.2 ao 2.5.1.4 irá ser explanado as características físicas do pó, abordando aspectos da granulometria, módulo de finura e massa unitária.

2.5.1.2 Granulometria

A granulometria de um material representa a distribuição dos tamanhos de seus grãos, sendo um indicador da plasticidade da pasta e da lisura na superfície de acabamento (BARDELLA, 2011).

Na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a) é descrito o procedimento para execução do ensaio de granulometria, utilizando peneiramento mecânico sequencial, em peneiras normatizadas com aberturas das malhas de 0,840 mm, 0,420 mm, 0,210 mm e 0,105 mm. Segundo Bardella (2011), os gessos comerciais apresentam granulometria menor que os gessos reciclados, logo a taxa de hidratação aumenta com a diminuição do tamanho das partículas, pois há aumento na área específica do material.

2.5.1.3 Módulo de finura

De acordo com a NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a), a determinação do módulo de finura, um indicador da distribuição dos tamanhos dos grãos, representa a soma das porcentagens retidas nas peneiras de série normal, acumuladas em massa, dividida por 100.

As peneiras de série normal, fazem parte de um conjunto que possuem as aberturas das malhas, 0,840 mm, 0,420 mm, 0,210 mm e 0,105 mm, a classificação é atribuída conforme valores descritos no Quadro 3 NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a).

Classificação do gesso	Módulo de finura
Gesso fino para revestimento	< 1,10
Gesso grosso para revestimento	> 1,10
Gesso fino para fundição	< 1,10
Gesso grosso para fundição	> 1,10

Quadro 3 – Módulo de finura normatizado pela NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a)
Fonte: Adaptado de NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a).

O valor do módulo de finura quantifica se o agregado é mais grosso ou mais fino, e guarda a relação de proporcionalidade. Assim, quanto maior o módulo de finura, mais grosso é o material (SAVI, 2012).

Bardella (2011) realizou ensaios e tabelou o módulo de finura dos gessos comerciais e gessos reciclados a 150 °C, 180 °C, 200 °C conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Módulo de finura do gesso reciclado - 2011

Gesso	Temperatura (°C)	Módulo de finura
Gesso comum		0,26
Gesso Reciclado 1	150 ° C	1,31
Gesso Reciclado 2	180 ° C	1,17
Gesso Reciclado 3	200 ° C	0,92

Fonte: Adaptado de Bardella (2011).

2.5.1.4 Massa unitária

A massa unitária é definida pela NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a) como relação entre a massa não compactada do material e o volume, verificada por meio dos procedimentos e equipamentos definidos nesta norma.

A massa unitária é definida por Savi (2012) como a quantidade de massa possível de ser acomodada em recipiente de volume unitário, segundo condições padronizadas de adensamento e que pode representar ao mesmo tempo a distribuição granulométrica, formas dos grãos e capacidade de empacotamento.

Para massa unitária, o limite mínimo determinado pela NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) é de 700 kg m⁻³. No entanto, a massa unitária do gesso reciclado é inferior à massa unitária do gesso comum (PINHEIRO, 2011).

Savi (2012) destaca uma grande variabilidade nos valores, tanto para o gesso comum, quanto para o reciclado. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa unitária do gesso comum e do gesso reciclado - 2012

Tipo	Temperatura (° C)	Massa Unitária (kg m⁻³)
Gesso comum 1		646,18
Gesso comum 2		630,00
Gesso comum 3		655,00
Gesso Reciclado 1	150 °C	614,86
Gesso Reciclado 2	180 °C	549,57
Gesso Reciclado 3	200 °C	531,40

Fonte: Adaptado de Savi (2012).

Diversos autores descrevem o valor da massa unitária observados em seus experimentos com reciclagem de gesso comum, estando os principais valores encontrados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso reciclado - 2016

Autor	Massa Unitária (kg m⁻³)
John; Antunes (2002)	594,00
Carvalho <i>et al.</i> (2008)	504,00
Mesquita; Póvoas (2014)	649,38
Moura <i>et al.</i> (2014)	596,94
Vimmrová <i>et al.</i> (2014)	670,00

Conhecidas as características do material em seu estado pulverulento, serão descritas no item 2.5.2 as propriedades do estado fresco.

2.5.2 Propriedades no Estado Fresco

Durante a hidratação da pasta de gesso são, geralmente, observadas características de trabalhabilidade, tempo de pega e variação dimensional das pastas (PINHEIRO, 2011).

2.5.2.1 Preparação da pasta de gesso

Segundo Ribeiro (2006), a pasta de gesso deve ser preparada em quantidade suficiente para ser aplicada antes do início da pega, pois a pasta estando em estado de endurecimento não se tornará novamente utilizável com adição de água.

Para preparar o gesso é necessário utilizar água e recipientes limpos, colocar primeiro a água no recipiente e só depois juntar o gesso misturando-se lentamente. Esta mistura deverá ser feita polvilhando o gesso sobre a água, conforme pode ser observado na Figura 12 (RIBEIRO, 2006).

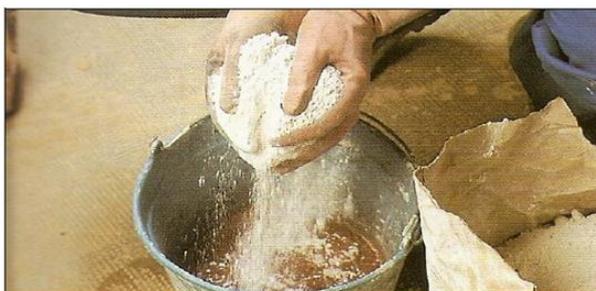


Figura 12 - Polvilhamento do pó de gesso
Fonte: Ribeiro (2006).

A quantidade de pó utilizada é a necessária para que praticamente toda quantidade de água da superfície seja absorvida pelo pó. Seguindo um período de descanso em torno de 2 min., para a dissolução do hemi-hidrato. Após esta etapa foi feita mistura da pasta por mais 1 min., atingindo consistência mínima (PRS, 2016; PINHEIRO, 2011; CAVALCANTI, 2006).

2.5.2.2 Relação água / gesso

A relação água/gesso (a/g) é a proporcionalidade da água que fornece trabalhabilidade necessária a seu manuseio. Em geral, quanto menor a relação a/g, mais rápida é a pega do material (PINHEIRO, 2011).

A quantidade de água, necessária para que a pasta de gesso adquira consistência adequada à sua utilização, depende da superfície específica, da finura, da forma e da distribuição dos grãos de gesso. Quanto maior a superfície específica, maior a área de reação, mais rápida a dissolução e menor o período de indução do material conseqüentemente, mais rápido o início de pega do material (PINHEIRO, 2011).

Bardella (2011) relata que o aumento da relação a/g altera a distribuição dos poros, ou seja, a adição de água faz com que a pasta passe a ter mais poros, relativamente, maiores. Essa quantidade de água excedente evapora e confere porosidade ao gesso, o que aumenta a sua capacidade de deformação e diminui sua resistência mecânica.

Para Savi (2012), a quantidade de água normalmente utilizada na produção da pasta de gesso varia entre 50 e 70%, devendo ser evitado o uso de água de amassamento em taxas acima de 80%, pois o excesso de água incorporado na mistura pode gerar poros após a cura do material. Observa-se também que a quantidade de água utilizada em obra, em relação à massa de gesso, está na faixa de 0,60 kg L⁻¹ a 0,80 kg L⁻¹ (BARDELLA, 2011).

Porém as pastas de gesso comum e reciclado apresentam características distintas. As pastas de gesso comum com fator a/g 0,80 ou superior apresentam aspecto líquido, as pastas de gesso reciclado, nas mesmas condições de mistura, apresentam aspecto cremoso (SAVI, 2012).

Roque *et al.* (2005); Pinheiro (2011); Ribeiro (2006); Savi (2012) e Erbs *et al.* (2015) utilizaram relação a/g 0,7 em seus estudos, relatando que as pastas de gesso reciclado apresentam aspecto mais pastoso, enquanto as pastas de gesso comum tem aspecto mais fluido.

2.5.2.3 Tempo de pega

O tempo de início de pega deve ser entendido como o intervalo de tempo entre a mistura do gesso com a água e o instante em que começa o processo de endurecimento do material. A partir deste instante a pasta não deve ser manuseada (RIBEIRO, 2006; MELO, 2012).

Ribeiro (2006); Pinheiro (2011) e Bardella (2011) citam que a relação a/g, é o parâmetro de maior influência na cinética da reação de hidratação e conseqüentemente, na pega do gesso. Quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior o período de indução e retardamento no início da precipitação dos cristais de di-hidrato, pois as distâncias entre as partículas aumentam com o aumento da relação a/g 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 (BARDELLA, 2011).

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) são descritos valores para o tempo de pega para pastas de gesso fino e grosso para revestimento e fundição, estes valores são demonstrados no Quadro 4.

Classificação do gesso	Tempo de pega (min) (NBR 13207)	
	Início	Fim
Gesso fino para revestimento	> 10	> 45
Gesso grosso para revestimento	> 10	> 45
Gesso fino para fundição	4 - 10	20 - 45
Gesso grosso para fundição	4 - 10	20 - 45

Quadro 4 – Tempo de pega normatizado pela NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994)
Fonte: Adaptado de NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994).

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 comum (BARDELLA, 2011).

2.5.2.4 Inserção de resíduos e sua alteração no tempo de pega

Cavalcanti *et al.* (2012) inseriram resíduos de gesso moídos na proporção de 5 e 10%, em massa, observando que o tempo de pega reduziu nos dois casos. Mesquita e Póvoas (2014) encontraram valores inferiores ao limite da NBR 13207

(ASSOCIAÇÃO..., 1994), alguns os valores encontrados na literatura são demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre o tempo de pega do gesso comum e com adição de resíduos - 2016

Composição	Tempo de pega (min)		Autor
	início	fim	
Gesso comum	13	27	Cavalcanti et al. (2012)
5% resíduo	3	14	Cavalcanti et al. (2012)
10% resíduo	23	11	Cavalcanti et al. (2012)
25% resíduo	6	35	Tazawa (1998)
50% resíduo	15	43	Tazawa (1998)
100% resíduo	4	13	Mesquita e Póvoas (2014)

Para completar a caracterização do material serão abordados os aspectos no estado endurecido, como a resistência à flexão na tração, compressão axial e dureza superficial.

2.5.3 Propriedades da pasta no estado endurecido

As propriedades físicas e mecânicas do gesso, no estado endurecido, são influenciadas diretamente pela formação de sua microestrutura, em particular, pela porosidade e pela forma de entrelaçamento dos cristais (BARDELLA, 2011).

2.5.3.1 Resistência à tração na flexão

A resistência à tração na flexão é outro indicador de resistência mecânica, representando a capacidade que um determinado corpo possui de resistir a esforços transversais. Os gessos nacionais, apresentam resistência à tração na flexão que

variaram de 4,40 a 10,50 MPa, porém os reciclados apresentam valores de resistências à tração entre 0,7 e 3,5 MPa (SAVI, 2012).

Os ensaios de resistência à flexão, com aplicação de carga de ruptura no centro de corpos de prova prismáticos, apoiados nas extremidades, são realizados em conformidade com a NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO..., 1991), na qual é descrito o método para executar o ensaio, porém não apresenta valores mínimos de resistência a serem alcançados.

Serna *et al.* (2012) e Yu; Brouwers (2011) relatam uma resistência à tração na flexão de 3,9 MPa, aos 28 dias, todos para corpos de prova de gesso comum produzidos para relação a/g de 0,7. Dai; Fan (2015) e Vasconcelos *et al.* (2012) obtiveram valores de 4,4 MPa. Soares (2005); Jiménez-Rivero *et al.* (2014) e Guan *et al.* (2011) obtiveram valores de 3,1; 3,2 e 3,4 MPa, respectivamente para os parâmetros de tração na flexão utilizando corpos de prova moldados com gesso reciclado.

2.5.3.2 Resistência à compressão axial

Para Bauer (2012) a resistência à compressão axial é um dos indicadores da resistência mecânica e representa a capacidade que um determinado corpo tem para resistir aos esforços de compressão. As pastas de gesso endurecidas podem atingir resistências à compressão entre 5 e 15 MPa (BAUER, 2012; SAVI, 2012).

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) são estabelecidos valores maiores do que 8,40 MPa para a resistência à compressão axial do gesso.

Carvalho *et al.* (2008) ao estudar o reaproveitamento do entulho de gesso para a sua reutilização na forma de pasta, também observaram que as propriedades dos gessos comerciais e reciclados foram semelhantes, destacando somente que a resistência mecânica obtida pelo gesso reciclado foi inferior à do gesso natural.

Essa diferença encontrada nos resultados é atribuída ao tamanho das partículas que compõem os gessos. Como os gessos reciclados são bem mais grossos do que os gessos comerciais, constata-se conformidade com a literatura técnica que trata do assunto para justificar a maior resistência à compressão axial alcançada pelos gessos comerciais (BARDELLA, 2011).

Cincotto; John (2007) descrevem sobre a porosidade do gesso reciclado devido à água de amassamento, que tem sua origem na evaporação do excesso de água que não consumida durante o processo de hidratação.

Para alcançar trabalhabilidade satisfatória da pasta de gesso, é necessária utilização de teores de água superiores a 50% da massa do gesso. Durante a reação é consumida 0,186 gramas de água para cada grama de gesso, resultando uma estrutura altamente porosa e, conseqüentemente, com resistência mecânica reduzida (CINCOTTO; JOHN, 2007).

Guam *et al.* (2011) cita o aspecto da estrutura cristalina, afirmando que o desenvolvimento da resistência mecânica está relacionado ao entrelaçamento da estrutura cristalina e aos defeitos dos cristais de gipsita, influenciando 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.

Os principais valores de resistência à compressão axial, do gesso comum e reciclado são demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre a resistência à compressão axial em ensaios com gesso comum e reciclado - 2016

Autor	Material	Temperatura de calcinação	Relação a/g	Resistência à compressão axial (MPa)
Gmouh <i>et al.</i> (2003)	Gesso reciclado	150 °C	0,7	9,06
Roque <i>et al.</i> (2005)	Gesso comum	150 °C	0,8	3,90
	Gesso reciclado		0,8	4,00
Ribeiro (2006)	Gesso comum	140 °C	0,90	12,80
	Gesso reciclado	160 °C	0,90	13,00
Cardoso <i>et al.</i> (2009)	Gesso reciclado	160 °C	0,7	8,90
Schmitz; Póvoas (2009)	Gesso comum	180 °C	0,5	12,88
	Gesso reciclado		0,5	10,53
Nascimento; Pimentel (2010)	Gesso comum	180 °C	0,80	2,33
	Gesso reciclado		0,47	2,51
Peng <i>et al.</i> (2010)	Gesso reciclado	200 °C	0,6	9,80
	Gesso comum	150 °C	0,70	6,60
Lima; Camarini (2011)	Gesso reciclado	180 °C	0,70	10,00
	Gesso reciclado	200 °C	0,70	8,20
Yu; Brouwers (2011)	Gesso reciclado	160 °C	0,4	8,60
	Gesso comum		0,9	4,67
Vasconcelos <i>et al.</i> (2012)	Gesso reciclado	150 °C	0,9	3,76
	Gesso comum		0,7	7,54
Serna <i>et al.</i> (2012)	Gesso reciclado	150 °C	0,7	7,54
Silva (2013)	Gesso reciclado	180 °C	0,6	8,90
	Gesso comum		0,70	8,50
Moura <i>et al.</i> (2014)	Gesso reciclado	180°C	0,70	4,20
	Gesso comum		0,70	10,59
Dai; e Fan (2015)	Gesso comum	170 °C	0,70	10,59
	Gesso reciclado		0,70	8,68

2.5.3.3 Dureza superficial

A dureza é uma propriedade do material que permite qualificá-lo em diversos aspectos quanto à sua resistência, trabalhabilidade e durabilidade. É caracterizada como a resistência que os corpos possuem de serem riscados (BAUER, 2012).

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) são estabelecidos valores maiores que 30 N mm⁻² para a dureza superficial.

Ribeiro (2006) também obteve valores de 34,50 a 41,30 N mm⁻² para a dureza superficial analisando o gesso reciclado calcinado a temperatura de 140 °C pelo período de 30 minutos.

Os resultados dos ensaios de dureza, obtidos por Lima; Camarini (2011), indicam que as pastas com relação a/g 0,70 obtiveram valores dentro dos limites mínimos da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) e pastas com relação a/g 1 resultaram valores abaixo do valor mínimo estipulado pela norma.

Savi (2012) demonstra valores obtidos para o gesso reciclado apontando que alguns são inferiores aos especificados pela norma técnica, Tabela 10.

Tabela 10 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso reciclado - 2012

Autor	Temperatura de calcinação	Relação a/g	Dureza (N mm ⁻²)
Ribeiro (2006)	140 °C	0,90	34,50
	160 °C	0,90	41,30
Fiano; Pimentel (2009)	180 °C	0,90	12,80
Harada; Pimentel (2009)	160 °C	0,60	38,80
	180 °C	0,60	39,37
	200 °C	0,60	41,77
Nascimento; Pimentel (2010)	160 °C	0,48	57,05
	180 °C	0,47	39,94
	200 °C	0,46	27,27
Lima; Camarini (2011)	150 °C	0,70	11,08
	150 °C	1,00	11,97
	200 °C	0,70	31,20
Moura <i>et al.</i> (2014)	200 °C	1,00	30,99
	180 °C	0,7	31,12

Fonte: Adaptado de Savi (2012).

Para finalizar o capítulo de revisão será montado um quadro resumo relacionando os autores utilizados nesta pesquisa com os ensaios e características empregados.

2.5.4 Principais autores e estudos realizados

Conforme citado no item 2.5, diversos são os ensaios utilizados para caracterização do gesso, assim como os autores que os realizaram, um quadro relacionando o autor com o ensaio realizado foi construído e é apresentado no Quadro 5.

	Calцинаção	Módulo de Finura	Massa unitária	Granulometria	Tempo de Pega	Inserção de resíduos	Relação a/g	Tração na Flexão	Compressão Axial	Dureza Superficial
Ribeiro (2006)	X				X		X		X	X
Fiano; Pimentel (2009)	X									X
Harada; Pimentel (2009)	X									X
Bardella (2011)	X	X		X	X		X		X	
Rosseto <i>et al.</i> (2013)	X									
Lima; Camarini (2011)	X								X	X
Savi (2012)	X	X		X			X	X		X
Erbs <i>et al.</i> (2015)	X						X			
John; Antunes (2002)			X							
Carvalho <i>et al.</i> (2008)			X						X	
Mesquita; Póvoas (2014)			X			X	X			
Moura <i>et al.</i> (2014)			X						X	X
Vimmrová <i>et al.</i> (2014)			X							
Silva (2013)				X					X	
Pinheiro (2011)					X		X			
Melo (2012)					X					
Tazawa (1998)						X				
Cavalcanti <i>et al.</i> (2012)						X				
De Millito (2001)							X			
Roque <i>et al.</i> (2005)							X		X	
Soares (2005);								X		
Serna <i>et al.</i> (2012)								X	X	
Vasconcelos <i>et al.</i> (2012)								X	X	
Yu; Brouwers (2011)								X	X	
Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014)								X		
Dai; Fan (2015)								X	X	
Bauer (2012)									X	X
Gmouh <i>et al.</i> (2003)									X	
Cincotto; John (2007)									X	
Cardoso <i>et al.</i> (2009)									X	
Schmitz; Póvoas (2009)									X	
Nascimento; Pimentel (2010)									X	X
Peng <i>et al.</i> (2010)									X	
Guam <i>et al.</i> (2011)									X	

Quadro 5 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre os ensaios realizados relacionados com os autores abordados

Desta forma, conclui-se o capítulo de revisão da bibliografia, que norteou os experimentos descritos no capítulo 3, auxiliando a determinação dos materiais e métodos utilizados no estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordados os materiais utilizados e os ensaios laboratoriais realizados para determinação das propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do gesso reciclado no estado fresco e endurecido.

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A reversibilidade das reações de desidratação do gesso di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apontados na revisão bibliográfica norteou os experimentos realizados.

Neste sentido, foi adotado neste estudo um processo de reciclagem do resíduo de chapas de gesso acartonado e do gesso comum, constituído das etapas de moagem, calcinação e determinação das propriedades ao longo de cinco ciclos de reciclagem, conforme demonstrado na Figura 13.

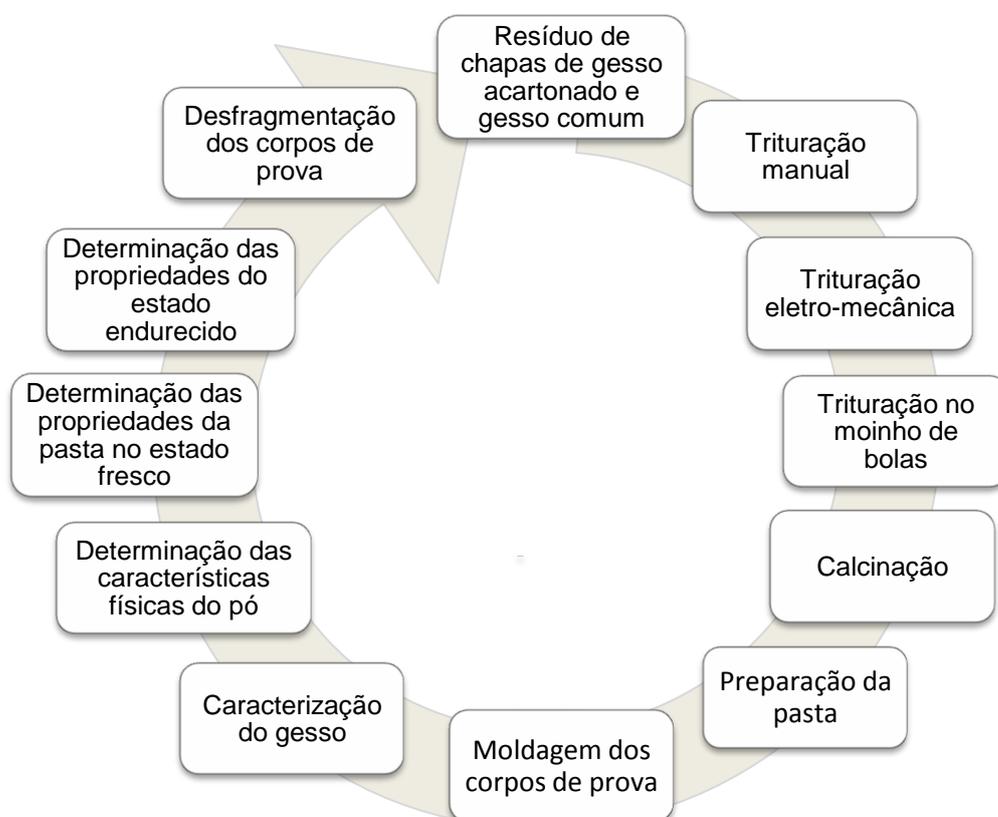


Figura 13 - Ciclo de reciclagem dos resíduos de chapa de gesso acartonado e gesso comum

Cada fase do processo foi realizado em um laboratório e instituição específicos, conforme apresentado no Quadro 6.

Etapa da reciclagem	Laboratório	Instituição
Trituração manual	Residência do aluno	Residência do aluno
Trituração eletro-mecânica	Residência do aluno	Residência do aluno
Trituração no moinho de bolas	Laboratório do núcleo de pesquisas tecnológicas - laboratório geral	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Calcinação	Laboratório de pesquisa	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Ensaio de granulometria	Laboratório de agregados	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Ensaio de massa unitária	Laboratório de pesquisa e extensão	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Ensaio de início e fim de pega	Laboratório de aglomerantes e argamassas	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Moldagem dos corpos de prova cúbicos 5x5x5 cm para ensaio de compressão	Laboratório de Solos	IFSC - Campus Canoinhas
Moldagem dos corpos de prova prismáticos 4 x 4 x 16 cm para ensaio de tração na compressão e dureza superficial	Laboratório de pesquisa e extensão	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
Rompimento dos corpos de prova (compressão, dureza, tração na flexão).	Laboratório de prensas	UTFPR - Campus Curitiba - sede Ecoville
MEV	Centro multiusuário de caracterização de materiais	UTFPR - Campus Curitiba - sede Centro
EDS	Centro multiusuário de caracterização de materiais	UTFPR - Campus Curitiba - sede Centro
Desfragmentação dos corpos de prova	Residência do aluno	Residência do aluno

Quadro 6 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos

Para preparação do material para ensaio foram coletados 150 kg de descarte de resíduos de chapas de gesso acartonado, do tipo comum ou *standard*, com 12,5 mm de espessura, oriundos do corte ou perda do processo de execução de forros e paredes de *drywall*.

As sobras do corte de chapas de gesso acartonado, que serviram de matéria-prima para a presente pesquisa, foram coletadas em duas obras em Curitiba no dia 04 de maio de 2015. Em posse deste resíduo adotou-se a metodologia para produção do material na forma de pó. Na mesma data foram adquiridas duas embalagens de 40 kg de gesso comum em Curitiba.

Em posse dos materiais utilizou-se a metodologia apresentada no item 3.2 para a preparação das amostras.

3.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Os resíduos das chapas de gesso acartonado foram recortados em filetes de aproximadamente 3 cm pelo comprimento total do resíduo (Figura 14) com a utilização de estiletes retráteis, facilitando o processo de trituração manual.



Figura 14 - Filetes de resíduos de chapas de gesso coletadas de obras da região de Curitiba

Preparados os filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado iniciou-se o processo de trituração manual, conforme descrito no item 3.3

3.3 TRITURAÇÃO MANUAL

Para realização deste processo foi adaptado um cilindro manual utilizado para prensagem de massas. O equipamento dispunha de rolos lisos, regulagem de

distância entre os cilindros e engrenagens acopladas diretamente no eixo, (Figura 15).

Os filetes de resíduos de chapas com espessura de 12,5 mm eram posicionados perpendicularmente entre os eixos do cilindro, cuja distância era ajustada para 10 mm. Conforme a manivela era girada o resíduo era pressionado contra as paredes do cilindro, desfragmentando a massa de gesso.



Figura 15 - Separação manual da massa de gesso do cartão

Desta forma, o papel cartão que reveste as chapas de gesso acartonado foi separado da massa de gesso através da compressão exercida pelos cilindros no resíduo (Figura 16).



Figura 16 - Descolamento mecânico do cartão aderido no gesso após a passagem no cilindro manual

Mesmo assim, no fim do processo uma quantidade de gesso ainda permaneceu aderida ao papel cartão (Figura 17).



Figura 17 – Gesso aderido no papel cartão após a segunda passagem no cilindro manual

Os 150 kg de resíduos produziram 83 kg de gesso provenientes do interior das chapas de gesso acartonado, ou seja, 55,33% da massa de resíduo pode ser aproveitada no processo. Os 67 kg restantes eram resultado do papel cartão que reveste chapas de gesso acartonado, com gesso fortemente aderido.

Este processo foi realizado uma única vez com os resíduos de chapas de gesso acartonado, pois uma vez removido o papel da massa de gesso todo material era conduzido à trituração eletro-mecânica.

3.4 TRITURAÇÃO ELETRO-MECÂNICA

Após a trituração do material no cilindro manual os resíduos de gesso apresentavam partículas de diversas granulometrias, sendo necessário desenvolver um mecanismo que pudesse reduzir esta granulometria.

Analisando o processo de trituração utilizado por Erbs *et al.* (2015), projetou-se um mecanismo similar para trituração do resíduo de gesso.

A ideia central do projeto era utilizar o atrito proporcionado entre dois cilindros de alumínio e as partículas de gesso para cominuição da sua dimensão.

O mecanismo deveria possuir regulagem de distância entre os cilindros, assim como um motor ligado diretamente ao eixo. Desta forma foi desenvolvido o projeto da Figura 18.

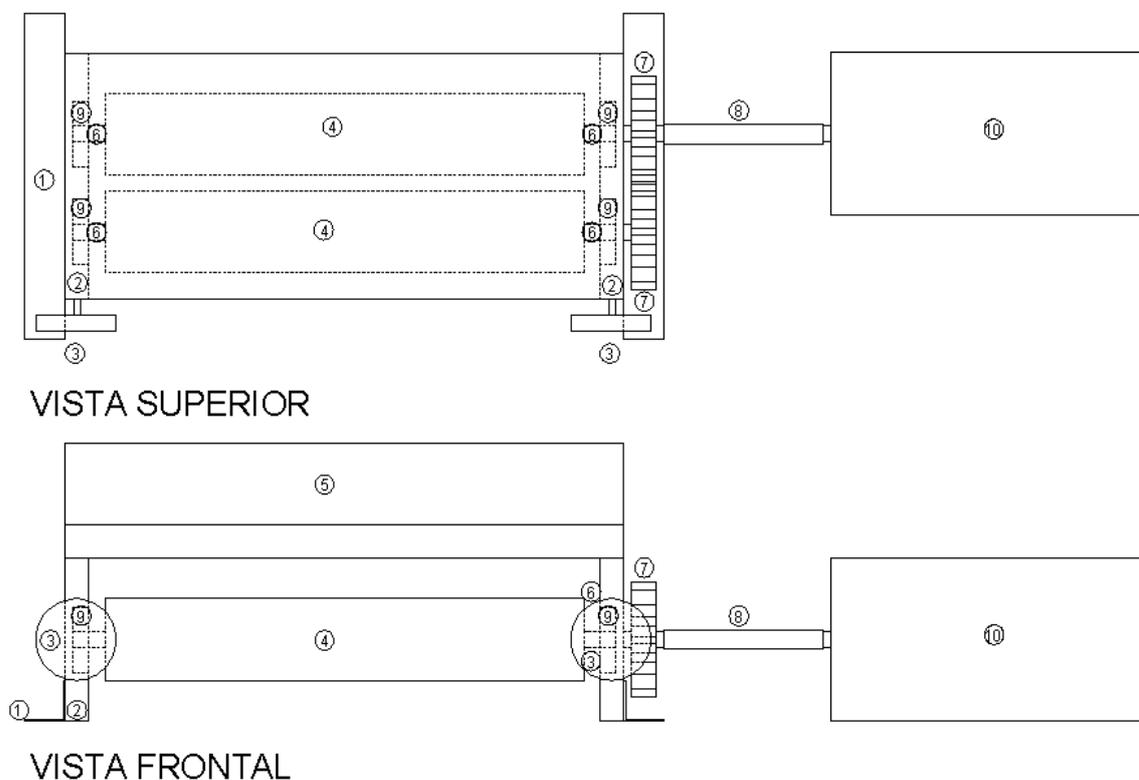


Figura 18 – Projeto do triturador eletro-mecânico

Para execução do projeto foi realizado o levantamento de material que seria utilizado para produção do cilindro, Quadro 7.

Legenda	Descrição	Quantidade
1	Cantoneira 1"x1"x1mm	2 unidades
2	Placa retangular 100x150x15mm	2 unidades
3	Botoeira para regulagem de espessura dos cilindros	2 unidades
4	Cilindros $\varnothing 50\text{mm} \times 300\text{mm}$	2 unidades
5	Cuba para depósito do material 150x300 mm	1 unidade
6	Eixos do mecanismo $\varnothing 10\text{mm}$	2 unidades
7	Engrenagens $\varnothing 70 \times 60$ mm	2 unidades
8	Luva de ligação eixo-motor $\varnothing 15\text{mm}$	1 unidade
9	Rolamentos $\varnothing 27 \times 12$ mm	4 unidades
10	Motor bifásico 600 W c/ 300 r.p.m.	1 unidade

Quadro 7 – Legenda dos materiais estimados para fabricação do cilindro eletro-mecânico

Em posse das peças relacionadas foi construído o triturador eletro-mecânico para a trituração do resíduo do gesso, Figura 19.

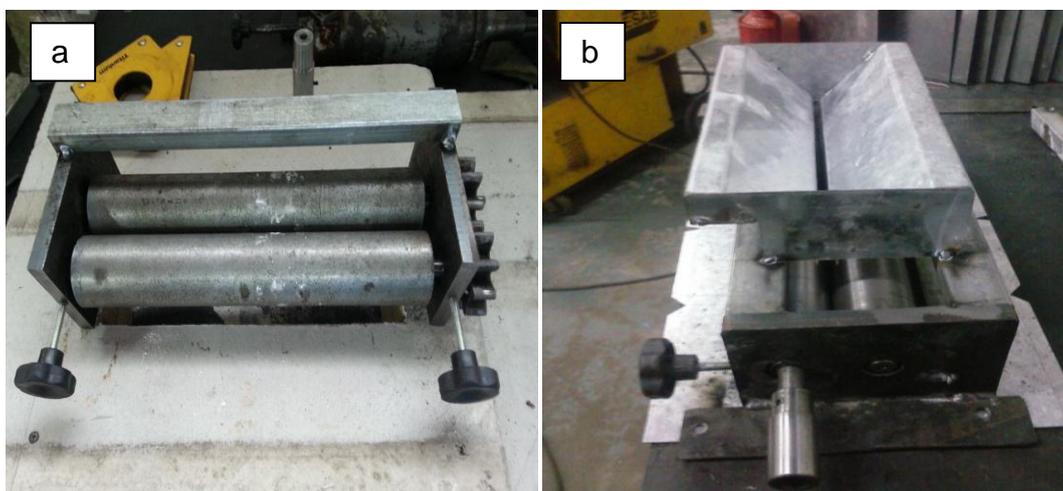


Figura 19 - Cilindro eletro-mecânico desenvolvido para trituração do gesso
a) vista frontal b) vista lateral

Tal aparato dispunha de regulagem da distância entre os cilindros, cuba para carregamento do material, rolamentos no eixo, botão de emergência e um motor com potência de 600 W instalado diretamente em um dos eixos do cilindro, gerando uma rotação de 300 r.p.m.

O gesso era triturado iniciando o processo com espaçamento de 10 mm entre os cilindros, desta forma, colocava-se o material na cuba de contenção onde o material descia por gravidade até os cilindros paulatinamente através de uma abertura no fundo da cuba, a própria vibração da máquina regia a descida do material pela cuba até os cilindros.

O material era reprocessado quatro vezes, em cada processamento a distância entre os cilindros era reduzida em 2 mm. Após a passagem pelos cilindros o material caía diretamente em sacos plásticos e era armazenado para repetição do processo de moagem.

Na última passagem pelo cilindro eletromecânico a distância entre os cilindros era ajustada para 0,5 mm, ao final do processo de trituração eletromecânica a redução da granulometria das partículas era notável, como pode ser observado na Figura 20.

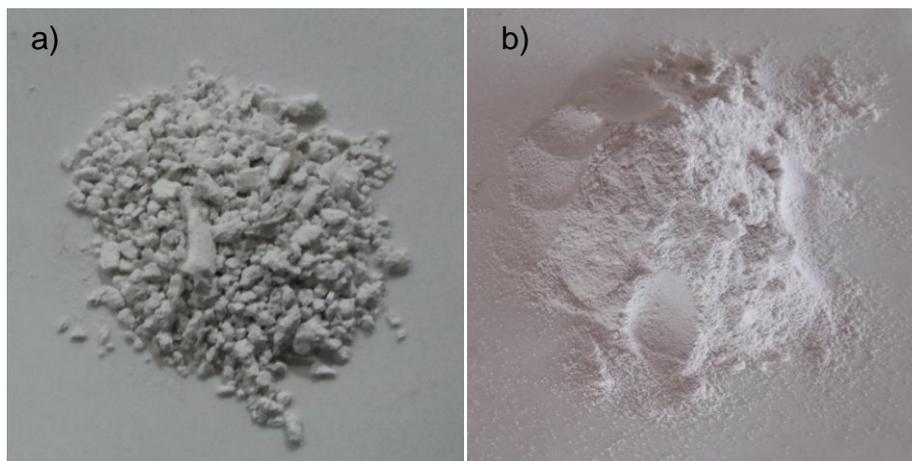


Figura 20 - a) Granulometria do resíduo de gesso no início do processo e b) ao final da trituração eletro-mecânica

O atrito provocado entre os cilindros proporcionava a redução do diâmetro das partículas durante o processo de trituração eletromecânica.

Foram despendidas 36 horas ao longo dos cinco ciclos para triturar 212300g de gesso proveniente das chapas de gesso acartonado e 135800g de gesso comum.

Após a trituração eletro-mecânica o material foi condicionado à trituração no moinho de bolas para redução do tamanho das partículas. Tal processo foi adotado após a percepção tátil-visual, onde era possível identificar pequenas partículas no material triturado. Estas partículas não são perceptíveis quando observado o pó de gesso comum, granulometria usada como referência na pesquisa.

3.5 TRITURAÇÃO NO MOINHO DE BOLAS

Após o processo da trituração eletromecânica o resíduo de gesso recebeu mais um processo de moagem. Foi utilizado um moinho rotatório, com velocidade de 40 r.p.m., composto por corpo de porcelana e esferas de ágata de 2 cm de diâmetro, da marca Quimilo, Figura 21. Cada batelada processava 1 kg de material em 50 minutos.



Figura 21 - Moinho de bolas de porcelana com esferas de ágata

Após o processo da trituração no moinho de bolas finalizava-se o processo da trituração, obtendo-se o material desfragmentado na forma de material pulverulento.

A próxima etapa do processo consistia na calcinação do resíduo, descrita detalhadamente no item 3.6.

3.6 CALCINAÇÃO DO RESÍDUO DE GESSO

O resíduo de gesso foi colocado na fôrma de alumínio (Figura 22) e inserido em estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar, para execução do processo de calcinação.



Figura 22 - Resíduo de gesso calcinado repousando para diminuição da temperatura

A amostra permaneceu em estufa por 24 h a temperatura de 180 °C. Este tempo e temperatura foram definidos de acordo com os experimentos descritos por Fiano; Pimentel (2009), Lima; Camarini (2011), Savi (2012) e Erbs *et al.*, (2015). O material era retirado da estufa e posicionado sobre a bancada por aproximadamente cinco minutos, desta forma ocorria a redução da temperatura, sendo possível manusear o material. Ao final do processo o material era armazenado em sacos plásticos a fim de não hidratar com a umidade do ar.

O final da calcinação é considerado um dos marcos da pesquisa, pois é a partir deste ponto que se gerou o material necessário para execução dos ensaios descritos no item 3.8.

3.7 CARACTERIZAÇÃO DO GESSO RECICLADO

Diversos foram os ensaios realizados para determinação das características físicas e mecânicas do gesso reciclado, a relação dos ensaios realizados é descrito no Quadro 8.

Etapa	Ensaio
Determinação das características físicas do pó	Granulometria Módulo de Finura Massa unitária
Propriedades da pasta no estado fresco	Determinação do início e fim de pega
Propriedades no estado endurecido	Tração na flexão Compressão axial Dureza superficial
Composição química e mineralógica	MEV EDS

Quadro 8 - Ensaio realizados para determinação das propriedades

De posse do material calcinado será descrito nos itens 3.7.1 a 3.7.5 o programa experimental que será desenvolvido para determinação das características do material.

3.7.1 Determinação das propriedades físicas do pó

3.7.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado segundo as prescrições da NBR 12.127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a) onde o material seco em estufa foi submetido ao peneiramento mecânico sequencial, em peneiras normatizadas com aberturas de malha de 0,80 mm, 0,40 mm, 0,20 mm e 0,10 mm.

Foram realizadas 3 amostragens, onde a massa de 100 g era depositada no conjunto de peneiras com o fundo. Após colocar a tampa, o conjunto foi inserido sobre um agitador de peneiras eletromagnético de bancada da marca Contenco, Figura 23.



Figura 23 - Agitador de peneiras eletromagnético

Após este período o material de cada peneira foi pesado em uma balança digital da marca Digimed modelo KN 5000 com precisão de 0,1 g. Através da Equação 1 era determinada a média aritmética percentual retida em cada peneira.

$$R = \frac{m}{M} \times 100, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 1})$$

R = material retido, em percentagem;

m = resíduo na peneira, em gramas;

Mi = massa inicial, em gramas.

Com os valores obtidos no ensaio de granulometria era possível calcular o módulo de finura através da equação apresentada no item 3.7.1.2.

3.7.1.2 Módulo de finura

O módulo de finura foi determinado utilizando os valores encontrados no ensaio de granulometria pela Equação 2.

$$MF = \frac{\sum Ra}{100}, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 2})$$

MF = módulo de finura;

$\sum Ra$ = somatório do percentual retido acumulado em cada peneira da série padrão.

Encerrados os ensaios envolvendo a granulometria do material, iniciava-se o ensaio de massa unitária.

3.7.1.3 Massa unitária

O ensaio de massa unitária foi realizado conforme prescrições da NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a). A única adaptação realizada foi em relação ao recipiente utilizado, pois a norma recomenda um recipiente cilíndrico de 1000 cm³, porém, devido à indisponibilidade, foi utilizado o recipiente cúbico de latão com 3442,95 cm³, apresentado na Figura 24.



Figura 24 - Recipiente utilizado para ensaio da massa unitária

Sendo assim, o material seco em estufa foi depositado em um recipiente de volume e peso conhecidos até seu transbordamento e nivelamento final. As dimensões do recipiente estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores aferidos do recipiente para determinação da massa unitária - 2016

Dimensões	Valores (cm)
altura (cm)	15,1
largura (cm)	15,1
profundidade (cm)	15,1
volume (cm ³)	3442,95

Foram realizadas 5 amostragens para determinação da massa unitária, e seu resultado foi determinado segundo a Equação 3.

$$M_u = \frac{M}{V} \times 1000, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 3})$$

M_u = massa unitária, em quilogramas por metro cúbico;

M = massa do gesso, em gramas;

V = volume do recipiente, em centímetro cúbico.

O fim do ensaio de massa unitária encerra o processo de determinação das características físicas do pó. No próximo item será explanado sobre as misturas experimentais utilizadas na pesquisa.

3.7.1.4 Misturas experimentais

Para os ensaios no estado fresco e formação dos corpos de prova para os ensaios do estado endurecido foram utilizadas composições com 100% de gesso comum reciclado e 100% de gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado.

Foram adotadas misturas experimentais de 25%, 50% e 75%, em massa, de gesso comum adicionado ao gesso acartonado reciclado. Tais misturas foram adotadas supondo-se que amostras formadas somente com gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado não atenderiam os parâmetros estabelecidos na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Misturas entre gesso reciclado e gesso comum foram utilizadas por Tazawa (1998) e Bardella (2011), obtendo-se incremento no valor obtido para as características mecânicas.

Todas as misturas foram reproduzidas ao longo dos cinco ciclos de reciclagem. Sendo assim, as misturas experimentais e os ciclos de reciclagem utilizados são descritas conforme o Quadro 9.

Sigla	Amostra
GC	Gesso comum
GC-1C	Gesso comum - 1º ciclo
GC-2C	Gesso comum - 2º ciclo
GC-3C	Gesso comum - 3º ciclo
GC-4C	Gesso comum - 4º ciclo
GC-5C	Gesso comum - 5º ciclo
GR-1C	Gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 1º ciclo
GR-2C	Gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 2º ciclo
GR-3C	Gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 3º ciclo
GR-4C	Gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 4º ciclo
GR-5C	Gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 5º ciclo
GR75GC25-1C	75% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 1º ciclo + 25% de gesso comum
GR75GC25-2C	75% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 2º ciclo + 25% de gesso comum
GR75GC25-3C	75% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 3º ciclo + 25% de gesso comum
GR75GC25-4C	75% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 4º ciclo + 25% de gesso comum
GR75GC25-5C	75% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 5º ciclo + 25% de gesso comum
GR50GC50-1C	50% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 1º ciclo + 50% de gesso comum
GR50GC50-2C	50% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 2º ciclo + 50% de gesso comum
GR50GC50-3C	50% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 3º ciclo + 50% de gesso comum
GR50GC50-4C	50% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 4º ciclo + 50% de gesso comum
GR50GC50-5C	50% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 5º ciclo + 50% de gesso comum
GR25GC75-1C	25% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 1º ciclo + 75% de gesso comum
GR25GC75-2C	25% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 2º ciclo + 75% de gesso comum
GR25GC75-3C	25% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 3º ciclo + 75% de gesso comum
GR25GC75-4C	25% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 4º ciclo + 75% de gesso comum
GR25GC75-5C	25% de gesso reciclado de chapa de gesso acartonado - 5º ciclo + 75% de gesso comum

Quadro 9 – Misturas propostas nos experimentos

Uma vez definidas as misturas a serem utilizadas, inicia-se o processo de determinação das propriedades no estado fresco, descrito no item 3.7.2.

3.7.2 Propriedades da pasta no estado fresco

3.7.2.1 Preparação da pasta

As pastas de gesso reciclado e de gesso comum foram preparadas através da mistura homogênea de gesso e água, utilizando a relação a/g de 0,7, em massa, replicando os experimentos realizados por Roque *et al.* (2005); Pinheiro (2011); Ribeiro (2006); Savi (2012) e Erbs *et al.* (2015).

Para preparação de cada pasta foi utilizado o processo de polvilhamento do pó de gesso sobre a água por período de tempo de 1 min. A solução era deixada em repouso por mais 1 min e então era homogeneizada manualmente com a utilização de uma espátula por 1 min para obtenção de pasta isenta de grumos, Figura 25.



Figura 25 - Pasta GR-3C, relação a/g 0,7

Após a homogeneização as pastas eram inseridas nos moldes tronco cônico metálicos para determinação das propriedades da pasta no estado fresco, os tempos de início e fim de pega.

3.7.2.2 Tempos de início e fim de pega

Os tempos de início e fim de pega da pasta de gesso reciclado foram determinados segundo a norma NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a). Para determinação do tempo de pega foi utilizado o aparelho de Vicat, onde a agulha do aparelho penetrou na pasta sobre a ação do peso próprio.

O início de pega foi cronometrado a partir do momento em que o gesso reciclado entrou em contato com a água e onde a agulha do aparelho estacionou a 1 mm da base, Figura 26.



Figura 26 - Ensaio de tempo de pega do resíduo de gesso

O fim de pega foi apontado a partir do momento em que a agulha não deixava mais impressão sobre a pasta de gesso reciclado.

Foram realizadas 3 medições para determinação dos tempos de início e fim de pega para cada amostra.

Não foi realizado o ensaio de consistência normal descrito na NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a), pois todas as pastas de gesso foram moldadas com a relação a/g de 0,7, definida pelo autor.

Conhecidos os tempos de pega de todas as misturas iniciava-se o processo de moldagem e rompimento dos corpos de prova, conforme descrito em 3.7.3.

3.7.3 Propriedades no estado endurecido

3.7.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão simples foi utilizado molde metálico padronizado, sendo possível moldar 3 corpos de prova de 5 x 5 x 5 cm. Os moldes foram posicionados sobre a bancada e untados com cera líquida para facilitar a remoção.

Foram moldados dez corpos de prova para cada composição sugerida, sendo cinco para os ensaios de 07 dias e cinco para 28 dias.

Os corpos de prova prismáticos, utilizados no ensaio de tração na flexão, foram moldados utilizando moldes metálicos padronizados, onde era possível moldar 03 corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm. Os moldes foram posicionados sobre a bancada e untados com cera líquida para facilitar a remoção posterior dos corpos de prova (Figura 27).



Figura 27 - Molde padronizado com dimensões 4 x 4 x 16 cm untado com cera

Utilizando uma espátula de 10 cm de largura a pasta de gesso reciclada foi acondicionada nos moldes metálicos, evitando provocar vibrações ou pressão sobre as paredes do molde. A moldagem dos corpos de provas foi replicada da mesma maneira em todos os ciclos, partindo-se da premissa que a pressão da espátula na pasta de gesso aplicado no molde foi irrelevante.

Foram moldados dez corpos de prova para cada composição sugerida, sendo cinco para os ensaios de 07 dias e cinco para 28 dias, Figura 28.



Figura 28 - Corpos de prova moldados com gesso reciclado

Decorridas duas horas após a moldagem, os moldes eram desmontados e os corpos de prova identificados e armazenados em uma estufa à temperatura ambiente, Figura 29.



Figura 29 - Corpos de prova armazenados e identificados aguardando data para ensaio

O aparato da Figura 29 foi construído utilizando uma caixa metálica aramada revestida com uma manta plástica transparente de 1 mm. Desta forma os corpos de prova realizaram cura semelhante aos artefatos fabricados com gesso (BARDELLA, 2011; SAVI, 2012).

A inserção dos corpos de prova na estufa à temperatura ambiente auxiliou os corpos de prova a aumentarem os valores observados na resistência mecânica, se comparado aos corpos de prova que secaram à sombra, em laboratório (ERBS *et al.*, 2015).

Utilizou-se a premissa que a estufa permaneceu sob uma maior temperatura se comparado ao interior do laboratório. Por outro lado, foi retida a umidade

proveniente da evaporação dos corpos de prova em seu interior. Tal fenômeno era possível observar devido a presença de gotículas de água no interior da estufa.

Do material restante da moldagem dos corpos de prova, 1 kg do material foi armazenado em sacos hermeticamente fechados, caso fosse necessário replicar algum ensaio. O material restante era hidratado com relação a/g de 0,7 para posterior moagem.

O Quadro 10 resume a quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio.

Ensaio	amostra	7dias	28 dias	Ensaio	amostra	7dias	28 dias
Tração na flexão	GC	5	5	Compressão axial	GC	5	5
	GC-1C	5	5		GC-1C	5	5
	GC-2C	5	5		GC-2C	5	5
	GC-3C	5	5		GC-3C	5	5
	GC-4C	5	5		GC-4C	5	5
	GC-5C	5	5		GC-5C	5	5
	GR-1C	5	5		GR-1C	5	5
	GR-2C	5	5		GR-2C	5	5
	GR-3C	5	5		GR-3C	5	5
	GR-4C	5	5		GR-4C	5	5
	GR-5C	5	5		GR-5C	5	5
	GR75GC25-1C	5	5		GR75GC25-1C	5	5
	GR75GC25-2C	5	5		GR75GC25-2C	5	5
	GR75GC25-3C	5	5		GR75GC25-3C	5	5
	GR75GC25-4C	5	5		GR75GC25-4C	5	5
	GR75GC25-5C	5	5		GR75GC25-5C	5	5
	GR50GC50-1C	5	5		GR50GC50-1C	5	5
	GR50GC50-2C	5	5		GR50GC50-2C	5	5
	GR50GC50-3C	5	5		GR50GC50-3C	5	5
	GR50GC50-4C	5	5		GR50GC50-4C	5	5
	GR50GC50-5C	5	5		GR50GC50-5C	5	5
GR25GC75-1C	5	5	GR25GC75-1C	5	5		
GR25GC75-2C	5	5	GR25GC75-2C	5	5		
GR25GC75-3C	5	5	GR25GC75-3C	5	5		
GR25GC75-4C	5	5	GR25GC75-4C	5	5		
GR25GC75-5C	5	5	GR25GC75-5C	5	5		
TOTAL		130	130	TOTAL		130	130

Quadro 10 - Relação de corpos de prova moldados para cada ensaio

Após a cura dos corpos de prova iniciavam-se os ensaios para determinação da resistência mecânica, sendo eles o de resistência à tração na flexão, compressão axial e dureza superficial.

3.7.3.2 Resistência à tração na flexão

A resistência à flexão foi determinada utilizando os corpos de prova seguindo as recomendações da NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO..., 1991) – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.

Foi utilizada prensa hidráulica denominada Máquina Universal de Ensaio, eletromecânica e microprocessada da marca EMIC modelo DL10T e um dispositivo para ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos, da marca Solotest, específico para o ensaio, Figura 30.



Figura 30 - Ensaio de tração na flexão realizado no corpo de prova prismático

Foram submetidos ao ensaio de resistência à tração na flexão dez corpos de prova de cada composição, cinco decorridos 7 dias de sua moldagem e cinco aos 28 dias.

Os corpos de prova foram rompidos e os resultados foram obtidos segundo a Equação 4.

$$f_{ctM} = \frac{P \times l}{b \times d^2}, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 4})$$

f_{ctM} = resistência à tração na flexão, em MPa;

P = carga máxima aplicada, em Newton;

l = distância entre os cutelos de suporte, em milímetros;

b = largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros;

d² = altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros.

3.7.3.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão da amostra de gesso reciclado determinada pelo ensaio descrito na norma NBR 12129 (ASSOCIAÇÃO..., 1991b).

Foram submetidos ao ensaio de compressão axial dez corpos de prova de cada composição, cinco decorridos 7 dias de sua moldagem e cinco aos 28 dias (Figura 31).



Figura 31 - Ensaio de compressão axial

Os corpos de prova foram rompidos e os resultados foram obtidos segundo a Equação 5.

$$f_c = \frac{P}{S}, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 5})$$

f_c = resistência à compressão, em MPa;

P = carga que produziu a ruptura do corpo de prova, em Newton;

S = área de seção transversal de aplicação da carga, em milímetros quadrados.

3.7.3.4 Dureza superficial

A dureza superficial foi determinada adaptando o procedimento descrito na norma NBR 12129 (ASSOCIAÇÃO..., 1991b). Foi realizada uma adaptação no ensaio, pois ao invés da utilização de um corpo de prova 5 x 5 cm, a esfera metálica de 10 mm de diâmetro foi colocada sobre a sobra rompida no ensaio de tração na flexão. Estes corpos de prova foram submetidos à carga de 500 N por dois segundos na prensa, Figura 32.



Figura 32 - Ensaio de dureza superficial

Após este período a carga era retirada e com um paquímetro era efetuada a medição da profundidade da impressão que a esfera de aço deixava sobre os corpos de prova, Figura 33.



Figura 33 - Marca da esfera de aço do ensaio de dureza superficial sobre os corpos de prova.

A dureza foi determinada pela média entre os valores obtidos e utilizando a Equação 6.

$$D = \frac{F}{\pi \times \phi \times t}, \text{ em que} \quad (\text{Eq. 6})$$

D = dureza superficial, em Newton por milímetro quadrado;

F = carga, em Newton;

ϕ = diâmetro, em milímetros;

t' = média da profundidade, em milímetros.

Finalizados os ensaios para determinação da resistência mecânica, uma amostra de cada corpo de prova era coletada e identificada. Esta amostra foi utilizada para determinação da formação dos cristais e da composição química, realizados através do MEV e do EDS, explanados no item 3.7.4.

3.7.4 Microestrutura e composição química

3.7.4.1 Microestrutura

As amostras destinadas à observação no microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram armazenadas e identificadas ao longo dos ciclos de reciclagem. As amostras foram moídas em almofariz de porcelana para atingir a finura adequada para a realização do ensaio. Após a sua preparação, o pó foi levado à estufa de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital por 24 h a temperatura de 105 °C para remoção da umidade.

Inicialmente as amostras foram metalizadas com Ouro no equipamento vaporizador de Ouro e Carbono para recobrimento de amostras não condutoras da marca Quarum modelo Q150R ES, Figura 34.



Figura 34 - Vaporizador de Ouro e Carbono

Após o recobrimento, as amostras foram inseridas na câmara de vácuo do MEV Carl Zeiss / EVO MA 15 equipado com detectores de elétrons secundários de alto vácuo e retroespalhados com cristal adicional para análise de nitrogênio, Figura 35.



Figura 35 - Microscópio eletrônico de varredura

3.7.4.2 Composição química

Para a análise da composição química do resíduo de gesso acartonado e de gesso comum foi utilizado Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS), presente no MEV. Assim foi possível determinar a microanálise química escolhendo pontos em uma área pré-determinada durante o ensaio do MEV.

Terminados todos os ensaios as amostras dos corpos de prova eram desfragmentadas para reiniciar o processo de reciclagem, conforme descrito no item 3.7.5.

3.7.5 Desfragmentação dos corpos de prova

Decorridos 45 dias após os ensaios de determinação das propriedades mecânicas do estado endurecido e a cura do saldo restante do gesso no ciclo, o material era desfragmentado. Neste processo foi utilizado um soquete de concreto manual, Figura 36.



Figura 36 - Soquete de concreto para desfragmentação no final de cada ciclo de reciclagem

Com a desfragmentação dos corpos de prova finalizava-se o ciclo de reciclagem. Outro ciclo era iniciado a partir da etapa de trituração eletro-mecânica.

Foram realizados cinco ciclos de reciclagem devido ao tempo despendido para realizar os ensaios, uma vez que seriam necessários ao menos 225 dias entre a coleta de amostras inicial e a conclusão do quinto ciclo.

Somente as amostras formadas 100% com gesso reciclado eram utilizadas no próximo ciclo, os demais corpos de prova utilizando as misturas experimentais eram descartados.

No próximo item serão abordados aspectos relativos à duração dos ensaios e aos custos envolvidos no processo.

3.8 TEMPO E CUSTO PARA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

O tempo total utilizado para o desenvolvimento da pesquisa realizada foi de 670 horas. Este período compreende as etapas de coleta de resíduos até a desfragmentação dos corpos de prova, ao longo dos cinco ciclos de reciclagem. Na somatória do tempo não estão contabilizadas as horas gastas com a cura dos corpos de prova, visto que não houve nenhum trabalho envolvido durante este período.

O custo para aquisição do material, insumos e desenvolvimento dos cilindros para trituração foi de R\$ 1.893,00. As informações são demonstradas na Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo com custo e horas despendidas em cada etapa do processo- 2016

Etapa	Tempo gasto (horas)	Custo (reais)
Coleta dos resíduos de chapa de gesso acartonado	2	-
Aquisição dos sacos de gesso comum	1	R\$ 40,00
Aquisição do cilindro manual	2	R\$ 180,00
Aquisição de componentes para fabricação do cilindro eletromecânico	6	R\$ 883,00
Mão de obra para montagem do cilindro eletromecânico	26	R\$ 600,00
Corte dos filetes de resíduos de chapa de gesso acartonado	6	-
Trituração manual dos filetes de chapa de gesso acartonado	8	-
Trituração eletromecânica - 5 ciclos	36	-
Ajustes e reparos no cilindro eletromecânico - 5 ciclos	10	R\$ 130,00
Trituração no moinho de bolas do gesso comum reciclado - 5 ciclos	30	-
Trituração no moinho de bolas dos resíduos de chapas de gesso acartonado - 5 ciclos	215	-
Calcinação dos resíduos de chapa de gesso acartonado e do gesso comum - 5 ciclos	116	-
Ensaio de granulometria - 5 ciclos	10	-
Ensaio de massa unitária - 5 ciclos	8	-
Ensaio de tempo de início e fim de pega - 5 ciclos	60	-
Moldagem dos corpos de prova - 5 ciclos	80	-
Aquisição dos materiais e montagem da estufa para cura dos corpos de prova	4	R\$ 60,00
Ensaio de tração na flexão - 5 ciclos	10	-
Ensaio de resistência à compressão axial - 5 ciclos	12	-
Ensaio de dureza superficial - 5 ciclos	8	-
Preparação de amostras para ensaios de Microscopia eletrônica de varredura e difratograma de raios-X - 5 ciclos	5	-
Ensaio de microscopia eletrônica de varredura e difratograma de Raios-X - 5 ciclos	5	-
Desfragmentação de corpos de prova - 5 ciclos	10	-
Total	670	R\$ 1.893,00

Encerrado o capítulo sobre os materiais e os métodos utilizados, serão descritos no capítulo 4 os resultados e discussões obtidos no estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no programa experimental das amostras de gesso reciclado de chapas de gesso acartonado e de gesso comum ao longo dos cinco ciclos de reciclagem são descritos sequencialmente apresentando as propriedades físicas do pó, no estado fresco e endurecido, as composições químicas e a geometria microscópica.

A discussão é iniciada descrevendo as etapas iniciais realizadas, até o final da etapa de desfragmentação.

4.1 TRITURAÇÃO MANUAL

O processo de trituração manual utilizado além de eficiente foi essencial para executar a separação do papel cartão da massa de gesso. Sem esta etapa do processo não seria possível separar as duas fases deste material composto, isto é, desprender a massa de gesso do papel cartão que reveste as chapas de gesso acartonado.

A pressão exercida pelos cilindros fragmentou a massa de gesso, separando-a do papel cartão. Visualmente não era possível observar nenhum fragmento de papel cartão aderido à massa de gesso. Porém, após a hidratação, a massa de gesso alterava sua coloração para um tom parecido com o do papel que reveste as chapas.

Durante a execução do ensaio do MEV foi confirmado a presença de pequenas partículas de papel ainda aderidas na massa de gesso, como pode ser observado na fotomicrografia da Figura 37.

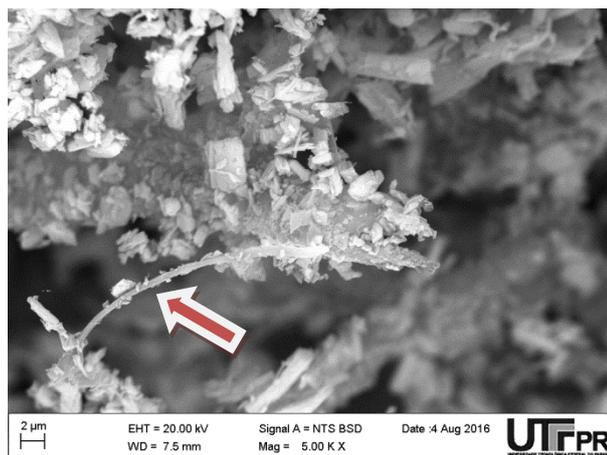


Figura 37 - Fotomicrografia que demonstra a presença de papel na amostra GR-3C

A partícula alongada, presente na fotomicrografia da Figura 37 é característica de partículas de papel cartão, em meio aos cristais de gesso (AZIMI; PAPANGELAKIS, 2011).

Vale ressaltar que a trituração manual exigiu muito esforço físico em sua execução, pois era necessário rotacionar manualmente a manivela do cilindro durante a passagem dos filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado. A distância entre a manivela e o eixo do cilindro era de 18 cm. Para minimizar o esforço despendido uma das sugestões é aumentar a distância entre a manopla e o eixo do cilindro, aumentando o momento e consequentemente diminuindo a força empregada.

Foi necessário ajuda de uma pessoa para colocar os resíduos no sentido transversal dos rolos do cilindro, enquanto outra pessoa rotacionava o mecanismo. Qualquer outro sentido de colocação dos resíduos travava o mecanismo e impedia a pessoa que rotacionava a manivela a continuar o processo.

Em uma escala industrial seria necessário desenvolver um triturador específico para esta função, pois não seria viável a trituração manual deste resíduo para reciclagem.

Os 150 kg de resíduos produziram 83 kg de gesso provenientes do interior das chapas de gesso acartonado. Somente 55,33% do resíduo de chapa de gesso acartonado foi aproveitado para reciclagem, o restante do material se apresentava como papel cartão com gesso fortemente aderido.

Todo material proveniente da trituração manual foi passado através de uma peneira com malha de 10 mm. Desta forma era separado o papel cartão da massa de gesso.

Uma sugestão para o aproveitamento da massa de gesso ainda aderida ao cartão seria o uso de um tanque de decantação com misturador. Supõe-se que o cartão poderia se desprender da massa de gesso quando depositado em um tanque com água, sob agitação. Desta forma, seria possível reaproveitar a massa de gesso que decantaria e a celulose que compõe o cartão.

Esta etapa de trituração foi utilizada somente no primeiro ciclo para produção do GR-1C, pois somente este resíduo inicial precisou ser separado do papel cartão.

4.2 TRITURAÇÃO ELETRO-MECÂNICA

A trituração eletromecânica também cumpriu seu objetivo, reduzindo a dimensão das partículas de gesso provenientes de chapas de gesso acartonado assim como as de gesso comum.

A cuba era carregada paulatinamente com aproximadamente 1 kg de gesso comum ou gesso proveniente das chapas de gesso acartonado. O próximo carregamento acontecia somente depois da moagem completa do material existente na cuba.

Nesta etapa houve perda de material pulverulento, que era carregado pelo ar durante a trituração. Na tabela 13 foram resumidas as perdas observadas durante o processo de trituração eletro-mecânica do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado.

Tabela 13 – Perda de material durante o processo de trituração do GR - 2016

	Massa inicial (g)	GR-1C	GR-2C	GR-3C	GR-4C	GR-5C
Massa do material no início do processo (g)	83000	63500	48000	34100	21700	12100
Massa do material utilizada para moldar os corpos de prova (g)	11000	11000	11000	11000	11000	11000
Massa reserva do material (g)	1000	1000	1000	1000	1000	1100
Massa hidratada para posterior trituração(g)	71000	51500	36000	22100	9700	-
Massa dos corpos de prova reutilizados (g)	4400	4400	4400	4400	4400	-
Massa total no final do ciclo (g)	75400	55900	40400	26500	14100	-
Massa após trituração (g)	63500	48000	34100	21700	12100	-
Perda no processo de trituração (%)	15,78%	14,13%	15,59%	18,11%	14,18%	-

Da mesma forma durante a trituração do gesso comum também ocorreram perdas, similares às observadas na trituração do gesso proveniente das chapas de gesso acartonado, os valores observados estão descritos na Tabela 14.

Tabela 14 – Perda de material durante o processo de trituração do GC - 2016

	Massa inicial (g)	GC-1C	GC-2C	GC-3C	GC-4C	GC-5C
Massa do material no início do processo (g)	40000	33100	27400	22500	17800	14500
Massa do material utilizada para moldar os corpos de prova (g)	4400	4400	4400	4400	4400	4400
Massa reserva do material (g)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Massa Hidratada para posterior trituração(g)	34600	27700	22000	17100	12400	-
Massa dos corpos de prova reutilizados (g)	4400	4400	4400	4400	4400	-
Massa total no final do ciclo (g)	39000	32100	26400	21500	16800	-
Massa após trituração (g)	33100	27400	22500	17800	14500	-
Perda no processo de trituração (%)	15,13%	14,64%	14,77%	17,21%	13,69%	-

A perda de material foi similar se comparada à trituração do gesso comum com o gesso proveniente das chapas de gesso acartonado, considerando o mesmo ciclo. O único ciclo que apresentou perda maior que os demais foi o terceiro ciclo. Atribui-se este aumento de perda a um dos parafusos de regulagem, que devido à

intensa utilização sofreu desgaste e apresentou folga. Por este motivo algumas passagens pelo cilindro eletro-mecânico tiveram que ser refeitas neste ciclo.

É importante salientar que durante os ciclos de reciclagem foi necessário trocar três vezes os rolamentos, pois o parafuso da regulagem que rege a distância entre os cilindros exercia pressão diretamente no mecanismo, como pode ser observado na Figura 38. Para sanar este problema deve-se construir um compartimento para alojar o rolamento, com paredes grossas, que suporte a pressão exercida pelos parafusos de regulagem.



Figura 38 - Regulagem da distância entre os cilindros e rolamento livre blindado

Uma dificuldade encontrada durante a construção do mecanismo foi adquirir um rolamento com espessura menor que a espessura da base, 15 mm, e menor que o diâmetro do cilindro, 50 mm. Foi adquirido um rolamento com 27 mm de diâmetro e 12 mm de espessura, pois comercialmente todos os rolamentos com diâmetro superior possuíam mais de 16 mm de espessura.

Várias vezes foi necessário parar o processo pois algumas partículas de gesso reciclado angulares travavam entre os cilindros e interrompiam o giro do motor, fazendo necessário desligar o equipamento, remover as partículas travadas, regular os cilindros e reiniciar o processo.

O mecanismo gerava vibração excessiva, dado que os parafusos fixadores do cilindro na bancada tiveram que ser trocados duas vezes devido à quebra por fadiga do material.

A utilização de um motor com rotação menor e maior torque seria mais eficiente no processo de trituração, pois se notava o aquecimento do motor devida a elevada rotação e força utilizada no processo.

A granulometria utilizada como referência no processo era a partícula de gesso comum, pois apresentava partículas uniformes e muito finas ao toque. Um teste muito simples utilizado para determinação da finura dos grãos foi pressionar o dedo contra uma amostra de material e verificar a demarcação da impressão digital.

Esperava-se que o processo de trituração eletro-mecânica fosse o suficiente para atingir esta granulometria. Porém, após o fim do processo as partículas ainda apresentavam uma granulometria mais grosseira. Assim foi decidido utilizar mais um tipo de trituração, a trituração com o moinho de bolas descrito no item 4.3.

4.3 TRITURAÇÃO NO MOINHO DE BOLAS

A trituração no moinho de bolas reduziu a dimensão das partículas de gesso reciclado. Visualmente houve redução no diâmetro das partículas, porém, sua granulometria não atendeu o valor de 1,1 para o módulo de finura, descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a). No item 4.4.2 será abordado sobre o ensaio físico do módulo de finura do gesso.

O incremento do tempo de permanência do gesso no moinho de bolas não reduzia a dimensão dos grãos de gesso reciclado, devido a aglutinação das partículas de gesso reciclado no fundo do mecanismo, Figura 39.



Figura 39 - Resíduo de gesso após a trituração no moinho de bolas

Após 50 minutos de permanência do material no moinho de bolas era possível perceber através da audição o incremento do barulho, indicando que as esferas de porcelana não mais estavam triturando o gesso.

Devido às dimensões do recipiente era possível triturar somente 1 kg de material a cada batelada, desta forma, este processo foi o mais demorado de toda a pesquisa, demandando 331 horas em laboratório para ser concluído.

Para redução do tempo despendido sugere-se a utilização de moinhos com maiores capacidades de carregamento. Outra sugestão seria a utilização de outro mecanismo de trituração durante esta etapa, como moinhos rotatórios contínuos utilizados no processo de moagem do clínquer para fabricação do cimento.

Sem a trituração no moinho de bolas não seria possível calcinar as partículas de gesso com eficiência, pois este processo diminuiu consideravelmente a dimensão das partículas do gesso reciclado.

Uma sugestão para redução ainda maior da granulometria do gesso reciclado é utilizar esferas de aço com dimensões menores ao invés das esferas de ágata.

Mesmo após a trituração no moinho de bolas a granulometria do resíduo de gesso era maior do que a de gesso comum usado como referência, assim, supõe-se que o método escolhido possa não ser o ideal para a cominuição das partículas de gesso.

A seguir serão discutidas as observações relacionadas às propriedades físicas do pó, iniciando assim os ensaios do material.

4.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação das propriedades no estado pulverulento, como a granulometria, o módulo de finura e a massa unitária.

4.4.1 Granulometria

O gesso reciclado, proveniente de chapas de gesso acartonado, possui menor granulometria que o GC e o GR-1C. Porém, esta granulometria inferior não

garantiu que este atenda o parâmetro de 700 kg m^{-3} da massa unitária definido na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). O gesso comum reciclado no primeiro ciclo apresentou granulometria maior se comparado ao gesso comum, conforme pode ser observado na Figura 40a.

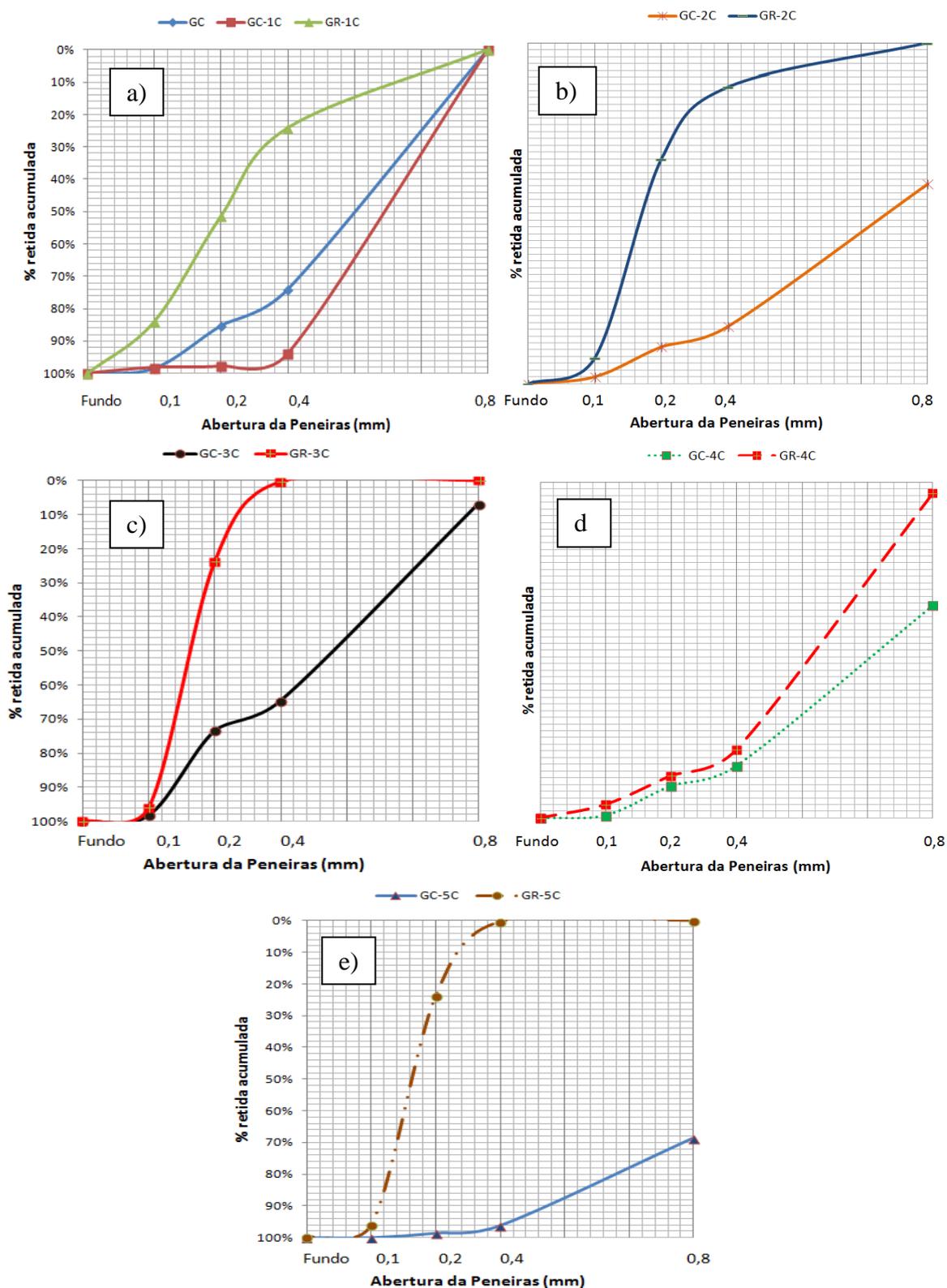


Figura 40 – Curva granulométrica dos gessos reciclados e amostra de gesso comum

Nos demais ciclos o gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado, apresentaram, em todos os casos, partículas com dimensões inferiores aos gessos comerciais reciclados, como pode ser visualizado na Figura 40 b, c, d e e.

A Figura 41 representa graficamente a variação da granulometria ao longo dos ciclos de reciclagem para as amostras GR e GC, respectivamente.

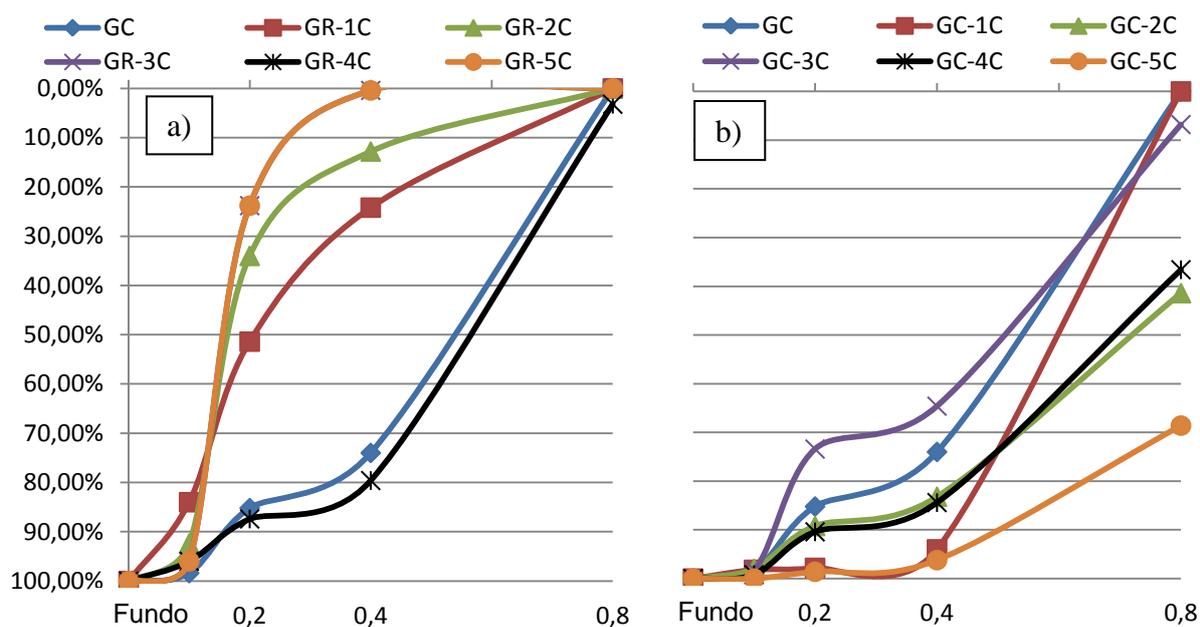


Figura 41 – a) Curva granulométrica dos gessos reciclados e b) curva granulométrica dos gessos comuns reciclados

Graficamente é possível observar que a granulometria dos gessos reciclados proveniente das chapas de gesso acartonado é menor que a de gesso comum.

Desta forma observa-se que o processo de trituração foi mais eficiente para o gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado do que para os gessos comerciais.

O ensaio de granulometria foi realizado somente com as amostras 100% GR e GR ao longo dos ciclos pois partiu-se da premissa que o gesso comum possuía uma granulometria muito fina. Desta forma, as partículas de gesso comum atravessariam as peneiras e se depositariam no fundo, interferindo o resultado final.

4.4.2 Módulo de Finura

De acordo com a NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), um dos critérios para classificação do gesso leva em conta o módulo de finura. Os resultados do módulo de finura estão dispostos no Tabela 15.

Tabela 15 – Módulo de finura dos gessos reciclados - 2016

Amostra	Módulo de Finura	Amostra	Módulo de Finura
		GC	2,58
GR-1C	1,60	GC-1C	2,90
GR-2C	1,39	GC-2C	2,70
GR-3C	1,20	GC-3C	2,36
GR-4C	1,81	GC-4C	2,74
GR-5C	1,92	GC-5C	2,95

Os valores obtidos foram superiores a 1,10, sendo assim, segundo o critério estabelecido na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a), o gesso reciclado é classificado como gesso grosso.

Com base nos valores apresentados na Tabela 15 é possível observar que o módulo de finura dos GR é menor que os do GC, em todos os casos. O processo de trituração no moinho de bolas reduziu a dimensão das partículas de gesso reciclado, porém, não foi o suficiente para classificá-lo como gesso fino.

Pondera-se desta forma que o gesso comum utilizado como referência em diversos parâmetros apresentou o valor de 2,58 para o módulo de finura, superior ao valor de 0,26 obtido por Bardela (2011) em seus experimentos.

Este elevado valor obtido no ensaio de módulo de finura foi inesperado, uma vez que através de um simples ensaio tátil o gesso comum apresentava as menores partículas entre os materiais. Sendo assim, supõe-se que o gesso comum utilizado nos ensaios encontrava-se fora das especificações da norma.

Sugere-se que, o gesso reciclado possui cristais irregulares e com maiores dimensões, reduzindo o módulo de finura e outros parâmetros físicos, como a massa unitária, descrita no item 4.3.3.

4.4.3 Massa Unitária

Durante a realização do ensaio de massa unitária foi necessário realizar uma adaptação ao procedimento descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a). A norma correspondente solicita o uso de um recipiente cilíndrico com 1000 cm³ de volume, porém foi utilizado um recipiente cúbico com 3442,95 cm³ de volume.

Como a massa unitária é a razão entre a massa que preenche um volume conhecido, supõe-se que tal modificação não foi relevante para determinação dos valores obtidos.

A massa unitária foi calculada utilizando a Equação 3 descrita no item 3.7.1.3. Os valores encontrados foram compilados e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Massa unitária das amostras analisadas

Amostra	Massa unitária (kg m⁻³)	Amostra	Massa unitária (kg m⁻³)
		GC	653,93 (3,17)
GR-1C	675,68 (6,53)	GC-1C	645,47 (3,91)
GR-2C	775,75 (4,65)	GC-2C	630,26 (5,91)
GR-3C	677,94 (2,14)	GC-3C	520,20 (4,78)
GR-4C	778,05 (7,30)	GC-4C	518,58 (3,41)
GR-5C	672,49 (3,15)	GC-5C	511,20 (3,65)

Legenda: () Desvio padrão

Dos valores apresentados na Tabela 16, apenas o GR-2C e o GR-4C atendem o valor mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), definido em 700 kg m⁻³.

Todas as amostras apresentaram valores superiores aos encontrados por John; Antunes (2002), Carvalho *et al.* (2008) e Moura *et al.* (2014).

As demais amostras de gesso reciclado provenientes de chapas de gesso acartonado apresentaram valores superiores aos reportados na literatura, descritos na Tabela 6 item 2.5.1.4, mesmo no decorrer dos ciclos de reciclagem.

As amostras de gesso comum reciclado, por sua vez, além de não atenderem o valor mínimo estipulado de 700 kg m⁻³ da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), também obtiveram redução de seus valores ao longo dos ciclos de reciclagem.

O gesso comum não atingiu os 700 kg m^{-3} especificado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) para a massa unitária. Atribui-se a baixa massa unitária à adaptação realizada no ensaio, conforme descrito no item 3.7.1.3.

Uma das hipóteses para não ser atingido o valor de 700 kg m^{-3} no ensaio de massa unitária é a forma como os cristais se organizam. O gesso comum se apresenta com arranjo organizado e compacto, enquanto o gesso reciclado apresenta os cristais dispersos e espaçados (Figura 42), com grande volume de vazios entre eles, justificando em parte a menor massa unitária obtida. Tal fenômeno também foi observado por Bardella (2011) e Savi (2013).

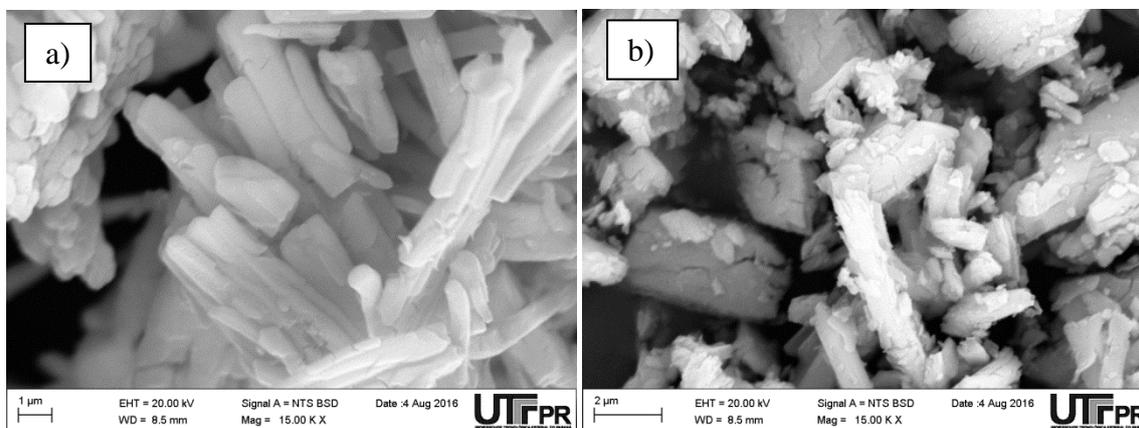


Figura 42 – Fotomicrografias de a) gesso comum b) gesso reciclado primeiro ciclo

Mesmo apresentando baixos valores de massa unitária, o gesso reciclado utilizado nesta pesquisa apresentou bom desempenho mecânico quanto à compressão axial, tração na flexão e dureza superficial, como será descrito posteriormente no item 4.6.

Conhecidas as informações sobre o pó de gesso reciclado, o item 4.5 abordará as características físicas da pasta no estado fresco.

4.5 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

No estado fresco serão abordados os aspectos da preparação da pasta e a classificação segundo o tempo de início e fim de pega.

4.5.1 Preparação da pasta

Durante os ensaios ao longo dos ciclos de reciclagem, tanto para o gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado como para as de gesso comum, foi mantida a relação a/g de 0,7, característica na formação da pasta de gesso em obras e utilizada nos estudos de Roque *et al.* (2005); Pinheiro (2011); Ribeiro (2006); Savi (2012) e Erbs *et al.* (2015).

De maneira geral durante a preparação da pasta, as amostras de GR apresentavam um aspecto mais rijo ao longo dos ciclos, se comparado as amostras de GC, confirmando que as pastas de GR demandam de mais água para hidratação Ribeiro (2006); Savi (2012) e Erbs *et al.* (2015).

Algumas composições no quarto e quinto ciclos não poderiam ser homogeneizadas com relações a/g menores que 0,7, pois com esta relação as misturas apresentaram aspecto seco de difícil homogeneização. Algumas misturas podem ser observadas na Figura 43.



Figura 43 – Pasta de gesso reciclado: a) amostra GR-1C, b) amostra GR-5C, c) amostra GC, d) amostra GC-5C

Como é possível averiguar na Figura 43a, a amostra GR-1C apresentava excesso de água de composição, uma vez que se evidenciou formação e o aprisionamento de bolhas.

Uma hipótese para retirar as bolhas de ar aprisionadas na amostra GR-1C seria a utilização de um aditivo desincorporador de ar, capaz de remover bolhas aprisionadas em pastas e argamassas.

A Figura 43b, GR-5C, apresentou um aspecto mais rijo, assim como todas as amostras do quinto ciclo. Na Figura 43c, amostra de gesso comum, é possível observar a liquidez na mistura muito diferente da amostra GC-5C, que apresentou um aspecto homogêneo.

Algumas amostras poderiam ser conformadas com relações a/g menores, como as amostras GC, GR-1C, GR75GC25-1C e GR50GC50-1C, aumentando suas propriedades mecânicas, conforme descrito posteriormente no item 4.5.1. Mesmo assim, a manutenção da relação a/g em todas as amostras ao longo dos ciclos foi eficaz, pois foi possível homogeneizar e formar corpos de prova de todas as amostras.

Seria possível utilizar uma relação a/g menor em todos os ciclos, desde que fossem utilizados aditivos plastificantes e superplastificantes, porém a inserção de aditivos não foi um tópico abordado nesta pesquisa.

4.5.2 Tempo de pega

Para determinação da propriedade no estado fresco foram realizados os ensaios de início e fim de pega. Todas as amostras ensaiadas ao longo dos cinco ciclos apresentaram patamares de início e fim de pega.

Segundo a NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), para o gesso ser classificado como de fundição, o tempo de início de pega deve estar no intervalo de 4 a 10 minutos, e o tempo de fim de pega entre 20 e 45 minutos, conforme assinalados em azul e vermelho, respectivamente, na Figura 44.

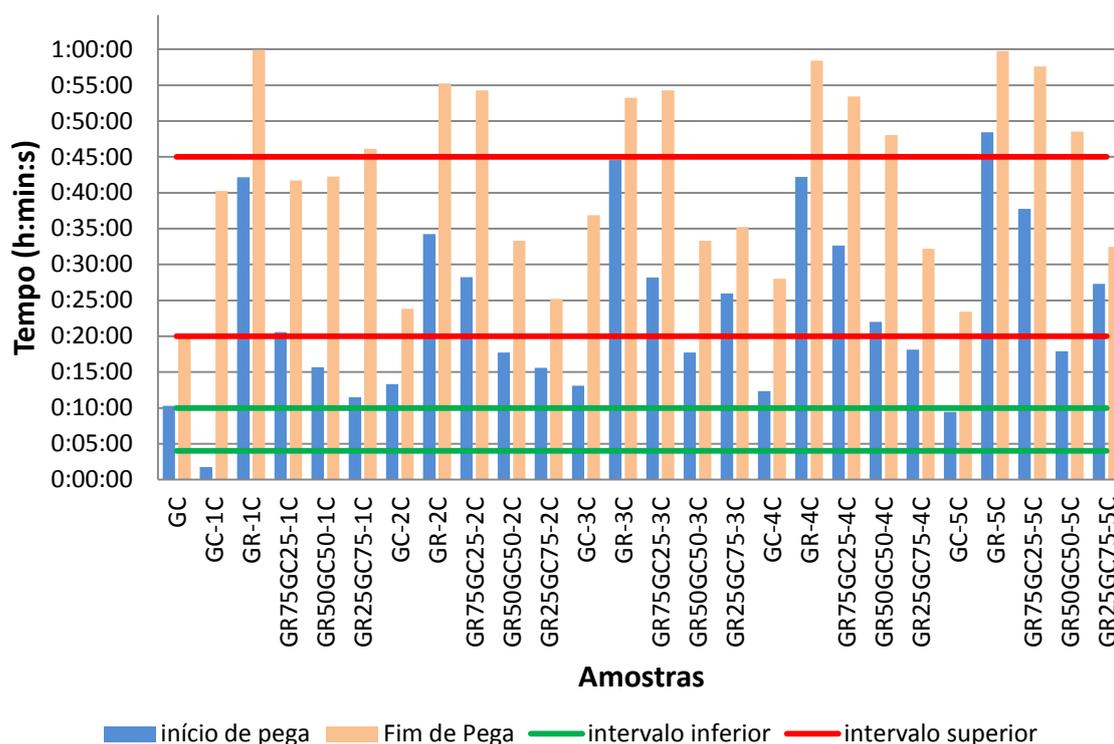


Figura 44 – Intervalos de início e fim de pega do gesso para fundição descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994).

Como é possível observar na Figura 44, somente a amostra GC-5C atendeu simultaneamente os intervalos de início e fim de pega exigidos pela NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994).

Novamente atribui-se o retardamento do início de pega a relação a/g, pois quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior o período de indução e retardamento no início da precipitação dos cristais de di-hidrato, aumentando o tempo de pega (BARDELLA, 2011).

A amostra de gesso comum, adquirida no mercado local como gesso rápido para fundição não apresentou início de pega anterior aos 10 minutos, devido a elevada relação a/g da amostra.

A NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) também indica o patamar mínimo no qual o gesso pode ser classificado como gesso de revestimento, sendo o início de pega superior a 10 minutos e o fim de pega superior a 45 minutos, apontados pela linha azul e vermelha respectivamente na Figura 45.

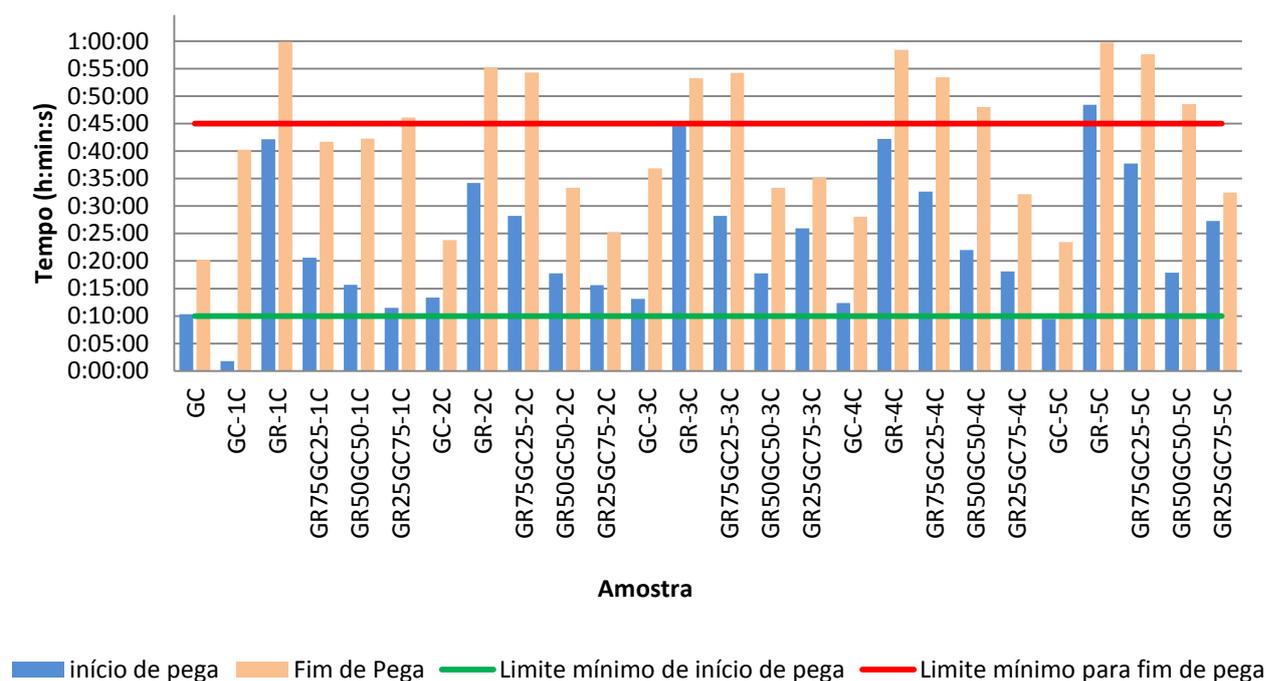


Figura 45 – Tempo de início e fim de pega para gessos de revestimento

Ao analisar as amostras com os parâmetros do tempo de pega do gesso para revestimento, as amostras GR-1C, GR25GC75-1C, GR-2C, GR75GC25-2C, GR-3C, GR75GC25-3C, GR-4C, GR75GC25-4C, GR50GC50-4C, GR75GC25-5C e GR50GC50-5C atingem os dois parâmetros simultaneamente.

As amostras de gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado atenderam os dois parâmetros de tempo de início e fim de pega para gessos de revestimento simultaneamente, durante os cinco ciclos de reciclagem.

Com o objetivo de incrementar o tempo de pega a inserção de gesso comum proposto nas misturas experimentais era contraditório, uma vez que o gesso comum utilizado era de pega rápida e iria acelerar o processo de pega. Tal fenômeno foi observado no segundo, quarto e quinto ciclo. Nestes ciclos é possível observar uma redução no tempo de início e fim de pega proporcional à mistura de gesso comum adicionada, isto é, quanto maior a porcentagem de gesso comum adicionada, isto é, quanto maior a porcentagem de gesso comum, menor o tempo de pega.

As mistura de primeiro e terceiro ciclo demonstraram valores muito aquém do esperado. No primeiro ciclo a amostra com adição de 75% de gesso comum apresentou o tempo de fim de pega superior às amostras com adição de 50 e 25% de gesso comum. No terceiro ciclo a adição de 25% de gesso comum retardou o fim

de pega da amostra. Já a adição de 75% de gesso comum apresentou pega superior à amostra com 50%. Desta forma, sugere-se que pode ter ocorrido um erro de leitura durante o ensaio de tempo de pega. Outra hipótese é a qualidade do gesso comum utilizado, uma vez que tal material não pode ser classificado segundo o módulo de finura e a massa unitária, podendo também ter interferido nos resultados de início e fim de pega.

Outro aspecto que merece observação é o fato de que o início do tempo de pega acontecia instantaneamente após os períodos apontados na Figura 45, e assim permaneciam até a cura completa no fim de pega, isto é, a pasta não apresentava aumento de sua consistência ao longo do tempo.

As pastas de GR e GC em todos os ciclos apresentavam três fases distintas, sem início de pega, com início de pega e fim de pega.

Inicialmente as pastas não apresentavam endurecimento, pois a agulha do aparelho não encontrava resistência para penetrar a pasta e chegar a base. Após um período a pasta ganhava viscosidade e pendia a agulha por atrito lateral, confirmando o início de pega, permanecendo desta forma até o fim de pega, onde a agulha não penetrava na pasta pois esta estava totalmente enrijecida.

Foi possível observar a mudança de coloração de todos os GR no fim do processo de pega, conforme pode ser observado na Figura 46.

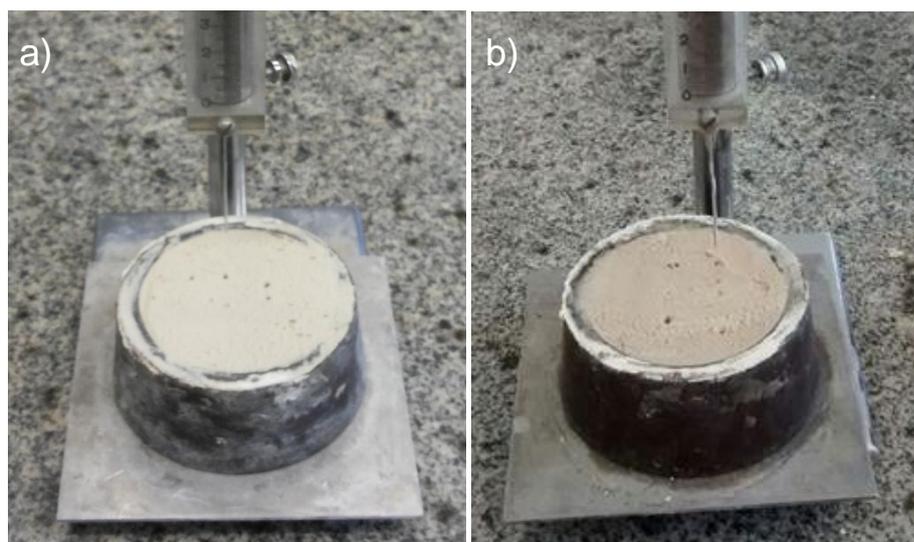


Figura 46 - a) amostra GR-3C no início do ensaio, b) amostra GR-3C no fim do ensaio de tempo de pega

As hipóteses sobre a mudança de coloração no GR são à reação do molde metálico com o gesso reciclado, ao desmoldante utilizado e a presença de partículas de papel aderidas nas partículas de gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado.

Tal mudança de coloração não foi observada nos ensaios com GC, desta forma a hipótese da presença de partículas de papel presente no GR torna-se a mais plausível e foi confirmada durante a realização do ensaio do MEV, conforme descrito anteriormente no item 4.1 e observado na fotomicrografia da Figura 37.

No item 4.6 serão discutidos os resultados obtidos pelos corpos de prova no estado endurecido.

4.6 PROPRIEDADES DA PASTA NO ESTADO ENDURECIDO

Neste item são abordadas as características mecânicas observadas nos ensaios de tração na flexão, compressão axial e dureza superficial.

O intervalo de confiança é descrito junto com os valores obtidos. Ressalta-se que todos os experimentos apresentaram valores de no mínimo 68,18% dentro do intervalo de confiança.

4.6.1 Resistência à tração na flexão

O ensaio de tração na flexão não é regulamentador em nenhuma norma referente ao gesso, porém serve como parâmetro para conhecer melhor o material estudado.

Os resultados da resistência média à tração na flexão são representados graficamente na Figura 47. O intervalo de confiança dos dados é superior a 68,18%.

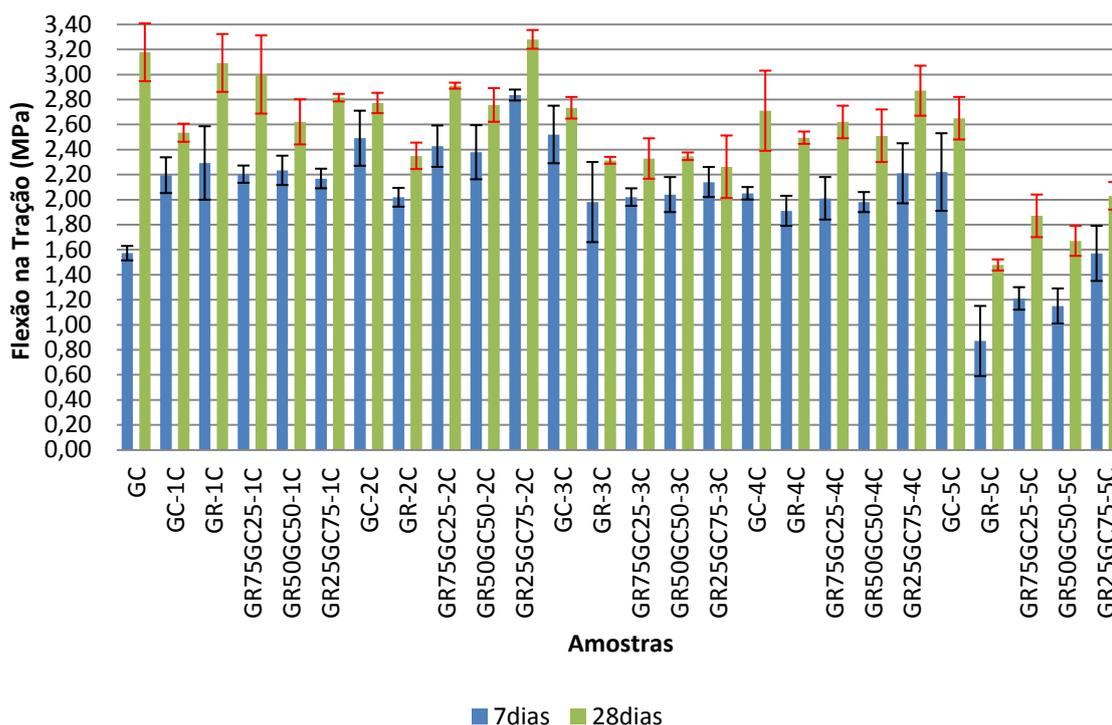


Figura 47 – Resistência à tração na flexão dos gessos reciclados

As amostras de gesso reciclado obtiveram resultados dentro do intervalo sugerido por Savi (2012), isto é, entre 0,7 e 3,5 MPa. Todas as amostras tiveram acréscimo em seus valores de resistência à tração na flexão de 7 para 28 dias.

Nenhuma das amostras atingiu o valor de 3,9 MPa descrito por Serna *et al.* (2012) e Yu; Brouwers (2011). Atribui-se à baixa resistência ao excesso de água na preparação da pasta, que após a cura tende a formar poros, reduzindo os valores observados no ensaio de tração na flexão, conforme descrito posteriormente no item 4.6.2.

As amostras GR-1C, GR75GC25-1C, GR75GC25-1C, GR75GC2-4C obtiveram valores próximos aos obtidos por Soares (2005); Jiménez-Rivero *et al.* (2014) e Guan *et al.* (2011), superiores a 3 MPa.

De forma geral, o quinto ciclo apresentou valores de resistência à tração na flexão abaixo dos demais ciclos. Atribui-se a baixa resistência obtida ao fato de que se analisado microscopicamente o quinto ciclo apresentar cristais curtos e ortorrômbicos, conforme descrito no item 4.7.1, dificultando o entrelaçamento entre as partículas.

A Figura 48 agrupa os resultados obtidos entre as amostras moldadas somente com gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado e suas misturas com gesso comum, aos 28 dias.

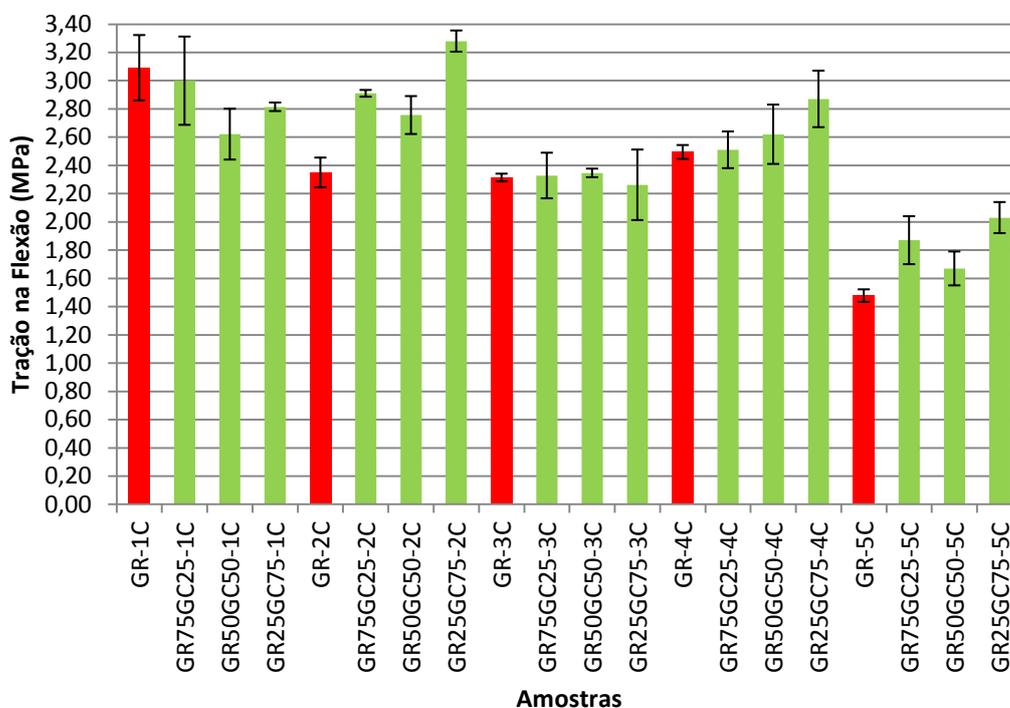


Figura 48 – Resistência à tração na flexão dos gessos reciclados x misturas experimentais

Como é possível observar na Figura 48, no primeiro ciclo houve decréscimo no valor observado na tração à flexão para todas as misturas. Atribui-se estes baixos valores observados à elevada relação a/g, conforme descrito posteriormente no item 4.6.2.

De maneira geral, a utilização de 75% de gesso comum no gesso reciclado elevou os valores obtidos no ensaio de tração na flexão. A hipótese mais provável é a de que o gesso comum possui cristais mais alongados, facilitando o entrelaçamento da estrutura cristalina.

4.6.2 Resistência à compressão

Os corpos de prova foram colocados diretamente sob a prensa hidráulica e calculado seu valor de resistência à compressão com a utilização da Equação 4,

apresentada no item 3.14. Os valores obtidos estão representados graficamente na Figura 49, cujo intervalo de confiança encontra-se acima dos 68,27%.

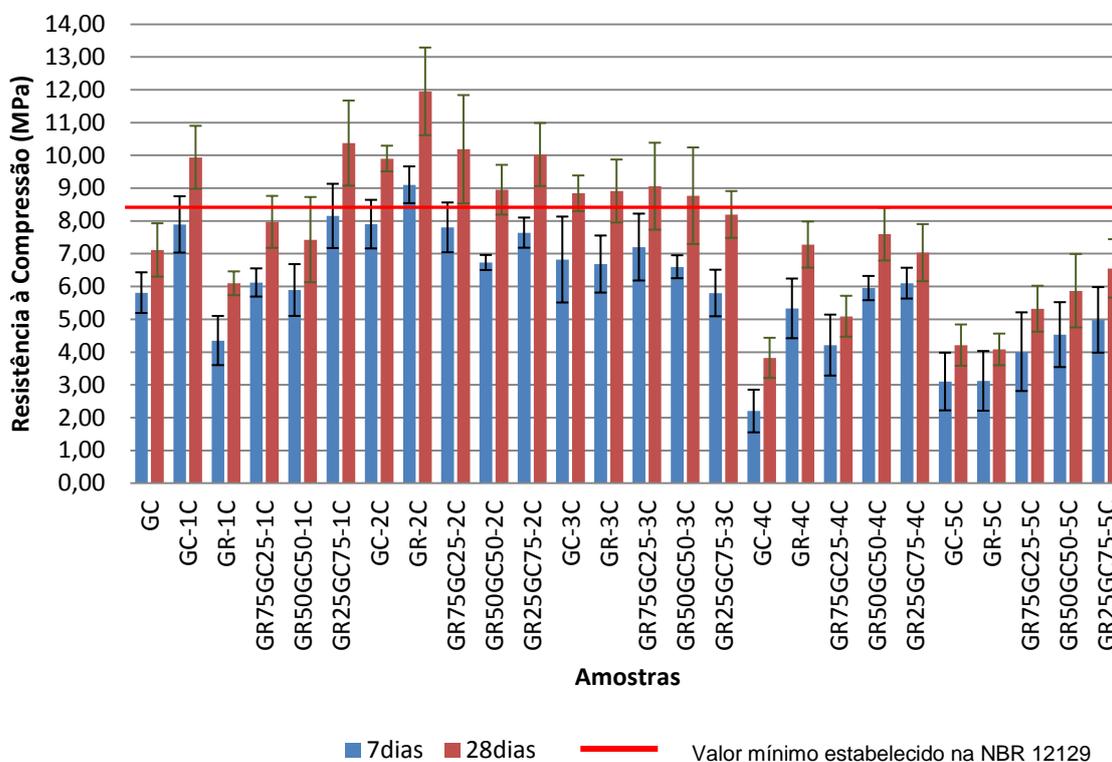


Figura 49 – Resistência à compressão axial dos gessos reciclados

No primeiro ciclo, as amostras GC e GR-1C não obtiveram os 8,4 MPa, valor mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), aos 28 dias. Atribui-se o comportamento de baixa resistência destas amostras ao excesso de água na mistura, formando pastas muito líquidas ou com excesso de bolhas de ar/água aprisionadas, como pode ser observado na Figura 50.

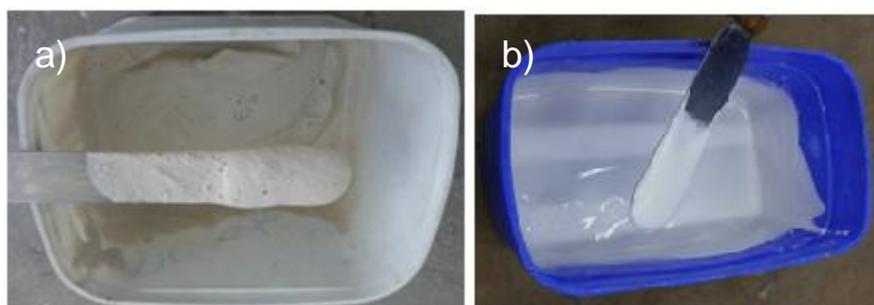


Figura 50 – a) Pasta de GR-1C e b) pasta de GC apresentando excesso de água

Devido a este excesso de água, após a evaporação, notou-se o surgimento de poros nos corpos de prova, reduzindo assim sua resistência, como pode ser observado na Figura 51.

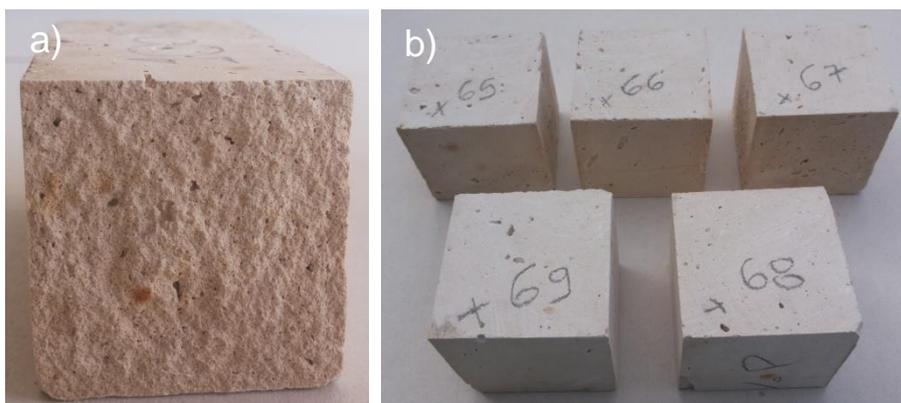


Figura 51 – a) porosidade interior do corpo de prova GR-1C b) corpos de prova de GC apresentando porosidade

Supõe-se que caso fosse utilizado um aditivo desincorporador de ar ou uma relação a/g abaixo de 0,7 estes poros não seriam formados, incrementando assim os valores obtidos para a resistência mecânica na compressão axial.

É possível observar que todas as demais amostras nos três primeiros ciclos atendem o limite mínimo de 8,40 MPa, aos 28 dias, no quesito resistência à compressão axial estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), representada pela linha vermelha na Figura 49.

Todas as amostras do quarto e quinto ciclo não atendem o valor mínimo de 8,4 MPa estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), aos 28 dias. Nestes corpos de provas não era visível a formações de poros. Desta forma, atribui-se a baixa resistência à microestrutura, uma vez que estes ciclos apresentaram cristais com dimensões microscopicamente inferiores se comparados com os primeiros ciclos.

As amostras do segundo e terceiro ciclo obtiveram resistência à compressão axial iguais ou superiores às descritas por Lima; Camarini (2011), Moura *et al.* (2014), Dai; e Fan (2015), Serna *et al.* (2012), Cardoso *et al.* (2009) e Gmouh *et al.*

(2003), conforme apresentado na Tabela 9 do item 2.5.3.2, para pastas preparadas com relação a/g 0,7.

A Figura 52 representa os resultados obtidos entre as amostras moldadas somente com gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado e suas misturas com gesso comum, aos 28 dias.

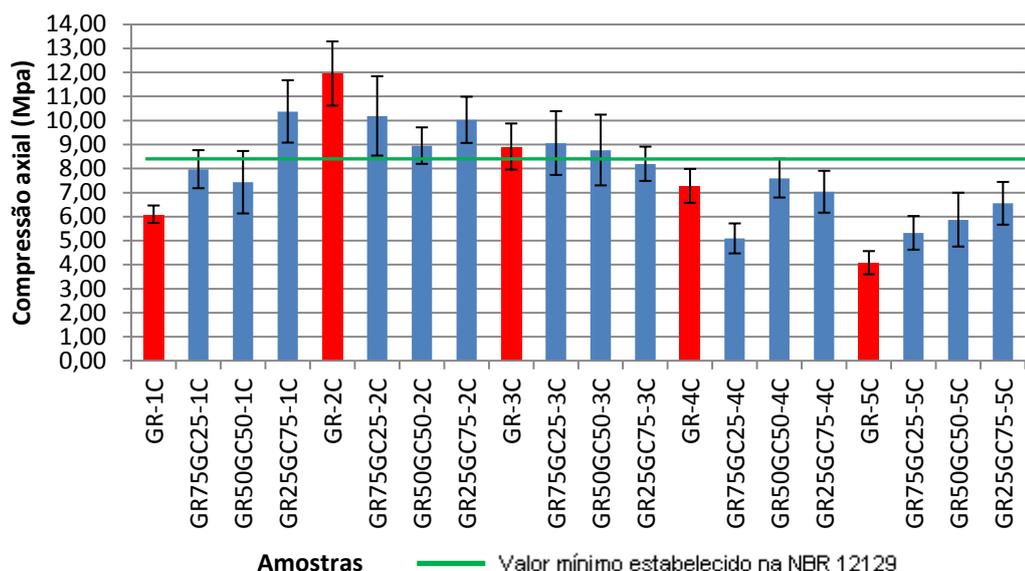


Figura 52 – Resistência à compressão axial dos gessos reciclados x misturas experimentais

As misturas propostas entre o gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado e o gesso comum apresentaram valores significativos somente no primeiro e quinto ciclo. No segundo, terceiro e quarto ciclo as amostras não apresentaram incrementos significativos nos valores. As amostras GR75GC25-2C, GR50GC50-2C e GR25GC75-2C apresentaram redução do valor observado em relação às amostras moldadas somente com gesso reciclado.

4.6.3 Dureza Superficial

É importante frisar que todos os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial foram obtidos através de uma adaptação do procedimento descrito na NBR 12129 (ASSOCIAÇÃO..., 1991b).

A norma específica descreve que os experimentos devem ser realizados com corpos de prova 5 x 5x 5 cm. Porém, para a realização do ensaio foram utilizados as metades dos corpos de prova resultantes do ensaio de tração na flexão, assim os corpos de prova utilizados possuíam as dimensões de 4 x 4 x 8 cm.

Mesmo assim parte-se da premissa que a dimensão do corpo de prova não altera significativamente o resultado obtido.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial dos corpos de prova e são apresentados na Figura 53, cujo intervalo de confiança dos dados estão acima de 68,57%.

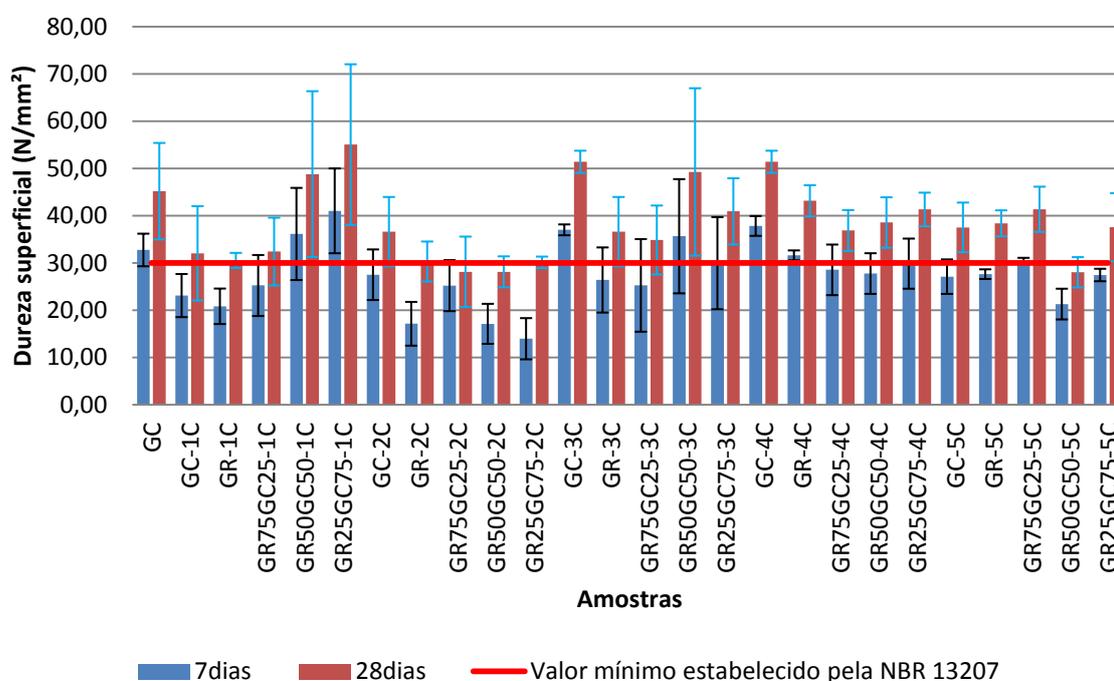


Figura 53 – Resistência à dureza superficial dos gessos reciclados

Todas as amostras ensaiadas atendem o valor mínimo de dureza superficial descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) de 30 N mm⁻², aos 28 dias, representado pela linha vermelha na Figura 53.

De forma geral, todas as amostras nos cinco ciclos alcançaram ou superaram os valores de dureza superficial encontrados por Ribeiro (2006), Lima; Camarini (2011) e Moura *et al.* (2014), descritos na Tabela 10 no item 2.5.3.3.

A Figura 54 representa os resultados obtidos entre as amostras moldadas somente com gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado e suas misturas com gesso comum, aos 28 dias.

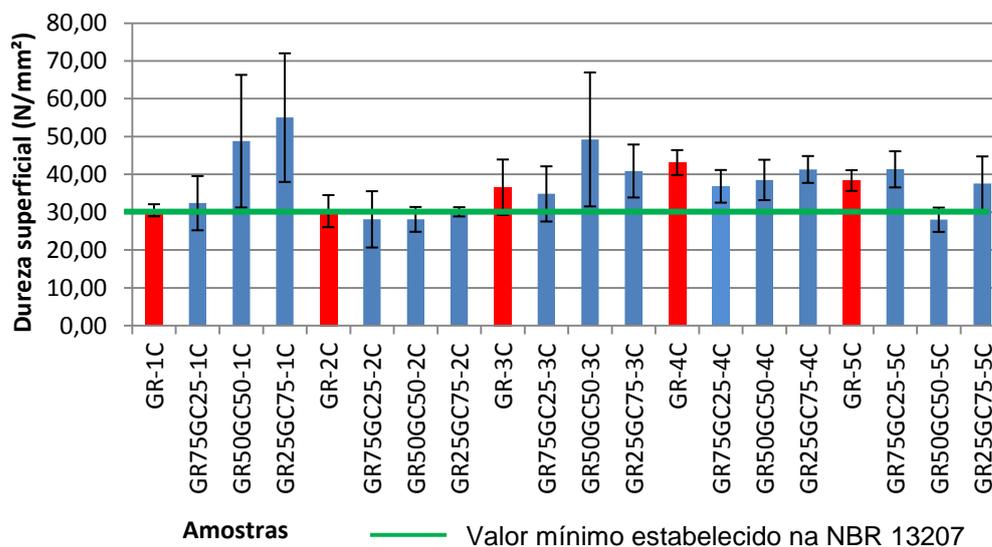


Figura 54 – Resistência à dureza superficial dos gessos reciclados x misturas experimentais

A inserção de gesso comum nas amostras apresentou valores significativos somente nas amostras do primeiro ciclo e na amostra GR50GC50-3C. As demais amostras não apresentaram incrementos significativos no quesito resistência superficial das amostras, mesmo assim foi atendido o limite mínimo de 30 N mm⁻² descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) em todas as misturas propostas.

Por fim, será realizada uma análise das fotomicrografias obtidas nos ensaios do MEV e a composição química das amostras.

4.7 MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A análise das microestruturas e a composição química podem ser utilizadas para solucionar inúmeras dúvidas referentes aos resultados obtidos, no item 4.7.1 e 4.7.2 serão abordados os aspectos microscópicos.

4.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a observação morfológica dos cristais de Sulfato de Cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) do gesso comum. As fotomicrografias obtidas no ensaio da MEV para o gesso comum foram similares aos visualizados por Kojima; Yasue (2016),

Na Figura 55 é apresentada a fotomicrografia do gesso comum, onde é possível observar a aglutinação dos cristais, a formação de grandes núcleos e o entrelaçamento dos cristais de CaSO_4 .

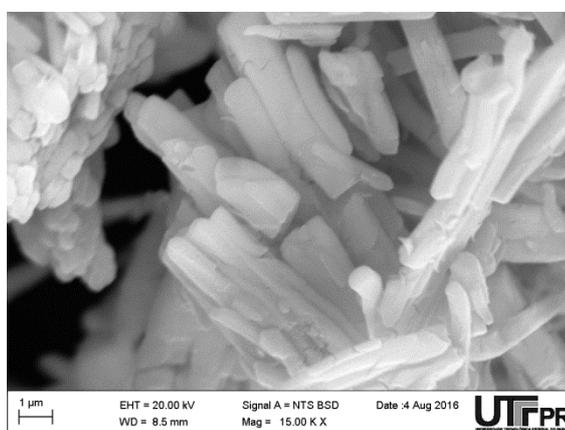


Figura 55 – Fotomicrografia do gesso comum ampliado 15000 vezes

A observação das micrografias do gesso comum reciclado, ao longo dos cinco ciclos de reciclagem, demonstra a formação de aglomerados de microcristais de forma alongada, com dimensões variadas. Morfologicamente semelhantes às fotomicrografias obtidas por Lewry; Williamson (1994) e Guam *et al.* (2011) em seus estudos.

Há presença de fraturas nos cristais, originados pelo processo de evaporação da água durante a cura, demonstrando que a relação a/g poderia ser reduzida nos primeiros ciclos, comprovando que havia excesso de água na mistura, Figura 56.

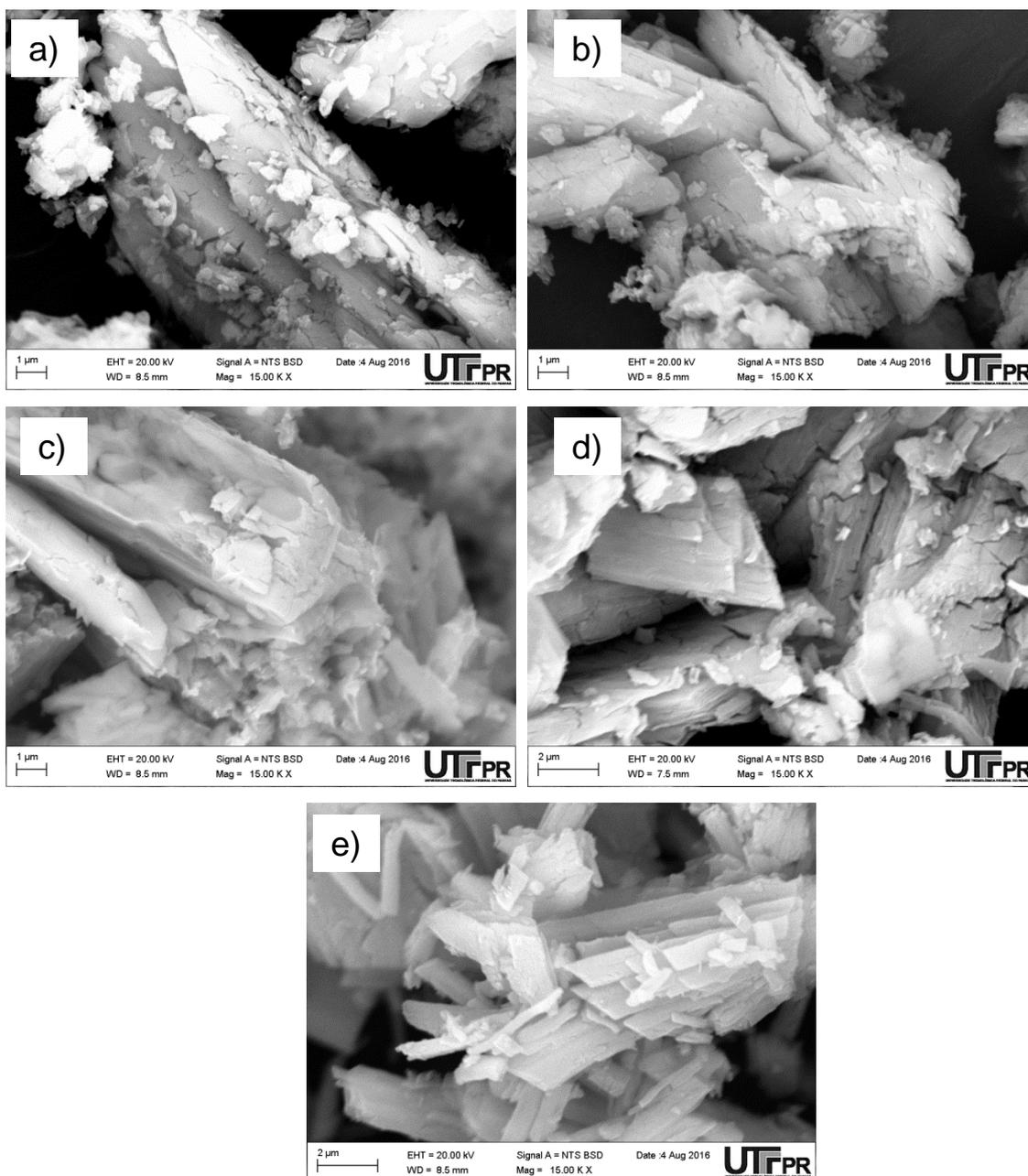


Figura 56 – Fotomicrografia do gesso comum reciclado ao longo dos ciclos de reciclagem ampliado 15000 vezes a) 1º ciclo, b) 2º ciclo, c) 3º ciclo, d) 4º ciclo e e) 5º ciclo

A fotomicrografia da Figura 56 e), referente à amostra GC-5C, não apresentou trincas provenientes do excesso de água de evaporação, pois desde a preparação da pasta sua consistência apresentava um aspecto homogêneo, sem excesso de bolhas de ar ou água.

A Figura 57 refere-se às fotomicrografias das cinco amostras de GR coletadas ao longo dos ciclos.

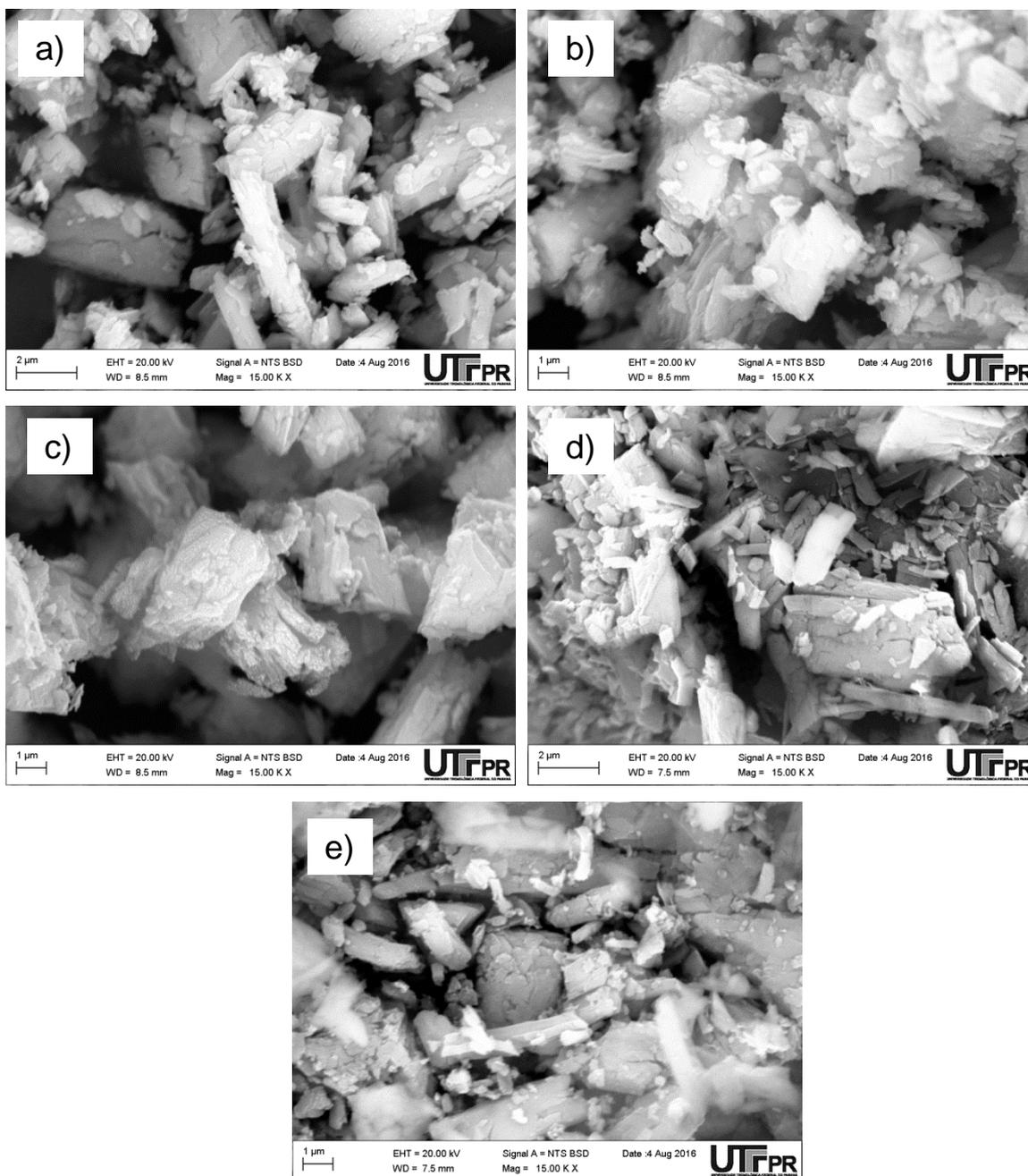


Figura 57 – Fotomicrografia através de MEV do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso cartonado ao longo dos ciclos ampliado 15000 vezes a) 1º ciclo, b) 2º ciclo, c) 3º ciclo, d) 4º ciclo e e) 5º ciclo

Em todas as imagens da Figura 57 observa-se a presença de cristais de diversos comprimentos e espessuras, característico do gesso reciclado (ZHOU *et al.* 2015; GMOUH *et al.*, 2003).

Nas amostras de GR os cristais possuem formas mais ortorrômbicas, diferentes dos cristais observados no GC, sendo assim já não é tão evidente o entrelaçamento dos cristais, devido à sua estrutura cristalina.

Assim como no GC, todas as amostras de GR apresentam fraturas na formação dos cristais, geradas pela evaporação do excesso de água de composição.

4.7.2 Composição química

O EDS determinou a composição química dos elementos presentes nas amostras. Os resultados obtidos no ensaio de EDS são apresentados Tabela 17.

Tabela 17 - Composição química da do gesso determinado através do EDS

Amostra	Elementos Químicos (%)					Total (%)
	Oxigênio (O)	Enxofre (S)	Cálcio (Ca)	Alumínio (Al)	Silício (Si)	
GC	52,96	23,43	23,61	-	-	100,00
GC-1C	57,33	21,29	21,38	-	-	100,00
GR-1C	50,01	24,31	25,49	-	-	100,00
GC-2C	48,75	25,58	25,67	-	-	100,00
GR-2C	51,38	24,30	24,32	-	-	100,00
GC-3C	58,38	20,87	20,87	0,19	-	100,00
GR-3C	40,59	27,22	31,82	0,37	-	100,00
GC-4C	44,89	25,80	29,05	0,26	-	100,00
GR-4C	44,59	27,34	27,91	0,16	-	100,00
GC-5C	53,33	21,93	24,57	0,17	-	100,00
GR-5C	48,80	22,67	23,40	2,56	2,57	100,00

As composições encontradas foram similares às apontadas na literatura, onde prevalece o Oxigênio, o Cálcio e o Enxofre, confirmando os dados de Yu; Brouwers (2011).

Em todas a amostras a porcentagem de Cálcio é ligeiramente superior a de Enxofre, porém muito próximas, confirmando assim que estes dois minerais são os mais relevantes na composição da partícula de gesso.

Durante os ciclos foi mantida a proporção dos elementos, assim como a manutenção dos elementos observados, confirmando reversibilidade das reações.

Esperava-se encontrar elementos diferentes nas amostras de GR devido aos aditivos utilizados durante o processo de produção das chapas de gesso acartonado, o que não ocorreu em nenhum ciclo. Somente na amostra de GR-5C foi detectada a presença de Silício.

Bardella (2011) classifica o alumínio como um tipo de impureza. O alumínio presente nas amostras pode ter origem no desgaste do cilindro utilizado no processo de trituração eletro-mecânica ou no momento da desfragmentação das amostras para ensaio do MEV, pois a cuba e o soquete utilizado eram de alumínio, o que pode ter comprometido a amostra.

Finalizado o capítulo de resultados inicia-se o capítulo 5 com as conclusões sobre a pesquisa.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa serve de ponto de partida para uma série de estudos sobre a reciclagem do gesso contido nas chapas de gesso acartonado e do gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem.

A metodologia utilizada em laboratório para reciclagem do gesso confirmou que após a rehidratação foi possível moldar corpos de prova sólidos somente utilizando resíduo de gesso, em todos os ciclos de reciclagem. Assim, foi comprovada a reversibilidade das reações, sendo possível hidratar e calcinar o gesso através de cinco ciclos.

O processo de trituração foi eficiente tanto na etapa de separação do papel cartão da massa de gesso das chapas de gesso acartonado quanto na cominuição das partículas de gesso reciclado, atingindo o parâmetro de gesso grosso descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a). Para um trituração ainda mais fina sugere-se a utilização de outro mecanismo de moagem para as partículas finas, como por exemplo os moedores rotativos utilizados na moagem do clínquer.

Foi possível verificar que a granulometria entre as amostras é similar, não ocorrendo grande variação ao longo dos ciclos de reciclagem. O gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado apresenta partículas mais finas do que as de gesso comum reciclado, conforme constatado nos resultados do ensaio de módulo de finura.

Mesmo apresentando elevado grau de finura, somente as amostras GR-2C e GR-4C atendem o valor mínimo da massa unitária estipulado na NBR 13207, de 700 kg m^{-3} (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Os baixos valores obtidos no ensaio de massa unitária não comprometeram a obtenção de valores de resistência mecânica acima dos estabelecidos pela norma correspondente.

Todas as amostras formadas somente com gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado, atendem os dois patamares do tempo de início e fim de pega para o gesso de revestimento simultaneamente. Já a amostra 5C-GC se enquadra no intervalo para gesso de fundição.

A utilização de misturas de gesso comum nas amostras de GR incrementou os valores de resistência à tração na flexão em todos os ciclos. Atribui-se o aumento de resistência ao melhor entrelaçamento dos cristais e a redução de vazios, uma vez

que os cristais de gesso comum são mais alongados, enquanto os de gesso reciclado são ortorrômnicos e mais curtos, preenchendo assim os vazios.

Foi possível obter os 8,40 MPa aos 28 dias para resistência à compressão axial estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) nos três primeiros ciclos de reciclagem para o gesso proveniente das chapas de gesso acartonado, o gesso comum reciclado e todas as misturas sugeridas. Somente as amostras GR-1C e GC não atenderam o limite mínimo estabelecido de 8,40 MPa aos 28 dias devido ao excesso de água presente na mistura. Tal excesso após a cura formava poros, diminuindo a resistência dos corpos de prova.

A relação a/g de 0,7 escolhida para moldagem dos corpos de prova poderia ser reduzida nos primeiros três ciclos. Desta forma supõe-se que haveria um acréscimo nos valores observados para as propriedades mecânicas, uma vez que o excesso de água de composição evapora e cria poros nos corpos de prova. Seria possível utilizar uma relação a/g menor na moldagem dos corpos de prova caso fossem utilizados plastificantes ou superplastificantes durante a preparação da pasta.

Embora o ensaio de dureza superficial não tenha sido executado com os corpos de prova 5x5 cm estabelecidos na norma, todas as amostras ao longo dos cinco ciclos de reciclagem, atenderam os 30 N mm⁻² aos 28 dias descritos na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) para a dureza superficial. Desta forma sugere-se que a utilização das metades dos corpos de prova utilizados no ensaio de flexão não afetou o resultado obtido.

O gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado de segundo ciclo, a amostra GR-2C, atende simultaneamente os parâmetros físicos da NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 1991b) e os parâmetros mecânicos da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Desta forma esta amostra pode ser classificada como gesso grosso de revestimento.

Nos ensaios do MEV foi possível confirmar as características morfológicas apontadas na literatura, verificando a geometria e formações dos cristais. Foi possível observar microscopicamente que os cristais tendem a reduzir seu comprimento ao longo dos ciclos de reciclagem, dificultando o entrelaçamento dos cristais. Durante os ciclos de reciclagem foi possível observar o aumento dos vazios entre os cristais, fator que reduziu os valores obtidos nos ensaios de tração na flexão, compressão axial e dureza superficial. Em algumas amostras foi possível

observar o aparecimento de fraturas nos cristais, provenientes da evaporação do excesso de água de composição.

A utilização de misturas entre gesso comum e gesso reciclado não apresentou padrão de acréscimo ou decréscimo dos valores observados nos ensaios de determinação de resistência mecânica.

A inserção de gesso comum na moldagem dos corpos de prova elevou os valores da resistência à tração na flexão nos segundo, quarto e quinto ciclos, em relação aos corpos de prova moldados somente com gesso reciclado. No terceiro ciclo, o incremento do valor observado não foi significativo. Nas amostras do primeiro ciclo, as misturas propostas reduziram o valor observado no quesito tração na flexão. Atribui-se esta baixa resistência ao excesso de água na pasta.

No primeiro ciclo, somente as amostras que possuíam gesso comum em sua composição atingiram os 8,4 MPa para a resistência à compressão axial. No quinto ciclo, as misturas entre gesso comum e reciclado ampliaram os valores observados, porém não o suficiente para atingir os 8,4 MPa descritos na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) para a compressão axial. Nos demais ciclos não houve incremento significativo nos valores observados. As amostras do segundo ciclo e a amostra GR75GC25-4C apresentaram redução dos valores de compressão axial em relação às amostras moldadas somente com gesso reciclado.

A mistura entre gesso comum e gesso reciclado ampliou os valores de dureza superficial em todas as amostras do primeiro ciclo e na amostra GR50GC50-3C, em relação às amostras moldadas somente com gesso reciclado. As amostras GR50GC50-1C, GR75GC25-1C e GR50GC50-3C atingiram valores acima de 66 N mm² no ensaio de dureza superficial, superior aos 30 N mm² descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994). Nas demais amostras, não foi observado um incremento significativo nos valores de dureza superficial em relação aos corpos de prova moldados somente com gesso reciclado.

De forma geral, as misturas experimentais propostas não incrementaram os valores de resistência mecânica como esperado. Atribui-se estes baixos valores de resistência mecânica obtidos à geometria dos cristais. Uma vez que os cristais de gesso comum são mais finos e alongados, enquanto os de gesso reciclado possuem formato ortorrômbico, dificultando assim seu entrelaçamento. Outra possibilidade é a qualidade do gesso comum utilizado na pesquisa.

Por fim, conclui-se que é possível realizar a reciclagem do gesso proveniente de chapas de gesso acartonado e de gesso comum, atendendo às prescrições da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) até o terceiro ciclo de reciclagem.

Demonstra-se, assim, que o resíduo de gesso hoje descartado nas obras pode vir a ser reutilizado, gerando novas oportunidades comerciais e inserindo este produto hoje nocivo ao meio ambiente na esfera sustentável.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se ampliação do tema proposto através do estudo dos seguintes temas:

- Desenvolvimento de um equipamento que amplie a escala de bancada para escala piloto realizando as primeiras etapas de moagem das chapas de gesso acartonado, isto é, com uma série de cilindros e peneiras para obter maior redução do tamanho das partículas.
- Utilização de um cilindro diferente do cilindro de rolos para redução da granulometria das partículas mais finas.
- Realização do levantamento de custos para produção do gesso reciclado.
- Averiguação de uma possível política reversa para coleta deste resíduo e envio para reciclagem.
- Replicar o estudo com outras relações a/g para determinar a variação das propriedades físicas e mecânicas.
- Utilizar aditivos plastificantes e/ou superplastificantes, reduzindo assim a relação a/g e determinar as propriedades mecânicas do material.

REFERÊNCIAS

AHMED, A.; SOLIMAN, A. M.; HESHAM N. M.; KAMEI, T. An assessment of geo-environmental properties for utilization of recycled gypsum in earthwork projects. **Soils and Foundations**, v. 55, p. 1137-1147, set. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061500116X>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A Indústria do Cimento e o Desenvolvimento do Brasil**. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/a-industria-do-cimento-e-o-desenvolvimento-do-brasil/>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12127**: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991a.

_____. **NBR 12128**: Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991b.

_____. **NBR 12129**: Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991c.

_____. **NBR 13207**: Gesso para construção civil – Especificação. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL. **Mercado do Drywall no Brasil**. São Paulo: Drywall. Disponível em: < <http://www.drywall.org.br/>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

AZIMI, G.; PAPAGELAKIS, V. G. Mechanism and kinetics of gypsum–anhydrite transformation in aqueous electrolyte solutions. **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 122–129, jun. 2011. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/hydromet>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

BALLIRANO, P.; MELIS, E.. Thermal behaviour and kinetics of dehydration of gypsum in air from in situ real-time laboratory parallel-beam X-ray powder diffraction. **Physics and Chemistry of Minerals**, Verlag, v. 36, n. 3, jun. 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00269-008-0285-8>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

BARDELLA, P. S. **Análise das Propriedades de Pastas de Gesso de Construção Reciclado**. 2011. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2011. Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000847076>>. Acesso em: 23 jan. 2016.

BAUER, C. **Gypsum Recycling in PlaNYC 2030: Spaces for Government Intervention**. 2012. 72 f. Tese. Faculty of Architecture & Planning Columbia University, 2012. Disponível em: <<https://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac%3A147120>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

BEER, M. de; MAREE, J.P.; L. LIEBENDERG, L; DOUCET, F.J. Conversion of calcium sulphide to calcium carbonate during the process of recovery of elemental sulphur from gypsum waste. **Waste Management**, v. 34, p. 2373–2381, 2014. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/wasman>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

BICINI, H.; ASLAN, M. Engineering properties of composites containing polyurethane, wheat stalk and corn stalk ash, peanut shell ash, fly ash, sawdust, perlite, barite and gypsum. **European Journal of Engineering and Technology**, v. 4, n. 3, 2016. Disponível em: <<http://www.idpublications.org/wp-content/uploads/2016/03/Abstract-ENGINEERING-PROPERTIES-OF-COMPOSITES-CONTAINING-POLYURETHANE-WHEAT-STALK.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

BOISVERT, J.; DOMENECH, M.; FOISSY, A.; PERSELLO, J.; MUTIN, J. Hydration of calcium sulfate hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) into gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). The influence of the sodium poly(acrylate) / surface interaction and molecular weight. **Journal of Crystal Growth**, Netherlands, v. 220, p. 579-591, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024800008654>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

BORTOLETO, G.G. **Desenvolvimento de métodos analíticos usando espectrometria de raios x e quimiometria**. 2007. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 2007. Disponível em: <<http://biq.iqm.unicamp.br/arquivos/teses/vtIs000414755.pdf>>. Acesso em: 03 nov. 2016.

CAMPBELL, S. Lead by Example. **Walls & Ceillings**, v. 1, n. 1, p.1-6, 2003. Disponível em: <http://www.wconline.com/Articles/Feature_Article/6f999d146a768010VgnVCM100000f932a8c0>. Acesso em: 04 jan. 2016.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/ISMS-6X6R77>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

CARDOSO, F. A.; AGOPYAN, A. K.; CARBONE, C.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Squeeze flow as a tool for developing optimized gypsum plasters. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1349–1353, 2009. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000102&pid=S1983-4063201400010000400008&lng=en>. Acesso em: 04 jun. 2016.

CARVALHO, M. A.; JÚNIOR, C. C.; JUNIOR, H. S. Microstructure and Mechanical Properties of Gypsum Composites Reinforced with Recycled Cellulose Pulp. **Materials Research**, v. 11, n. 4, p. 391-397, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392008000400002>. Acesso em: 04 jun. 2016.

CARVALHO, M. C. S.; NASCENTE, A. S. Calcário, gesso e efeito residual de fertilizantes na produção de biomassa e ciclagem de nutrientes de milho. **Embrapa Arroz e Feijão**, v. 44, n. 4, p. 370-380, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pat/v44n4/v44n4a08.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

CAVALCANTI, R. A. A.; ALVES, B. C. A.; ROMANO, R. C. O.; JOHN, V. M.; PÓVOAS, Y. V. Composição Granulométrica Do Resíduo De Gesso Influencia Nas Propriedades Do Revestimento Interno De Parede: XIV ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012 Juiz de Fora. **Anais eletrônicos..** Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212011000200013>. Acesso em: 12 jan. 2016.

CAVALCANTI, L. B. **Determinação de condições operacionais adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável.** 2006. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco, 2006. Disponível em: <http://www.unicap.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=25>. Acesso em: 12 fev. 2016.

CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. Gesso de construção civil. In: ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil.** São Paulo: Ibracon, 2007.

CUNHA, Paulo Waldemiro Soares. **Estudo sobre as potencialidades de compósitos à base de gesso e fibras de coco seco para aplicação na construção civil.** 2012. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12847>>. Acesso em: 05 de jun. 2016.

CHINAGLIA, C. R.; CORREA, C. A. Análise de falhas em materiais através de técnicas avançadas de microscopia. **Polímeros**, v. 7, n. 3, 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14281997000300005>. Acesso em: 03 nov. 2016.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO n.º 307.** Julho, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 08 de nov. 2016.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **RESOLUÇÃO n.º 431**. Maio, 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>>. Acesso em: 08 de nov. 2016.

COSTA, A. S. V.; HORN, A. H.; DONAGEMMA, G. K.; POLIDORO, J. C.; GIACOMINI, R. P.; Trindade, A. S. Efeitos no solo do gesso produzido em diferentes reações químicas da solução de ácido sulfúrico reciclada com carbonato de cálcio residual e óxido de cálcio. In: IMPEQUI - 9.º Simpósio Brasileiro de Educação Química, 2011. Natal. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/rqi/2011/730/RQI-730-pagina17-artigo-tecnico.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

DAI, D.; FAN, M. Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 417–424, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015301175>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura** - aplicações e preparação de amostras. Porto Alegre: Edipucrs, 2007.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Comunicado Técnico n.º 07**. Maio, 1992. Disponível em: <<http://file:///C:/Users/Alexandre/Downloads/cot007.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

ERBS, A.; NAGALLI, A.; MYMRINE, V.; CARVALHO, K. Q. Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado. **Cerâmica**, v. 61, p. 482-487, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000400482&script=sci_abstract&tlng=pt/>. Acesso em: 04 jun. 2016.

FERREIRA, M. S.; CORDON, H. S. F. **Análise da Microestrutura do Gesso Reciclado com a Utilização de Micro-Ondas**. In: SEMESP - 15.º Seminário de Especialização e Pesquisa, 2015. São Paulo. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<http://maua.br/files/0016/analise-microestrutura-gesso-reciclado-desidratado-com-utilizacao-micro-ondas-081040.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

FIANO, M. B. S.; PIMENTEL, L. L. **Estudo da Viabilidade do Reaproveitamento de Gesso – queima rápida**: XIV ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC-CAMPINAS, 2009 Campinas. **Anais eletrônicos**. Campinas: PUC Campinas, 2009. Disponível em: <<https://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/pesquisa/ic/pic2009/resumos/%7BFB739EF6-CC1A-4C02-B488-74930848D9D1%7D.PDF>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

FILHO, H. J. B. L. **Tratamento dos resíduos de gesso da construção e da demolição-RCD para a produção do gesso beta reciclado**. 2010. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Pernambuco, 2010. Disponível em:

<<http://repositorio.ufpe.br:8080/xmlui/handle/123456789/6201>>. Acesso em: 23 jan. 2016.

FREITAS, J. A. **Materiais de Construção. Aglomerantes.** Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Departamento de Construção Civil, 2013. Curitiba, p. 152. Disponível em: <<http://www.docplayer.com.br/6243550-Materiais-de-construcao-tc-030.html>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

FUKAMI, T.; TAHARA, S.; NAKASONE, K.; YASUDA, C. Synthesis, Crystal Structure, and Thermal Properties of CaSO₄·2H₂O Single Crystals. **International Journal of Chemistry**, v. 7, n. 2, 2015. Disponível em: <<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/ijc/article/view/47260>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions — The case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 4, p. 289–295, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884609000234>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

GMOUH, A; EVE, S.; SANDÍ, 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 and Engineering**, v. 352, p. 325–332, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509302009383>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

GUAN, B.; YANG, L.; FU, H.; KONG, B.; LI, T.; YANG, L. α -calcium sulfate hemihydrate preparation from FGD gypsum in recycling mixed salt solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 174, p. 296–303, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711010916>>. Acesso em: 09 jun. 2016.

GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL (Dinamarca). **The recycling technology.** Disponível em: <<http://www.gypsumrecycling.biz/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

HARADA, E; PIMENTEL, L. L. **Estudo da Viabilidade do Reaproveitamento de Gesso – queima lenta:** XIV ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC-CAMPINAS, 2009 Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: PUC Campinas, 2009. Disponível em: <<https://www.puc-campinas.edu.br/websist/porta/pesquisa/ic/pic2009/resumos/%7B09A7911B-5629-474D-B119-186B06603353%7D.PDF>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

HERMES, D. V. **Reutilização dos resíduos de gesso de revestimento: Painéis Decorativos.** 2011. Desenhando o Futuro. 2011. I CONGRESSO NACIONAL DE DESIGN. Disponível em: <http://www.desenhandoofuturo.com.br/anexos/anais/design_e_inovacao/reutilizacao_dos_residuos_de_gesso_de_revestimento.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2016.

- INAZUMI, S.; SANO, H.; YAMADA, M. Estimation of gypsum hemihydrate content in recycled gypsums derived from gypsum boards. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 18, p. 168 - 176, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10163-014-0319-x>>. Acesso em: 09 jun. 2016.
- JOHN, V. M.; ANTUNES, R. P. N. **Argamassas de gesso**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 29-37, 2002. Disponível em: <<https://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3409>>. Acesso em: 12 jan. 2016.
- KANNO, W. M. **Propriedades Mecânicas do Gesso de alto Desempenho**. 2009. 132 f. TESE (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-21112010-084639/>>. Acesso em: 23 jan. 2016.
- KOJIMA, Y.; YASUE, T. Synthesis of large plate-like gypsum dihydrate from waste gypsum board. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, p. 777–783, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221905005789>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- LAWRENCE-SANSBURY, D.; BOYLE, C. **The Feasibility And Practicalities Of Recycling Gypsum Plasterboard Waste In New Zealand**. 2013. Disponível em: <<http://www.wasteminz.org.nz/wp-content/uploads/RECYCLING-GYPSUM-PLASTERBOARD-WASTE-IN-NEW-ZEALAND.pdf>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- LEE, J.; OGURA, H. Reaction characteristics of various gypsum as chemical heat pump materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, p. 1557 - 1563, 2013. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/apthermeng>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster. **Journal of materials science**, London, v. 29, p. 5524-5528, 1994. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2F0354546>>. Acesso em: 04 jun. 2016.
- LIMA, K. D. DOS S.; CAMARINI, G. **Influência da temperatura e do tempo de calcinação na reciclagem dos resíduos de gesso: XVIII ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC-CAMPINAS, 2011** Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: PUC Campinas, 2011. Disponível em: <<http://www.prp.rei.unicamp.br/pibic/congressos/xviii-congresso/paineis/083725.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2016.
- LOU, W.; GUAN, B. ; WU, Z. Dehydration behavior of FGD gypsum by simultaneous TG and DSC analysis. **J Therm Anal Calorim**, v. 104, p. 661–669, out. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10973-010-1100-6>>. Acesso em: 05 jun. 2016.

MARVIN, E. **Gypsum wallboard recycling and reuse opportunities in the state of Vermont**. 2000. Vermont: Waste Management Division Vermont Agency of Natural Resources, 2000. 44 p. Disponível em: <<http://www.anr.state.vt.us/dec/wastediv/recycling/gypsum.pdf>> Acesso em: 12 jan. 2016.

MEDINA, N. F.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; ARROYO, X.; AGUILERA, A.; FERNANDEZ, F. Characterization of a more sustainable cement produced with recycled drywall and plasterboards as set retarders. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 982–991, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816314039>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

MESQUITA, L. S. P.; PÓVOAS, Y. V. **Influência De Aditivo Retardador De Pega Na Pasta De Gesso Com Resíduo De Gesso Calcinado** In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, Maceio. **Anais eletrônicos...** Maceio. Disponível em: <<https://pct.capes.gov.br/teses/2011/33003017041P4/TES.PDF>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

MELO, D. C. P. **Processo de calcinação da gipsita/resíduo em um forno rotativo contínuo para a produção de gesso beta reciclável**. 2012. 177f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11783>>. Acesso em: 23 jan. 2016.

MIAO, M.; FENG, X.; WANG G.; CAO, S.; SHI, W., SHI, L. Direct transformation of FGD gypsum to calcium sulfate hemihydrate whiskers: Preparation, simulations, and process analysis. **Particuology**, v. 19, p. 53–59, 2015. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/partic>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MOURA, R. S. L. M.; DEUSDARA, D. F. M.; BARRETO, J. M. L.; CABRAL, A. E. B.. **Avaliação Da Adequação Do Gesso Reciclado Às Prescrições Da Nbr 13207** In: XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2014, Maceio. **Anais eletrônicos..** Maceio. Disponível em: <<https://pct.capes.gov.br/teses/2011/33003017041P4/TES.PDF>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

NAGALLI, A.. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASCIMENTO, F. J. de F.; PIMENTEL, L. L. **Reaproveitamento de Resíduo de Gesso**. In: XV ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA PUC-CAMPINAS, 15., 2010, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: PUC Campinas, 2010. Disponível em: (<https://www.puccampinas.edu.br/websist/portal/pesquisa/ic/pic2010/resumos/2010924_101439_502012254_resiaL.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2016.

NEW WEST GYPSUM RECYCLING. **Recovery process**. Disponível em: <<http://www.nwgyypsum.com/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

NITA, C.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. **I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável. X ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2014 São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.antac.org.br/#!eventoshistorico/c10b4>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

PAPAILIOPOULOU, N; GRIGOROPOULOU, H; FOUNTI, M. Energy Analysis of the Effects of High-Level Reincorporation of Post-consumer Recycled Gypsum in Plasterboard Manufacturing. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-11, 2016. Netherlands. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9750-7>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

PENG, C.; ZHANG, F.; GUO, Z. Gypsum crystallization and potassium chloride regeneration by reaction of calcium chloride solution with potassium sulfate solution or solid. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 20, p. 712-720, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100363260960203X>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes**. 2011. 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, 2011. Disponível em: <<http://pct.capes.gov.br/teses/2011/33003017041P4/TES.PDF>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

PINHO, R. D. **Avaliação das propriedades mecânicas dos pré-moldados de gesso alterados microestruturalmente e uso das causas do amarelamento pós pintura**. 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, 2003. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br:8080/xmlui/handle/123456789/5452>>. Acesso em: 05 mar. 2016.

PLACO DO BRASIL. **Mercado de drywall segue em expansão**. Disponível em: <<http://www.placo.com.br/noticias-drywall/releases-drywall/template-release-drywall.asp?id={9CAF41B4-E49D-408D-897D-5A4B5F01C769}>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. **Reciclagem do Gesso**. Disponível em: <<http://www.portalresiduossolidos.com/>>. Acesso em: 12 jan. 2016

PRACOWNIA PERMAKULTURY. **The use of gypsum in agriculture and horticulture**. Disponível em: <<http://permakultura.net/2015/03/25/zastosowanie-gipsu-w-rolnictwie-i-ogrodnictwie-2/?lang=en>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

RAGHAVENDRA, T.; UDAYASHANKAR, B. C.. Engineering properties of controlled low strength materials using flyash and waste gypsum wall boards. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 548–557, 2015. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181530492X>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

REAL, J. C. C. **Determinação de condições operacionais adequadas para produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica**. 2009. 57 f. Dissertação (Mestrado em Processos Ambientais). Universidade Católica de Pernambuco. Disponível em: <http://www.unicap.br/tede/tde_arquivos/6/TDE-2012-02.../dissertacao_joao_carlos.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2016.

RIBEIRO, A. S. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. 2006. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal da Paraíba, 2006. Disponível em: <http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=150>. Acesso em: 23 jan. 2016.

RIBEIRO, A. S. **Estudo e otimização do processo de produção de gesso reciclado a partir de resíduos da construção civil**. 2011. 312f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal da Paraíba, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6087>>. Acesso em: 23 jan. 2016.

RIVEIRO, A. J.; NAVARRO, J. G. Indicators to Measure the Management Performance of End-of-Life Gypsum: From Deconstruction to Production of Recycled Gypsum. **Waste and Biomass Valorization**, Verlag, v. 7, n. 3, mai. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12649-016-9561-x>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

RIVEIRO, A. J.; SATHRE, R.; NAVARRO, J. G.. Life cycle energy and material flow implications of gypsumplasterboard recycling in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 108, n. 2, p. 171–181 2016. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/294139753_Life_cycle_energy_and_material_flow_implications_of_gypsum_plasterboard_recycling_in_the_European_Union>. Acesso em: 04 jun. 2016.

RIVEIRO, A. J.; BÁEZ, A. G.; NAVARRO, J. G. New composite gypsum plaster-ground waste rubber coming from pipe foam insulation. **Construction and Building Materials**, v. 55, p. 146-152, mar. 2014. Disponível em: <<http://elsevier/locate/conbuiltmat>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

ROQUE, J. A.; LIMA, M. M. T.; CAMARINI, G.; Características químicas e propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado calcinado na temperatura de 200 °C. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49, 2005, São Pedro - SP. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbc/2005/artigos/49cbc-15-02.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

ROSSETO, J. R. M.; CORREIA, L. S.; GERALDO, R. H.; CAMARINI, G. Gypsum plaster waste recycling: analysis of calcination time. **Key Engineering Materials**. Switzerland, v. 668, p. 312-323, nov. 2013. Disponível em: <<http://www.scientific.net/KEM.668.312>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

SANTOS, V. A. **Análise cinética da reação de desidratação térmica da gipsita na obtenção do gesso beta**. 1996. 170 f. Tese. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_eea451173f977bd21d498ff984f388fd>. Acesso em: 12 jan. 2016.

SAVI, O.; SOUZA, R. A.; FILHO, A. M. M.; ROERA, G.; PEREIRA, J. J. Massa Unitária do gesso reciclado e convencional. In: **IX Encontro Tecnológico da Engenharia Civil e Arquitetura**, 2013, Maringá - PR. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<http://www.eventos.uem.br/index.php/enteca/2013>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

SAVI, O. **Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso**. 2012. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, 2012. Disponível em: <<http://www.peu.uem.br/Discertacoes/Olindo.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2016.

SERNA, A.; RÍO, M.; PALOMO, J. G.; GONZÁLEZ, M. Improvement of gypsum plaster strain capacity by the addition of rubber particles from recycled tyres. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 633–641, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812002954>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

SCHMITZ, I. B. T. A.; PÓVOAS, Y. V. Análise de desempenho do revestimento de gesso com adição de seu resíduo gerado em obra. In: V ENCONTRO NACIONAL E III ENCONTRO LATINO AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E CONSTRUÇÕES SUSTENTÁVEIS, 2009, Recife - PE. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-86212010000100006&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 14 jun. 2016.

SCREMIM, C. B. **Novos compósitos para materiais de construção civil contendo sedimentos de dragagem de porto marítimo, cinza de madeira de bracing e cal residual**. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <<http://www.repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/1073>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

SIEVERT, T; WOLTER, A.; SINGH, N.B. Hydration of anhydrite of gypsum (CaSO₄.II) in a ball mill. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 623–630, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604000894>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

SINIAT. **Drywall – perguntas frequentes**. Disponível em: <<http://www.gypsum.com.br/web/pt/consumidores/faq-drywall.htm>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

SINGH, N.B.; MIDDENDORF, B. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, v. 53, p. 57 - 77 2007. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/pcrysgrow>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

SOARES, J. P. **Estudo Microestrutural do Gesso Alfa produzido pelo Processo Hidrotérmico e Calcinação a Seco e sua Influência nas Propriedades Mecânicas Pós-Hidratação**. 2005. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <http://www.repositorio.ufpe.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/5642/arquivo7653_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jan. 2016.

SONG, K.; JANG, Y.; KIM, W.; LEE, M.; SHIN, D.; BANG, J.; JEON, C. W.; CHAE, S. C. Precipitation of calcium carbonate during direct aqueous carbonation of flue gas desulfurization gypsum. **Chemical Engineering Journal**, v. 213, p. 251–258, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894712013472>>. Acesso em: 23 jun. 2016.

TACHIZAWA, T.; ANDRADE, R. O. B. **Gestão socioambiental: estratégias na nova era da sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

TAZAWA, E.. Effect of Self Stress on Flexural Strength of Gypsum-Polymer Composites. **Advanced Cement Based Materials**, v. 7, n. 1, p. 1-7, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1065735597000102>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

VASCONCELOS, R.S.; HENAUTH, R.C.S.; SANTOS, V.A. Programa Computacional como Ferramenta para Análise Química do Gesso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 52, 2012, Recife - PE. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<https://www.abq.org.br/cbq/2012/trabalhos/12/637-12722.html>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

VIMMROVA, A.; KEPPERT, M.; MICHALKO, O.; CERNY, R. Calcined gypsum–lime–metakaolin binders: Design of optimal composition. **Cement & Concrete Composites**, v. 52, p. 91–96, 2014. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

WOLKOWSKI, R. P. **Using recycled wallboard for crop production**. In: Wastecap Wisconsin. **Anais eletrônicos**. Wisconsin, 2003. Disponível em: <<http://www.soils.wisc.edu/extension/pubs/A3782.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

YAKOLEV, G.; POLYANSKIKH, I.; FEDOROVA, G.; GORDINA, A.; BURYANOV, A. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine manmade admixtures. **Procedia Engineering**, v. 108, n. 3, p. 13 – 21, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392008000400002>. Acesso em: 04 jun. 2016.

YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H. Microstructure and mechanical properties of b-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3149–3157, 2011. Disponível em: <<http://www.link.springer.com/article/10.1617/s11527-015-0717-0>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

ZHONG, L.; QU, J.; LI, X.; HE, X.; ZHANG, Q. Simultaneous synthesis of ettringite and absorbate incorporation by aqueous agitation of a mechanochemically prepared precursor. **RSC Advances**, v. 6, p. 35203–35209, 2016. Disponível em: <<http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2016/RA/C6RA01253A>>. Acesso em: 08 nov. 2016.

ZHOU, J.; LIU, C.; SHU, Z.; YU, D.; ZHANG, Q. T. L., XUE, Q. Preparation of specific gypsum with advanced hardness and bending strength by a novel In-situ Loading-Hydration Process. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 179–183, 2015. Disponível em: <<http://ees.elsevier.com/CEMCON/default.asp>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

ZUHAIMI, N. A. S.; INDRAN, V. P.; DERAMAN, M. A.; MUDRIKAH, N. F.; MANIAMA, G. P.; TAUFIQ-YAP, Y. H.; RAHIM; M. H. A. Reusable gypsum based catalyst for synthesis of glycerol carbonate from glycerol and urea. **Applied Catalysis A: General**, v. 502, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0926860X>>. Acesso em: 04 jun. 2016.