

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

ALEXANDRE ERBS

**DESENVOLVIMENTO DE CHAPAS DE GESSO ACARTONADO  
EXCLUSIVAMENTE A PARTIR DE SEUS RESÍDUOS**

TESE

CURITIBA  
2020

ALEXANDRE ERBS

**DESENVOLVIMENTO DE CHAPAS DE GESSO ACARTONADO  
EXCLUSIVAMENTE A PARTIR DE SEUS RESÍDUOS**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor 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

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

Erbs, Alexandre

Desenvolvimento de chapas de gesso acartonado a partir de exclusivamente seus resíduos [recurso eletrônico] / Alexandre Erbs. -- 2020.

1 arquivo texto (186 f.): PDF; 9,77 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 07 ago. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 157-180.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Paredes de gesso. 3. Papel cartão - Reaproveitamento. 4. Drywall. I. Nagalli, André, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. III. Título.

CDD: Ed. 23 -- 624

---

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba  
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271  
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Mangueira



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

## TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº19

A Tese de Doutorado intitulada **Desenvolvimento de chapas de gesso acartonado exclusivamente a partir de seus resíduos**, defendida em sessão pública pelo(a) candidato(a) **Alexandre Erbs**, no dia 03 de agosto de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, área de concentração Meio Ambiente, linha de pesquisa Saneamento e Recursos Hídricos, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. André Nagalli - UTFPR - Presidente da Banca

Profa. Dra. Karina Querne de Carvalho Passig - UTFPR

Prof. Dr. Wellington Mazer - UTFPR

Profa. Dra. Kalinny Patrícia Vaz Lafayette - UPE-PE

Prof. Dr. Diogo Henrique Fernandes da Paz - IFPE-PE

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por sempre me acalantar nos momentos mais difíceis. A jornada é longa, mas a certeza de não estar sozinho fortalece cada passo.

À minha esposa, Márcia e à minha filha Rafaela, pois nos momentos mais duvidosos sempre estiveram ao meu lado. Quando tudo parecia nebuloso, um simples sorriso iluminava mais uma vez o caminho. Ao Romiro e sua filha Amanda, pois ambos despenderam muito tempo e paciência, ajudando no desenvolvimento dos equipamentos e ensaios.

Aos meus pais, Oscar e Evarilda Pecharke Erbs, que mesmo sem muito conhecimento inseriram um conceito fundamental em minha mente, em que o estudo pode nos levar a lugares inimagináveis.

Ao Sr. Amenon e Dr.<sup>a</sup> Josete (*in memoriam*) que incentivaram meus estudos desde o ensino fundamental, demonstrando que o esforço e a dedicação são o caminho para o sucesso .

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela estrutura física e humana cedida para realização dos ensaios. Do curso técnico ao doutorado foram 14 anos de formação, não imagino ter sido tão bem aproveitado em qualquer outra instituição. Em especial pelo Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais e ao Núcleo de Pesquisas Tecnológicas. Aos técnicos de laboratório, Felipe, Lucas e Luis, que despenderam horas de trabalho realizando ensaios. Ao corpo docente do PPGEC, não só pelos ensinamentos, mas por todas as discussões e sugestões geradas durante o processo.

À professora Dr.<sup>a</sup> Karina Querne de Carvalho e aos professores Dr. Wellington Mazer e Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda, membros da banca de qualificação. Suas sugestões foram fundamentais ao aprimoramento desta pesquisa.

Especialmente ao professor André Nagalli, muitas pessoas passam por nossa vida, mas poucos deixam marcas e ensinamentos tão profundos quanto os seus. Obrigado por todas as correções, as orientações e os direcionamentos. Problemas que perduravam dias o senhor resolvia em minutos. Obrigado pela paciência e por confiar que eu poderia chegar até aqui.

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e  
pensar uma coisa diferente.”

Roger Von Oech

## RESUMO

ERBS, Alexandre. Desenvolvimento de chapas de gesso acartonado exclusivamente a partir de seus resíduos. 2020. 186 f. Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Chapas de gesso acartonado são compostas, basicamente, por gesso comum envolto em um papel cartão. Os resíduos de sua aplicação na construção precisam ser adequadamente destinados, pois do contrário podem causar impactos ambientais. A reciclagem deste tipo de resíduo se resume atualmente a incorporar pequenas frações do gesso comum que integra essas chapas na produção de novas chapas. Os resíduos de papel cartão não são reaproveitados no processo de reciclagem, sendo atualmente descartados. Ocorre que, com a crescente utilização destas chapas, tem-se a necessidade de reciclar quantidade cada vez maior deste material. Assim, o objetivo geral desta pesquisa é avaliar o processo de reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado em escala de bancada, produzindo-se novas chapas somente com estes resíduos. Foram reciclados o gesso e o papel de revestimento do resíduo de chapas de gesso acartonado para então se produzir novas chapas recicladas. O experimento incluiu a trituração, calcinação, reidratação, formação e rompimento de corpos de prova moldados somente com gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado. Determinaram-se as características físico-químicas do pó, as propriedades mecânicas nos estados fresco e endurecido, além de caracterizar a microestrutura e a composição química do gesso reciclado. Foi reciclado o papel cartão de revestimento de resíduos de chapas de gesso acartonado, determinando-se suas características físicas e mecânicas. Foram produzidas chapas de gesso acartonado recicladas e determinadas as características físicas e mecânicas. O processo de moagem mostrou-se eficiente, pois além de apresentar granulometria acima de 90% passante na peneira de abertura 0,29mm, a massa unitária do gesso reciclado apresentou valor de  $657,37 \text{ g cm}^{-3}$ , acima de  $600 \text{ kg cm}^{-3}$  estipulado na NBR 13207:2017 de  $600 \text{ kg cm}^{-3}$ . Quanto aos requisitos químicos, o gesso reciclado apresentou valores inferiores a 1,3% para água livre e 4,4% para água de cristalização. O tempo de pega atendeu o critério de gesso para revestimento, com início de pega após 10 minutos e fim de pega após 35 minutos. O gesso reciclado obteve 9,3 MPa no requisito mecânico compressão axial, 3,25 MPa na tração na flexão, valores superiores a  $20 \text{ N mm}^{-2}$  para a dureza superficial e 0,27 MPa na resistência à aderência, suprimindo-se todos os requisitos mecânicos da NBR 13207:2017. Foi possível fabricar folhas de papel cartão reciclado somente com resíduos de papel cartão de revestimento. Produziu-se chapas de gesso acartonado recicladas integralmente com gesso e papel cartão reciclados. Obteve-se 556,99 N e 443,57 N no ensaio de resistência à flexão longitudinal e transversal assim como atendeu-se os 20 mm de diâmetro máximo de dureza superficial nas chapas de gesso acartonado recicladas. A chapa de gesso acartonado reciclada atendeu simultaneamente todos os requisitos físicos e mecânicos da NBR 14715-1:2010.

**Palavras-chave:** Placa; Economia Circular; Resíduos de Construção; *Drywall*.

## ABSTRACT

ERBS, Alexandre. Development of plasterboard sheets exclusively from waste. 2020. 186 p. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) - Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2020.

Plasterboard sheets are basically composed of ordinary plaster wrapped in cardboard. Waste from its application in construction must be properly disposed of, otherwise it can cause environmental impacts. The recycling of this type of waste is currently limited to incorporating small fractions of the common plaster that integrates these sheets in the production of new sheets. Cardboard waste is not reused in the recycling process and is currently being discarded. It happens that, with the increasing use of these plates, there is a need to recycle an increasing amount of this material. Thus, the general objective of this research is to evaluate the recycling process of plasterboard waste on a bench scale, producing new sheets only with this waste. Plaster and lining paper from gypsum plasterboard waste were recycled to produce new recycled sheets. The experiment included the crushing, calcination, rehydration, formation and breaking of specimens molded only with recycled plaster from plasterboard residues. The physical-chemical characteristics of the powder, the mechanical properties in the fresh and hardened states were determined, in addition to characterizing the microstructure and chemical composition of the recycled plaster. Plasterboard waste paper was recycled, determining its physical and mechanical characteristics. Recycled plasterboard sheets were produced and the physical and mechanical characteristics were determined. The grinding process proved to be efficient, because in addition to presenting granulometry above 90% through the 0.29 mm opening sieve, the unit mass of the recycled plaster showed a value of 657.37 g cm<sup>-3</sup>, above 600 kg cm<sup>-3</sup> stipulated in NBR 13207: 2017 of 600 kg cm<sup>-3</sup>. As for chemical requirements, the recycled plaster showed values below 1.3% for free water and 4.4% for crystallization water. The setting time met the plaster for coating criteria, with the start of setting after 10 minutes and the end of setting after 35 minutes. The recycled plaster obtained 9.3 MPa in the mechanical requirement axial compression, 3.25 MPa in split tensile strength, values greater than 20 N mm<sup>-2</sup> for the surface hardness and 0.27 MPa in the adhesion resistance, supplying all mechanical requirements of NBR 13207: 2017. It was possible to manufacture sheets of recycled cardboard only with waste cardboard coverings. Plasterboard sheets were produced that were fully recycled using recycled plaster and cardboard. 556.99 N and 443.57 N were obtained in the longitudinal and transverse flexural strength test, as well as meeting the 20 mm maximum diameter of surface hardness in the recycled plasterboard sheets. The recycled plasterboard sheet simultaneously met all the physical and mechanical requirements of NBR 14715-1: 2010.

**Keywords:** Plasterboard; Circular Economy; Construction waste; Drywall.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - a) Fotomicrografias do gesso em pó ampliado 15000 vezes; b) 25000 vezes e c) 15000 vezes.....   | 27 |
| Figura 2 - Fotomicrografias dos cristais de gesso di-hidratados .....  | 28 |
| Figura 3 - Difração de raio-X do gesso comum .....   | 29 |
| Figura 4 - Fotomicrografias do gesso comum com relação a/g: a) 0,5 b) 0,6 e c) 0,7 .....   | 33 |
| Figura 5 – Resistência à compressão axial e à tração na flexão do gesso comum x relação a/g.....   | 34 |
| Figura 6- Processo de produção das placas de gesso acartonado.....   | 39 |
| Figura 7 - Histórico de consumo de chapas de gesso acartonado no Brasil (em milhões).....  | 41 |
| Figura 8 - Consumo mundial de m <sup>2</sup> de chapas de gesso acartonado por habitante/ano.....  | 42 |
| Figura 9 - Fluxograma referente ao ciclo de reciclagem do gesso .....  | 49 |
| Figura 10 – Fotomicrografia da fratura dos cristais de gesso reciclado .....   | 54 |
| Figura 11 – Fotomicrografias dos cristais de: a) gesso comum b) gesso reciclado .....  | 56 |
| Figura 12 – Fotomicrografias do gesso reciclado.....   | 57 |
| Figura 13 - Difração de raio-X do gesso reciclado .....  | 58 |
| Figura 14 - Fotomicrografia que demonstra a presença de papel cartão misturado ao GR.....  | 61 |
| Figura 15 – Fotomicrografia do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado .....   | 62 |
| Figura 16 – Fotomicrografias de impurezas observadas no gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado, sendo: a) grão de calcita b) cristais de sulfato hemi-hidratados ..... | 62 |
| Figura 17 – DRX do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado, sendo: D: di-hidrato, H: hemi-hidrato, QTZ: quartzo, Cal: calcita .....                                     | 63 |
| Figura 18 - Processo de reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado ..  | 65 |
| Figura 19 – Fluxo esquemático de produção de chapa de gesso acartonado reciclada .....   | 66 |
| Figura 20 - Filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado.....   | 68 |
| Figura 21 – Cilindro de cana de açúcar manual .....  | 69 |
| Figura 22 – Trituração manual do resíduo de chapas de gesso acartonado.....  | 70 |
| Figura 23 – Gesso aderido no papel cartão após a passagem no cilindro manual ...   | 70 |
| Figura 24 - Cilindro eletromecânico desenvolvido para trituração do gesso a) modelo original b) adaptação no eixo do motor.....  | 71 |
| Figura 25 – Granulometria do gesso reciclado sendo a) início do da trituração eletromecânica e b) final da trituração eletromecânica .....   | 72 |
| Figura 26 - Moinho de bolas de porcelana com esferas de ágata.....   | 73 |
| Figura 27 - Equivalente da solução de permanganato de potássio sendo a) início da diluição e b) coloração rósea persistente .....  | 80 |
| Figura 28 – Mudança de coloração após gotejamento de hidróxido de amônio .....   | 81 |
| Figura 29 – Alteração de cor observada durante a titulação com permanganato de potássio.....   | 81 |
| Figura 30 - Aparelho de Vicat modificado .....   | 83 |
| Figura 31 – Moldes utilizados para moldagem de corpos de prova .....   | 85 |
| Figura 32 - Ensaio de compressão axial no gesso reciclado .....  | 87 |
| Figura 33 - Ensaio de dureza superficial .....   | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 34 - Marca da esfera de aço resultante do ensaio de dureza superficial sobre os corpos de prova.....                             | 88  |
| Figura 35 – Posição dos corpos de prova para ensaio de aderência.....   | 90  |
| Figura 36 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco.....          | 90  |
| Figura 37 - Vaporizador de ouro e carbono.....  | 92  |
| Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura .....   | 93  |
| Figura 39 – Martelo de madeira corrugada utilizado na refinação da pasta celulósica .....   | 95  |
| Figura 40 – Formação da folha úmida sobre a tela metálica.....  | 96  |
| Figura 41 – Folha de papel cartão reciclada, de dimensões 45 x 50 cm, produzida a partir de resíduos de chapas de gesso acartonado..... | 97  |
| Figura 42 – Ensaio de resistência à tração nas folhas de papel cartão recicladas ...  | 99  |
| Figura 43 – Ensaio de resistência à compressão nas folhas de papel.....   | 100 |
| Figura 44 – Molde metálico de dimensões internas 30 x 40 cm posicionado sobre a folha de papel reciclada .....                          | 101 |
| Figura 45 – Chapa de gesso acartonado reciclada úmida .....   | 102 |
| Figura 46 – Chapa de gesso acartonado reciclada de dimensões 30 x 40 cm sendo a) vista superior e b) perspectiva .....                  | 102 |
| Figura 47 – Ensaio de resistência mínima à ruptura na flexão.....   | 104 |
| Figura 48 - Ensaio de compressão axial na chapa de gesso acartonado .....   | 105 |
| Figura 49 – Ensaio de dureza superficial .....  | 106 |
| Figura 50 - RG após a trituração no moinho de bolas.....  | 110 |
| Figura 51 – Redução da granulometria do RG durante as etapas de trituração .....  | 111 |
| Figura 52 – Material aglutinado na peneira de abertura 0,29 mm - a) GC e b) GR.....   | 113 |
| Figura 53 – Granulometria do GR e do GC.....  | 114 |
| Figura 54 – Coloração característica do GR .....  | 123 |
| Figura 55 – Resistência à tração na flexão do GC e do GR.....   | 124 |
| Figura 56 – Resistência à compressão axial das amostras do GC e GR.....   | 125 |
| Figura 57 – Resistência à dureza superficial do GC e do GR.....   | 127 |
| Figura 58 – Rompimento do revestimento na pasta de gesso sendo a) GC e b) GR .....  | 128 |
| Figura 59 – Rompimento do substrato da parede executada com blocos cerâmicos sendo a) GC e b) GR .....                                  | 129 |
| Figura 60 - Fotomicrografia do a) GC em pó ampliado 1000 x e b) GR em pó ampliado 1000 x.....   | 130 |
| Figura 61 - Fotomicrografia do a) GC em pó ampliado 10000 x e b) GR em pó ampliado 10000 x.....   | 131 |
| Figura 62 - Fotomicrografia do a) GC hidratado ampliado 1000 x e b) GR hidratado ampliado 1000 x.....                                   | 132 |
| Figura 63 - Fotomicrografia do a) GC hidratado ampliado 10000 x e b) GR hidratado ampliado 10000 x.....                                 | 132 |
| Figura 64 - Fotomicrografia dos canais de evaporação da água presente no gesso comum ampliado 10000 x .....                             | 134 |
| Figura 65 – Difratoograma do GC em pó.....  | 135 |
| Figura 66 – Difratoograma do GR em pó .....   | 136 |
| Figura 67 – Difratoograma do GC hidratado .....   | 136 |
| Figura 68 – Difratoograma do GR hidratado .....   | 137 |
| Figura 69 – Refinamento da pasta celulósica sendo a) antes do refino e b) após o refino .....   | 138 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 70 – Formação da folha úmida com falhas .....   | 139 |
| Figura 71 – Folha de papel cartão reciclada sendo a) seca ao sol e b) seca à sombra .....                                      | 139 |
| Figura 72 – Partículas de gesso sendo a) folha de papel cartão reciclada úmida e b) folha de papel cartão reciclada seca ..... | 140 |
| Figura 73 - Fotomicrografias do PC sendo a) ampliado 1000 x, b) ampliado 5000 x e c) ampliado 10000 x .....                    | 143 |
| Figura 74 - Fotomicrografia da polpa de celulose sendo a) ampliada 1000 x, b) ampliada 5000 x e c) ampliada 10000 x .....      | 144 |
| Figura 75 - Fotomicrografia do PR sendo a) ampliado 1000 x, b) ampliado 5000 x e c) ampliado 10000 x .....                     | 145 |
| Figura 76 – Difratoograma do PC .....  | 146 |
| Figura 77 – Difratoograma da polpa de celulose .....   | 147 |
| Figura 78 – Difratoograma do PR .....  | 147 |
| Figura 79 – Descolamento do papel cartão da chapa de gesso acartonado comercial .....  | 149 |

## LISTA DE QUADROS

|  |         |
|--|---------|
| Quadro 1 - Influência das impurezas presentes na gipsita.....  | 24      |
| Quadro 2 - Sistema cristalino do gesso comum.....  | 27      |
| Quadro 3 - Requisitos físicos para classificação do gesso (granulometria via seca)                               | 30      |
| Quadro 4 – Tempo de pega normatizado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017)  | .33     |
| Quadro 5 – Propriedades físicas em folhas de papel formadas em laboratórios                                      | .....38 |
| Quadro 6 – Requisitos físicos das chapas de gesso acartonado.....  | 40      |
| Quadro 7 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com gesso reciclado.....                     | 66      |
| Quadro 8 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com papel cartão reciclado.....              | 67      |
| Quadro 9 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com chapa de gesso acartonado reciclada..... | 68      |
| Quadro 10 - Ensaio realizados para caracterização do gesso reciclado e comum                                     | .74     |
| Quadro 11 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio de resistência mecânica.....                 | 85      |
| Quadro 12 – Ensaio realizados para caracterização do papel reciclado.....  | 93      |
| Quadro 13 – Ensaio realizados para caracterização do papel reciclado.....  | 103     |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Composição química teórica do gesso comum .....   | 24  |
| Tabela 2 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso comum .....   | 31  |
| Tabela 3 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa específica do gesso .....   | 31  |
| Tabela 4 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre superfície específica do gesso comum .....  | 31  |
| Tabela 5 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tração na flexão do gesso comum .....   | 34  |
| Tabela 6 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre a resistência à compressão axial em ensaios com gesso comum .....                                   | 35  |
| Tabela 7 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso comum .....                                       | 36  |
| Tabela 8 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre determinações químicas .....  | 37  |
| Tabela 9 - Composição química do gesso reciclado .....   | 50  |
| Tabela 10 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre temperatura relacionada com tempo de permanência em estufa .....                                   | 51  |
| Tabela 11 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso reciclado .....  | 52  |
| Tabela 12 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa específica e superfície específica do gesso reciclado .....                                  | 52  |
| Tabela 13 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tempo de pega do gesso reciclado .....   | 53  |
| Tabela 14 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tração na flexão do gesso reciclado .....  | 54  |
| Tabela 15 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre a resistência à compressão axial em ensaios com gesso reciclado .....                              | 55  |
| Tabela 16 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso reciclado .....                                  | 56  |
| Tabela 17 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre características físicas e mecânicas do papel cartão reciclado .....                                | 60  |
| Tabela 18 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre composição química do resíduo de gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado ..... | 61  |
| Tabela 19 – Resumo da caracterização das amostras de GR e GC .....   | 112 |
| Tabela 20 - Massa unitária das amostras analisadas .....   | 115 |
| Tabela 21 - Massa específica das amostras analisadas .....   | 116 |
| Tabela 22 - Superfície específica das amostras de GC e GR .....  | 117 |
| Tabela 23 - Requisitos químicos do gesso .....   | 118 |
| Tabela 24 – Tempo de início e fim de pega das amostras analisadas .....  | 122 |
| Tabela 25 - Resistência de aderência a tração .....  | 128 |
| Tabela 26 - Composição química do GC e GR determinada através do EDS .....   | 134 |
| Tabela 27 – Resumo da caracterização das amostras de PC e PR .....   | 140 |
| Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de gramatura e espessura das folhas de papel cartão .....   | 141 |
| Tabela 29 – Resumo da caracterização das amostras de PC e PR .....   | 141 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 30 - Composição química do PC, PR e da pasta de celulose determinada através do EDS .....  | 146 |
| Tabela 31 – Resumo da caracterização das amostras de GC e GR.....                                 | 148 |
| Tabela 32 – Equipamentos utilizados para produção das chapas de gesso acartonado recicladas ..... | 152 |
| Tabela 33 – Recursos utilizados na produção das chapas de gesso acartonado recicladas .....       | 152 |
| Tabela 34 – Custo dos recursos para produção das chapas de gesso acartonado recicladas .....      | 153 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas;               |
| ATSDR   | <i>Agency for Toxic Substances and Disease Registry</i> |
| a/g     | Relação água/gesso                                      |
| CBIC    | Câmara Brasileira da Indústria da Construção            |
| CGC     | Chapa de gesso acartonado comercial                     |
| CGR     | Chapa de gesso acartonado reciclada                     |
| COPEL   | Companhia Paranaense de energia                         |
| DRX     | Difratômetro de raio-X                                  |
| EDS     | Espectrômetro de dispersão de energia                   |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária             |
| EVA     | Etil Vinil Acetado                                      |
| GC      | Gesso comercial   |
| GR      | Gesso reciclado   |
| GTOG    | <i>Gypsum to Gypsum</i>                                 |
| MEV     | Microscopia Eletrônica de Varredura                     |
| NBR     | Norma Brasileira;                                       |
| NWGR    | <i>New West Gypsum Recycling</i>                        |
| PML     | Produção Mais Limpa                                     |
| PC      | Papel cartão comercial                                  |
| PR      | Papel cartão reciclado                                  |
| PGC     | Placa de gesso comum                                    |
| PGR     | Placa de gesso reciclado                                |
| RG      | Resíduo de gesso  |
| SANEPAR | Companhia de Saneamento do Paraná                       |
| UE      | União Europeia  |
| UTFPR   | Universidade Tecnológica Federal do Paraná              |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                     |  |
|---------------------|--|
| R                   | material retido, em percentagem;   |
| m                   | resíduo na peneira, em gramas;   |
| M <sub>i</sub>      | massa inicial, em gramas;  |
| $\sum Ra$           | 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;  |
| $\rho$              | massa específica, em gramas por centímetro cúbico;                                     |
| V <sub>1</sub>      | volume deslocado pelo material, em centímetro cúbico;                                  |
| M <sub>g</sub>      | massa do gesso, em gramas;   |
| $\epsilon$          | porosidade   |
| V <sub>c</sub>      | volume da camada compactada, em centímetro cúbico.                                     |
| $f_{ctM}$           | 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 <sup>2</sup>      | quadrado da 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;  |
| kg m <sup>-2</sup>  | densidade superficial de massa;  |
| ST                  | chapa de gesso acartonado tipo <i>standard</i> ;                                       |
| J                   | joule;   |
| E                   | equivalente da solução de permanganato de potássio em óxido de cálcio, em percentagem; |
| P                   | pureza do Na <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , em percentagem;              |
| SO <sub>3</sub> (%) | teor de anidrido sulfúrico, em percentagem;  |
| Ra                  | resistência de aderência à tração, em MPa;   |
| A'                  | área de corpo de prova, em milímetros  |
| G                   | gramatura, em gramas por metro quadrado;   |
| $\epsilon$          | intervalo de dados esperados;  |
| h                   | hora;  |
| kg                  | quilograma;  |
| MPa                 | unidade de tensão: MPa;  |
| °C                  | graus Celsius;   |
| kg m <sup>-3</sup>  | quilograma por metro cúbico;   |
| N mm <sup>-2</sup>  | newton por milímetro quadrado;   |
| g m <sup>-2</sup>   | grama por metro quadrado;  |
| $\emptyset$         | diâmetro, em milímetros;   |
| $\sigma_T^b$        | resistência à tração, em MPa;  |
| F <sub>t</sub>      | força média máxima de tração, em Newtons;  |



D' densidade superficial, em  $\text{kg m}^{-2}$ ;  
m' massa do corpo de prova, em gramas;  
x comprimento de cada corpo de prova, em milímetros;  
y largura de cada corpo de prova, em milímetros.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>19</b> |
| 1.1 Objetivos.....   | 20        |
| 1.1.1 Objetivo geral .....   | 20        |
| 1.1.2 Objetivos específicos.....   | 20        |
| 1.2 Justificativa .....  | 21        |
| 1.3 Inovação e Originalidade .....   | 22        |
| 1.4 Hipótese .....   | 22        |
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....  | <b>23</b> |
| 2.1 Gesso comum .....  | 23        |
| 2.1.1 Disponibilidade do gesso comum.....  | 23        |
| 2.1.2 Composição química do gesso comum.....   | 23        |
| 2.1.3 Calcinação do gesso comum .....  | 24        |
| 2.1.4 Cinética de hidratação do gesso comum.....   | 26        |
| 2.1.5 Microestrutura do gesso comum .....  | 27        |
| 2.1.6 Microanálise química pelo método de dispersão de energia.....  | 29        |
| 2.1.7 Caracterização do gesso comum .....  | 30        |
| 2.2 Papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado .....  | 37        |
| 2.3 Chapas de gesso acartonado.....  | 38        |
| 2.3.1 Processo de produção das chapas de gesso acartonado .....  | 38        |
| 2.3.2 Características físicas das chapas de gesso acartonado.....  | 39        |
| 2.3.3 Mercado do <i>drywall</i> .....  | 41        |
| 2.3.4 Perdas na construção com chapas de gesso acartonado .....  | 42        |
| 2.3.5 Impactos ambientais ocasionados pelos resíduos de gesso.....   | 43        |
| 2.3.6 Ciclo de vida das chapas de gesso acartonado .....   | 44        |
| 2.4 Reúso e reciclagem .....   | 45        |
| 2.4.1 Reúso alternativo do resíduo de gesso.....   | 46        |
| 2.4.2 Reciclagem do resíduo do gesso .....   | 49        |
| 2.4.3 Processo de produção do gesso reciclado.....   | 50        |
| 2.4.4 Características físicas do pó e propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido do gesso reciclado..... | 51        |
| 2.4.5 Microestrutura do gesso reciclado.....   | 56        |
| 2.4.6 Reciclagem de papel cartão.....  | 58        |
| 2.4.7 Reciclagem do gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado .....                              | 60        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....  | <b>64</b> |
| 3.1 Programa experimental .....  | 64        |
| 3.1.1 Planejamento experimental.....   | 64        |
| 3.2 Preparação dos resíduos de chapas de gesso acartonado.....   | 68        |
| 3.3 Trituração .....   | 69        |
| 3.3.1 Trituração Manual.....   | 69        |
| 3.3.2 Trituração eletromecânica .....  | 71        |
| 3.3.3 Trituração no moinho de bolas .....  | 72        |
| 3.4 Calcinação do resíduo de gesso .....   | 73        |
| 3.5 Caracterização do gesso .....  | 74        |
| 3.5.1 Determinação das propriedades físicas do pó .....  | 74        |
| 3.5.2 Determinação dos requisitos químicos do gesso .....  | 77        |
| 3.5.3 Propriedades da pasta no estado fresco .....   | 83        |
| 3.5.4 Moldagem dos corpos de prova .....   | 84        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.5.5     | Ensaio mecânico no estado endurecido do gesso reciclado e comum               | 86         |
| 3.5.6     | Microestrutura e composição química do gesso reciclado                        | 92         |
| 3.6       | Caracterização do papel cartão reciclado                                      | 93         |
| 3.6.1     | Preparação da pasta celulósica  | 94         |
| 3.6.2     | Formação de folhas de papel cartão reciclado                                  | 96         |
| 3.6.3     | Caracterização das folhas de papel cartão reciclado                           | 98         |
| 3.7       | Chapas de gesso acartonado recicladas   | 101        |
| 3.7.1     | Produção das chapas de gesso acartonado recicladas                            | 101        |
| 3.7.2     | Características físicas e mecânicas das chapas de gesso acartonado recicladas | 103        |
| 3.8       | Análise estatística   | 106        |
| <b>4.</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>  | <b>108</b> |
| 4.1       | Considerações sobre o processo de trituração manual                           | 108        |
| 4.2       | Trituração eletromecânica   | 109        |
| 4.3       | Considerações sobre o processo de trituração no moinho de bolas               | 110        |
| 4.4       | Caracterização das amostras de GR e GC  | 111        |
| 4.5       | Propriedades físicas do pó de GC e GR   | 113        |
| 4.5.1     | Granulometria   | 113        |
| 4.5.2     | Massa Unitária  | 115        |
| 4.5.3     | Massa Específica  | 116        |
| 4.5.4     | Superfície Específica   | 117        |
| 4.6       | Determinação dos requisitos químicos do gesso reciclado                       | 118        |
| 4.7       | Propriedades dos materiais no estado fresco                                   | 121        |
| 4.7.1     | Consistência normal   | 121        |
| 4.7.2     | Tempo de pega   | 121        |
| 4.8       | Propriedades da pasta no estado endurecido                                    | 124        |
| 4.8.1     | Resistência à tração na flexão  | 124        |
| 4.8.2     | Resistência à compressão  | 125        |
| 4.8.3     | Dureza Superficial  | 127        |
| 4.8.4     | Aderência   | 128        |
| 4.9       | Microestrutura e composição química   | 130        |
| 4.9.1     | Microscopia Eletrônica de Varredura   | 130        |
| 4.9.2     | Composição química  | 134        |
| 4.9.3     | Difratometria de raio-X   | 135        |
| 4.10      | Papel cartão reciclado  | 137        |
| 4.10.1    | Considerações sobre o processo de preparo da pasta celulósica                 | 137        |
| 4.10.2    | Formação de folhas de papel cartão reciclado                                  | 138        |
| 4.11      | Caracterização das folhas de papel cartão                                     | 140        |
| 4.12      | Ensaio físico das folhas de papel cartão                                      | 141        |
| 4.13      | Ensaio mecânico das folhas de papel cartão                                    | 141        |
| 4.14      | Composição química e mineralógica do papel cartão                             | 143        |
| 4.15      | Chapas de gesso acartonado recicladas   | 148        |
| 4.16      | Custo de produção das chapas de gesso acartonadas recicladas                  | 152        |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES</b>   | <b>154</b> |
| <b>6.</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                                       | <b>156</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>157</b> |
|           | <b>APÊNDICE A</b>   | <b>181</b> |
|           | <b>ANEXO A</b>  | <b>186</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Chapas de gesso acartonado constituem um importante material de construção em todo o mundo. Nos Estados Unidos da América, o maior fabricante mundial, em 2017 foram produzidos 2,3 bilhões de m<sup>2</sup> (GYPSUM ASSOCIATION, 2020). Na União Europeia e Reino Unido produz-se também quantidade expressiva deste material de construção, 2,1 bilhões de m<sup>2</sup> produzidos em 2018. Em relação aos países asiáticos, tem-se informação que Japão, China, Coreia do Sul e Tailândia produziram juntos 1,2 bilhões de m<sup>2</sup> em 2019 (EUROGYPSUM, 2020). No Brasil produz-se quantidade significativamente inferior, sendo 73 milhões de m<sup>2</sup> em 2019 (KNAUF DO BRASIL, 2020), porém, com mercado emergente de 8% ao ano.

Estima-se que cerca de 10% deste volume represente perdas oriundas do processo de montagem, avarias durante a produção e demolições (CAVALCANTI; PÓVOAS, 2016). Aproximadamente 2,35 milhões de toneladas de resíduos de chapas de gesso acartonado foram destinados a aterros na União Europeia em 2019 (EUROGYPSUM, 2020). Caso não haja contenção adequada nos aterros, os resíduos de chapas de gesso acartonado, acondicionados com resíduos orgânicos e umidade, geram gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), fatal em grandes proporções (SUN; BARLAZ, 2015).

A reciclagem é uma alternativa para redução do consumo de recursos naturais e processamento de resíduos já existentes. Incorporar o processo de reciclagem ao longo da cadeia produtiva da construção civil reduz a quantidade de resíduos destinados aos aterros e diminui o consumo de matérias-primas durante o processo de produção (MENDONÇA *et al.*, 2016).

Diferentemente de produtos monofásicos como plásticos, vidros, metais e papéis, a reciclagem de produtos compostos, tais como as chapas de gesso acartonado, demanda estudos mais aprofundados (NAGALLI, 2014). Existem atualmente estudos pontuais para reutilização do gesso presente no núcleo do resíduo de chapas de gesso acartonado.

A Comissão Europeia criou um projeto em 2013 denominado *Gypsum to Gypsum (GTOG)*, cujo objetivo foi fomentar economia circular entre indústrias de reciclagem, demolição e fabricantes de chapas de gesso acartonado. O projeto GTOG concluiu que somente duas das 5 fábricas utilizadas no estudo conseguiram reincorporar 30% de resíduo de gesso no processo de produção de novas chapas de

gesso acartonado, sem que houvesse perdas significativas nas características mecânicas. Este resíduo necessitou ser beneficiado e utilizado sem qualquer tipo de contaminante, como o papel cartão de revestimento, que precisou ser descartado em aterros (GYPSUM TO GYPSUM, 2020).

O papel cartão que reveste as chapas de gesso acartonado impõe desafios específicos, como a separação eficiente do gesso fortemente aderido e um sistema de reciclagem que proporcione características físicas similares às da matriz original.

A averiguação das características físicas e mecânicas de um material composto reciclado, oriundo somente de resíduos, pode demonstrar que o resíduo destinado atualmente aos aterros pode ser fonte de matéria-prima valorosa.

Desta forma, é proposta nesta pesquisa a produção de chapas de gesso acartonado recicladas utilizando somente resíduos de chapas de gesso acartonado, sem inserção de novas matérias-primas, averiguando-se suas propriedades físico-mecânicas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo da pesquisa é avaliar as propriedades físicas e mecânicas de chapas de gesso acartonado recicladas provenientes somente da reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos propostos para alcançar o objetivo geral são:

- Propor um processo de produção de chapas de gesso acartonado, em escala de bancada, que possibilite incorporação de resíduos de chapas de gesso acartonado como matérias-primas;
- Determinar as características físicas, químicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapa de gesso acartonado no estado pulverulento e as propriedades mecânicas nos estados fresco e endurecido e;

- Compreender as propriedades físicas e mecânicas de folhas de papel cartão reciclado provenientes da reciclagem do papel cartão de revestimento de resíduos de chapas de gesso acartonado.

## 1.2 Justificativa

Realizou-se este estudo com o intuito de averiguar a possibilidade de reciclar o gesso e o papel cartão provenientes de resíduos de chapas de gesso acartonado. A principal contribuição tecnológica deste trabalho será desenvolver um composto utilizando somente gesso reciclado e papel reciclado, visto que os grandes fabricantes nacionais e internacionais reincorporam pequena porcentagem deste resíduo, sem papel ou outro contaminante, na produção de novas chapas de gesso acartonado.

Espera-se contribuir com o conhecimento das propriedades das matérias-primas gesso reciclado e papel reciclado, individualmente, provenientes de resíduos de chapas de gesso acartonado.

Pinheiro (2011) cita que a experimentação em laboratórios leva à tona a temática da reciclagem de resíduos de materiais de construção, além de incentivar empresas a transformarem estudos em negócios palpáveis. Transformar resíduos em recursos, desenvolver alternativas para criação de uma economia circular, manter o valor agregado dos produtos, reduzir o desperdício e gerar maior eficiência de recursos no setor da construção civil (RIVERO; NAVARRO, 2016).

Incentivar os fabricantes de chapa de gesso acartonado a substituir matérias-primas naturais por recicladas, preservando-se recursos naturais e prevenindo-se a escassez de matérias-primas.

Salientar alternativas para reaproveitamento de resíduos de chapas de gesso acartonado oriundos de diferentes geradores, como falhas no processo de produção, perdas do processo de montagem e demolições.

Desta forma, estudar os resíduos de chapas de gesso acartonado, transformando-o em recurso disponível, promoverá economia de recursos, reduzirá emissões e possibilitará reutilização de materiais que vem acumulando-se nos aterros (ROQUE *et al.*, 2005; BARDELLA; CAMARINI, 2011; ZHU *et al.*, 2018).

### 1.3 Inovação e Originalidade

Papailiopoulou *et al.* (2016) citam ser possível inserir até 25% de resíduo de gesso na produção de novas chapas de gesso acartonado, desde que este resíduo não possua papel ou outro tipo de contaminante. Industrialmente não se utiliza mais do que 2% do resíduo, conservando-se assim as propriedades físicas e mecânicas das chapas de gesso acartonado (RIVERO; NAVARRO, 2016; KNAUF DO BRASIL, 2020).

A originalidade desta tese decorre de não terem sido evidenciados na literatura, até o momento, estudos relacionados à reciclagem do papel cartão de revestimento de resíduos de chapas de gesso acartonado. Assim como a possibilidade de se produzir uma chapa de gesso acartonado utilizando-se apenas gesso reciclado, tampouco papel reciclado. Desta forma, esta pesquisa considera como inovação os seguintes aspectos:

- Solução para destino dos resíduos de papel cartão, contaminados ou não com partículas de gesso aderidas em sua superfície, provenientes de chapas de gesso reciclado, por meio de sua reciclagem, atualmente inexistente no mercado;
- Produção de novas folhas de papel cartão de revestimento de chapas de gesso acartonado utilizando 100% de material reciclado, além da determinação de suas características físicas e mecânicas, processo não encontrado na literatura;
- Criação de um novo composto utilizando 100% de material reciclado, ou seja, uma chapa de gesso acartonado reciclada produzida com núcleo de gesso reciclado revestido com folhas de papel cartão reciclado, sem igual na literatura consultada;
- Determinação das características físicas e mecânicas de um composto produzido integralmente com materiais que seriam descartados em aterros sanitários, que podem servir de base para desenvolvimento de processos produtivos e de reciclagem em escala industrial.

### 1.4 Hipótese

Tem-se como hipótese desta tese que é possível produzir chapas de gesso acartonado utilizando-se apenas resíduos de chapas de gesso acartonado, em um processo de reciclagem contínuo.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Apresentam-se neste capítulo aspectos relativos às matérias-primas utilizadas, desde a obtenção do gesso comum, mecanismo de hidratação, propriedades físicas, químicas, mecânicas e microestruturais. São retratadas informações sobre as chapas de gesso acartonado, onde o gesso é revestido entre lâminas de papel cartão, suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. São descritas informações sobre o papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado e suas características físico-mecânicas. Por fim, são detalhados aspectos inerentes à reciclagem do gesso e do papel cartão de revestimento de resíduos de chapas de gesso acartonado.

### 2.1 Gesso comum

#### 2.1.1 Disponibilidade do gesso comum

O Brasil possui reservas significativas de minério gipso, do qual se extrai a gipsita, localizadas no Norte, Nordeste e Oeste do país, sendo o maior produtor de gipsita da América do Sul com 3,7 megatoneladas, com 2,5% da produção mundial, colocando-o na 10<sup>a</sup> colocação como produtor global (NETO *et al.*, 2010).

O Estado de Pernambuco produz 95% de toda produção nacional de gipsita, e tem reserva estimada de 1,22 bilhão de toneladas, considerada a maior reserva do planeta. Os Estados Unidos da América e o Canadá tem 700 milhões e 450 milhões de toneladas desse mineral em suas reservas, respectivamente (BALTAR *et al.*, 2013).

#### 2.1.2 Composição química do gesso comum

A pureza do minério de gipso e a temperatura de calcinação podem influenciar a composição química do gesso comum (CINCOTTO; JOHN 2007). Os principais autores e as respectivas percentagens encontradas na literatura são demonstrados na Tabela 1.



**Tabela 1 - Composição química teórica do gesso comum**

| Autor                                  | Composição química (%) |                 |      |                  |                                |                                |                  |
|--|------------------------|-----------------|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|
|  | CaO                    | SO <sub>3</sub> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> |
| Carvalho <i>et al.</i> (2008)          | 38,63                  | 52,08           | -    | -                | 0,41                           | -                              | 0,65             |
| Chandara <i>et al.</i> (2009)          | 35,00                  | 41,00           | -    | 0,13             | 0,28                           | 0,63                           | 1,90             |
| Leiva <i>et al.</i> (2010)             | 43,70                  | 49,99           | 2,00 | 0,20             | 0,30                           | 0,70                           | -                |
| Guan <i>et al.</i> (2011)              | 31,51                  | 41,92           | 0,06 | 0,05             | 0,32                           | 0,35                           | 2,69             |
| Vasconcelos <i>et al.</i> (2011)       | 41,30                  | 56,00           | 0,69 | 0,06             | 0,22                           | 0,35                           | 1,10             |
| Liang <i>et al.</i> (2012)             | 31,20                  | 40,90           | 0,35 | -                | -                              | -                              | -                |
| Magallanes-Rivera <i>et al.</i> (2012) | 60,20                  | 36,10           | 0,30 | 0,10             | 0,40                           | 0,40                           | 1,50             |
| Khalil <i>et al.</i> (2014)            | 37,61                  | 53,66           | 0,12 | 0,03             | 0,17                           | -                              | 0,43             |
| Moura <i>et al.</i> (2014)             | 38,63                  | 59,15           | -    | -                | 0,38                           | 0,26                           | 1,30             |
| Medina <i>et al.</i> (2016)            | 32,9                   | 43,57           | 0,80 | -                | 0,13                           | 0,05                           | 2,01             |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)            | 38,73                  | 47,57           | -    | 0,07             | 0,13                           | 0,42                           | 1,15             |
| Lei <i>et al.</i> (2017)               | 34,83                  | 38,97           | 1,73 | 0,05             | 0,18                           | 0,69                           | 3,12             |
| Krejsová <i>et al.</i> (2018)          | 41,81                  | 45,50           | 0,70 | 0,42             | 0,96                           | 2,50                           | 6,93             |

Fonte: o autor.

Na composição química do gesso prevalecem o oxigênio, cálcio, enxofre e silício, em quantidades menores observa-se o magnésio e o alumínio (BARBOSA *et al.*, 2014; HAO *et al.*, 2017). Argila, calcita, quartzo ou dolomita, podem afetar algumas propriedades do material, como resistência mecânica, tempo de pega e consistência da pasta, conforme descrito no Quadro 1 (SCHMITZ; PÓVOAS, 2009; PINHEIRO, 2011).

**Quadro 1 - Influência das impurezas presentes na gipsita**

| 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, 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           |

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

Discutida a composição química do material, o próximo item descreve o processo de calcinação do gesso comum.

### 2.1.3 Calcinação do gesso comum

O gesso comum é um aglomerante mineral obtido pela calcinação da gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), denominado sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), produzido entre 150 °C e 180 °C (PINHEIRO, 2011). É composto por sulfato de cálcio hemi-



Descrito o processo de calcinação do gesso comum, será abordado no item 2.1.4 o desenvolvimento os cristais durante a hidratação do gesso comum.

#### 2.1.4 Cinética de hidratação do gesso comum

Gartner (2009) relata a cinética de hidratação do gesso, em que após o contato com a água forma-se pasta homogênea, trabalhável e consistente, e que após alguns minutos, há ganho de viscosidade e esta endurece, incrementando sua resistência mecânica. No processo de hidratação, o hemi-hidrato e a anidrita III retomam a quantidade de água perdida durante a calcinação, reintegrando o teor de água de cristalização do sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A anidrita III tende a Reidratar mais rapidamente do que o hemi-hidrato (CINCOTTO; JOHN, 2007; BARDELLA, 2011).

A cinética de hidratação do gesso comum é composta por três etapas: primeiramente ocorre a rápida dissolução dos hemi-hidratos e a formação de soluções supersaturadas; posteriormente há formação de núcleos de cristais; e a última etapa consiste no crescimento destes cristais (MEDINA *et al.*, 2016). Os cristais de gesso, sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), crescem a partir de núcleos de cristalização. A quantidade de núcleos na solução vai influenciar a taxa de crescimento e o tamanho dos cristais (JEULIN *et al.*, 2001).

Núcleos numerosos auxiliam o rápido crescimento e há formação de pequenos cristais por unidade de volume da solução (BARBOSA *et al.*, 2014). A estrutura torna-se mais densa, propiciando uma maior resistência mecânica (MOURA *et al.*, 2016).

O crescimento é lento quando ocorre formação de poucos núcleos, favorecendo a formação de cristais grandes e menos resistentes. A diminuição de contatos na interface dos cristais gera porosidade na estrutura, e conseqüentemente degradação de características físicas e mecânicas (AAGLI *et al.*, 2005; BARDELLA; CAMARINI, 2011).

Relatado o processo de hidratação, reiteração do teor de água de cristalização e desenvolvimento dos cristais de gesso, o item 2.1.5 descreve o método utilizado para visualização dos cristais, o ensaio da microscopia eletrônica de varredura.

### 2.1.5 Microestrutura do gesso comum

Melo *et al.* (2011) descrevem a microscopia eletrônica de varredura (MEV) como uma técnica de caracterização microestrutural, onde um feixe de elétrons é direcionado sobre a amostra, e gera sinais retroespelhados, o que permite a definição qualitativa ou quantitativa dos elementos químicos, composição, superfície topográfica e cristalográfica (KANNO, 2009; BARDELLA, 2011).

Lewry; Williamson (1994) relatam que as partículas de hemi-hidrato de gesso são formadas por cristais hexagonais, com características uniformes. A variação da temperatura de calcinação do gesso, responsável pela formação do hemi-hidrato, anidrita III e II, altera a geometria do cristal observado na MEV (CANUT *et al.*, 2008; BALLIRANO; MELIS, 2009). O Quadro 2 resume a geometria dos cristais observados na matéria-prima natural e nas diferentes temperaturas de calcinação do gesso.

**Quadro 2 - Sistema cristalino do gesso comum**

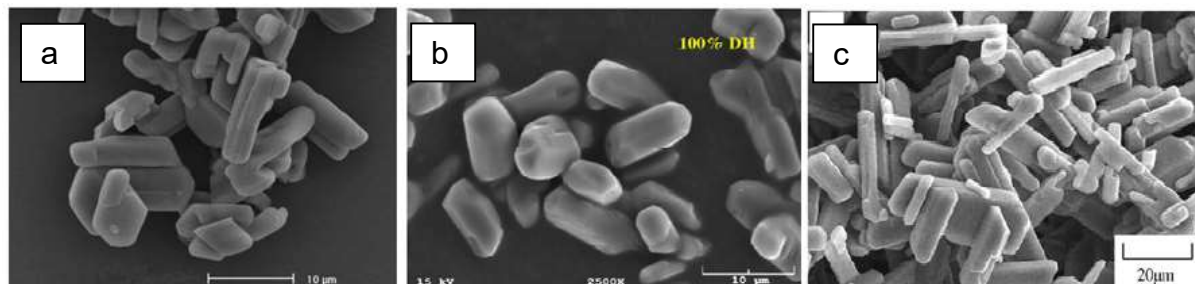
| Mineral      | Temperatura     | Sistema cristalino | Fórmula   |
|--------------|-----------------|--------------------|---|
| Gipsita      | 145 °C à 180 °C | Monoclínico        | $\text{CASO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                   |
| Hemi-hidrato | < 180 °C        | Hexagonal          | $\text{CASO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$                 |
| Anidrita III | 180 °C à 300 °C | Hexagonal          | $\text{CASO}_4 \cdot (0,5 - \varepsilon)\text{H}_2\text{O}$ |
| Anidrita II  | > 300 °C        | Ortorrômbica       | $\text{CASO}_4$   |

**Legenda:  $0,06 < \varepsilon < 0,11$**

**Fonte: Canut *et al.* (2008); Jeulin *et al.* (2001).**

Ballirano; Melis (2009), Azimi; Papangelakis (2011) e Kojima; Yasue (2016) descrevem a morfologia do sistema cristalino do pó de gesso como partículas hexagonais, com comprimento de 10 a 20  $\mu\text{m}$ , como pode ser visualizado na Figura 1.

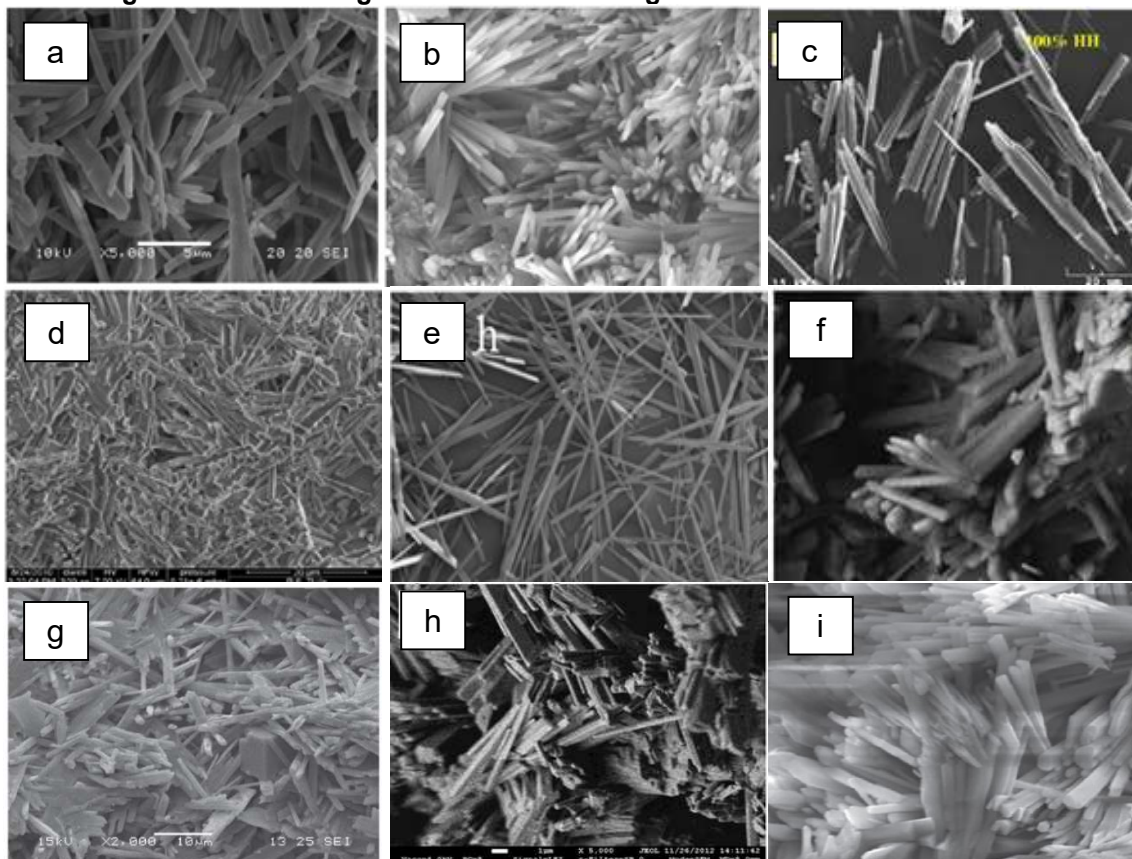
**Figura 1 - a) Fotomicrografias do gesso em pó ampliado 15000 vezes; b) 25000 vezes e c) 15000 vezes**



**Fonte: a) Ballirano; Melis (2009); b) Azimi; Papangelakis (2011) e c) Kojima; Yasue (2016).**

Assim que entra em contato com a água, as partículas de pó de gesso se hidratam e formam cristais na forma de agulhas alongadas, estas formações tendem a se entrelaçar e preencher os vazios da matriz (LEWRY; WILLIAMSON, 1994; REYNAUD *et al.*, 2006), como pode ser observado na Figura 2.

**Figura 2 - Fotomicrografias dos cristais de gesso di-hidratados**



Fonte: a) Soares *et al.* (2001); b) Carvalho *et al.* (2008); c) Azimi; Papangelakis (2011); d) Yu; Brouwers (2011); e) Miao *et al.* (2015); f) Yakolev *et al.* (2015); g) Moura *et al.* (2016); h) Pervyshin *et al.* (2017); i) Zhu *et al.* (2018).

Se a calcinação da gipsita ocorrer em temperaturas superiores a 180 °C, observa-se a formação de anidrita solúvel, caracterizada por pequenos cristais com 10 µm de comprimento e até 1 µm de diâmetro espalhados aleatoriamente no volume da matriz (YAKOVLEV *et al.*, 2015). Tais partículas geralmente apresentam fissuras oriundas do processo de evaporação da água (FREYER; VOIGT, 2003; BARBOSA *et al.*, 2014).

Uma técnica utilizada paralelamente nos ensaios MEV é a microanálise química determinada através do espectrômetro de dispersão de energia (EDS). Um feixe de raios-X é disparado pontualmente ou em uma área pré-determinada sobre a amostra durante o ensaio MEV. O espectrômetro realiza a microanálise química para obtenção

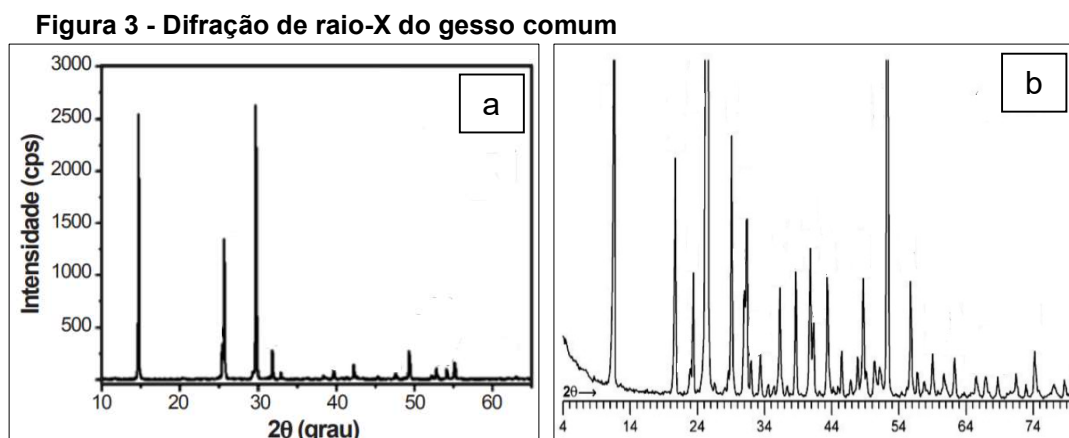
dos elementos químicos (BORTOLETO *et al.*, 2011). Capraro *et al.* (2017) afirmam que o EDS deve ser utilizado de maneira qualitativa, pois representa uma parcela muito pequena da amostra. Para confirmação apurada dos elementos químicos presentes em amostras, deve-se utilizar a microanálise de dispersão de energia.

### 2.1.6 Microanálise química pelo método de dispersão de energia

A difratometria de raios-X (DRX) é uma técnica que consiste na determinação dos componentes mineralógicos de um determinado material. Feixes de elétrons de raios-X são difratados após atingirem a superfície da amostra. Esta interação produz fótons de raios-X com espectro, intensidade e comprimento de onda específicos para cada composto presente na amostra (LOU *et al.*, 2010; BARDELLA, 2011).

Miao *et al.* (2015) exemplificam que o material é bombardeado pelo feixe de elétrons de raios-X, as camadas dos átomos difratam os raios e gera picos característicos. Substâncias cristalinas apresentam picos acentuados nos gráficos da DRX, compostos amorfos geram picos menores e menos definidos.

Os difratogramas de raios-X do gesso comum (Figura 3) demonstram resultados típicos de amostras de gesso comum, composto essencialmente por hemi-hidrato ( $\text{CASO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), caracterizada por picos mais elevados e anidrita ( $\text{CASO}_4$ ), caracterizada por picos menores (AHMED *et al.*, 2011; BARBOSA *et al.*, 2014; KONDRATIEVA *et al.*, 2017).



Fonte: a) Barbosa *et al.* (2014) e b) Yakovlev *et al.* (2015).

O di-hidrato e o hemi-hidrato apresentam cristais hexagonais, com pequena variação nos picos de difração de raios-X. Por outro lado, a anidrita tem estrutura

ortogonal, com picos menores nos gráficos de DRX (MANDAL; MANDAL, 2002; CARVALHO *et al.*, 2008).

Descrita a microanálise de dispersão de energia, será abordada a caracterização do material, como as características físico-químicas do pó e as propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido.

### 2.1.7 Caracterização do gesso comum

Relativo às características físicas do pó de gesso comum, dois aspectos são relevantes, a granulometria e a massa unitária. A granulometria, influencia, por exemplo, a plasticidade da pasta e seu acabamento superficial (ZHU *et al.*, 2018).

O ensaio de granulometria está preconizado na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) em que se utiliza peneiramento mecânico sequencial, em determinada série de peneiras. Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) é utilizada a porcentagem passante nas peneiras 0,29 e 0,21 mm (Quadro 3), como requisito físico de classificação do gesso, desconsiderando-se o antigo critério de módulo de finura que era utilizado na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 1991a)

**Quadro 3 - Requisitos físicos para classificação do gesso (granulometria via seca)**

| <b>Classificação do gesso</b> | <b>Granulometria mínima</b>                   |
|-------------------------------|---|
| Gesso para fundição           | ≥ 90% passante na peneira de abertura 0,29 mm |
| Gesso para revestimento       | ≥ 90% passante na peneira de abertura 0,21 mm |

**Fonte: adaptado de NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017).**

A relação entre a massa não compactada do material e o volume é definida na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) como massa unitária. O limite mínimo exigido na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) é de 600 kg m<sup>-3</sup>. Savi (2017) cita que a massa unitária pode representar a distribuição granulométrica, capacidade de empacotamento e a forma dos grãos simultaneamente. Os principais valores encontrados na determinação da massa unitária na literatura são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso comum**

| <b>Autor</b>                  | <b>Massa Unitária (kg m<sup>-3</sup>)</b> |
|-------------------------------|---|
| Vimmrová <i>et al.</i> (2011) | 945,00                                    |
| Moura <i>et al.</i> (2016)    | 675,00                                    |
| Shiroma <i>et al.</i> (2016)  | 610,00                                    |
| Savi (2017)                   | 630,00                                    |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)     | 653,93                                    |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)      | 880,00                                    |

**Fonte: o autor.**

A massa específica é definida na NBR 16605 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) como a relação entre a massa e o volume deslocado pelo material ensaiado, os valores apurados na literatura a respeito da massa específica do gesso são descritos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa específica do gesso**

| <b>Autor</b>                           | <b>Massa específica (kg m<sup>-3</sup>)</b> |
|--|---|
| Bardella; Camarini (2011)              | 2605  |
| Vimmrová <i>et al.</i> (2011)          | 2314  |
| Magallanes-Rivera <i>et al.</i> (2012) | 2600  |
| Medina <i>et al.</i> (2016)            | 2300  |
| Moura <i>et al.</i> (2016)             | 2660  |
| Shiroma <i>et al.</i> (2016)           | 2550  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)               | 2319  |

**Fonte: o autor.**

Segundo prescrições contidas na NBR 16372 (ASSOCIAÇÃO..., 2015), a superfície específica das partículas de gesso pode ser determinada através do método da permeabilidade ao ar (método de *Blaine*), em que o número e a faixa de tamanho dos poros individuais são determinados pela distribuição dos tamanhos das partículas, que também determina o tempo para um dado fluxo de ar atravessar a amostra (BARDELLA, 2011). Os principais valores encontrados na literatura a respeito da superfície específica do gesso estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre superfície específica do gesso comum**

| <b>Autor</b>                  | <b>Superfície específica (m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>)</b> |
|-------------------------------|--|
| Pinheiro (2011)               | 623  |
| Pinheiro; Camarini (2015)     | 624  |
| Camarini <i>et al.</i> (2016) | 231  |
| Moura <i>et al.</i> (2016)    | 664  |
| Geraldo <i>et al.</i> 2017    | 309  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)      | 281  |

**Fonte: o autor.**



A preparação da pasta de gesso possui características peculiares. Diferentemente de outros aglomerantes, a pasta de gesso deve ser preparada polvilhando-se o gesso sobre a água lentamente (RIBEIRO, 2011). Após o polvilhamento do gesso em pó deve-se deixar a mistura repousar por 2 minutos, período onde ocorre a dissolução do hemi-hidrato. Só então recomenda-se misturar a pasta lentamente por mais 1 minuto (CAVALCANTI; PÓVOAS, 2016).

Na NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) a consistência normal é definida como a relação água/gesso (a/g) na qual se obtém fluidez da pasta de gesso adequada para manipulação, ou seja, 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 demanda estequiométrica para hidratação das partículas de gesso comum é de 18,6%, porém, é necessário adicionar quantidade excessiva de água para trabalhabilidade (KHALIL *et al.*, 2014; KIRCHHEIM *et al.*, 2018). A superfície específica, forma, distribuição e finura dos grãos de gesso são parâmetros que influenciam diretamente a quantidade de água necessária para que a pasta de gesso se torne trabalhável (PINHEIRO, 2011).

Bardella (2011), Pinheiro (2011) e Ribeiro (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 relação a/g, maior o tempo de pega, pois as distâncias entre as partículas são maiores devido ao excesso de água, ampliando o espaçamento entre os grãos. Como os cristais possuem mais espaço, o crescimento e o entrelaçamento é mais lento.

Khalil *et al.* (2014) apuraram o valor de 0,6 na relação a/g durante o ensaio de consistência normal, valor comumente utilizado nas obras. Zhu *et al.* (2018) apuraram o valor de 0,62 para a consistência normal em seus ensaios com gesso comum.

A quantidade de água normalmente utilizada na produção da pasta de gesso varia entre 50 e 70%, e deve-se evitar percentagens superiores, pois o excesso de água presente na mistura pode gerar poros após a cura do material (SAVI, 2017). É comumente observado em obras a utilização de quantidade de água entre 0,60 kg L<sup>-1</sup> a 0,80 kg L<sup>-1</sup>, em relação à massa de gesso (BARDELLA, 2011).

O intervalo de tempo compreendido entre o contato do gesso em pó na água e o início do processo de endurecimento é denominado tempo de pega (MELO *et al.*, 2011; RIBEIRO, 2011). Impurezas contidas na matéria-prima, como argila e alumínio

podem acelerar o tempo de pega, pois geram núcleos de cristalização (BARBOSA *et al.*, 2014).

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) são descritos patamares mínimos e máximos para o tempo de pega de pastas de gesso para fundição e revestimento, estes parâmetros são descritos no Quadro 4.

**Quadro 4 – Tempo de pega normalizado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017)**

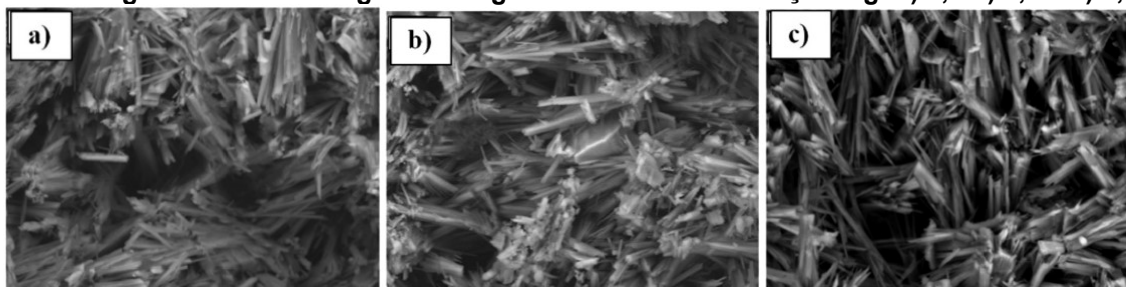
| Classificação do gesso                 | Tempo de pega (min)<br>(NBR 13207) |      |
|--|------------------------------------|------|
|  | Início                             | Fim  |
| Gesso para fundição                    | ≤ 10                               | ≤ 20 |
| Gesso para revestimento (sem aditivos) | ≥ 10                               | ≥ 35 |

Fonte: Adaptado de NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017).

A água é o fator de maior influência no processo de dissolução e cristalização do gesso. A formação de grandes aglomerados com formas irregulares proporciona menor compactação dos cristais, conseqüentemente maior quantidade de vazios. Quanto maior a quantidade de água utilizada na hidratação do pó, maior será a quantidade de poros deixados após a cura (KARNI; KARNI, 1995).

O excesso de água na pasta de gesso tende a ocupar volume entre os cristais, o que dificulta o entrelaçamento. Após a cura, este excesso de água evapora e deixa vazios no material, isto é, cria porosidade (KANNO, 2009; BARDELLA, 2011). A falta de material gerado pela porosidade facilita a deformação e conseqüentemente diminui as características físicas e mecânicas (AAGLI *et al.*, 2005; BARDELLA; CAMARINI, 2011; YU; BROUWERS, 2012). A Figura 4 representa o incremento do número de vazios observados conforme aumento da relação a/g (BARBOSA *et al.*, 2014).

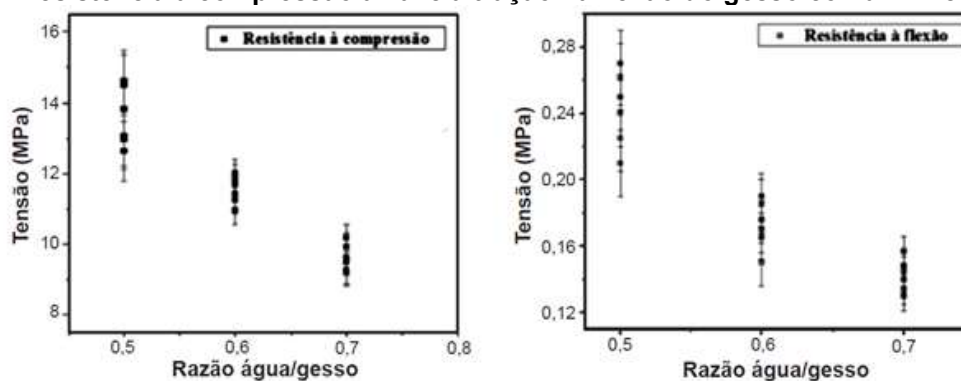
**Figura 4 - Fotomicrografias do gesso comum com relação a/g: a) 0,5 b) 0,6 e c) 0,7**



Fonte: Barbosa *et al.* (2014).

A redução dos valores de resistência à compressão axial e à tração na flexão são inversamente proporcionais ao incremento da relação a/g (Figura 5) (BARBOSA *et al.*, 2014).

Figura 5 – Resistência à compressão axial e à tração na flexão do gesso comum x relação a/g.



Fonte: Barbosa *et al.* (2014).

Com relação as propriedades mecânicas, as normas brasileiras não indicam valores mínimos a serem atingidos em ensaios de resistência à tração na flexão, tão qual o método a ser utilizado. Na norma espanhola UNE-EN 13279-1:2006 são atribuídos valores mínimos de 2 MPa para os ensaios de tração na flexão do gesso comum (SERNA *et al.*, 2012). Os principais autores que estudaram a resistência à tração na flexão do gesso encontrados na literatura, assim como seus resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tração na flexão do gesso comum

| Autor                                     | Relação a/g | Resistência à tração na flexão (MPa) |
|---|-------------|--------------------------------------|
| Bardella; Camarini (2011)                 | 0,70        | 3,40                                 |
| Vasconcelos <i>et al.</i> (2011)          | 0,70        | 4,40                                 |
| Yu; Brouwers (2011)                       | 0,70        | 3,90                                 |
| Gutiérrez-González (2012)                 | 0,70        | 6,19                                 |
| Serna <i>et al.</i> (2012)                | 0,70        | 3,92                                 |
| Serna <i>et al.</i> (2012)                | 0,80        | 3,25                                 |
| Gencil <i>et al.</i> (2014)               | 0,80        | 1,00                                 |
| Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014)       | 0,70        | 5,97                                 |
| Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014)       | 0,76        | 5,41                                 |
| Vimmrová <i>et al.</i> (2014)             | 0,80        | 4,00                                 |
| San-Antonio-González <i>et al.</i> (2015) | 0,70        | 3,16                                 |
| Yakovlev <i>et al.</i> (2015)             | 0,60        | 4,20                                 |
| Medina <i>et al.</i> (2016)               | 0,54        | 0,35                                 |
| Morales-Conde <i>et al.</i> (2016)        | 0,55        | 3,50                                 |
| Shiroma <i>et al.</i> (2016)              | 0,70        | 3,20                                 |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)               | 0,63        | 5,29                                 |
| Pedreno-Rojas <i>et al.</i> (2017)        | 0,55        | 3,64                                 |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)                 | 0,70        | 3,18                                 |
| Merino <i>et al.</i> (2018)               | 0,50        | 2,91                                 |

Fonte: o autor.

Na atualização da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), anteriormente NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), aboliu-se o requisito mecânico de compressão axial em corpos de prova moldados com gesso. Anteriormente, era indicado o valor mínimo de 8,40 MPa para resistência à compressão axial.

Guan *et al.* (2011) citam que a resistência mecânica está relacionada ao entrelaçamento da estrutura cristalina e a ausência de fraturas nos cristais. Fissuras geradas nos cristais devido à evaporação da água de cristalização tendem a reduzir valores de compressão axial do gesso (SAVI, 2017). Os principais valores de resistência à compressão axial do gesso comum são descritos na Tabela 6.

**Tabela 6 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre a resistência à compressão axial em ensaios com gesso comum**

| <b>Autor</b>                              | <b>Relação a/g</b> | <b>Resistência à compressão axial (MPa)</b> |
|---|--------------------|---|
| Arikan; Sobolev (2002)                    | 0,45               | 11,30                                       |
| Gmouh <i>et al.</i> (2003)                | 0,70               | 9,06  |
| Roque <i>et al.</i> (2005)                | 0,80               | 3,90  |
| Pimentel; Camarini (2009)                 | 0,80               | 2,33  |
| Schmitz; Póvoas (2009)                    | 0,50               | 12,88                                       |
| Bardella; Camarini (2011)                 | 0,70               | 8,60  |
| Lima; Camarini (2011)                     | 0,70               | 6,60  |
| Vasconcelos <i>et al.</i> (2011)          | 0,90               | 4,67  |
| Serna <i>et al.</i> (2012)                | 0,60               | 9,80  |
| Serna <i>et al.</i> (2012)                | 0,70               | 7,54  |
| Serna <i>et al.</i> (2012)                | 0,80               | 5,64  |
| Baltar <i>et al.</i> (2013)               | 0,90               | 12,80                                       |
| Gencel <i>et al.</i> (2014)               | 0,80               | 3,34  |
| Moura <i>et al.</i> (2014)                | 0,70               | 8,50  |
| Vimmrová <i>et al.</i> (2014)             | 0,60               | 12,00                                       |
| Dai; Fan (2015)                           | 0,70               | 10,59                                       |
| Iucolano <i>et al.</i> (2015)             | 0,70               | 2,61  |
| San-Antonio-González <i>et al.</i> (2015) | 0,70               | 5,59  |
| Yakovlev <i>et al.</i> (2015)             | 0,60               | 9,00  |
| Morales-Conde <i>et al.</i> (2016)        | 0,55               | 10,00                                       |
| Shiroma <i>et al.</i> (2016)              | 0,80               | 7,05  |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)               | 0,60               | 13,08                                       |
| Medina; Barbero-Barrera (2017)            | 0,54               | 12,50                                       |
| Pedreno-Rojas <i>et al.</i> (2017)        | 0,55               | 9,87  |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)                 | 0,70               | 7,11  |
| Krejsová <i>et al.</i> (2018)             | 0,70               | 8,41  |
| Merino <i>et al.</i> (2018)               | 0,50               | 5,09  |

**Fonte: o autor.**

A resistência que o material oferece a esforço de impacto ou a dificuldade de ser riscado recebe a denominação de dureza superficial (BAUER, 2012). Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) são estabelecidos valores superiores a 20 N mm<sup>-2</sup> para a dureza superficial de corpos de prova moldados com gesso.

Lima; Camarini (2011) afirmam que o incremento da relação a/g tende a reduzir o valor da resistência à dureza superficial. Os principais valores de dureza superficial do gesso comum encontrados na literatura são demonstrados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso comum**

| <b>Autor</b>                        | <b>Relação a/g</b> | <b>Dureza (N mm<sup>-2</sup>)</b> |
|-------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Bardella; Camarini (2011)           | 0,70               | 20,20                             |
| Serna <i>et al.</i> (2012)          | 0,60               | 82,50                             |
| Serna <i>et al.</i> (2012)          | 0,70               | 76,20                             |
| Serna <i>et al.</i> (2012)          | 0,80               | 66,80                             |
| Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014) | 0,70               | 89,00                             |
| Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014) | 0,76               | 84,00                             |
| Medina <i>et al.</i> (2016)         | 0,60               | 58,00                             |
| Medina <i>et al.</i> (2016)         | 0,70               | 39,00                             |
| Morales-Conde <i>et al.</i> (2016)  | 0,55               | 45,00                             |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)         | 0,63               | 46,20                             |
| Pedreno-Rojas <i>et al.</i> (2017)  | 0,55               | 99,50                             |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)           | 0,70               | 45,18                             |
| Merino <i>et al.</i> (2018)         | 0,50               | 61,87                             |

**Fonte: o autor.**

Um requisito mecânico observado no gesso é a capacidade de aderência. Flores-Colen *et al.* (2009) afirmam que a aderência é a propriedade que o revestimento tem em manter-se fixo ao substrato. Turunen *et al.* (2004) citam que a aderência é um fenômeno mecânico, onde ocorre a penetração da pasta aglomerante nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação.

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) são estabelecidos valores maiores que 0,2 MPa como requisito mecânico para aderência à tração no gesso comum. Na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) é descrito o procedimento para ensaio de resistência de aderência à tração.

Em seus ensaios de aderência à tração, Morales-Conde *et al.* (2016) obtiveram valores de 0,55 MPa, superior ao estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017). Araújo *et al.* (2016) e Merino *et al.* (2018) informam valores entre 0,15 e 0,4 MPa, em seus ensaios de aderência à tração com gesso comum. Os autores ainda citam que a ruptura ocorreu na camada de interface entre gesso e substrato.

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) são estabelecidos requisitos químicos mínimos para o gesso comum. Na Tabela 8 são demonstrados estes requisitos e os principais resultados encontrados na literatura.

**Tabela 8 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre determinações químicas**

| Determinações químicas (%)            | NBR 13207: 2017 | Autores                     |                           |                             |                               |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                                       | Limites (%)     | Mármol <i>et al.</i> (2013) | Pinheiro; Camarini (2015) | Medina <i>et al.</i> (2016) | Mendonça <i>et al.</i> (2016) |
| Água livre                            | Máx. 1,3        | 0,25                        | 1,27                      | 1,49                        | 1,98                          |
| Água de cristalização                 | 4,2 a 6,2       | 5,70                        | 1,04                      | 17,49                       | 6,01                          |
| Óxido de cálcio (CaO)                 | Mín. 38,0       | 43,26                       | 37,30                     | 38,08                       | 31,00                         |
| Anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) | Mín. 53,0       | 54,46                       | 49,90                     | 44,52                       | 43,21                         |

Fonte: o autor.

Descritas as características físico-químicas do pó e as propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido, no item 2.2 são abordados aspectos relativos ao papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado.

## 2.2 Papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado

Como com a maioria das fibras lignocelulósicas, o papel de revestimento das chapas de gesso acartonado é composto por uma mistura de hemiceluloses de celulose e lignina. Aditivos orgânicos, como caulins, argila da China ou amido catiônico também estão incorporados no papel, a fim de melhorar propriedades como opacidade, densidade, retenção de umidade e resistência (HURTADO *et al.*, 2016).

O papel cartão que reveste as chapas de gesso acartonado possui capacidade natural de equilibrar a umidade e o clima interno, além de proporcionar textura naturalmente lisa e qualidade de finalização superficial única. Possui facilidade de aceitar acabamentos como pintura, textura, azulejos, pastilhas, mármore, granito, papel de parede e lambris de madeira (GYPSUM S/A, 2019).

Ao aplicar revestimento acrílico sobre o papel cartão que reveste as chapas de gesso acartonado é possível aumentar sua resistência à umidade e criar uma superfície pouco absorvente e hidrofóbica (SHAW, 2003).

Na NBR 14527 (ASSOCIAÇÃO..., 2009) são estabelecidas as propriedades físicas em folhas de papel formadas em laboratório, assim como é direcionado para as normas utilizadas nos ensaios, conforme descrito no Quadro 5.

**Quadro 5 – Propriedades físicas em folhas de papel formadas em laboratórios**

| <b>Propriedade</b>                                | <b>Norma</b>             |
|---|--------------------------|
| Gramatura   | ABNT NBR 14527           |
| Determinação da espessura                         | ABNT NBR 14527           |
| Resistência à tração                              | ABNT NBR NM – ISO 1924-2 |
| Resistência à compressão – <i>Short Span Test</i> | ISO 9895                 |

**Fonte: Adaptado de NBR 14527 (ASSOCIAÇÃO..., 2009).**

Abordadas informações sobre o papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado, serão abordados no item 2.3 aspectos referente à junção de gesso comum com papel cartão, as chapas de gesso acartonado.

### 2.3 Chapas de gesso acartonado

Na busca pela produção de um material de construção robusto, leve e isolante, dois engenheiros de Nova Iorque, EUA, Sackett e Kane, criaram as placas de gesso acartonado em 1894. Este sucesso é principalmente devido ao fato de que placas de gesso cartonado podem ser usadas em muitas aplicações e projetadas com desempenho aprimorado para requisitos acústicos e de proteção ao fogo (VIMMROVÁ *et al.*, 2011).

*Drywall* é o sistema para construção de paredes e forros mais utilizado na Europa e na América do Norte. A aparência externa é similar à alvenaria. Porém, sua estrutura é composta por perfis de aço galvanizado, sobre as quais são parafusadas chapas de gesso revestidas com papel cartão, gerando-se uma superfície apta a receber o acabamento final (PLACO DO BRASIL, 2018; GYPSUM S/A, 2019).

O gesso acartonado fornece bons níveis de isolamento térmico e acústico, além de alto nível de proteção contra incêndio, devido à sua natureza incombustível (BOJIC *et al.*, 2012).

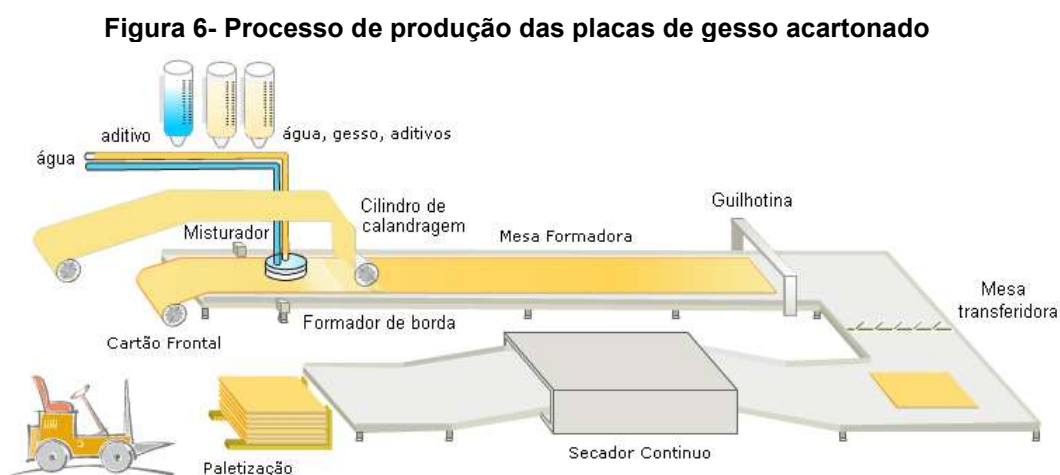
#### 2.3.1 Processo de produção das chapas de gesso acartonado

O minério de gesso é extraído da pedra com um diâmetro máximo de 5 cm, então as rochas são transportadas até fábrica, onde são moídas e calcinados a 160 °C. Durante esse processo, o gesso perde cerca de 70% de sua umidade (QUINTANA *et al.*, 2018).

O gesso utilizado no núcleo da chapa de gesso acartonado é depositado em uma solução de água e aditivos, tais como amido, lignina, perlita, vermiculita, espuma

de sabão e retardadores (BOUTERF *et al.*, 2015; RIVERO *et al.*, 2016). A pasta de gesso é lançada sobre uma lâmina de papel cartão. A seguir, é aplicada outra lâmina de papel cartão na parte superior. O componente então é submetido a um sistema de calandras que dão a conformidade necessária à peça. O papel aplicado em ambos os lados do núcleo de gesso é responsável pela resistência à tração na placa de gesso acartonado (RIVERO *et al.*, 2016).

O gesso então hidrata para formar sulfato de cálcio di-hidratado. O núcleo de gesso da placa de gesso acartonado leva de 4 a 5 min para endurecer. Após a cura inicial as placas são cortadas e conduzidas ao forno de secagem, onde o excesso de água é expelido. Após a secagem as chapas de gesso acartonado são empilhadas e embaladas (FREITAS, 2013; RIVERO *et al.*, 2016). A Figura 6 é representado o desenho esquemático do processo de produção.



**Fonte: Freitas (2013).**

O núcleo da chapa de gesso é quimicamente restaurado ao composto encontrado na natureza (di-hidrato) após a hidratação (RIVERO *et al.*, 2016).

### 2.3.2 Características físicas das chapas de gesso acartonado

Na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) são estabelecidos requisitos físicos mínimos para as chapas de gesso acartonado, como densidade superficial, resistência à flexão e dureza superficial, como pode ser observado no Quadro 6.



**Quadro 6 – Requisitos físicos das chapas de gesso acartonado**

| Características   |                           | Limites<br>(chapas 12,5 mm de espessura) |
|---|---------------------------|--|
| Densidade superficial de massa (kg m <sup>-2</sup> )              | Mínima                    | 8,0 ± 0,5                                |
|   | Máxima                    | 12,0 ± 0,5                               |
| Resistência mínima à ruptura à flexão (N)                         | Longitudinal <sup>a</sup> | 550                                      |
|   | Transversal <sup>b</sup>  | 210                                      |
| Dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da mocha (mm) |                           | 20                                       |

<sup>a</sup> Amostra com a face da frente virada para baixo. Carga aplicada na face do verso.  
<sup>b</sup> Amostra com a face da frente virada para cima. Carga aplicada na face da frente.

**Fonte: Adaptado de NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).**

As chapas de gesso acartonado possuem cerca de 35% de poros em sua composição, produzidos pela inserção de espuma de sabão durante o processo de produção. Esta alta porosidade contribui não só para leveza da chapa de gesso acartonado, cuja densidade é aproximadamente 1 g cm<sup>-3</sup>, como acentua características de isolamento termo-acústicas e resistência ao fogo (ANG; WANG, 2009; KIM, 2009).

Yu; Brouwers (2012) obtiveram densidade de 0,92 g cm<sup>-3</sup> para chapa de gesso acartonado. Ao recriarem o mesmo corpo de prova com gesso comum, os autores obtiveram densidade de 1,20 g cm<sup>-3</sup>. O incremento na densidade ocorreu devido à pouca porosidade apresentada pela chapa de gesso comum.

O ensaio de resistência à flexão das chapas de gesso acartonado visa garantir a não deformação das chapas de gesso acartonado quando instaladas na posição horizontal, como na utilização em forros (BOUTERF *et al.*, 2015).

Em seus experimentos, Leiva *et al.* (2010) obtiveram 585 N nos ensaios de resistência mínima à ruptura à flexão longitudinal para chapas de gesso acartonado. Valor similar ao apresentado por Yu; Brouwers (2012) de 592 N. Bouterf *et al.* (2015) apuraram valores de 271 N nos ensaios de resistência mínima à ruptura à flexão transversal. Os autores descrevem que o início da primeira fissura macroscópica ocorre no núcleo de gesso próximo a face de tração da amostra. Porém isso não leva à falha repentina da amostra. A falha final da amostra ocorre quando o papel de revestimento não suporta a carga de tração.

As normas brasileiras não apresentam requisitos de resistência à compressão para chapas de gesso acartonado. Normas espanholas, como a UNE-EN 13279-1:2006 estabelecem resistência à compressão superior a 2 MPa. Leiva *et al.* (2010) e

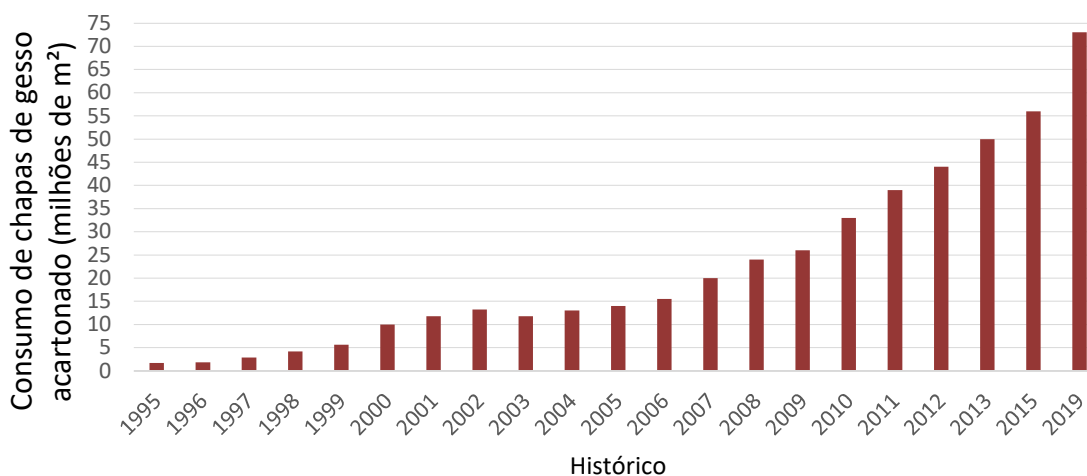
Yu; Brouwers (2012) obtiveram valores de 12,1 e 9,1 MPa, respectivamente, para os parâmetros de compressão de chapas de gesso acartonado.

Outro requisito mecânico observado nas chapas de gesso acartonado é a dureza superficial, que demonstra a capacidade do material de resistir a esforços sem deformar. Em seus ensaios de dureza superficial, Leiva *et al.* (2010) obtiveram o valor de 16 mm na impressão do diâmetro da moça nas chapas de gesso acartonado, superior ao requisito da NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) de no máximo 20 mm.

### 2.3.3 Mercado do *drywall*

De acordo com dados da Knauf do Brasil (2020), o Brasil consumiu cerca de 73 milhões de m<sup>2</sup> de chapas de gesso acartonado em 2019, o que superou o volume máximo de 56 milhões de m<sup>2</sup> consumidos em 2015 (Figura 7) (CONDEIXA *et al.*, 2015).

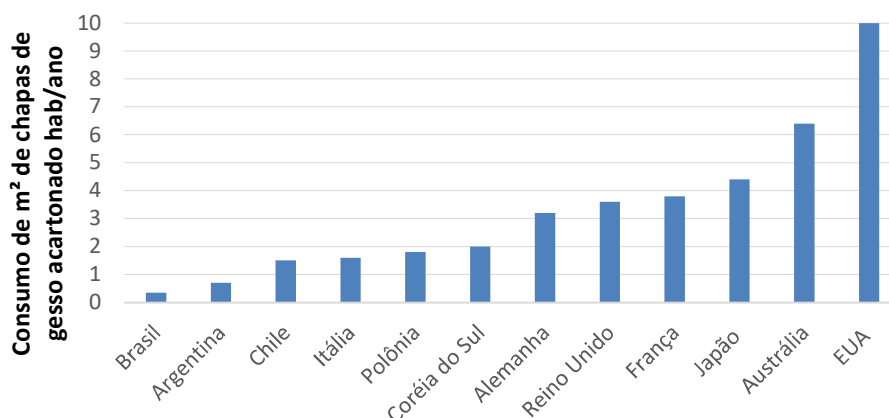
**Figura 7 - Histórico de consumo de chapas de gesso acartonado no Brasil (em milhões)**



**Fonte: Adaptado de Associação Brasileira do *Drywall* (2019).**

Associação Brasileira do *Drywall* (2019) expõe que há grande mercado a ser explorado, visto que o consumo por habitante/ano no Brasil é 0,35 m<sup>2</sup> de chapas de gesso acartonado, bem aquém do consumo americano, de 10 m<sup>2</sup>/hab./ano, conforme ilustrado na Figura 8.

**Figura 8 - Consumo mundial de m<sup>2</sup> de chapas de gesso acartonado por habitante/ano**



**Fonte: Adaptado de Associação Brasileira do Drywall (2019).**

As regiões Sul e Sudeste consomem 80% da produção nacional. Somente o Estado de São Paulo consome 44% de todas as chapas de gesso acartonado produzidas no Brasil. As regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte têm participações de 11%, 6% e 3%, respectivamente, na utilização de chapas de gesso acartonado (PLACO DO BRASIL, 2018).

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

#### 2.3.4 Perdas na construção com chapas de gesso acartonado

Durante as etapas de produção, construção e demolição, aproximadamente 15 milhões de toneladas de resíduos de placas de gesso acartonado estão sendo despejadas em aterros anualmente. Depois de materiais argilosos, os resíduos de gesso são o segundo maior contribuinte no fluxo de resíduos de construção civil (GODINHO-CASTRO *et al.*, 2012).

Os resíduos de gesso pré-consumo gerados durante o processo de fabricação são geralmente conhecidos como resíduos de produção, e incluem placas fora de especificação danificadas durante a produção ou danificados na expedição ou estoque das fábricas (RIVERO *et al.*, 2016). Neto *et al.* (2010) citam que a principal atividade geradora de perda das placas de gesso acartonado são as atividades de

corte durante a instalação do sistema *drywall*. Estima-se que a perda esteja entre 10 a 12% durante este processo, nos EUA (CAVALCANTI; PÓVOAS, 2016; GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL, 2019). No Brasil a estimativa de descarte das chapas de gesso acartonado é de 5% do total produzido (GYPSUM S/A, 2019). Empresas brasileiras como *Gypsum S/A*, *Knauf* e *Placo*, fornecem chapas de gesso acartonado com altura personalizada, o que reduz o desperdício com corte indevido (PLACO DO BRASIL, 2018; GYPSUM S/A, 2019; KNAUF DO BRASIL, 2020).

### 2.3.5 Impactos ambientais ocasionados pelos resíduos de gesso

Os resíduos de gesso comum e de chapas de gesso acartonado são cada vez mais gerados na União Europeia e não são adequadamente geridos em 20 dos 27 países europeus. No geral, estima-se que 87% dos resíduos de gesso são depositados em aterros na União Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2012; RIVERO *et al.*, 2014).

Dois efeitos indesejáveis são produzidos quando o resíduo de gesso não é gerenciado adequadamente. Primeiro, o gesso contamina outros resíduos inertes da construção civil, que poderiam ser reciclados. Em segundo lugar, ocorre geração de gás sulfídrico ( $H_2S$ ) (BARBUDO *et al.*, 2012; LEE; OGURA, 2013).

O resíduo de placas de gesso acartonado em si não é perigoso, mas quando é misturado com resíduos orgânicos e exposto à chuva em um ambiente anaeróbico, há produção do gás sulfeto de Hidrogênio, ou gás sulfídrico (CHANDARA *et al.*, 2009; AHMED *et al.*, 2011; SUN; BARLAZ, 2015). A dispersão de  $H_2S$  emite um gás tóxico, incolor, corrosivo e inflamável. Este gás apresenta odor característico de ovo podre e têm efeitos potencialmente fatais se atingir grandes proporções (VRANCKEN; LAETHEM, 2000).

De acordo com a *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR, 1996), exposição à concentrações de  $H_2S$  de 1000 ppm provoca colapso imediato ao inalar um único sopro de gás  $H_2S$ . Concentrações acima de 600 ppm podem afetar o sistema nervoso central, o que acarreta a falta de ar e morte. Baixos níveis de  $H_2S$  podem ser tolerados pelos seres humanos, mas mesmo em concentrações de 10 a 20 ppm pode causar irritação nos olhos (ALENCAR *et al.*, 2011). A taxa de emissão

de H<sub>2</sub>S é variável e depende de diferentes fatores como umidade do solo, concentração de H<sub>2</sub>S e temperatura (RAGHAVENDRA; UDAYASHANKAR, 2015).

A incineração destes resíduos resulta na liberação potencial de dióxido de enxofre, um contribuinte para formação de chuva ácida. Os métodos tradicionais de descarte também resultam na perda de um recurso valioso. Portanto, o gerenciamento adequado desses resíduos por meio de programas de reciclagem garantirá que um recurso valioso não seja perdido, além de mitigar os impactos ambientais (NDUKWE; YUAN, 2016; JIMÉNEZ-RIVERO; NAVARRO, 2017).

### 2.3.6 Ciclo de vida das chapas de gesso acartonado

Um sistema de economia circular mantém o valor agregado nos produtos o máximo possível e reduz o desperdício. Esta estratégia de transformar resíduos em recursos é parte essencial do aumento da eficiência de recursos e do “fechamento do ciclo” em uma economia circular (GOVINDAN *et al.*, 2014). O gerenciamento da cadeia de suprimentos de ciclo fechado envolve projeto, controle e operação de um sistema para maximizar a criação de valor ao longo de todo o ciclo de vida de um produto com recuperação dinâmica de valor de diferentes tipos e volumes de retorno ao longo do tempo (QUINTANA *et al.*, 2018).

Assim que os produtos de construção em fim de vida são gerados, práticas adotadas pelas partes interessadas desempenham papel central na determinação de seu destino. Uma gestão de resíduos eficaz beneficia a hierarquia de resíduos e promove economia circular de produtos, o que evita perdas de matérias-primas secundárias potenciais (CONDEIXA *et al.*, 2015).

O ciclo de vida da chapa de gesso acartonado normalmente começa com a extração e processamento de matérias-primas, continua com a manufatura e uso da chapa e, em seguida, atinge o fim-de-vida. Estima-se que atualmente apenas 6% do resíduo de gesso fecha o ciclo do material em economia circular (RIVERO *et al.*, 2016).

Para evitar contaminação e ampliar o ciclo de vida da chapa de gesso acartonado é necessário segregar, evitando que esta se misture com outros resíduos e acabe destinada a aterros (JIMÉNEZ-RIVERO; NAVARRO, 2017). Abordados os principais tópicos sobre mercado, perdas e ciclo de vida das chapas de gesso acartonado, no item 2.4 serão abordados aspectos sobre reuso e reciclagem.

## 2.4 Reúso e reciclagem

O reúso de resíduos pode ser conceituado como reutilização do resíduo sem alterações físico-químicas significativas (AJAYI, *et al.*, 2015; ISLAM *et al.*, 2019).

Segundo conceituação do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2019), reciclagem é um conjunto de técnicas de reaproveitamento de materiais descartados, reintroduzindo-os no ciclo produtivo. Do ponto de vista ambiental e social, é uma técnica vantajosa, pois reduz o consumo de recursos naturais, energia, diminui o volume de resíduos e gera empregos. Entende-se como reciclagem a transformação de resíduos em matéria-prima para produtos semelhantes aos iniciais (THORMARK, 2001; ALENCAR *et al.*, 2011).

A reciclagem é uma estratégia para gerenciamento resíduos e está relacionada à Produção Mais Limpa (PML), pois busca reduzir recursos e reutilizá-los no mesmo processo, além de oportunizar interações para alavancar o compromisso ambiental (FERNANDES; ESPINOSA, 2011).

A tecnologia e o desenvolvimento de materiais de construção devem incluir o reaproveitamento de resíduos e a aplicação de produtos residuais da indústria. A utilização de recursos naturais como matéria-prima para construção deve ser reduzida tanto possível. Além disso, os produtos devem ser recicláveis, gerando menos poluição ambiental e desperdício (LIANG; LI, 2015).

Jiménez-Rivero; Navarro (2017) afirmam que os governos têm papel relevante em fortalecer a legislação sobre resíduos de gesso, os marcos regulatórios e a aplicabilidade desses instrumentos. Em particular, os seguintes aspectos regulatórios são identificados como críticos: Proibição deste tipo de resíduo em aterros sanitários, uso de materiais reciclados, marco regulatório favorável à desconstrução, destinos legais alternativos dos resíduos e marco regulatório favorecendo plano de gestão de resíduos. Estes têm de ser acompanhados por incentivos econômicos, medidas de controle e outros instrumentos políticos, criando-se e desenvolvendo-se mercados para materiais reciclados.

#### 2.4.1 Reúso alternativos do resíduo de gesso

Na resolução 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) são estabelecidas diretrizes, procedimentos e critérios para a gestão e a classificação dos resíduos da construção civil (CONAMA, 2002). Tal classificação de resíduos foi alterada conforme texto publicado na resolução CONAMA nº 431/2011. O resíduo de gesso foi deslocado para a Classe B, que engloba os materiais recicláveis para outras destinações (CONAMA, 2011).

Diversos estudos foram realizados para propiciar o reúso de resíduos de gesso, tais como aditivo retardador de pega do cimento, fertilizantes e corretivos do solo, incorporação na fabricação de blocos cerâmicos, material de subleito para pavimentação e reincorporação no processo de produção das chapas de gesso acartonado (NEW WEST GYPSUM RECYCLING, 2018).

Neto *et al.* (2010) informam que a produção de cimento *Portland* necessita de 5% de sulfato de cálcio, este composto atua como retardador do tempo de pega e é obtido da gipsita. Estudos indicam que certo volume pode ser substituído por resíduos do gesso (BICINI; ASLAN 2016; MEDINA *et al.*, 2016; ZHIXIN *et al.*, 2016). As partículas do resíduo de gesso são menores, o que promove o empacotamento melhor dos cristais, se comparadas às da gipsita (ZHONG *et al.*, 2016).

Costa *et al.* (2011) citaram que após publicação de um comunicado técnico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o gesso pode ser utilizado como um insumo agrícola. Paralelo a isto, diversos autores pesquisam se a utilização do resíduo de gesso é tão eficaz quanto o gesso comum. Pracownia (2016) cita que foi possível corrigir a acidez do solo e remover teores de alumínio utilizando-se resíduos de gesso misturado ao solo. Este resíduo também auxilia a fixação do nitrogênio e fornece cálcio e enxofre para as plantas (WOLKOWSKY, 2003; AHMED; UGAI, 2011; CARVALHO; NASCENTE, 2014). Além de reduzir as perdas de amônia e diminuir odores durante compostagem (TUBAIL *et al.*, 2008).

O resíduo de gesso pode neutralizar solos salinos e sódicos ao aumentar a condutividade hidráulica, o que promove o crescimento das plantas (LIU; HUE, 2001; HANAY *et al.*, 2013). Os resíduos de chapas de gesso acartonado têm potenciais indicadores para recuperação do solo, especialmente para solos de baixa qualidade (NAETH; WILKINSON, 2013).

A adição de resíduos de chapas de gesso acartonado aumentou a concentração de cálcio no solo em 5 vezes e 18 vezes para o enxofre, se comparado a adição somente de estrume. O cálcio estimula a absorção de amônia e melhora absorção de nitrogênio por jovens raízes de plantas (KOST *et al.*, 2008).

Alguns estudos têm sido direcionados ao uso de resíduo de gesso adicionado na produção de blocos cerâmicos. A mistura de 20% de resíduo de gesso na produção de blocos cerâmicos indicou que o produto tinha boas propriedades físicas em comparação com argila natural (BASPINAR; KAHRAMAN, 2011; GODINHO-CASTRO *et al.*, 2012).

A formulação para produção de blocos cerâmicos composto por 35% de argila plástica, 35% de argila não plástica, 20% de gesso resíduos e 10% de cimento *Portland*, que apresentou resistência média de  $2,66 \pm 0,32$  MPa (SILVA *et al.*, 2013)

O resíduo de gesso comum e de placas de gesso acartonado tem sido usado recentemente no Japão em projetos de terraplenagem para melhoria do solo em aterros e rodovias (KAMEI *et al.*, 2013). Durante os ensaios com solo e gesso reciclado, os valores obtidos de resistência à compressão aumentaram com uso de 20% de resíduo de gesso (AHMED *et al.*, 2011).

O solo estabilizado com gesso reciclado pode apresentar problemas ambientais relacionados à solubilidade, porque o sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é solúvel em água (AHMED *et al.*, 2011; ZHU *et al.*, 2018). Porém, a incorporação de 3% de cimento na matriz solo-gesso reciclado reduz os vazios, isto é, diminui a porosidade, e elimina o contato com a água e conseqüentemente a solubilidade do resíduo de gesso (KAMEI *et al.*, 2013). Em solos argilosos, a coesão específica aumenta acentuadamente com a incorporação de 15% de resíduos de gesso devido à formação de cristais nos poros do solo, o que reduz a porosidade e, portanto, aumenta a coesão (KUTTAH; SATO, 2015).

O resíduo de gesso deve ser reincorporado se nenhum tipo de contaminante, inclusive o papel, pois este material reduz potencialmente o tempo de resistência ao fogo por ser combustível (AHMED *et al.*, 2015; GTOG, 2020). A BPB do Canadá, afirma utilizar até 22% de resíduos de chapas de gesso acartonado sem qualquer prejuízo no desempenho (CAMPBELL, 2003; MAGALLANES-RIVEIRA *et al.*, 2012).

Industrialmente, menos de 5% de resíduo de gesso são inseridos na matriz das chapas de gesso acartonado, assegurando-se os requisitos de resistência mecânica e as demais propriedades (KNAUF DO BRASIL, 2020).



Tais modelos de reutilização são válidos para resíduos homogêneos da indústria de gesso. Como os resíduos gerados a partir do material danificado durante a produção. Há pouco risco de que esse material esteja contaminado por agentes físicos. Já para o reuso de resíduos de chapas de gesso acartonado provenientes de desconstruções ou demolições, há a necessidade de usar usinas de triagem para separação de impurezas (MENDONÇA *et al.*, 2016). Estima-se que as avarias durante o processo de produção das chapas de gesso acartonado estejam na faixa de 4% (LAWRENCE-SANSBURY; BOYLER, 2013; RIVERO *et al.*, 2016).

A Knauf, na Alemanha, possui centrais de reuso para reaproveitamento de materiais defeituosos oriundos de sua linha de produção. Para reutilização o resíduo de chapas de gesso acartonado passa por uma triagem que remove quaisquer materiais metálicos e outros contaminantes, só então é triturado para separação do núcleo de gesso do papel de revestimento (FERNANDES; ESPINOSA, 2011; NETO *et al.*, 2010).

A empresa canadense *New West Gypsum Recycling* utiliza um processo de separação da massa de gesso do papel de revestimento móvel desde 2001 (CAVALCANTI; PÓVOAS, 2016). A unidade de reciclagem remove diversos tipos de contaminantes, como parafusos, pregos e outras impurezas, utilizando-se trituradores que pulverizam o núcleo de gesso e removem o papel cartão.

A NWGR (2016) informa que sua atividade consiste somente na separação dos diferentes tipos de resíduos encontrados nos resíduos de chapas de gesso acartonado, como plásticos, papel, metal e o resíduo de gesso. Estes resíduos são destinados até empresas ou centrais de reciclagem que se interessem pelo resíduo.

Após o processamento dos resíduos de chapas de acartonado, 7,5%, em peso, é de uma mistura entre papel cartão com gesso fortemente aderido. Na Europa, este papel misturado com gesso é destinado a aterros sanitários, pois não há tecnologia disponível para sua reintegração no processo de produção de novas folhas de papel cartão, devido ao contaminante gesso (RIVERO *et al.*, 2014). Ao utilizarem cilindros lisos no processo de separação do papel cartão de revestimento dos resíduos de chapa de gesso acartonado, Erbs *et al.* (2018) obtiveram 55,33% de eficiência na separação da massa de gesso do papel cartão com gesso fortemente aderido.

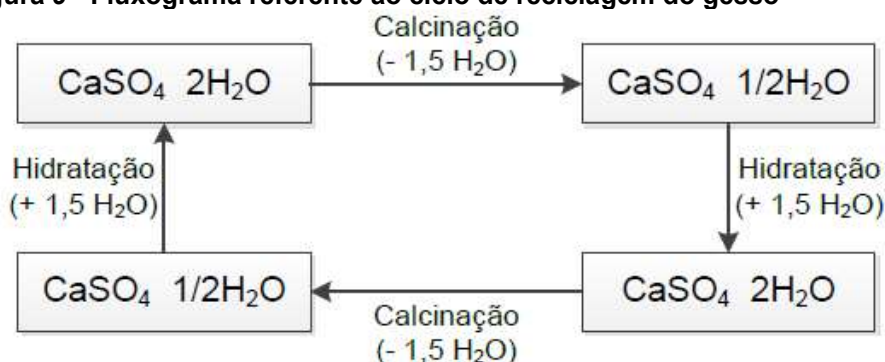
Conhecidas as formas de reuso dos resíduos de gesso e dos resíduos de chapas de gesso acartonado, o próximo aspecto a ser discutido é a reciclagem do resíduo gesso.

### 2.4.2 Reciclagem do resíduo do gesso

Thormark (2001) afirma que a reciclagem de resíduos de gesso pode reduzir a necessidade de energia e recursos naturais, áreas de terra para extrair recursos; e consequentemente áreas para construção de aterro (ALENCAR *et al.*, 2011).

Pinheiro; Camarini (2015) sugerem um processo de reciclagem para o resíduo de gesso com intuito de obter um aglomerante reciclado. Para tanto, é necessário compreender a reversibilidade das reações de transformação da gipsita. O mineral gipso é triturado e calcinado para desprendimento de 1,5 moléculas de H<sub>2</sub>O (hemi-hidrato. Em contato com a água esta molécula é reincorporada formando-se o di-hidrato ou gesso comum. Como o resíduo é formado pelo di-hidrato, associa-se que uma nova calcinação gera novamente o hemi-hidrato (Figura 9).

**Figura 9 - Fluxograma referente ao ciclo de reciclagem do gesso**



Fonte: Vasconcelos *et al.* (2011).

Quando o resíduo de gesso é calcinado o tempo de pega tende a diminuir, devido a alteração da microestrutura (CORDON *et al.*, 2019). Os compostos químicos presentes no gesso reciclado são muito semelhantes se comparados ao gesso comum (ROQUE *et al.*, 2005), como pode ser observado na Tabela 9.

**Tabela 9 - Composição química do gesso reciclado**

| <b>Elementos químicos</b>      | <b>Porcentagem (%)</b>        | <b>Porcentagem (%)</b>      |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| CaO                            | 37,00                         | 38,92                       |
| SO <sub>3</sub>                | 42,00                         | 46,88                       |
| MgO                            | 0,97                          | 2,70                        |
| K <sub>2</sub> O               | 0,03                          | -                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,17                          | 0,26                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,16                          | -                           |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,93                          | 1,64                        |
| SrO                            | 0,13                          | -                           |
| <b>Autor</b>                   | Chandara <i>et al.</i> (2009) | Medina <i>et al.</i> (2016) |

**Fonte: Chandara *et al.* (2009); Medina *et al.* (2016)**

Conhecida a reversibilidade das reações de calcinação e hidratação e a composição do gesso reciclado, será abordada a metodologia para produção do gesso reciclado no item 2.4.4.

#### 2.4.3 Processo de produção do gesso reciclado

Há muito tempo se reconhece que a moagem é dependente da dureza, esta é pequena quando há vazios nos materiais, como no caso do minério de gipso (ZHIXIN *et al.*, 2016). O gesso hidratado é muito mais fácil de moer do que o minério de gipso, o que resulta em tamanho de partícula com distribuição deteriorada, grande superfície específica, fração de vazios e baixa esfericidade, e aumenta notavelmente a exigência de água (ZHU *et al.*, 2018).

De acordo com Bicer; Kar (2017), quanto mais forte a ligação molecular entre os cristais, mais energia deve ser fornecida para moagem. Assim, os materiais só podem ser moídos em pequenos pedaços após várias repetições, sem ser diretamente moído em partículas finas.

A temperatura para que reação de desidratação ocorra é de 106 °C, porém empresas produtoras de gesso utilizam temperaturas entre 145 a 170 °C para conversão do minério de gipso em gesso comum (RIBEIRO, 2011). O resíduo de gesso calcinado a 180 °C por 24h atende ao critério de tempo de pega de gesso para fundição (GERALDO *et al.*, 2017).

Savi (2017) e Bardella (2011) observaram que as maiores resistências mecânicas foram obtidas calcinando-se o resíduo de gesso em temperaturas de 180 °C a 200 °C por 24 h. Lima; Camarini (2011) indicam duas temperaturas como as de maior resistência, a de 150 °C e 200 °C.

A calcinação do gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado e de gesso comum em temperaturas de 160 °C, 180 °C e 200 °C, com tempos de permanência em estufa por períodos de 1, 2, 4, 8, e 24h, foi estudada por Erbs *et al.* (2015), os quais verificaram 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 calcinação em temperatura de 180 °C com período de permanência de 24 horas. A Tabela 10 elenca as temperaturas e o tempo de permanência em estufa apontados na literatura utilizados na reciclagem do gesso.

**Tabela 10 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre temperatura relacionada com tempo de permanência em estufa**

| Autor                        | Calcinação       |                  |
|------------------------------|------------------|------------------|
|                              | Temperatura (°C) | Tempo (h)        |
| Greco <i>et al.</i> (2005)   | 160              | 1                |
| Ribeiro (2011)               | 145 °C e 170     | ½                |
| Fiano; Pimentel (2009)       | 180              | 24               |
| Bardella (2011)              | 200              | 24               |
| Lima; Camarini (2011)        | 150 e 180        | 1, 5, 8, 16 e 24 |
| Rosseto <i>et al.</i> (2013) | 160              | 1                |
| Erbs <i>et al.</i> (2015)    | 160, 180 e 200   | 1, 2, 4, 8, e 24 |
| Geraldo <i>et al.</i> (2017) | 150              | ½                |
| Geraldo <i>et al.</i> (2017) | 160              | ½                |
| Savi (2017)                  | 180 e 190        | 24               |

**Fonte: o autor.**

Descrita a metodologia para obtenção do gesso reciclado, no próximo tópico são abordadas as propriedades físicas do pó e as características no estado fresco e endurecido do gesso reciclado.

#### 2.4.4 Características físicas do pó e propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido do gesso reciclado

Estima-se que o gesso comum apresente mais que 80% de partículas passantes pela peneira de abertura 0,105 mm, porém, após a moagem do resíduo de gesso, através do mesmo processo de moagem para o minério de gipso, observou-se que as partículas se aglutinam, restando-se mais de 40% na peneira 0,105 mm (BARDELLA; CAMARINI, 2011; CAMARINI; PINHEIRO, 2014; CAMARINI *et al.*, 2016; MOURA *et al.*, 2016; ZHU *et al.*, 2018).

Pinheiro; Camarini (2015) atribuem a baixa massa unitária do gesso reciclado à forma como os cristais se organizam. O gesso comum tem arranjo organizado e

compacto, enquanto o gesso reciclado apresenta volume de vazios com cristais dispersos e espaçados (BARDELLA, 2011; SAVI, 2017).

Na Tabela 11 são resumidos os principais estudos de massa unitária, temperatura de calcinação e tempo de permanência na estufa.

**Tabela 11 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa unitária do gesso reciclado**

| <b>Autor</b>                  | <b>Temperatura (° C)</b> | <b>Tempo de permanência na estufa (h)</b> | <b>Massa unitária (kg m<sup>-3</sup>)</b> |
|-------------------------------|--------------------------|---|---|
| Bardella; Camarini (2011)     | 150                      | 24  | 574,43                                    |
| Póvoas <i>et al.</i> (2014)   | 180                      | 24  | 649,38                                    |
| Moura <i>et al.</i> (2014)    | 180                      | 24  | 596,94                                    |
| Vimmrová <i>et al.</i> (2014) | 180                      | 2   | 670,00                                    |
| Moura <i>et al.</i> (2016)    | 150                      | 24  | 215,00                                    |
| Savi (2017)                   | 150                      | 4   | 614,86                                    |
| Savi (2017)                   | 180                      | 4   | 549,57                                    |
| Savi (2017)                   | 200                      | 4   | 531,40                                    |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)     | 180                      | 24  | 645,47                                    |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)      | 160                      | 3   | 608,00                                    |

**Fonte: o autor.**

Pinheiro (2011) cita que a massa específica do gesso reciclado tende a ser menor que a de gesso comum. Consequentemente, como o gesso reciclado apresenta cristais de maiores dimensões, a superfície específica é menor, se comparado ao gesso comum (ZHU *et al.*, 2018). Os principais valores reportados na literatura sobre a massa específica e a superfície específica do gesso reciclado estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre massa específica e superfície específica do gesso reciclado**

| <b>Autor</b>                  | <b>Massa específica (kg m<sup>-3</sup>)</b> | <b>Superfície específica (m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>)</b> |
|-------------------------------|---|--|
| Bardella; Camarini (2011)     | 2580  | -  |
| Pinheiro (2011)               | 2570  | -  |
| Camarini <i>et al.</i> (2016) | -   | 231  |
| Geraldo <i>et al.</i> (2017)  | -   | 351  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)      | -   | 416  |

**Fonte: o autor.**

As pastas de gesso comum e reciclado apresentam consistências distintas para a mesma relação a/g. As pastas de gesso comum com relação a/g 0,80 ou superior apresentam aspecto líquido, e as pastas de gesso reciclado apresentam aspecto cremoso (SAVI, 2017; ERBS *et al.*, 2018). O gesso reciclado tem maior superfície específica e maior volume de vazios se comparado ao ao gesso comum. Portanto, é

necessário excesso de água livre para envolver a superfície e preencher os vazios entre as partículas, a fim de alcançar a consistência normal (ZHIXIN *et al.*, 2016; ZHU *et al.*, 2018).

Roque *et al.* (2005), Ribeiro (2011), Pinheiro; Camarini (2015), Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018) utilizaram relação a/g 0,7. Tais autores relatam que as pastas de gesso reciclado apresentam aspecto mais pastoso, enquanto as pastas de gesso comum têm aspecto mais fluido. Deve-se destacar que, em estudos realizados em pastas de gesso reciclado calcinado na temperatura de 180 °C foram observados resultados similares entre os tempos de pega obtidos para os gessos reciclados e os obtidos para o gesso comum (BARDELLA, 2011).

Erbs *et al.* (2018) relataram em seus estudos sobre tempo de pega com gesso reciclado que o início de pega, na maioria dos casos, é mais rápido do que se comparado ao gesso comum. Porém, o fim de pega é mais lento. Os principais resultados sobre tempo de pega encontrados na literatura são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tempo de pega do gesso reciclado**

| Autor                       | Material        | Tempo de pega inicial (min:s) | Tempo de pega final (min:s) |
|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Bardella; Camarini (2011)   | Gesso comum     | 10:40                         | 23:08                       |
| Bardella; Camarini (2011)   | Gesso reciclado | 22:29                         | 41:37                       |
| Khalil <i>et al.</i> (2014) | Gesso reciclado | 08:10                         | 30:45                       |
| Medina <i>et al.</i> (2016) | Gesso comum     | 11:50                         | 18:00                       |
| Medina <i>et al.</i> (2016) | Gesso reciclado | 10:50                         | 16:00                       |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)   | Gesso comum     | 01:45                         | 45:15                       |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)   | Gesso reciclado | 09:40                         | 18:25                       |

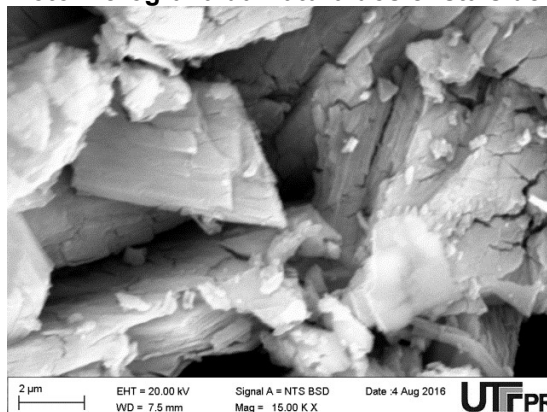
**Fonte: o autor.**

Como a consistência normal do gesso reciclado é maior que a do gesso comum, este excesso de água evapora após a cura, o que forma poros (KIRCHHEIM *et al.*, 2018; ZHU *et al.*, 2018). O diâmetro dos poros do gesso comum são menores que os do gesso reciclado, variando de 3015 nm para 3721 nm. O aumento da porosidade e tamanho dos poros devido à evaporação do excesso de água é o fator determinante que reduz significativamente a resistência mecânica do gesso reciclado (ZHIXIN *et al.*, 2016). A porosidade obtida para consistência normal do gesso reciclado é de 62% (YU; BROUWERS, 2012; ZHU *et al.*, 2018).

A morfologia dos cristais de gesso reciclado apresenta formas ortorrômbicas com comprimentos variados. Os cristais não se aglomeram como os de gesso comum.

Este espaçamento entre os cristais provoca vazios na matriz de gesso reciclado, o que aumenta ainda mais a porosidade. Além disso, observa-se fraturas na formação dos cristais, geradas pela evaporação do excesso de água de composição que conseqüentemente reduzem a resistência mecânica, como pode ser observado na Figura 10 (ERBS *et al.*, 2018).

**Figura 10 – Fotomicrografia da fratura dos cristais de gesso reciclado**



**Fonte: Erbs *et al.* (2018).**

Com relação ao ensaio de tração na flexão, as normas brasileiras não especificam valores mínimos a serem alcançados. Na norma espanhola UNE-EN 13279-1:2006 são atribuídos valores mínimos de 2 MPa para resistência à tração na flexão. Os principais valores de resistência à tração na flexão, para ensaios aos 28 dias para o gesso reciclado encontrados na literatura são apresentados na Tabela 14.

**Tabela 14 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre tração na flexão do gesso reciclado**

| <b>Autor</b>                        | <b>Relação a/g</b> | <b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b> |
|-------------------------------------|--------------------|---|
| Bardella; Camarini (2011)           | 0,70               | 2,90  |
| Guan <i>et al.</i> (2011)           | 0,70               | 3,40  |
| Jiménez-Rivero <i>et al.</i> (2014) | 0,70               | 3,20  |
| Dai; Fan (2015)                     | 0,60               | 4,40  |
| Suárez <i>et al.</i> (2016)         | 0,70               | 3,10  |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)         | 0,87               | 2,70  |
| Savi (2017)                         | 0,70               | 2,90  |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)           | 0,70               | 2,53  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)            | 0,60               | 5,25  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)            | 0,70               | 3,90  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)            | 0,80               | 2,60  |

**Fonte: o autor.**

A resistência à compressão do gesso reciclado é inferior à do gesso comercial. Atribui-se esta redução dos valores à morfologia dos cristais e ao incremento da relação a/g necessária para hidratar as partículas de gesso reciclado (BARDELLA, 2011). Os principais valores de resistência à compressão axial do gesso reciclado apurado na literatura são demonstrados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Relação de trabalhos reportados na literatura sobre a resistência à compressão axial em ensaios com gesso reciclado**

| <b>Autor</b>                     | <b>Relação a/g</b> | <b>Resistência à compressão axial (MPa)</b> |
|----------------------------------|--------------------|---|
| Gmouh <i>et al.</i> (2003)       | 0,80               | 3,90  |
| Roque <i>et al.</i> (2005)       | 0,80               | 4,00  |
| Cardoso <i>et al.</i> (2009)     | 0,70               | 8,90  |
| Pimentel; Camarini (2009)        | 0,47               | 2,51  |
| Peng <i>et al.</i> (2010)        | 0,60               | 9,60  |
| Bardella; Camarini (2011)        | 0,70               | 6,10  |
| Lima; Camarini (2011)            | 0,70               | 8,20  |
| Vasconcelos <i>et al.</i> (2011) | 0,90               | 3,76  |
| Serna <i>et al.</i> (2012)       | 0,70               | 7,54  |
| Yu; Brouwers (2012)              | 0,40               | 8,60  |
| Silva <i>et al.</i> (2013)       | 0,60               | 8,90  |
| Moura <i>et al.</i> (2014)       | 0,70               | 4,20  |
| Dai; Fan (2015)                  | 0,70               | 8,68  |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016)      | 0,87               | 4,80  |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)        | 0,70               | 9,24  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)         | 0,60               | 12,90                                       |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)         | 0,70               | 9,20  |
| Zhu <i>et al.</i> (2018)         | 0,80               | 5,70  |

**Fonte: o autor.**

Os maiores teores de SO<sub>3</sub> e a ausência de impurezas resulta em maior quantidade de produtos hidratados e, portanto, em maior densidade e resistência à compressão (BARBOSA *et al.*, 2014).

Diversos autores descrevem que a dureza superficial de amostras formadas somente com gesso reciclado é inferior aos valores observados se comparadas a amostras de gesso comercial. Os principais autores e os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial são demonstrados na Tabela 16.



**Tabela 16 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre dureza superficial observada em ensaios com gesso reciclado**

| Autor                       | Temperatura de calcinação | Relação a/g | Dureza (N mm <sup>-2</sup> ) |
|-----------------------------|---------------------------|-------------|------------------------------|
| Fiano; Pimentel (2009)      | 180                       | 0,90        | 12,80                        |
| Pimentel; Camarini (2009)   | 160                       | 0,48        | 57,05                        |
|                             | 180                       | 0,47        | 39,94                        |
|                             | 200                       | 0,46        | 27,27                        |
| Lima; Camarini (2011)       | 150                       | 0,70        | 11,08                        |
|                             | 150                       | 1,00        | 11,97                        |
|                             | 200                       | 0,70        | 31,20                        |
|                             | 200                       | 1,00        | 30,99                        |
| Baltar <i>et al.</i> (2013) | 140                       | 0,90        | 34,50                        |
|                             | 160                       | 0,90        | 41,30                        |
| Moura <i>et al.</i> (2014)  | 180                       | 0,70        | 31,12                        |
| Zhixin <i>et al.</i> (2016) | 160                       | 0,87        | 16,20                        |
| Erbs <i>et al.</i> (2018)   | 180                       | 0,70        | 32,03                        |

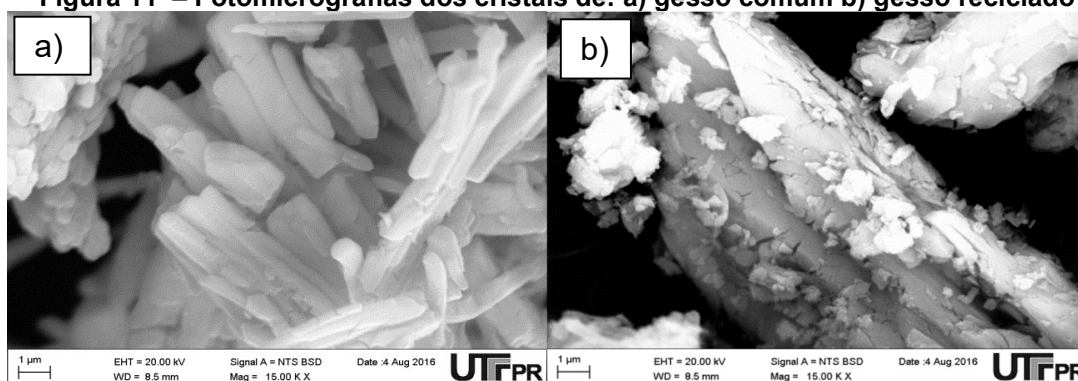
Fonte: o autor.

Após conhecer as características físicas do pó e as propriedades no estado fresco e endurecido, no item 2.4.6 serão abordados aspectos da microestrutura e o DRX do gesso reciclado.

#### 2.4.5 Microestrutura do gesso reciclado

A microestrutura dos cristais de gesso comum são alongados, em forma de agulha com dimensões variadas (BARDELLA, 2011). Possuem regiões de nucleação e boa adesão (ZHU *et al.*, 2018). Na análise microestrutural de amostras de gesso reciclado é possível verificar presença de cristais heterogêneos e sem ligação, distribuídos caoticamente no volume da matriz, conforme pode ser observado na Figura 11 (ERBS *et al.*, 2018). Há muitos cristais lamelares e alguns prismáticos finos (KONDRATIEVA *et al.*, 2017).

**Figura 11 – Fotomicrografias dos cristais de: a) gesso comum b) gesso reciclado**

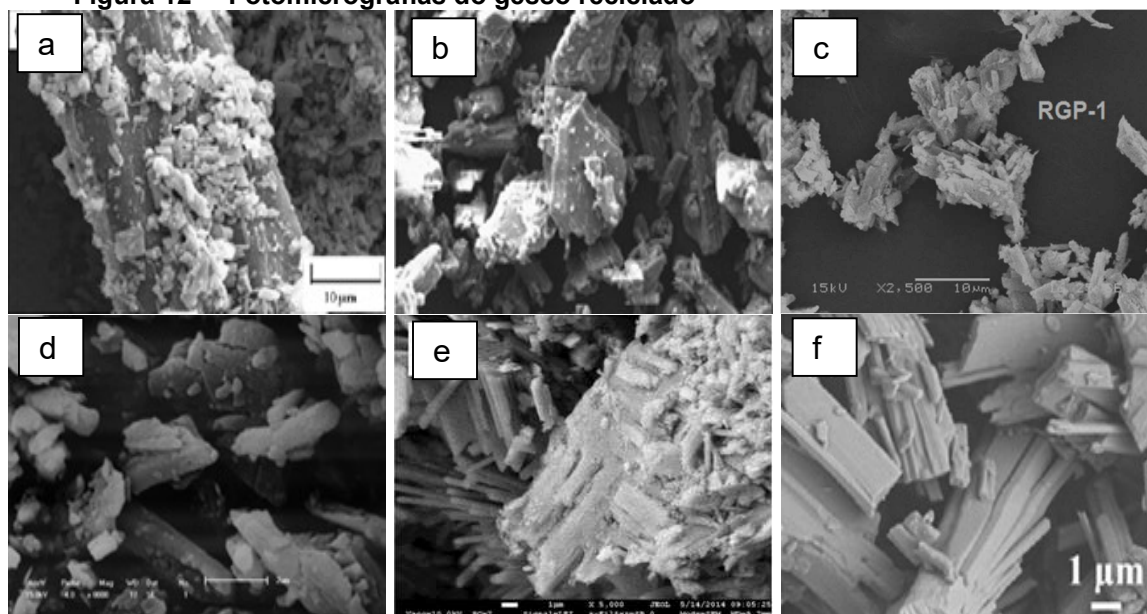


Fonte: Erbs *et al.* (2018).

A morfologia da microestrutura do gesso reciclado é muito diversificada, há diferença no tamanho do cristal do resíduo de gesso reciclado calcinado a diferentes temperaturas. Quanto maior a temperatura de reciclagem, menores os cristais (BARBOSA *et al.*, 2014).

O gesso reciclado pode conter teores de hemi-hidratos, anidritas e outras impurezas, alterando sua composição química em relação ao gesso comum. Os cristais do resíduo de gesso, devido às condições em que foram hidratados, podem apresentar morfologias diferenciadas do gesso comum, o que pode ser contemplado na Figura 12 (KOJIMA; YASUE, 2016).

**Figura 12 – Fotomicrografias do gesso reciclado**

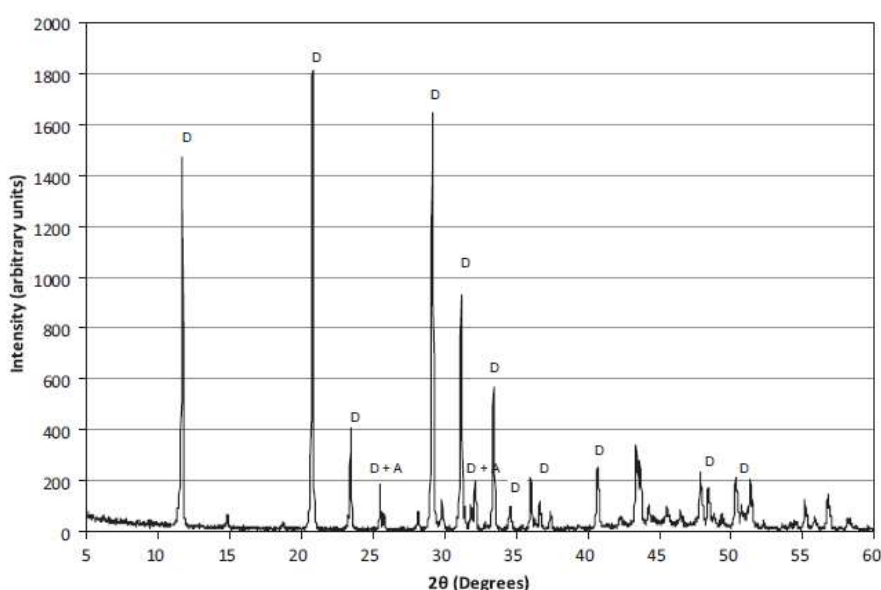


Fonte: a) Gmouh *et al.* (2003); b) Camarini; Pinheiro (2014); c) Zhou *et al.* (2015); d) Zuhaimi *et al.* (2015); e) Pervyshin *et al.* (2017) e f) Savi (2017).

As impurezas comumente observadas no gesso reciclado são o alumínio, o magnésio e o ferro, além da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), porém, seus teores não representam mais do que 3% da massa observada (PINHEIRO; CAMARINI, 2015). Os maiores teores de  $\text{SO}_3$ , ou seja, maior pureza, resulta em maior quantidade de produtos hidratados e, portanto, em maior densidade e resistência mecânica (BARBOSA *et al.*, 2014). Estas impurezas formam centros de nucleação resultando em cristais prismáticos curtos, geralmente acompanhados de vazios, diferentemente dos cristais em formato de agulha intertravados do gesso comum, o que reduz a resistência à compressão, flexão e dureza do material (MEDINA *et al.*, 2016; ERBS *et al.*, 2018).

Após a reciclagem, o cristal de gesso altera sua morfologia para partículas irregulares de anidrita quebradas, o que resulta em ligação mais fraca entre as partículas, bem como na mudança da matriz (YU; BROUWERS, 2012). Diferente dos picos de difração de raios-X observados no gráfico dos cristais de gesso comum, o gesso reciclado apresenta maior quantidade de picos. Os picos mais elevados, representam o di-hidrato e o hemi-hidrato. Os picos menores representam a anidrita, Figura 13 (MOURA *et al.*, 2016; ZHU *et al.*, 2018).

**Figura 13 - Difração de raio-X do gesso reciclado**



**Fonte: Moura *et al.* (2016)**

Descritas as principais características e propriedades do gesso reciclado, a reciclagem do papel cartão será abordada no item 2.4.7.

#### 2.4.6 Reciclagem de papel cartão

A produção de papéis reciclados diminui o impacto ambiental desviando resíduos e transformando-o em matérias-primas. A reciclagem de papel demanda menor quantidade de energia e recursos hídricos, se comparado a produção convencional (OKSANEN *et al.*, 2000).

O papel de revestimento das chapas de gesso acartonado é muito pouco reciclável, devido ao gesso aderido na superfície de papel do cartão. Diferentemente do papel branco comum, a reciclagem de papel de cartão apresenta maiores

dificuldades no processamento, principalmente na formação das folhas. Isto ocorre devido à espessura e comprimento das fibras (TAKAHASHI; KANAHAMA, 2010).

A celulose reciclada apresenta um grau substancial de aglomeração na forma de nódulos, dando-lhe granulometria grosseira e, portanto, é necessário cortar a polpa ou quebrá-la para garantir que a mistura seja razoavelmente homogênea (AGULLÓ *et al.*, 2006).

As fibras recicladas perdem qualidades importantes para produção de papel devido à perda de ligações entre fibras, durante o processo de reciclagem (NAZHAD, 2004). As propriedades da celulose se deterioram durante a reciclagem devido às mudanças estruturais irreversíveis na fibra causada pela secagem (DINIZ *et al.*, 2004). Quando as fibras são secas, elas perdem sua conformabilidade e capacidade de inchamento, que não pode ser recuperado. Há alterações estruturais na parede celular da fibra, o que causa alterações nas propriedades da polpa, isto é, a hornificação (OKSANEN *et al.*, 2000).

A hornificação caracteriza-se pela eliminação da água dos espaços interfibrilares, desta forma impede-se que as fibras estabeleçam ligações inter e intrafibras através de ligações de hidrogênio. Observa-se perda de flexibilidade, permeabilidade e capacidade higroscópica da fibra (DINIZ *et al.*, 2004; MÁRMOL *et al.*, 2013).

Cardoso *et al.* (2012) relatam as principais diferenças observadas entre fibras virgens e fibras recicladas, como aumento da drenabilidade e da opacidade, redução do comprimento médio e conseqüentemente das propriedades de resistência do papel, menor capacidade de hidratação e de flexibilidade, e redução de fibrilação. A degradação das fibras ocorre pelo movimento da água dos poros em direção à superfície das fibras. Os núcleos internos das fibras podem hidratar-se, o que fragiliza as fibras e reduz seu desempenho mecânico (PAVASARS *et al.*, 2003).

Fibras recicladas podem ser melhoradas através da refinação, aditivos químicos, fracionamento ou mistura com polpa virgem, No entanto, nenhum desses tratamentos restaura completamente as propriedades da fibra virgem (MÁRMOL *et al.*, 2013). As principais características do papel cartão reciclado, sem presença de contaminantes, são apresentadas na Tabela 17.

**Tabela 17 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre características físicas e mecânicas do papel cartão reciclado**

| <b>Autor</b>                 | <b>Comprimento da fibra (mm)</b> | <b>Resistência à tração (kN m kg<sup>-1</sup>)</b> |
|------------------------------|----------------------------------|--|
| Oksanen <i>et al.</i> (2000) | 2,02                             | 70,10  |
| Alda (2008)                  | 0,50 – 0,80                      | 45,10  |

**Fonte: o autor.**

Fernandes; Espinosa (2011) informam que a consistência da polpa utilizada na reciclagem de papel cartão deve ser no mínimo 2%. Abaixo disto ocorre a formação de folhas muito finas. Experimentos realizados com maior quantidade de água fornecem papeis com gramatura inferior. Quando aumenta-se o tempo para desagregação das aparas, a gramatura dos papeis tende a diminuir.

Descritas as características da reciclagem do papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado, o próximo item abordará as características do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado.

#### 2.4.7 Reciclagem do gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado

Jiménez-Rivero; Navarro (2017) sugerem implementar processos de desconstruções, assim evita-se a contaminação do resíduo de chapas de gesso acartonado. Este gerenciamento de resíduos incentiva reciclagem e auxilia a conservar depósitos de gesso e recursos naturais.

O núcleo das chapas de gesso acartonado recebe vários aditivos, tais como amido, lignina, perlita, vermiculita, espuma de sabão e retardadores. Estes aditivos incorporados alteram a composição do resíduo, se comparado à matriz original do gesso comum (BOUTERF *et al.*, 2015).

Quanto à composição química do gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado, observa-se similaridades químicas em relação à composição do resíduo de gesso comum. Porém, algumas impurezas derivadas dos aditivos utilizados na fabricação das chapas de gesso acartonado podem ser observadas, conforme demonstrado na Tabela 18 (MENDONÇA *et al.*, 2016).

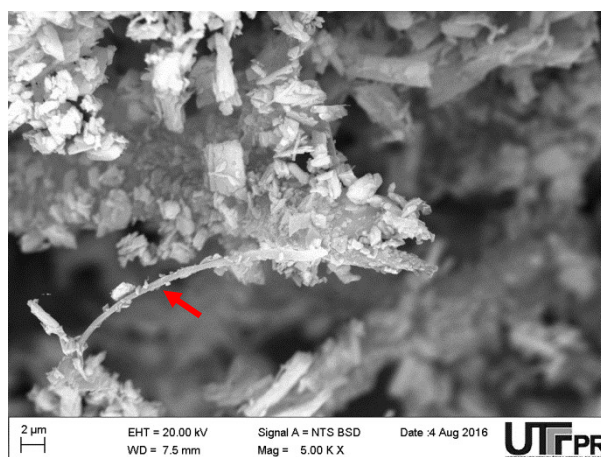
**Tabela 18 – Relação de trabalhos reportados na literatura sobre composição química do resíduo de gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado**

| Elementos químicos             | Porcentagem (%)               | Porcentagem (%)             |
|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| CaO                            | 31,00                         | 38,08                       |
| SO <sub>3</sub>                | 43,21                         | 44,52                       |
| MgO                            | -                             | 2,10                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,10                          | 0,32                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,16                          | 0,40                        |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,00                          | 4,37                        |
| Autor                          | Mendonça <i>et al.</i> (2016) | Medina <i>et al.</i> (2016) |

**Fonte: Medina *et al.* (2016); Mendonça *et al.* (2016).**

Outra impureza observada no gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado é a presença de pequenas partículas de papel cartão ainda aderidas à massa de gesso. Erbs *et al.* (2018) capturaram estas partículas durante a execução do ensaio de MEV, como pode ser observado na fotomicrografia da Figura 14.

**Figura 14 - Fotomicrografia que demonstra a presença de papel cartão misturado ao GR**

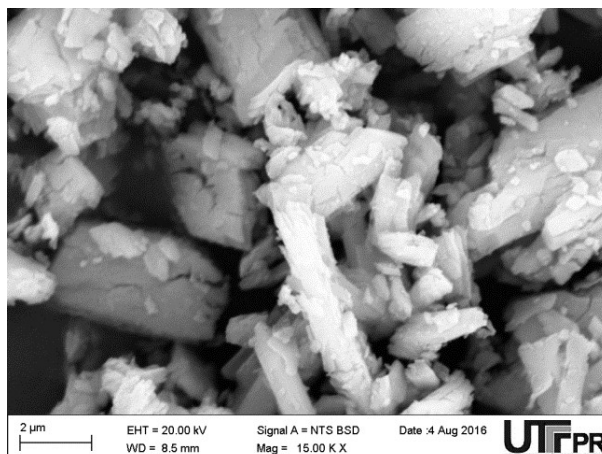


**Fonte: Erbs *et al.* (2018).**

A partícula alongada, presente na fotomicrografia da Figura 14, representada pela seta vermelha, é característica de partículas de papel cartão, em meio aos cristais de gesso (AZIMI; PAPANGELAKIS, 2011).

O gesso reciclado obtido a partir de resíduos de chapas de gesso acartonado apresentam microestrutura formada por cristais ortorrômnicos e mais curtos se comparado aos cristais de gesso comum reciclado, Figura 15 (BARBOSA *et al.*, 2014; ERBS *et al.*, 2015; MEDINA *et al.*, 2016).

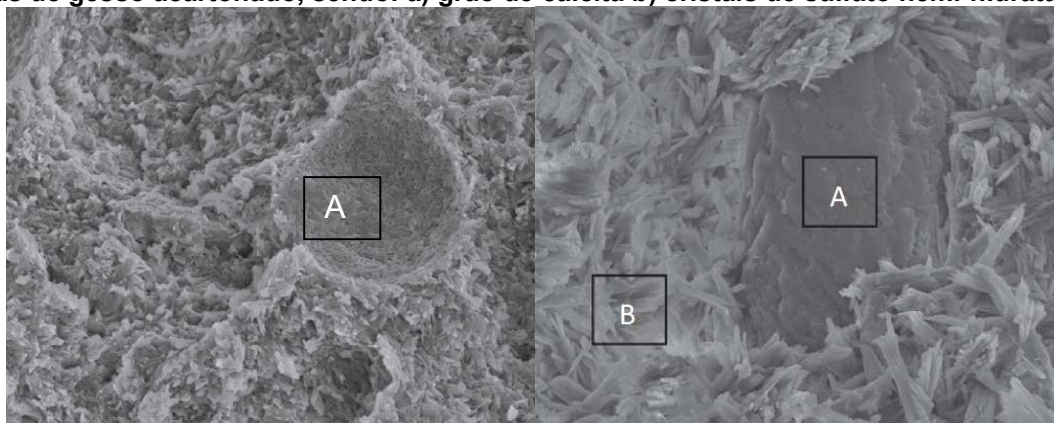
**Figura 15 – Fotomicrografia do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado**



Fonte: Erbs *et al.* (2015).

A fotomicrografia do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado consiste principalmente em sulfato de cálcio di-hidratado, além de hemi-hidratado e impurezas como calcita e quartzo, como pode ser observado na Figura 16 (MEDINA *et al.*, 2016).

**Figura 16 – Fotomicrografias de impurezas observadas no gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado, sendo: a) grão de calcita b) cristais de sulfato hemi-hidratados**

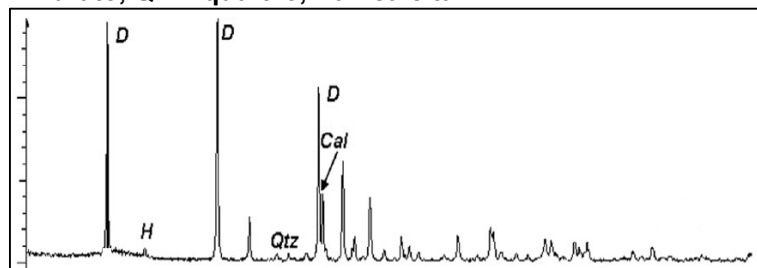


Fonte: Medina *et al.* (2016).

A dimensão média das partículas de gesso comum é 60 μm, e das partículas de gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado é de 10 μm (ZHIXIN *et al.*, 2016).

O DRX do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado confirma os elementos observados na MEV. Além dos picos característicos de di-hidrato, é possível observar impurezas como o, quartzo e calcita, como pode ser observado na Figura 17 (MEDINA *et al.*, 2016).

Figura 17 – DRX do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado, sendo: D: di-hidrato, H: hemi-hidrato, QTZ: quartzo, Cal: calcita



Fonte: Medina *et al.* (2016).

Descritos os principais aspectos apurados na literatura sobre gesso, papel e chapa de gesso acartonado, comercial e reciclado, o capítulo 3 aboradará os processos e produtos utilizados neste trabalho.



### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são abordados os materiais utilizados e os ensaios laboratoriais realizados para determinação das propriedades físico-químicas, mecânicas e microestruturais do gesso reciclado e comum nos estados fresco e endurecido. Também são apresentados os ensaios laboratoriais realizados para determinação das propriedades físicas e mecânicas do papel cartão reciclado e da chapa de gesso acartonado reciclada.

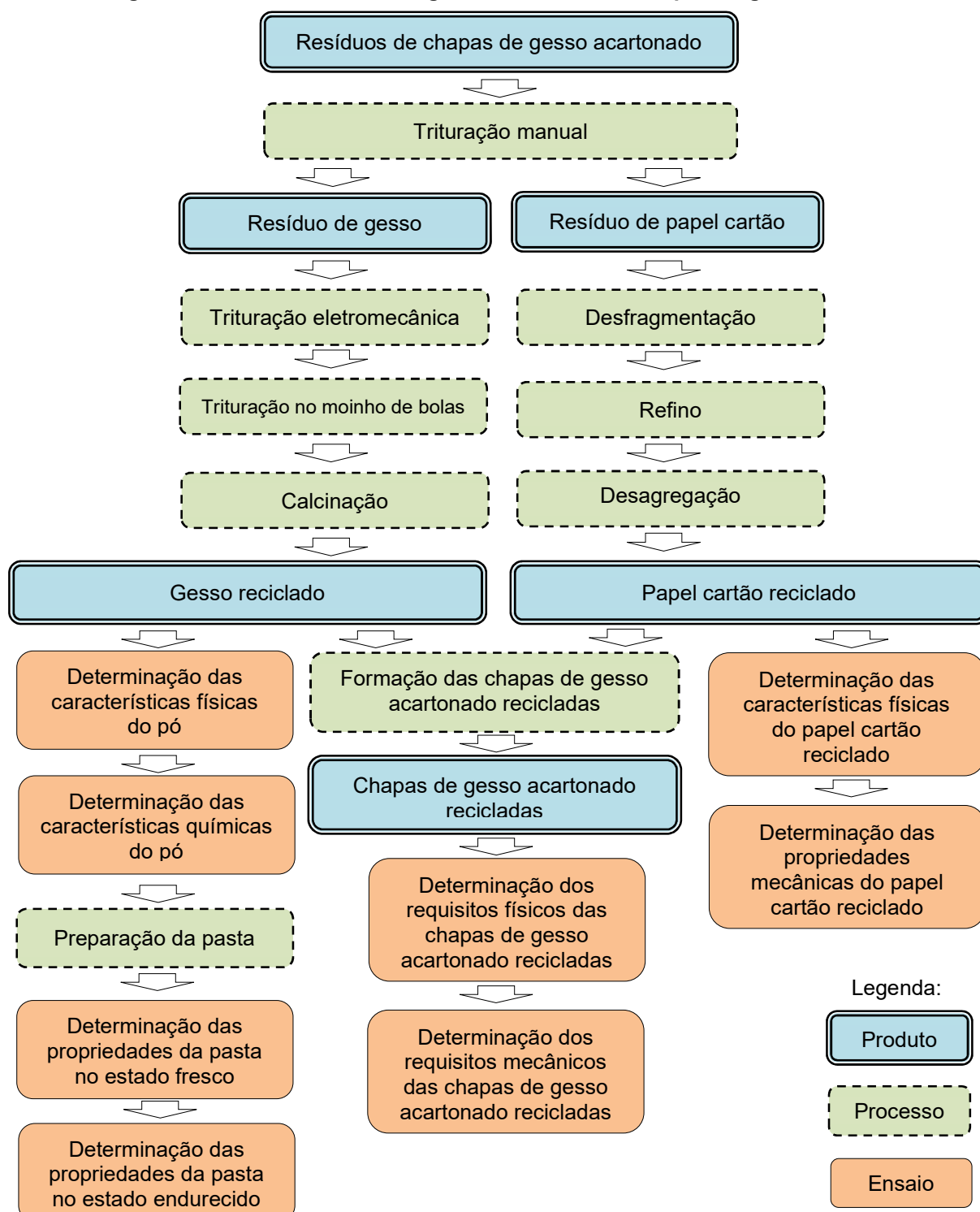
#### **3.1 Programa experimental**

##### **3.1.1 Planejamento experimental**

A capacidade de desidratação e reidratação da partícula de gesso apontada na revisão bibliográfica norteou os experimentos realizados. Desta forma, foi adotado neste estudo um processo de reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado. Foi reciclado o núcleo de resíduos de chapas de gesso acartonado, constituído das etapas de moagem, calcinação e determinação das propriedades, assim como o papel cartão de revestimento.

Após a reciclagem dos materiais foram formadas novas chapas de gesso acartonado reciclado, que posteriormente foram analisadas isoladamente, determinando-se suas características físico – mecânicas. Os insumos utilizados, processos e produtos obtidos na reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado são demonstrados na Figura 18.

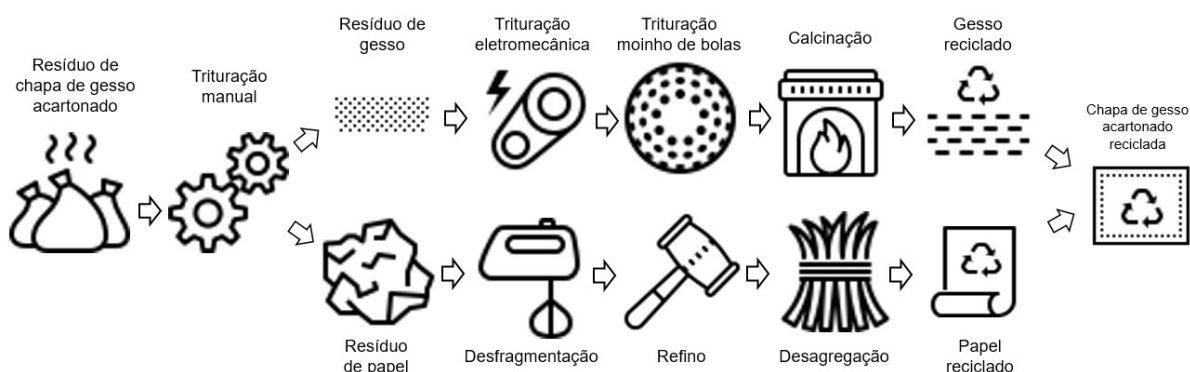
Figura 18 - Processo de reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado



Fonte: o autor.

Demonstra-se na Figura 19 o fluxo esquemático do processo de transformação do resíduo de chapas de gesso acartonado em chapa de gesso acartonado reciclada utilizado neste trabalho.

**Figura 19 – Fluxo esquemático de produção de chapa de gesso acartonado reciclada**



Fonte: o autor.

Os ensaios foram divididos com base nos três produtos obtidos, o gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado (Quadro 7), o papel cartão reciclado (Quadro 8) e a chapa de gesso acartonado reciclada (Quadro 9). Cada fase do processo foi realizada em um laboratório específico da instituição.

**Quadro 7 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com gesso reciclado**

| Gesso reciclado       |  |  |  |
|-----------------------|--|--|--|
|                       | Etapa da reciclagem                        | Laboratório  | Instituição                            |
| Trituração            | Trituração manual                          | Residência do autor                                | Residência do autor                    |
|                       | Trituração eletromecânica                  | Residência do autor                                | Residência do autor                    |
|                       | Trituração no moinho de bolas              | Laboratório do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas    | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Calcinação            | Calcinação                                 | Laboratório de Pesquisa e Extensão                 | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Ensaios físicos do pó | Granulometria                              | Laboratório de Agregados                           | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Massa unitária                             | Laboratório de Pesquisa e Extensão                 | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Massa específica                           | Laboratório de Aglomerantes e Argamassas           | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Superfície específica                      | Laboratório de Solos                               | IFSC - Câmpus Canoinhas                |
| Ensaios químicos      | Determinação da água livre                 | Laboratório de Química do Cimento                  | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Determinação da água de cristalização      | Laboratório de Química do Cimento                  | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Determinação do teor de óxido de cálcio    | Laboratório de Química do Cimento                  | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | Determinação do teor de anidrido sulfúrico | Laboratório de Química do Cimento                  | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                       | MEV do gesso reciclado                     | Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais | UTFPR – Sede Centro, Câmpus Curitiba   |
|                       | DRX do gesso reciclado                     | Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais | UTFPR – Sede Centro, Câmpus Curitiba   |

continua

| <b>Gesso reciclado</b>           |                            |  |  |
|----------------------------------|----------------------------|--|--|
|                                  | <b>Etapa da reciclagem</b> | <b>Laboratório</b>                       | <b>Instituição</b>                     |
| Ensaio da pasta no estado fresco | Consistência normal        | Laboratório de aglomerantes e argamassas | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                  | Início e fim de pega       | Laboratório de aglomerantes e argamassas | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Ensaio no estado endurecido      | Compressão axial           | Laboratório de Prensas                   | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                  | Tração na flexão           | Laboratório de Prensas                   | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                  | Dureza superficial         | Laboratório de Prensas                   | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                  | Aderência à tração         | Laboratório de Pesquisa e Extensão       | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |

Fonte: o autor.

**Quadro 8 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com papel cartão reciclado**

| <b>Papel cartão reciclado</b> |   |  |  |
|-------------------------------|---|--|--|
|                               | <b>Etapa da reciclagem</b>                        | <b>Laboratório</b>                                 | <b>Local/Instituição</b>               |
| Polpação                      | Separação do papel cartão do gesso aderido        | Residência do autor                                | Residência do autor                    |
|                               | Desagregação do papel cartão                      | Residência do autor                                | Residência do autor                    |
|                               | Refinamento da pasta celulósica                   | Residência do autor                                | Residência do autor                    |
| Formação de folhas            | Determinação do teor de massa seca                | Laboratório de Pesquisa e Extensão                 | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                               | Formação de folhas de papel cartão reciclado      | Residência do autor                                | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Ensaio físicos                | Gramatura   | Laboratório de Pesquisa e Extensão                 | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                               | Espessura   | Laboratório de Pesquisa e Extensão                 | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Ensaio mecânicos              | Resistência à tração                              | Laboratório de Prensas                             | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                               | Resistência à compressão – <i>Short span test</i> | Laboratório de Prensas                             | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Ensaio químicos               | MEV do papel cartão reciclado                     | Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais | UTFPR – Sede Centro, Câmpus Curitiba   |
|                               | EDS do papel cartão reciclado                     | Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais | UTFPR – Sede Centro, Câmpus Curitiba   |

Fonte: o autor.

**Quadro 9 – Laboratórios utilizados para realização dos experimentos com chapa de gesso acartonado reciclada**

| Chapa de gesso acartonado reciclada |  |                                    |  |
|-------------------------------------|--|------------------------------------|--|
|                                     | Etapa da reciclagem                                | Laboratório                        | Instituição                            |
| Características físicas             | Formação das chapas de gesso acartonado recicladas | Laboratório de Pesquisa e Extensão | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                     | Densidade superficial de massa                     | Laboratório de Pesquisa e Extensão | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
| Características mecânicas           | Resistência à ruptura à flexão                     | Laboratório de Prensas             | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |
|                                     | Dureza superficial                                 | Laboratório de Pesquisa e Extensão | UTFPR – Sede Ecoville, Câmpus Curitiba |

Fonte: o autor.

Foram coletados 260 kg de resíduos de chapas de gesso acartonado, do tipo *standard*, oriundos do corte ou perda do processo de execução de forros de *drywall*. Estes resíduos que serviram de matéria-prima para a presente pesquisa, foram coletadas em quatro obras em Curitiba no dia 21 de setembro de 2018 e no dia 27 de janeiro de 2020. Adotou-se a metodologia apresentada no item 3.2 para preparação do material utilizado durante a pesquisa.

### 3.2 Preparação dos resíduos de chapas de gesso acartonado

Utilizaram-se estiletes retráteis para o corte dos resíduos de chapas de gesso acartonado. Foram recortados filetes de aproximadamente 3 cm pelo comprimento total do resíduo (Figura 20). Tal processo facilitou a trituração manual do resíduo.

**Figura 20 - Filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado**



Fonte: o autor.

O processo seguinte ao corte dos resíduos de chapas de gesso acartonado foi o processo de trituração, que está apresentado no item 3.3.

### 3.3 Trituração

#### 3.3.1 Trituração Manual

A trituração manual foi realizada utilizando-se um cilindro para moagem de cana de açúcar manual da marca Botini. O equipamento dispunha de rolos corrugados, engrenagens acopladas diretamente ao eixo e distância entre os cilindros de 10 mm (Figura 21).

**Figura 21 – Cilindro de cana de açúcar manual**



**Fonte: o autor.**

Os filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado eram posicionados perpendicularmente entre os eixos do cilindro. Estes resíduos eram pressionados contra as paredes do cilindro, e conforme o operador girava a manivela, a massa de gesso era desfragmentada. Através da compressão exercida pelos cilindros, o núcleo de gesso dos resíduos de chapas de gesso acartonado era separado do papel cartão de revestimento, como pode ser constatado na Figura 22.

**Figura 22 – Trituração manual do resíduo de chapas de gesso acartonado**



Fonte: o autor.

Após a trituração manual eram observadas partículas de gesso aderidas ao papel cartão, como pode ser observado na Figura 23.

**Figura 23 – Gesso aderido no papel cartão após a passagem no cilindro manual**



Fonte: o autor.

Os 260 kg de resíduos de chapas de gesso acartonado produziram 177 kg de resíduo de gesso proveniente do interior de resíduos de chapas de gesso acartonado (RG). Somente 68,08% da massa dos resíduos de chapas de gesso acartonado foram convertidos em gesso reciclado, e o restante do material (31,92%) apresentou-se como papel cartão com gesso fortemente aderido.

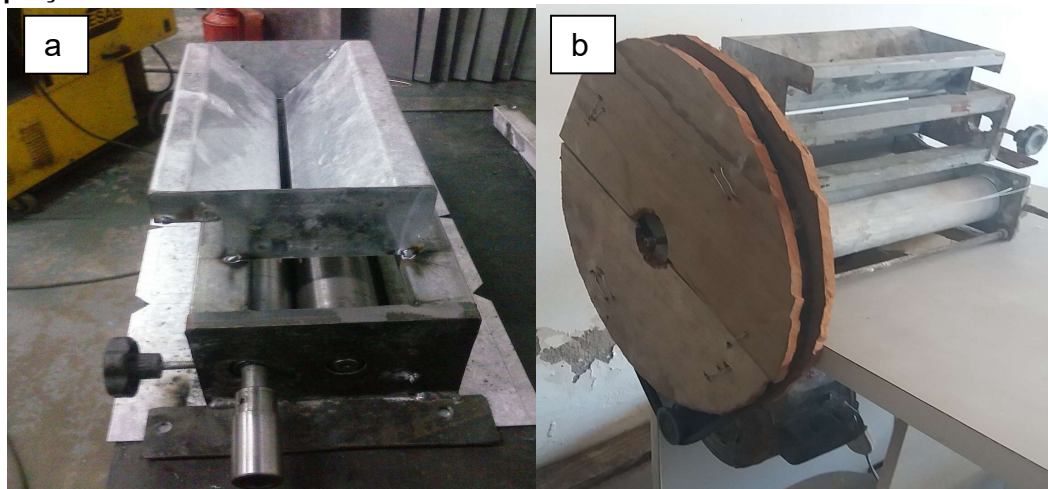
Após este processo de separação foram geradas duas matérias-primas distintas, o resíduo de gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado e o resíduo de papel cartão com gesso fortemente aderido. O resíduo de gesso foi direcionado à trituração eletromecânica, para redução da granulometria, como será abordado no item 3.3.2. O papel cartão de revestimento foi encaminhado para o

tanque de decantação, onde permaneceu de molho por 4 h, conforme descrito no item 3.6.

### 3.3.2 Trituração eletromecânica

Os resíduos de gesso apresentavam diversas granulometrias após a trituração do material no cilindro manual. Para redução destas partículas foi utilizado o triturador eletromecânico desenvolvido por Erbs *et al.* (2018), no qual é utilizado o atrito proporcionado entre dois cilindros de alumínio reguláveis para cominuição das partículas de gesso. Diferentemente do projeto inicial, onde o motor foi acoplado diretamente ao eixo, adaptou-se uma polia de madeira de 400 mm de diâmetro conectada a uma polia metálica de 100 mm de diâmetro através de uma correia de borracha, como pode ser observado na Figura 24.

**Figura 24 - Cilindro eletromecânico desenvolvido para trituração do gesso a) modelo original b) adaptação no eixo do motor**



Fonte: o autor.

O cilindro eletromecânico dispunha de regulagem da distância entre os cilindros, botão de emergência, cuba para carregamento do material e um motor com potência de 600 W. Após a instalação das polias, a rotação do eixo que era de 300 rpm foi reduzida para 75 rpm.

Os cilindros eram distanciados 10 mm na primeira trituração, para uniformizar a granulometria inicial. O resíduo de gesso era inserido na cuba de carregamento, onde o material descia por gravidade paulatinamente através da própria vibração do mecanismo até os cilindros.



Após a passagem pelo triturador o material era peneirado em peneira de abertura 0,29 mm. O material passante era armazenado em sacos plásticos para evitar sua hidratação pela umidade do ar. O material não passante pela peneira era reprocessado, porém, a cada reprocessamento a distância entre os cilindros era reduzida em 2 mm, até uma última passagem na qual a distância entre os cilindros era ajustada para 0,5 mm. Observou-se que ao final do processo de trituração eletromecânica houve redução da granulometria das partículas, como apresentado na Figura 25.

**Figura 25 – Granulometria do gesso reciclado sendo a) início do da trituração eletromecânica e b) final da trituração eletromecânica**



Fonte: o autor.

Foram despendidas 67 horas para triturar os 177 kg de gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado. Dos 177 kg de RG foram obtidos 170,20 kg de material passante na peneira 0,29 mm e 4,7 kg de material não passante na peneira 0,29 mm. Estima-se perda de 2,1 kg de material no estado pulverulento, que era carregado pelo ar durante a trituração eletromecânica do RG.

### 3.3.3 Trituração no moinho de bolas

O resíduo de gesso recebeu mais um processo de moagem em moinho rotatório após a trituração eletromecânica. O moinho de bolas, da marca Quimilo, possuía corpo de porcelana, onde a cada carregamento era possível processar 1 kg

de material. Para moagem foram utilizadas esferas de ágata de 2 cm de diâmetro e 40 rpm de velocidade, padrão do equipamento (Figura 26).

**Figura 26 - Moinho de bolas de porcelana com esferas de ágata**



**Fonte: o autor.**

Decorridos 50 min de processamento o resíduo de gesso era novamente armazenado em sacos plásticos para evitar sua hidratação pela umidade do ar. Finalizadas as etapas de moagem, o resíduo de gesso era direcionado à calcinação, que será descrita no item 3.4.

### **3.4 Calcinação do resíduo de gesso**

Utilizou-se uma 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. Durante 24 h as amostras foram mantidas em estufa a temperatura de 180 °C. Tais critérios (tempo e temperatura) foram definidos de acordo com os experimentos descritos por Fiano; Pimentel (2009), Lima; Camarini (2011), Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018). Após a calcinação o material era armazenado em sacos plásticos para evitar a hidratação pela umidade do ar.

Um dos marcos da pesquisa é a finalização do processo de calcinação, pois é a partir deste ponto que foi gerado o primeiro produto reciclado, o gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado. O subcapítulo 3.5 aborda os ensaios utilizados para caracterização do gesso reciclado e comum.

### 3.5 Caracterização do gesso

A relação dos ensaios realizados para determinação das características físicas, químicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado e comum, as normas utilizadas como referência e a quantidade de amostras ensaiadas são descritas no Quadro 10.

**Quadro 10 - Ensaios realizados para caracterização do gesso reciclado e comum**

| Etapa  | Ensaio  | Normas         | Número de amostras |           |            |           |
|--|---|----------------|--------------------|-----------|------------|-----------|
|  |   |                | GR                 |           | GC         |           |
| Determinação das características físicas do pó | Granulometria                                 | NBR 12127:2019 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Massa unitária                                | NBR 12127:2019 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Massa específica                              | NBR 16605:2017 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Superfície específica                         | NBR 16372:2015 | 5                  |           | 5          |           |
| Ensaios químicos e mineralógicos               | Determinação da água livre                    | NBR 12130:2019 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Determinação da água de cristalização         | NBR 12130:2019 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Determinação dos teores de óxido de cálcio    | NBR 12130:2019 | 3                  |           | 3          |           |
|  | Determinação dos teores de anidrido sulfúrico | NBR 12130:2019 | 3                  |           | 3          |           |
|  | MEV   | -              | 3                  |           | 3          |           |
|  | EDS   | -              | 3                  |           | 3          |           |
|  | DRX   | -              | 3                  |           | 3          |           |
| Propriedades da pasta no estado fresco         | Consistência normal                           | NBR 12128:2019 | 5                  |           | 5          |           |
|  | Determinação do início e fim de pega          | NBR 12128:2019 | 5                  |           | 5          |           |
| Propriedades no estado endurecido              |   |                | 7 dias             | 28 dias   | 7 dias     | 28 dias   |
|  | Tração na flexão                              | NBR 12142:2010 | 5                  | 5         | 5          | 5         |
|  | Compressão axial                              | NBR 12129:2019 | 5                  | 5         | 5          | 5         |
|  | Dureza superficial                            | NBR 12129:2019 | 5                  | 5         | 5          | 5         |
|  | Aderência à tração                            | NBR 13528:2010 | Conc<br>12         | Cer<br>12 | Conc<br>12 | Cer<br>12 |

**Legenda: Conc (Substrato de bloco de concreto) e Cer (Substrato de bloco cerâmico)**  
**Fonte: o autor.**

O programa experimental desenvolvido para determinação das características do gesso reciclado e comum está descrito nos itens 3.5.1 a 3.5.6.

#### 3.5.1 Determinação das propriedades físicas do pó

O ensaio de granulometria foi realizado segundo procedimento descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) onde o material seco em estufa foi submetido ao

peneiramento mecânico sequencial. Foi realizada adaptação no ensaio, inserindo-se a peneira de 0,29 mm no conjunto de peneiras normatizadas, visto que um dos critérios utilizados na norma é a porcentagem passante nesta peneira. Desta forma, as peneiras utilizadas foram as de abertura 0,84 mm, 0,42 mm, 0,29 mm, 0,21 mm e 0,105 mm. Foram inseridas 50 g de material sobre o conjunto de peneiras com o fundo. Após colocar a tampa, o conjunto era colocado sobre um agitador de peneiras eletromagnético de bancada da marca Contenco. Após o peneiramento, a massa do material retido de cada peneira foi determinada em uma balança digital da marca Digimed modelo KN 5000 com precisão de 0,1 g. Foram realizadas 5 medições para o gesso reciclado e 5 medições para o gesso comum, e considerou-se a média aritmética percentual retida em cada peneira de acordo com a Equação 1.

$$R = \frac{m}{M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

R = material retido, em porcentagem;

m = resíduo na peneira, em gramas;

M<sub>i</sub> = massa inicial, em gramas.

As porcentagens passantes nas peneiras com abertura 0,29 mm e 0,21 mm foram utilizadas como critério para classificação do gesso segundo prescrição da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017).

O ensaio de massa unitária foi realizado conforme prescrições da NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Foi realizada adaptação no ensaio devido à indisponibilidade de um recipiente cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup>. Desta forma, foi utilizado um recipiente cúbico de latão com 3442,95 cm<sup>3</sup>. Como a massa unitária é a razão entre a massa que preenche um volume conhecido, tal modificação não é relevante para determinação dos valores obtidos.

O material seco em estufa foi depositado em recipiente cúbico com massa e volume conhecidos até seu transbordamento e nivelamento final. Foram realizadas 5 amostragens para determinação da massa unitária, a média aritmética obtida foi determinada segundo a Equação 2.

$$M_u = \frac{M}{V} \times 1000 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$M_u$  = massa unitária, em quilogramas por metro cúbico;

$M$  = massa do gesso, em gramas;

$V$  = volume do recipiente, em centímetro cúbico.

O ensaio de massa específica foi realizado conforme prescrições contidas na NBR 16605 (ASSOCIAÇÃO..., 2017). Cerca de 60 g de material seco em estufa foi depositado no interior de um frasco de *Le Chatelier* que continha água. Através do deslocamento do líquido observado após a inserção do material foi possível determinar a massa específica. Foram realizadas 5 amostragens para determinação da massa específica, a média aritmética obtida foi determinada segundo a Equação 3.

$$\rho = \frac{M}{V_1} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

$\rho$  = massa específica, em gramas por centímetro cúbico;

$M$  = massa do gesso, em gramas;

$V_1$  = volume deslocado pela massa do material, em centímetro cúbico.

Para determinação da superfície específica dos grãos de gesso foi utilizada a determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de *Blaine*), conforme procedimento descrito na NBR 16372 (ASSOCIAÇÃO..., 2015). Observando-se o tempo de resistência ao ar oferecida por um volume de material com porosidade conhecida é possível determinar a superfície específica. Para tanto, o material é inserido sobre um disco perfurado e um papel filtro redondo dentro de um cilindro reto rígido de 12,7 mm de diâmetro. Sobre o material é colocado outro papel filtro redondo. Utilizou-se um êmbolo padronizado para pressionar o material sobre o disco perfurado. A Equação 4 foi empregada para determinação da porosidade.

$$M_g = (1 - \epsilon)\rho V_c \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

$M_g$  = massa do gesso, em gramas;

$\epsilon$  = porosidade;

$\rho$  = massa específica do gesso, em gramas por centímetro cúbico;

$V_c$  = volume da camada compactada, em centímetro cúbico.

Após o posicionamento do cilindro no aparelho de *Blaine*, mediu-se o tempo para o líquido padronizado ultrapassar as duas marcas presentes no tubo do aparelho. Foram realizadas 5 medições e considerada a média aritmética obtida através da Equação 5 como a área de superfície específica.

$$S = K \frac{\sqrt{\epsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho (1 - \epsilon) \cdot \sqrt{0,1 n}} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

$S$  = Superfície específica, em centímetro quadrado por grama;

$K$  = constante do aparelho;

$\epsilon$  = porosidade;

$t$  = tempo, em segundos;

$\rho$  = massa específica do gesso, em gramas por centímetro cúbico;

$n$  = viscosidade do ar à temperatura do ensaio, em Pascal por centímetro.

O ensaio de superfície específica encerra o processo de determinação das características físicas do pó e inicia-se o processo de determinação dos elementos químicos, descritos no item 3.5.2.

### 3.5.2 Determinação dos requisitos químicos do gesso

Os requisitos químicos do gesso reciclado e do gesso comum abordados neste estudo são a determinação da água livre e de cristalização, do óxido de cálcio e do anidrido sulfúrico. A determinação da água livre foi realizada segundo procedimentos

descritos na norma NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Pesou-se 50 g do material na balança de precisão analítica da marca Shimadzu, e espalhou-se em camada fina sobre o recipiente de porcelana. O material foi seco em estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar por 24 h na temperatura de 40 °C. Após a secagem, o material foi mantido no dessecador até obtenção da temperatura ambiente e novamente pesado. A água livre presente no gesso reciclado e comum foi determinada de acordo com a Equação 6.

$$\text{Água livre (\%)} = \frac{M-M_1}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

M = massa da amostra, em gramas;

M<sub>1</sub> = massa da amostra seca a 40 °C, em gramas.

Foram realizadas 5 pesagens e considerada a média obtida como o teor de água livre.

A determinação da água de cristalização foi realizada segundo procedimentos descritos na norma NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Pesou-se 2 g de pó de gesso na balança de precisão analítica da marca Shimadzu, e espalhou-se o material em camada fina sobre o recipiente de porcelana. Foi feita secagem na estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar por 24 h na temperatura de 230 °C. Após a secagem, o material foi colocado no dessecador até obtenção da temperatura ambiente e novamente pesado. A água de cristalização presente no gesso reciclado e no gesso comum foi determinada de acordo com a Equação 7.

$$\text{Água de cristalização (\%)} = \frac{M-M_2}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

M = massa da amostra, em gramas;

M<sub>2</sub> = massa da amostra seca a 230 °C, em gramas.

Foram realizadas 5 pesagens e considerado a média obtida como o teor de água de cristalização.

Para determinação da concentração de teor de óxido de cálcio e de anidrido sulfúrico foi necessário preparar uma amostra de filtrado do material e uma solução de permanganato de potássio, conforme procedimentos descritos na norma NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019).

Pesou-se 0,5 g de gesso seco em estufa a 230 °C e adicionou-se 50 mL de solução de HCl concentrado previamente diluído em água destilada, na proporção de 1 para 5. Em seguida a solução foi seca na estufa por duas horas a 105 °C. Após a secagem, o material foi umedecido com 20 mL de solução de HCl concentrado e água destilada, na proporção de 1 para 5 e a solução foi digerida em banho-maria da marca Novatécnica a 105 °C para solubilização dos sais, por uma hora. Após a solubilização a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo de gramatura 80 g m<sup>-2</sup> e lavada com água a 80 °C. O filtrado foi colocado em um balão volumétrico e o volume foi completado com água destilada até 250 mL.

Segundo procedimentos para determinação do óxido de cálcio e anidrido sulfúrico descrito na NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) foi preparada uma solução de permanganato de potássio, dissolvendo-se 3,2 g de oxalato de potássio (KMnO<sub>4</sub>) em 1 L de água destilada. Esta solução foi mantida em repouso por uma semana em recipiente escuro e fechado, para então ser filtrada em papel filtro qualitativo de gramatura 80 g m<sup>-2</sup>.

Após a filtração a solução de permanganato de potássio foi padronizada com uma solução de oxalato de sódio (Na<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) previamente preparada ao diluir 0,3 g de oxalato de sódio em 200 mL de água destilada e 10 mL de ácido sulfúrico diluído em água na proporção de 1 para 1. Esta diluição foi executada a 80 °C. Segundo a norma, o ponto de equivalência é identificado quando a coloração rósea se torna persistente por 30 s, conforme observado na Figura 27.



**Figura 27 - Equivalente da solução de permanganato de potássio sendo a) início da diluição e b) coloração rósea persistente**



Fonte: o autor.

O equivalente da solução de permanganato de potássio em óxido de cálcio foi calculado pela Equação 8.

$$E = \frac{M \times P \times 0,4185}{V \times 100} \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

E = equivalente da solução de permanganato de potássio em óxido de cálcio, em gramas por mililitro;

M = massa de  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , em gramas;

P = pureza do  $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , em percentagem;

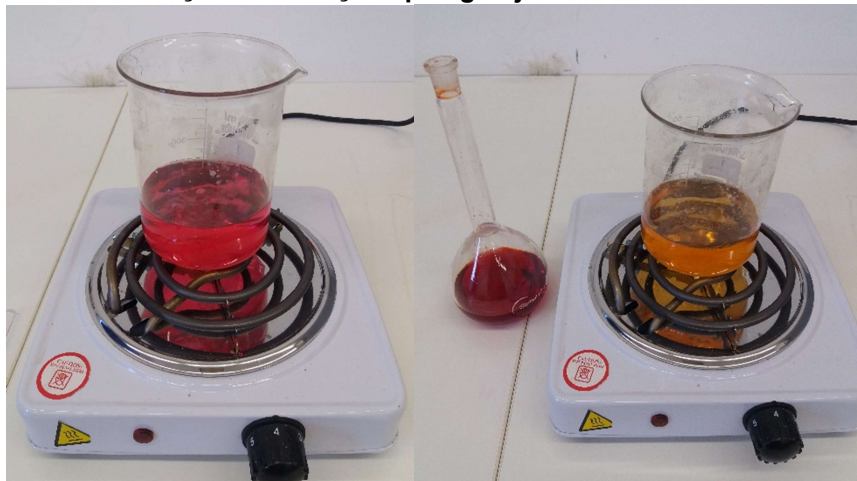
V = volume gasto de solução de  $\text{KMnO}_4$ , em mililitros.

Foram realizadas 3 amostragens e considerada a média aritmética obtida como a determinação da equivalência da solução de permanganato de potássio em óxido de cálcio.

Para determinação do teor óxido de cálcio do gesso reciclado e do gesso comum utilizou-se 100 mL do filtrado de gesso e adicionou-se 100 mL de água destilada. Nesta solução foram colocadas 10 gotas de ácido nítrico concentrado ( $\text{HNO}_3$ ) e aqueceu-se à ebulição por cinco minutos. Foram adicionadas 2 g de cloreto de amônio p.a. ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) e 20 gotas de vermelho de metila. Nesta solução foi gotejada

uma solução de hidróxido de amônio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) diluída em água destilada na proporção de 1 para 1 até que a solução mudasse da coloração vermelha para amarela, conforme pode ser observado na Figura 28.

**Figura 28 – Mudança de coloração após gotejamento de hidróxido de amônio**



Fonte: o autor.

A solução foi colocada em banho-maria por 30 min a temperatura de  $105\text{ }^\circ\text{C}$  e posteriormente filtrada, lavando-a com 1 L de solução de nitrato de amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) na concentração de  $20\text{ g L}^{-1}$ . Tomou-se 250 mL deste filtrado e adicionou-se lentamente, por agitação, 30 mL de solução de oxalato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) a  $100\text{ g L}^{-1}$ . Esta solução foi mantida em repouso no banho-maria a temperatura de  $105\text{ }^\circ\text{C}$  por uma hora. Após o banho-maria a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo de gramatura  $80\text{ g m}^{-2}$  e lavada com água quente a  $80\text{ }^\circ\text{C}$  por 10 vezes consecutivas. Neste filtrado foram adicionados 20 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) diluído na proporção de 1 para 1 e 200 mL de água destilada. Por fim esta solução foi titulada com a solução de permanganato de potássio previamente preparada até obtenção da coloração rosa claro, conforme pode ser visualizado na Figura 29.

**Figura 29 – Alteração de cor observada durante a titulação com permanganato de potássio**



Fonte: o autor.

A determinação do teor de óxido de cálcio foi calculado de acordo com a Equação 9.

$$\text{CaO (\%)} = \frac{V \times E}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

CaO (%) = teor de óxido de cálcio, em percentagem;

V = volume gasto de solução 0,1 N de  $\text{KMnO}_4$ , em mililitros;

M = massa da amostra na alíquota tomada, em gramas;

E = equivalente da solução de permanganato de potássio em óxido de cálcio, em gramas por mililitro.

Foram realizadas 3 titulações e considerada a média aritmética obtida como o teor de óxido de cálcio.

Para determinação do teor de anidrido sulfúrico foram utilizados 10 mL do filtrado de gesso e adicionados 190 mL de água destilada em um béquer de vidro com capacidade de 400 mL. Esta solução foi levada à ebulição e adicionada, sob agitação constante 10 mL de solução de cloreto de bário ( $\text{BaCl}_2$ ) 100 g L<sup>-1</sup> preparado com água destilada.

A solução foi deixada em repouso por 24 h a temperatura ambiente e então filtrada em papel filtro qualitativo de gramatura 80 g m<sup>-2</sup> e lavada com água quente a 80 °C. O filtro com precipitado foi colocado em um cadinho de porcelana e calcinado a 900 °C por 8 horas em um forno tipo mufla modelo F2 - DM Monofásico da marca Fornitec. Após a calcinação, o cadinho foi mantido no dessecador até obtenção da temperatura ambiente e posteriormente pesado. O teor de anidrido sulfúrico foi determinado de acordo com a Equação 10.

$$\text{SO}_3 (\%) = \frac{M_3 \times 34,3}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

SO<sub>3</sub> = teor de anidrido sulfúrico, em percentagem;

M<sub>3</sub> = massa do precipitado após calcinação, em gramas;

M = massa da amostra na alíquota tomada, em gramas.

Foram realizadas 3 calcinações e considerada a média aritmética obtida como o teor de anidrido sulfúrico. O fim do ensaio de determinação do teor de anidrido sulfúrico conclui o processo de determinação das características químicas do pó e iniciou-se o processo de determinação das propriedades no estado fresco, descrito no item 3.5.3.

### 3.5.3 Propriedades da pasta no estado fresco

Para determinação das propriedades do estado fresco foram utilizados os ensaios de consistência normal e de início e fim de pega. A determinação da consistência normal foi realizada segundo procedimentos descritos na norma NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Foi utilizado o aparelho de *Vicat* modificado, constituído de um suporte que sustenta uma haste móvel cuja extremidade inferior possuía uma sonda cônica de *nylon* com ângulo de ápice  $53^{\circ}08'$ , altura de 45 mm (Figura 30). A massa total da haste e da sonda era de 35 g.

**Figura 30 - Aparelho de Vicat modificado**



**Fonte: o autor.**

O ensaio foi realizado ao polvilhar 214 g de gesso reciclado, durante 1 min sobre uma solução de 10mL de citrato de sódio a  $20 \text{ g L}^{-1}$  e 140 mL de água destilada. A solução era deixada em repouso por 2 min e então homogeneizada manualmente com utilização de uma espátula por 1 min. Esta pasta foi acondicionada em molde

formato tronco-cônico com diâmetro interno de base de 70 mm, do topo de 60 mm e altura de 40 mm, previamente lubrificado com cera líquida incolor.

Durante o teste, a haste com o cone foi liberada sobre a pasta de gesso reciclado e a penetração da sonda foi medida. A haste penetrou na pasta de gesso reciclado e cessou sua penetração na escala de 30 mm, o que indica a consistência normal e a relação a/g utilizada nos demais experimentos. Foram realizadas 3 medições para confirmação da consistência normal do gesso reciclado. O ensaio de consistência normal foi repetido para determinar a relação a/g do gesso comum.

Conhecida a relação a/g das pastas de gesso reciclado e comum, os tempos de início e fim de pega do gesso reciclado e comum foram determinados no próximo ensaio do estado fresco.

Os tempos de início e fim de pega da pasta de gesso reciclado e comum foram determinados segundo procedimentos descritos na norma NBR 12128 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Para determinação do tempo de pega foi utilizado o aparelho de *Vicat*, em que uma agulha penetra a pasta sob ação do peso próprio. O início de pega foi cronometrado a partir do momento em que a agulha do aparelho estacionou a 1 mm da base.

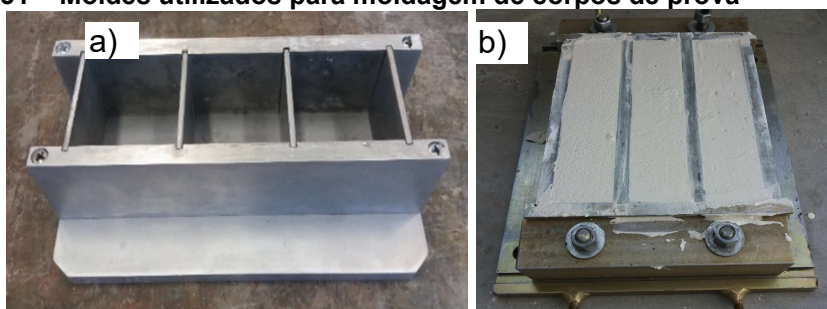
Tem-se o fim de pega quando a agulha não mais impressionava a pasta de gesso reciclado ou comum. Todas as pastas de gesso recicladas foram moldadas utilizando-se a relação a/g de 0,7, em massa, obtidos no ensaio de consistência normal conforme experimentos realizados por Roque *et al.* (2005), Pinheiro (2011), Ribeiro (2011), Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018). A relação a/g utilizada na moldagem dos corpos de prova de gesso comum foi 0,6, em massa.

Foram realizadas 5 medições e utilizada a média aritmética obtida para determinação dos tempos de início e fim de pega do gesso reciclado e comum. Conhecidos os tempos de início e fim de pega do gesso reciclado e comum foi iniciado o processo de moldagem dos corpos de prova, conforme descrito em 3.5.4.

#### 3.5.4 Moldagem dos corpos de prova

Foi utilizado um molde de alumínio padronizado para moldagem dos corpos de prova de dimensões 5 x 5 x 5 cm para o ensaio de compressão axial e dureza superficial, como pode ser observado na Figura 31a.

**Figura 31 – Moldes utilizados para moldagem de corpos de prova**



Fonte: o autor.

Para o ensaio de tração na flexão foram utilizados um molde padronizado de latão, produzindo-se corpos de prova com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, Figura 31b. Os moldes foram posicionados sobre a bancada e untados com cera líquida para facilitar a remoção.

Acondicionou-se pasta de gesso reciclada e comum nos moldes metálicos utilizando-se uma espátula de 10 cm de largura. Evitou-se provocar vibrações ou pressão sobre as paredes do molde. Parte-se da premissa que a pressão da espátula na pasta de gesso aplicado no molde foi irrelevante.

Foram moldados vinte corpos de prova cúbicos, sendo dez para o ensaio de compressão axial e dez para o ensaio de dureza superficial, e destes, cinco para ensaios de 7 dias de cura e cinco para os ensaios de 28 dias para o gesso reciclado e a mesma quantidade para o gesso comum.

Foram moldados dez corpos de prova prismáticos, sendo cinco para os ensaios de 7 dias e cinco para os ensaios de 28 dias, tanto para o gesso reciclado quanto para o comum. Duas horas após a moldagem, os moldes eram desmontados e os corpos de prova identificados e armazenados. O Quadro 11 resume a quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio.

**Quadro 11 – Quantidade de corpos de prova moldados para cada ensaio de resistência mecânica**

| Ensaio             | Amostra | 7 dias | 28 dias |
|--------------------|---------|--------|---------|
| Tração na flexão   | GC      | 5      | 5       |
|                    | GR      | 5      | 5       |
| Compressão axial   | GC      | 5      | 5       |
|                    | GR      | 5      | 5       |
| Dureza superficial | GC      | 5      | 5       |
|                    | GR      | 5      | 5       |

Fonte: o autor.

Após o período de cura dos corpos de prova foram iniciados os ensaios para determinação da resistência à tração na flexão, compressão axial, dureza superficial e aderência à tração, que são descritos no item 3.5.5.

### 3.5.5 Ensaios mecânicos no estado endurecido do gesso reciclado e comum

A resistência à tração na flexão foi determinada segundo recomendações da NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Foi utilizada prensa hidráulica universal de ensaios, eletromecânica e microprocessada da marca EMIC modelo DL10T e um dispositivo para ensaios de flexão em corpos de prova prismáticos, da marca Solotest.

Foram ensaiados dez corpos de prova prismáticos, sendo cinco decorridos 7 dias de sua moldagem e cinco aos 28 dias de gesso reciclado e a mesma proporção moldada com gesso comum. A resistência à tração na flexão foi calculada utilizando-se a média aritmética obtida através da Equação 11.

$$f_{ctM} = \frac{P \times l}{b \times d^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

Em que:

$f_{ctM}$  = 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;

$d^2$  = quadrado da altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros.

O ensaio de resistência à compressão axial do gesso reciclado e comum foi realizado segundo procedimento descrito na norma NBR 12129 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Foram submetidos ao ensaio de compressão axial vinte corpos de prova cúbicos, dez decorridos 7 dias de sua moldagem, sendo 5 moldados somente com gesso reciclado e 5 moldados somente com gesso comum e a mesma proporção decorridos 28 dias de cura (Figura 32).

**Figura 32 - Ensaio de compressão axial no gesso reciclado**



Fonte: o autor.

Os corpos de prova foram rompidos e considerada a média aritmética dos resultados obtidos como resistência axial, segundo a Equação 12.

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que:

$f_c$  = 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.

Determinou-se a dureza superficial foi determinada segundo procedimento descrito na NBR 12129 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Uma esfera metálica de 10 mm de diâmetro foi colocada sobre cada corpo de prova cúbico destinado ao ensaio de dureza superficial. Estes corpos de prova foram submetidos à carga de 500 N por dois segundos na prensa, Figura 33.



**Figura 33 - Ensaio de dureza superficial**

Fonte: o autor.

Dez corpos de prova foram submetidos ao ensaio de dureza superficial, sendo cinco decorridos 7 dias de sua moldagem e cinco aos 28 dias. Após este período a carga era retirada e medida a profundidade da impressão que a esfera de aço deixou sobre os corpos de prova, Figura 34.

**Figura 34 - Marca da esfera de aço resultante do ensaio de dureza superficial sobre os corpos de prova**

Fonte: o autor.

A dureza superficial foi determinada pela média aritmética entre os valores obtidos de acordo com a Equação 13.

$$D = \frac{F}{\pi \times \phi \times t'} \quad (\text{Eq. 13})$$

Em que:

D = dureza superficial, em Newton por milímetro quadrado;

F = carga, em Newton;

$\varnothing$  = diâmetro, em milímetros;

t' = média da profundidade, em milímetros.

Após o ensaio de dureza superficial foram coletadas amostras de gesso reciclado endurecido e de gesso comum para determinação da formação dos cristais e composição química utilizado MEV e EDS, explanadas no item 3.5.6.

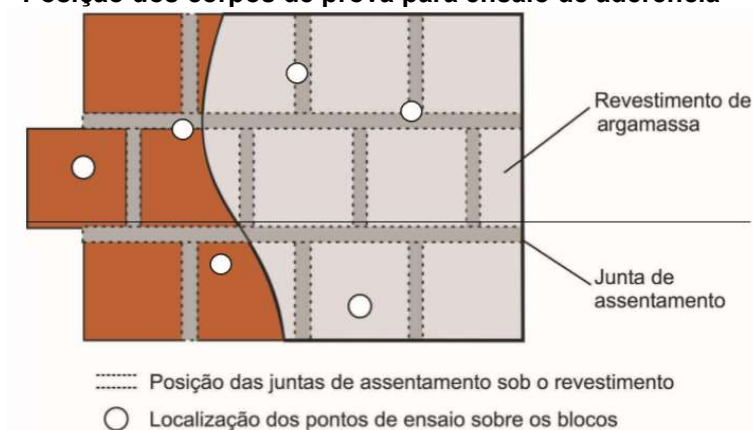
O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado segundo procedimentos descritos na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Foram construídas duas paredes, sendo uma com blocos de concreto (39 x 19 x 9 cm) de dimensões 120 x 76 cm e outra com blocos cerâmicos (19 x 13 x 9 cm) de dimensões 118 x 70 cm. Ambas foram construídas com cola pronta para assentamento de blocos.

Foi preparada uma pasta de gesso reciclado através da mistura homogênea de gesso e água com a relação a/g de 0,7, em massa. Para preparação da pasta foi utilizado o processo de polvilhamento do pó de gesso sobre a água por período de tempo de 1 min. A solução foi deixada em repouso por mais 1 min e então homogeneizada manualmente com a utilização de uma espátula por 1 min. Esta pasta foi aplicada sob metade da superfície da parede de bloco concreto e de bloco cerâmico, gerando-se uma camada de revestimento de gesso reciclado com 5 mm de espessura. Na outra metade de cada parede foi aplicada uma pasta de gesso comercial, com relação a/g 0,6.

Decorridos 28 dias da aplicação do revestimento, utilizou-se uma serra-copo de 50 mm acoplada a uma furadeira elétrica de 600 W de potência, realizando-se o corte do revestimento.

Os cortes para ensaio de aderência transpassaram no mínimo 1 mm o revestimento, conforme orientação contida na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). As amostras foram recolhidas das paredes conforme prescrição contida na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), respeitando-se juntas e espaçamentos recomendados, como pode ser observado na Figura 35.

**Figura 35 – Posição dos corpos de prova para ensaio de aderência**

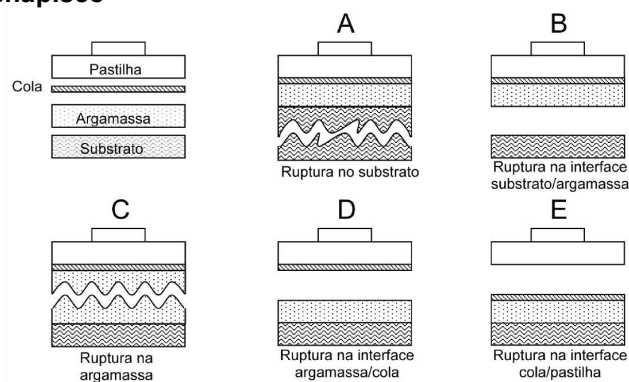


Fonte: NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

Após a limpeza da superfície foi utilizada cola epóxi para colar as amostras nas pastilhas do aparelho utilizado para medição de aderência da argamassa, o aderímetro hidráulico da marca Contenco. Decorrida uma hora após aplicação e cura da cola epóxi tracionou-se as pastilhas. Foram realizadas 12 medições de resistência de aderência à tração para o gesso reciclado e gesso comercial em substrato executado com blocos de concreto e 12 medições na parede construída com bloco cerâmico.

Depois dos rompimentos as amostras foram medidas com um paquímetro digital da marca Solotest para aferição do diâmetro das amostras e a espessura do revestimento. Foram observadas as formas de ruptura dos corpos de prova, conforme detalhado na Figura 36.

**Figura 36 - Formas de ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração para um sistema de revestimento sem chapisco**



Fonte: NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

A resistência de aderência à tração foi calculada pela média aritmética entre os valores obtidos através da Equação 14.

$$Ra = \frac{F}{A}, \quad (\text{Eq. 14})$$

Em que:

$Ra$  = resistência de aderência a tração, em MPa;

$F$  = força de ruptura, em Newton;

$A'$  = área do corpo de prova, em milímetros quadrados.

Foram retirados das paredes 3 testemunhos de gesso reciclado e 3 testemunhos de gesso comercial, da parede de bloco de concreto e de bloco cerâmico para determinação da umidade. Para tanto utilizou-se uma serra-copo de 50 mm acoplada a uma furadeira elétrica de 600 W de potência, realizando-se o corte do revestimento e ultrapassando-se a parede no mínimo 1 mm.

Os testemunhos foram direcionados até a estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar por 4 h a 105 °C para remoção da umidade. A média aritmética obtida na Equação 15 foi utilizada para determinação da umidade.

$$U (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{Eq. 15})$$

Em que:

$U$  = teor de umidade, em porcentagem;

$m_u$  = é a massa do testemunho úmida, em gramas;

$m_s$  = é a massa do testemunho seco, em gramas.

O ensaio de resistência de aderência à tração finaliza os ensaios de resistência mecânica do gesso reciclado e gesso comercial. No item 3.5.6 são descritos os procedimentos utilizados para visualização da microestrutura do gesso reciclado e gesso comum pelo ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

### 3.5.6 Microestrutura e composição química do gesso reciclado

As amostras foram destinadas à observação no microscópio eletrônico de varredura (MEV) para a análise da microestrutura do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado e do gesso comum. Primeiramente as amostras foram moídas em almofariz de porcelana para atingir a finura adequada para a realização do ensaio.

Após sua preparação, foi removida a umidade do por 24 h a temperatura de 105 °C utilizando-se a estufa de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital da umidade. Após a eliminação da umidade o gesso reciclado e o comum foram armazenados em recipientes hermeticamente lacrados para posteriormente serem metalizados.

Como o gesso não é um material condutor, as amostras foram recobertas com uma fina camada de pó de ouro, utilizando-se o equipamento vaporizador de ouro e carbono da marca Quarum modelo Q150R ES, Figura 37.

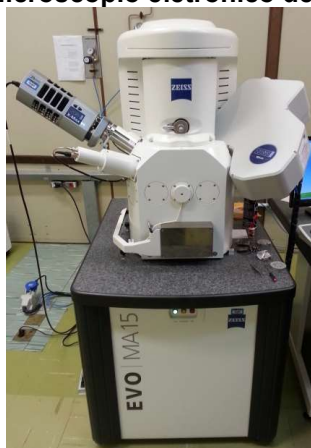
**Figura 37 - Vaporizador de ouro e carbono**



**Fonte: o autor.**

Na análise das amostras utilizou-se um equipamento da marca MEV Carl Zeiss, modelo EVO MA 15, equipado com detectores de elétrons secundários de alto vácuo e retroespehados com cristal adicional para análise de nitrogênio (Figura 38).

**Figura 38 - Microscópio eletrônico de varredura**



Fonte: o autor.

A composição química do gesso reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado foi determinada utilizando-se o Espectrômetro Dispersivo de Energia (EDS), acoplado no MEV. Para análise dos compostos e confirmação dos elementos químicos foi utilizado o Difratorômetro XRD – 6100/7000. Para análise dos picos obtidos no ensaio DRX foram utilizados os programas XRD *Qualitative Analysis* da PCXRD ver. 7.00 e o PDF – 2 *Release 2012 (database versão 2.1202)*.

Finalizados os ensaios de caracterização do gesso reciclado e comum, no próximo item serão explanados os ensaios realizados para caracterização do papel cartão reciclado.

### 3.6 Caracterização do papel cartão reciclado

A relação de ensaios realizados para determinação das características físicas, químicas e mecânicas do papel cartão comercial e reciclado, normas e quantidade de amostras ensaiadas são descritos no Quadro 12.

**Quadro 12 – Ensaio realizados para caracterização do papel reciclado**

| Etapa            | Ensaio                   | Normas             | Número de amostras |       |
|------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-------|
| Ensaio físicos   | Gramatura                | NBR 14527:2009     | GR                 | GC    |
|                  | Espessura                | NBR 14527:2009     | 5                  | 5     |
| Ensaio químicos  | MEV                      | -                  | 3                  | 3     |
|                  | EDS                      | -                  | 3                  | 3     |
|                  | DRX                      | -                  | 3                  | 3     |
| Ensaio mecânicos |                          |                    | Long               | Trans |
|                  | Resistência à tração     | NBR NM 1924-2:2012 | 5                  | 5     |
|                  | Resistência à compressão | NBR 9895:2009      | 5                  | 5     |

**Legenda: Long (sentido longitudinal) e Trans (sentido transversal)**

Fonte: o autor.

### 3.6.1 Preparação da pasta celulósica

As tiras de papel foram picotadas manualmente, em pedaços de aproximadamente 2,5 x 2,5 cm, para separar o gesso fortemente aderido ao papel cartão de revestimento de resíduos de chapas de gesso acartonado. Após o picotamento, 1 kg de papel com gesso aderido era deixado de molho em um recipiente com 5 L de água por 4 h.

Decorrido este tempo foi utilizada uma argamassadeira modelo I-3010 da marca Contenco para agitar a mistura papel/solução por 20 minutos, com rotação de 50 rpm.

A mistura era então deixada em repouso por uma hora para sedimentação das partículas de gesso. Eram retirados do recipiente 4,5 L da mistura papel/água, evitando-se que o gesso sedimentado no fundo do recipiente se misturasse com o papel cartão. O produto resultante foi direcionado para o processo de desagregação. Foram processados 53 kg de papel cartão com gesso aderido.

O processo de desagregação do papel cartão de revestimento de resíduo de chapas de gesso acartonado foi realizado segundo procedimento descrito na NBR 5263-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2005). Para tanto, o material picotado foi deixado de molho em repouso por 4h para umedecimento e separação das fibras.

Após este período o material foi desagregado segundo especificação da norma NBR 5263-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2005), porém, não foi utilizado um desagregador normatizado, mas uma argamassadeira modelo I-3010 da marca Contenco. Em cada batelada eram colocados 300 g de papel cartão umedecido em 3L de água. Foram utilizadas 1000 rotações para desagregação das fibras.

Toda solução foi então filtrada com papel filtro qualitativo de gramatura 80 g m<sup>2</sup> duas vezes consecutivas para que não houvesse perda de finos pelo filtro. O filtrado era reutilizado no processo de separação do papel cartão com gesso aderido. A pasta celulósica úmida retida no filtro era armazenada em recipiente hermeticamente fechado para posteriormente seguir para a etapa do refinamento.

O refinamento da pasta celulósica foi realizado estirando-se a pasta celulósica úmida com um martelo de madeira corrugado, Figura 39. O processo foi executado aplicando-se 200 golpes sobre 300 g de pasta celulósica filtrada acondicionada dentro de uma forma de alumínio.

**Figura 39 – Martelo de madeira corrugada utilizado na refinação da pasta celulósica**



Fonte: o autor.

Assumiu-se que a força aplicada em todos os golpes foi a mesma, assim como distribuída em toda amostra de pasta celulósica úmida. Após o refinamento a pasta de celulose recebeu outro processo de desagregação. Para tanto foi utilizado 300 g de pasta de celulose refinada diluída em 3 L de água. Foram utilizadas 1000 rotações da argamassadeira modelo I-3010 da marca Contenco. Após o refinamento e a desagregação da pasta celulósica foi determinado o teor de massa seca.

A determinação do teor de massa seca foi realizada segundo a NBR ISO 638 (ASSOCIAÇÃO..., 2008). Pesou-se 50 g de pasta de celulose úmida na balança de precisão analítica da marca Shimadzu, colocou-se o material em recipiente de porcelana. Após secagem na estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar por 4h na temperatura de 105 °C, o material foi colocado no dessecador e pesado novamente. O teor de massa seca da pasta de celulose foi determinado pela Equação 16.

$$\text{Teor de massa seca (\%)} = \frac{M - M_2}{M} \times 100 \quad (\text{Eq. 16})$$

Em que:

M = massa da amostra, em gramas;

M<sub>2</sub> = massa da amostra seca a 105 °C, em gramas.



Foram realizadas 5 pesagens e considerada a média aritmética obtida como o teor de massa seca da pasta de celulose. Conhecido o teor de massa seca da pasta de celulose, a próxima etapa do processo de reciclagem do papel cartão é a formação das folhas, que será abordado no item 3.6.2

### 3.6.2 Formação de folhas de papel cartão reciclado

O processo de formação de folhas foi executado segundo a NBR ISO 5269 (ASSOCIAÇÃO..., 2006). Para formação das folhas de papel cartão reciclado foi utilizado 300 g de polpa de celulose seca diluída em 30L de água destilada, obteve-se uma consistência de 1%, conforme indicado na NBR ISO 5269 (ASSOCIAÇÃO..., 2006). Esta suspensão foi colocada na caixa formadora metálica, que possuía dimensões de 80 x 60 x 30 cm.

Cuidadosamente foi imersa nesta caixa formadora uma tela metálica de inox com abertura de malha nominal de 125  $\mu\text{m}$ , fixada em uma moldura de madeira retangular de 45 x 35 cm. A tela metálica foi suspensa lentamente do fundo da caixa formadora, suspendeu-se a polpa de celulose diluída na água e formou-se a folha úmida, conforme pode ser observado na Figura 40.

**Figura 40 – Formação da folha úmida sobre a tela metálica**



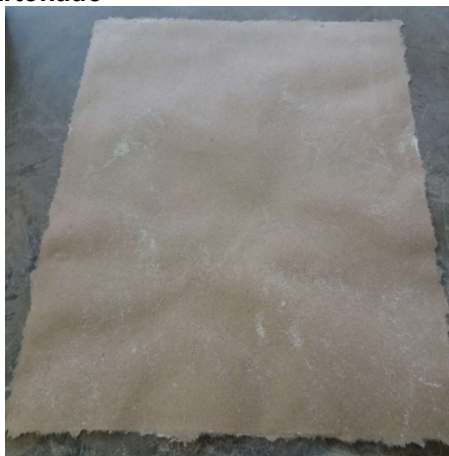
Fonte: o autor.

Sobre o conjunto tela metálica e folha úmida foi colocado um papel absorvente de 50 x 50 cm. Sobre o papel absorvente foi colocado uma chapa separadora de aço galvanizado, dimensões 50 x 40 cm. Todo o conjunto foi rotacionado 180 ° no sentido horizontal e a tela metálica removida. Sobre o conjunto chapa separadora, papel

absorvente e folha úmida foram colocados dois papéis absorventes e uma chapa separadora. Este sistema foi então colocado sobre um suporte metálico rijo e direcionado a uma prensa hidráulica manual da marca Marcon Bovenau. Nesta prensa o papel cartão reciclado úmido condicionado entre os papéis absorventes e as chapas separadoras recebia uma carga de 410 kPa por 5 minutos, conforme descrição da NBR ISO 5269 (ASSOCIAÇÃO..., 2006).

Decorridos os 5 minutos a pressão era aliviada e o conjunto removido da prensa. A chapa separadora superior foi removida e o restante do conjunto conduzido à secagem, à sombra, por um período de 24 h. Após a secagem a folha de papel cartão reciclado foi removida dos papéis absorventes e armazenada, Figura 41.

**Figura 41 – Folha de papel cartão reciclada, de dimensões 45 x 50 cm, produzida a partir de resíduos de chapas de gesso acartonado**



**Fonte: o autor.**

Foram produzidas 100 folhas de papel cartão reciclado de dimensões 45 x 50 cm. Deste total 90 folhas foram utilizadas na produção de 45 chapas de gesso acartonado recicladas, 10 folhas foram reservadas para determinação das propriedades físicas e mecânicas das folhas de papel cartão recicladas. O final desta etapa é considerado o segundo marco da pesquisa, pois a partir deste ponto gerou-se o segundo produto reciclado, a folha de papel cartão reciclada proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado. No item 3.6.3 serão abordados sobre os ensaios utilizados para caracterização deste material.

### 3.6.3 Caracterização das folhas de papel cartão reciclado

Para caracterização das folhas de papel cartão reciclado foram realizados os ensaios físicos de gramatura e determinação da espessura das folhas. Os ensaios mecânicos utilizados foram o de resistência à tração e o ensaio de resistência à compressão *short span test*. Microscopicamente foram realizados os ensaios de MEV e EDS para visualizar as fibras celulósicas e determinar sua composição química.

O ensaio de gramatura foi realizado conforme prescrições da NBR 14527 (ASSOCIAÇÃO..., 2009). Uma folha de papel cartão reciclado era medida e pesada, a gramatura foi calculada através da Equação 17.

$$G = \frac{m}{A} \quad (\text{Eq. 17})$$

Em que:

G = gramatura, em gramas por metro quadrado;

m = massa da amostra, em gramas;

A = área da amostra, em metros quadrados.

Foram realizadas 5 medições e considerada a média aritmética obtida como a gramatura da folha de papel cartão reciclado.

O ensaio de espessura foi realizado medindo-se a espessura correspondente à distância perpendicular entre quatro folhas empilhadas de papel reciclado. Para a leitura, os corpos de prova foram medidos através de um micrômetro digital da marca Digimess. Foram medidos 5 pontos em cada folha de papel cartão reciclado e considerada a média obtida como a espessura da folha, conforme indicado na NBR 14527 (ASSOCIAÇÃO..., 2009).

O ensaio de resistência à tração na folha de papel cartão reciclada foi realizado conforme prescrições da NBR NM 1924-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2012). Um corpo de prova de papel cartão reciclado com dimensões de 15 x 100 mm foi posicionado entre as garras autotravantes metálicas na prensa hidráulica modelo Piso Coluna Dupla 100 kN da marca Emic, como pode ser observado na Figura 42.

**Figura 42 – Ensaio de resistência à tração nas folhas de papel cartão recicladas**



Fonte: o autor.

As extremidades do corpo de prova foram revestidas com fita adesiva transparente para que a ruptura não ocorresse no contato com a garra. Foi aplicada uma velocidade de alongamento constante de  $20 \text{ mm min}^{-1}$ . A resistência à tração do papel reciclado foi calculada pela Equação 18.

$$\sigma_T^b = \frac{F_T}{b} \quad (\text{Eq. 18})$$

Em que:

$\sigma_T^b$  = Resistência à tração, em MPa;

$F_T$  = força média máxima de tração, em Newtons;

$b$  = largura inicial do corpo de prova, em milímetros.

Foram realizadas 5 medições no sentido transversal e 5 no sentido longitudinal, e considerada a média aritmética obtida como resistência à tração da folha de papel cartão reciclado.

O ensaio de resistência à compressão – *short span test* foi realizado conforme prescrições da NBR 9895 (ASSOCIAÇÃO..., 2009). Os corpos de prova de  $15 \times 100$  mm foram inseridos entre 2 garras móveis que comprimiram o corpo de prova com uma força constante de 2300 N, Figura 43.

**Figura 43 – Ensaio de resistência à compressão nas folhas de papel**



Fonte: o autor.

A resistência à compressão do papel reciclado foi calculada pela Equação 19.

$$\sigma_C^b = \frac{F_C}{b} \quad (\text{Eq. 19})$$

Em que:

$\sigma_C^b$  = Resistência à compressão, em MPa;

$F_C$  = força de compressão média máxima, em Newtons;

$b$  = largura inicial do corpo de prova, em milímetros.

Foram realizadas 5 medições para corpos de prova no sentido longitudinal e 5 no sentido transversal. A média aritmética obtida foi considerada como a resistência à compressão da folha de papel cartão reciclado.

O processo e o procedimento para observação da microestrutura do papel cartão reciclado e de sua composição química foram os mesmos utilizados para análise microscópica do gesso reciclado, descrito previamente em 3.5.6. Caracterizado o papel cartão reciclado, o próximo item descreve a metodologia utilizada para formação das chapas de gesso acartonado recicladas.

### 3.7 Chapas de gesso acartonado recicladas

#### 3.7.1 Produção das chapas de gesso acartonado recicladas

Para produção das chapas de gesso acartonado recicladas foi utilizado somente o gesso reciclado, descrito no item 3.4 e o papel cartão reciclado, do item 3.6.2. O processo de produção da chapa de gesso acartonado reciclada seguia a seguinte sequência de montagem: uma chapa metálica era posicionada sobre a bancada, sobre esta, uma folha de borracha de etil vinil acetado (EVA). Sobre o conjunto era colocada a primeira folha de papel cartão reciclada.

Sobre a folha de papel cartão reciclada era montado um quadro metálico utilizado como molde para dimensionar a chapa de gesso acartonado reciclada. O molde metálico possuía dimensões internas de 30 x 40 cm e 12,4 mm de espessura. Dimensão esta utilizada para corpos de prova de chapas de gesso acartonado, conforme especificado na NBR 14715-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), Figura 44.

**Figura 44 – Molde metálico de dimensões internas 30 x 40 cm posicionado sobre a folha de papel reciclada**

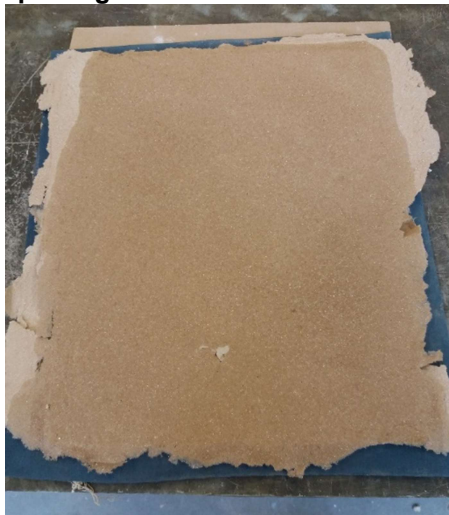


Fonte: o autor.

Uma pasta de gesso reciclada era preparada na relação a/g 0,7, previamente obtida no ensaio de consistência normal. A pasta foi inserida dentro do quadro metálico de dimensões internas 30 x 40 cm, rasada com uma régua metálica e sobre a pasta ainda fresca foi colocada outra folha de papel cartão reciclado. Sobre este conjunto foi inserida outra folha de EVA e mais uma chapa metálica para criar uma superfície plana. Não se exerceu pressão sobre a chapa metálica.

O conjunto era deixado em repouso por 4 h para realizar a cura da pasta de gesso. Foram então removidas as chapas metálicas, as folhas de EVA e o quadro metálico, Figura 45.

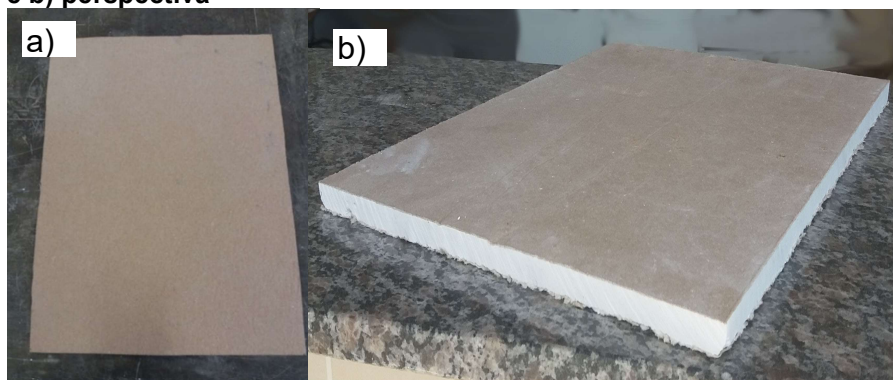
**Figura 45 – Chapa de gesso acartonado reciclada úmida**



Fonte: o autor.

A chapa de gesso reciclada foi conduzida a uma estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital, da marca Biopar, onde permanecia por 3h na temperatura de 105 °C, para evaporação do excesso de água. Após a retirada da estufa foi recortado o excesso de papel das bordas da chapa de gesso acartonado reciclada utilizando-se um estilete retrátil, conforme Figura 46.

**Figura 46 – Chapa de gesso acartonado reciclada de dimensões 30 x 40 cm sendo a) vista superior e b) perspectiva**



Fonte: o autor.

Ao todo foram fabricadas 45 chapas de gesso acartonado recicladas de dimensões 30 x 40 cm, que foram utilizadas nos ensaios de caracterização descrito no item 3.7.2.

### 3.7.2 Características físicas e mecânicas das chapas de gesso acartonado recicladas

Para o apontamento das características físicas das chapas de gesso acartonado recicladas foi realizado o ensaio de densidade superficial de massa. Para a determinação das propriedades mecânicas, realizaram-se os ensaios de resistência mínima à ruptura na flexão, compressão axial e dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da moessa. No Quadro 13 são expressos os ensaios, normas e quantidade de amostras ensaiadas.

**Quadro 13 – Ensaios realizados para caracterização do papel reciclado**

| Etapa             | Ensaio  | Normas           | Número de amostras |     |
|-------------------|---|------------------|--------------------|-----|
|                   |   |                  | CGC                | CGR |
| Ensaio físico     | Densidade superficial de massa                    | NBR 14715-2:2010 | 5                  | 5   |
| Ensaios mecânicos | Resistência mínima à ruptura na flexão            |                  | 5                  | 5   |
|                   | Dureza superficial pelo diâmetro máximo da moessa |                  | 5                  | 5   |
|                   | Compressão axial                                  |                  | NBR 13279:2005     | 5   |

Fonte: o autor.

O ensaio de densidade superficial de massa foi realizado conforme prescrições da NBR 14715-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Utilizou-se uma balança digital da marca Digimed modelo KN 5000 com precisão de 0,1 g foram determinadas as massas de 5 chapas de gesso acartonado recicladas. Utilizou-se um paquímetro da marca Mitutoyo foram medidas suas dimensões. Foi utilizada a Equação 20 para o cálculo da densidade superficial de massa

$$D' = \frac{m'}{xy} \times 10^3 \quad (\text{Eq. 20})$$

Em que:

$D'$  = densidade superficial, em  $\text{kg m}^{-2}$ ;

$m'$  = massa do corpo de prova, em gramas;



$x$  = comprimento de cada corpo-de-prova, em milímetros;

$y$  = largura de cada corpo-de-prova, em milímetros.

A densidade superficial de massa foi calculada através da média aritmética dos resultados das determinações realizadas nos cinco corpos de prova de chapa de gesso acartonado reciclada.

O ensaio de resistência mínima à ruptura na flexão foi executado conforme procedimento descrito na NBR 14715-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). A prensa hidráulica eletromecânica e microprocessada da marca EMIC modelo DL10000 exercia carga à velocidade de  $250 \text{ N min}^{-1}$  sobre os suportes de aço. Foram submetidos ao ensaio de resistência mínima à ruptura na flexão vinte corpos de prova. Sendo cinco no sentido longitudinal e cinco no sentido transversal, tanto da chapa de gesso acartonado comercial quanto reciclada, Figura 47. A resistência mínima à ruptura foi calculada utilizando-se a média aritmética obtida de cinco amostras.

**Figura 47 – Ensaio de resistência mínima à ruptura na flexão**



Fonte: o autor.

O ensaio de resistência à compressão axial da chapa de gesso acartonado comercial e reciclada foi realizado segundo procedimento descrito na norma NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO..., 2005). Corpos de prova de  $5 \times 5 \text{ cm}$  foram submetidos à carga constante de  $500 \text{ N}$  até sua ruptura. Foram ensaiadas cinco amostras de chapas de gesso acartonado comerciais e cinco chapas de gesso acartonado reciclada (Figura 48).

**Figura 48 - Ensaio de compressão axial na chapa de gesso acartonado**



**Fonte: o autor.**

Os corpos de prova foram rompidos e considerada a média aritmética dos resultados obtidos como resistência de compressão axial, segundo a Equação 21.

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (\text{Eq. 21})$$

Em que:

$f_c$  = 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.

O ensaio de dureza superficial determinado pelo diâmetro máximo da moesa foi realizado conforme descrito da NBR 14715-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), no qual uma esfera metálica com massa de 510 g e diâmetro de 50 mm era solta em queda livre, sem velocidade inicial, de altura de 50 cm sobre a chapa de gesso acartonado comercial e reciclada. Utilizou-se um paquímetro da marca Mitutoyo para medir o diâmetro da moesa causada pela esfera metálica nos corpos-de-prova (Figura 49).

**Figura 49 – Ensaio de dureza superficial**

Fonte: o autor.

Foram realizadas vinte medições em cinco chapas de cada material e considerada a média aritmética como sendo a dureza superficial determinada pelo diâmetro máximo da moesa.

### 3.8 Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o *software* livre *Past* 4.02. Adotou-se o teste de *Shapiro-Wilk*, para número de dados entre 3 e 5, e *K* variáveis, determinando-se a normalidade dos dados obtidos em cada ensaio físico, químico e mecânico, para as amostras de gesso, papel cartão e chapa de gesso acartonado, comercial e reciclada. Como critério de avaliação dos parâmetros considerou-se ( $p\text{-valor} > 0,05$ ) como distribuição normal.

Diferenças estatísticas (nível de significância se 5%,  $\alpha = 0,05$ ) foram verificadas entre as médias algebricamente diferentes das amostras recicladas e comerciais de gesso, papel cartão e chapas de gesso acartonado pelo teste paramétrico *t* de *Student* para os conjuntos de amostras com distribuição normal e pelo teste não paramétrico de *Kruskal Wallis* para o grupo que apresentasse distribuição não normal. Para ambos os testes as seguintes hipóteses foram aventadas:

H0: não observa-se diferença estatística significativa entre as amostras de gesso comercial e reciclado, papel comercial e reciclado e chapa de gesso acartonado reciclada e comercial,  $p\text{-valor} > 0,05$ .

H1: observa-se diferença estatística significativa entre as amostras de gesso comercial e reciclado, papel comercial e reciclado e chapa de gesso acartonado reciclada e comercial,  $p\text{-valor} \leq 0,05$ .

Todos os testes de normalidade e diferença estatística encontram-se no Apêndice A.

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

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no programa experimental das amostras de gesso reciclado provenientes de resíduos de chapas de gesso acartonado (GR) e gesso comum (GC) são descritos sequencialmente apresentando-se as propriedades físico-químicas do pó, no estado fresco e endurecido, as composições químicas e a morfologia dos cristais.

São descritos os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais para determinação das características físicas e mecânicas do papel cartão reciclado proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado (PR), assim como as propriedades físicas e mecânicas da chapa de gesso acartonado reciclada (CGR).

A discussão é iniciada descrevendo-se as etapas iniciais realizadas na preparação de resíduos de chapas de gesso acartonado até a etapa da calcinação.

### 4.1 Considerações sobre o processo de trituração manual

O processo de trituração manual utilizado 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 os resíduos de chapas de gesso acartonado.

A pressão exercida pelos cilindros fragmentou a massa de gesso, separando-a do papel cartão. Visualmente não era possível observar qualquer fragmento de papel cartão aderido à massa de gesso. Porém, após a hidratação, a massa de gesso teve sua coloração alterada para tonalidade similar à do papel cartão que reveste as chapas.

Vale ressaltar que a trituração manual exigiu esforço físico, pois era necessário rotacionar manualmente a manivela do moinho de moagem de cana de açúcar durante a passagem dos filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado. A distância entre a manivela e o eixo do cilindro era de 30 cm. Para minimizar o esforço despendido foi aumentada a distância entre a manopla e o eixo do cilindro, aumentando-se o momento e conseqüentemente diminuindo-se a força empregada.

O processo experimental de trituração manual demandou duas pessoas. Uma pessoa atuou na colocação de resíduos no sentido transversal aos 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 de continuar o processo.

Em escala industrial seria necessário desenvolver um triturador específico para esta função, pois seria inviável a trituração manual deste resíduo para reciclagem em larga escala.

A utilização de cilindros corrugados foi mais eficiente no processo de separação da massa de gesso comparada aos cilindros lisos utilizados por Erbs *et al.* (2018), tendo-se ampliado o aproveitamento de 55,33% para 68,08%.

O material proveniente da trituração manual foi peneirado em peneira com malha de abertura nominal de 10 mm. Desta forma era separado o papel cartão da massa de gesso. O papel cartão com gesso aderido foi armazenado em sacos plásticos para posterior processamento. O RG foi destinado à trituração eletromecânica, conforme descrito no item 4.2.

#### **4.2 Trituração eletromecânica**

Na trituração eletromecânica foi reduzida a dimensão das partículas do RG. A cuba era carregada em batelada, de aproximadamente 1 kg de RG. O próximo carregamento era feito somente após a moagem completa do material existente na cuba.

Durante o processo de trituração foi necessário trocar três vezes os rolamentos, pois o parafuso da regulagem que rege a distância entre os cilindros exercia pressão diretamente no mecanismo. 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.

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

O material passante na peneira de abertura 0,29 mm era armazenado em sacos plásticos para evitar sua hidratação pela umidade do ar. Posteriormente este material era conduzido à trituração no moinho de bolas, conforme descrito no item 4.3.

### 4.3 Considerações sobre o processo de trituração no moinho de bolas

O tamanho de grão utilizado como referência no processo de trituração no moinho de bolas foi o da partícula de gesso comum (GC), pois esta 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.

A trituração no moinho de bolas reduziu a dimensão do RG. Visualmente houve redução no diâmetro das partículas de RG, porém, ainda superiores às do GC utilizado como referência.

O incremento do tempo de permanência do RG no moinho de bolas não reduzia a dimensão dos grãos devido à aglutinação das partículas no fundo do mecanismo, Figura 50.

**Figura 50 - RG após a trituração no moinho de bolas**



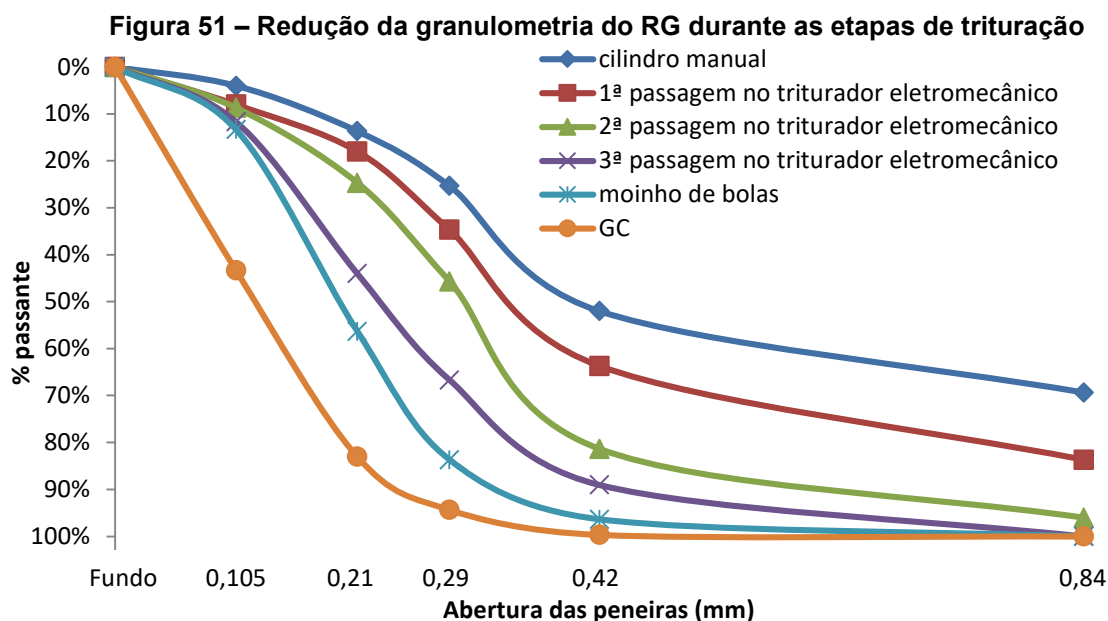
**Fonte: o autor.**

Após 50 minutos de permanência do material no moinho de bolas era possível perceber através da audição o incremento do ruído, indicando que as esferas de porcelana não trituravam mais o RG.

Devido às dimensões do recipiente era possível triturar somente 1 kg de material a cada batelada, e desta forma, este processo foi o mais demorado de toda a pesquisa, pois demandou 182 horas em laboratório para ser concluído.

Para redução do tempo despendido sugere-se a utilização de moinhos com maiores capacidades de carregamento. Outra sugestão é 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 RG com eficiência, pois este processo diminuiu consideravelmente a dimensão das partículas, principalmente na faixa granulométrica de 0,29 mm, conforme pode ser observado na Figura 51.



Fonte: o autor.

Uma sugestão para maior redução da granulometria do RG é utilizar esferas de aço inferiores à 10 mm de diâmetro ao invés das esferas de ágata. Desta forma ampliará-se a força de impacto das esferas no material e a área de contato, reduzindo-se a granulometria das partículas.

Mesmo após a trituração no moinho de bolas a granulometria do GR mostrou-se superior à de GC usada como referência. Assim, depende-se que o método escolhido possa não ter sido o ideal para a cominuição das partículas.

#### 4.4 Caracterização das amostras de GR e GC

Os resultados de caracterização das amostras de GC e GR no estado pulverulento, fresco e endurecido, assim como os limites estabelecidos nas respectivas NBR são resumidos na Tabela 19.



Tabela 19 – Resumo da caracterização das amostras de GR e GC

|  | Ensaio   | Limites                           | Classif.        | GR                 | GC                 | N              | p-valor                |
|--|--|-----------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------|------------------------|
| Ensaio<br>físicos do<br>pó                     | Granulometria<br>(≥ 90%<br>passante na<br>peneira)             | Peneira de<br>abertura<br>0,29 mm | GF              | 93,00              | 94,33              | 5              |                        |
|  |  | Peneira de<br>abertura<br>0,21 mm | GRE             | 77,67              | 83,00              | 5              |                        |
|  | Massa unitária<br>(kg m <sup>-3</sup> )                        | Mín 600                           | -               | 657,37<br>(3,27)   | 688,22<br>(4,12)   | 5              | 2,55 10 <sup>-6</sup>  |
|  | Massa<br>específica<br>(kg m <sup>-3</sup> )                   | -                                 | -               | 2524,74<br>(22,39) | 2567,59<br>(29,21) | 5              | 0,04187                |
|  | Superfície<br>específica<br>(m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ) | -                                 | -               | 358,18<br>(25,90)  | 448,36<br>(20,74)  | 5              | 0,00062                |
| Ensaio<br>químicos<br>do pó                    | Água livre (%)   | Máx 1,3                           | -               | 1,11<br>(0,17)     | 1,19<br>(0,09)     | 5              | 0,39043                |
|  | Água de<br>cristalização (%)                                   | 4,2 a 6,2                         | -               | 4,40<br>(0,17)     | 5,90<br>(0,25)     | 5              | 5,85 10 <sup>-6</sup>  |
|  | Teor de óxido<br>de cálcio (%)                                 | Mín 38                            | -               | 34,54<br>(1,89)    | 41,37<br>(1,17)    | 3              | 0,00599                |
|  | Teor de anidrido<br>sulfúrico (%)                              | Mín 53                            | -               | 42,35<br>(2,75)    | 46,57<br>(2,54)    | 3              | 0,00619                |
| Ensaio da<br>pasta no<br>estado<br>fresco      | Consistência<br>normal   | -                                 | -               | 0,60               | 0,70               | 5              |                        |
|  | Início de pega<br>(min)  | ≤ 10                              | GF              | -                  | 6:50<br>(0:40)     | 5              | 5,43 10 <sup>-8</sup>  |
|  |  | ≥ 10                              | GRE             | 15:45<br>(0:46)    | -                  |                |                        |
|  | Fim de pega<br>(min)   | ≤ 20                              | GF              | -                  | 18:30<br>(0:39)    | 5              | 3,70 10 <sup>-10</sup> |
| ≥ 35   |  | GRE                               | 48:25<br>(1:44) | -                  |                    |                |                        |
| Ensaio<br>mecânicos<br>no estado<br>endurecido | Tração na<br>flexão<br>(MPa) <sup>a</sup>                      | -                                 | -               | 3,25<br>(0,16)     | 3,63<br>(0,45)     | 5              | 0,10409                |
|  | Compressão<br>axial (MPa) <sup>a</sup>                         | -                                 | -               | 9,30<br>(0,25)     | 9,70<br>(0,15)     | 5              | 0,01586                |
|  | Dureza<br>superficial<br>(N mm <sup>-2</sup> ) <sup>a</sup>    | 20,00                             | -               | 38,90<br>(1,98)    | 45,70<br>(2,33)    | 5              | 4,91 10 <sup>-5</sup>  |
|  | Aderência à<br>tração (MPa) <sup>a</sup>                       | 0,2                               | Conc            |                    | 0,27<br>(0,05)     | 0,28<br>(0,06) | 12                     |
| Cer  |  |                                   |                 | 0,08<br>(0,01)     | 0,10<br>(0,02)     | 12             | 0,00069                |

<sup>a</sup> aos 28 dias de cura**Legenda: Valor médio (desvio padrão).****N – Número de amostras; GF – Gesso fundição; GRE – Gesso revestimento;  
Conc – Bloco de concreto; Cer – Bloco cerâmico.****Fonte: o autor.**

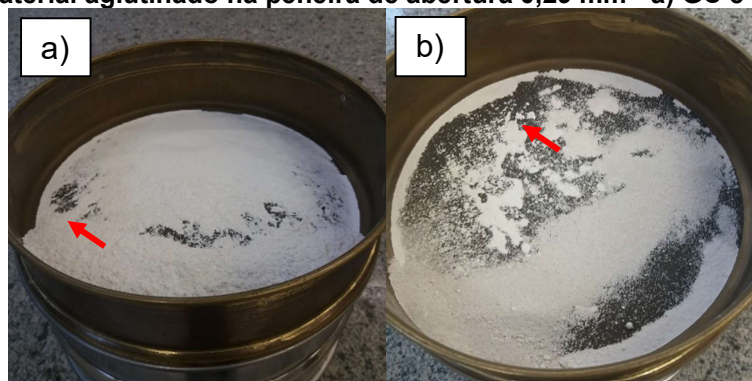
## 4.5 Propriedades físicas do pó de GC e GR

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação das propriedades no estado pulverulento, como a granulometria, massa unitária, massa específica e superfície específica.

### 4.5.1 Granulometria

Utilizando-se o peneiramento eletromecânico descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019), o GC utilizado como referência apresentou somente 69,33% de partículas passantes na peneira de abertura 0,29 mm. O GR apresentou 90,32% de partículas passantes na peneira de abertura 0,29 mm com o mesmo procedimento. Apesar da umidade das amostras ter sido removida antes do ensaio com a secagem na estufa de esterilização, notou-se durante o ensaio de granulometria que certa quantidade de material se aglutinava na malha da peneira, o que dificultava o transpasse na malha da peneira, conforme demonstrado na seta vermelha da Figura 52.

**Figura 52 – Material aglutinado na peneira de abertura 0,29 mm - a) GC e b) GR**

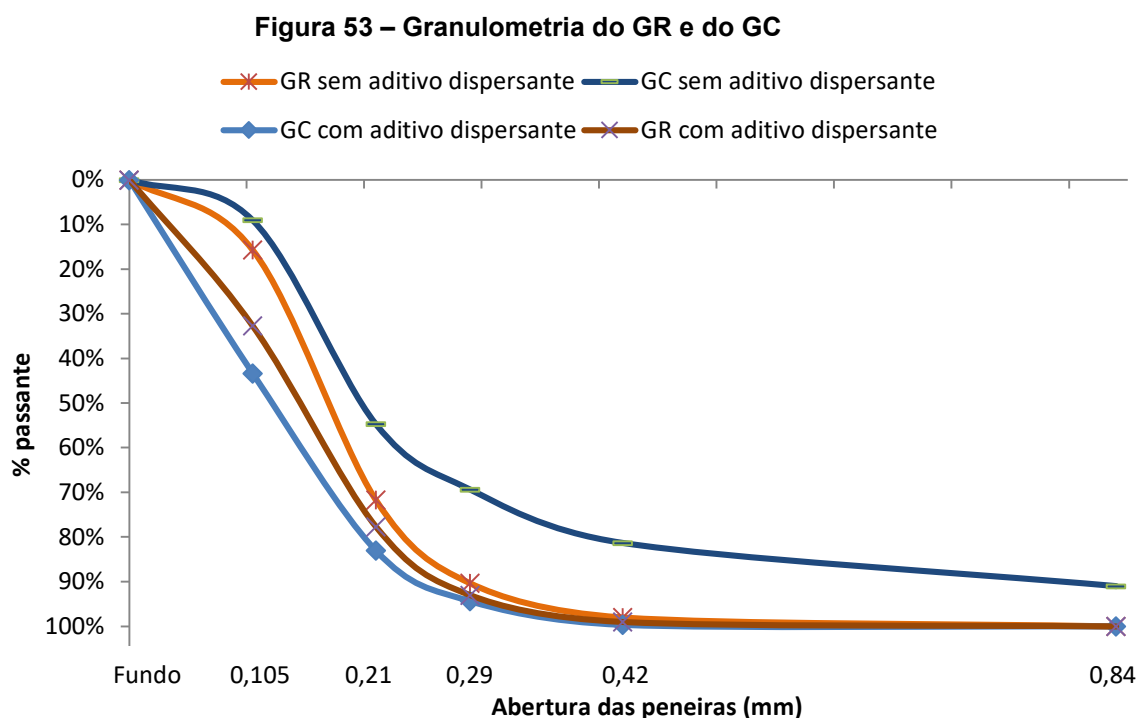


Fonte: o autor.

Inicialmente atribuiu-se esta aglutinação à hidratação do gesso pela umidade do ar, visto que o gesso é um aglomerante aéreo, ávido por água. Após o peneiramento eletromecânico destorroou-se o material aderido na malha da peneira com auxílio de um pincel. Verificou-se que parte do material passava pela abertura da peneira.

Oliveira *et al.* (2006) citam que a presença de partículas finas ou ultrafinas resulta em forças superficiais de atração eletrostáticas e secundárias (forças de *Van der Waals*), que conferem coesão e pontes de adesão com superfícies. Estes autores afirmam que ampliaram a porcentagem de partículas passantes acima de 10% ao reduzirem a atração eletrostática aplicando-se aditivos dispersantes.

Assim, o ensaio foi realizado novamente, porém, com adição de 0,5% do aditivo inorgânico dispersante Poliglicol, pulverizado sobre a amostra antes do início do ensaio. Na Figura 53 são apresentadas as curvas granulométricas do GR e GC, com e sem o aditivo dispersante.



Fonte: o autor.

É possível observar na Figura 52 que o uso do aditivo ampliou a porcentagem passante em todas as peneiras, no GC e no GR. Comprova-se, assim, a presença de forças eletrostáticas que promoviam a aglomeração das partículas, conforme citado por Oliveira *et al.* (2006).

Sem o uso de aditivo, a porcentagem passante de GC na peneira de abertura 0,29 mm era de 69,33%, e com a adição do aditivo esta porcentagem atingiu 94,33%, ampliando-se em 25% a porcentagem passante. No GR o incremento foi de 2,67%

somente, ampliando-se a porcentagem de partículas passantes de 90,33% para 93,00%.

Esta diferença de apenas 1,33% na porcentagem passante na peneira de abertura 0,29 mm entre o GC e o GR comprova que o processo de trituração foi eficiente. Segundo o critério de finura estabelecido na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), as duas amostras podem ser classificadas como gesso de fundição, pois apresentam mais de 90% de partículas passantes na peneira de abertura 0,29 mm.

Apointa-se como sugestão a inclusão da peneira de abertura 0,29 mm durante o peneiramento da amostra no procedimento de peneiramento sequencial descrito na NBR 12127 (ASSOCIAÇÃO..., 2019). Tal sugestão é justificada pois a classificação do gesso de fundição ocorre através da porcentagem passante na peneira de abertura 0,29 mm, segundo critério estabelecido na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017).

#### 4.5.2 Massa Unitária

Na Tabela 20 são apresentados os valores apurados nos ensaios de massa unitária do GC e do GR compilados.

**Tabela 20 - Massa unitária das amostras analisadas**

| Amostra | Limite mínimo da NBR 13207:2017 (kg m <sup>-3</sup> ) | Massa unitária (kg m <sup>-3</sup> ) | Número de amostras | p-valor               |
|---------|---|--------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| GC      | 600,00  | 688,22 (4,12)                        | 5                  | 2,55 10 <sup>-6</sup> |
| GR      | 600,00  | 657,37 (3,27)                        | 5                  |                       |

**Legenda: Valor médio (desvio padrão)**  
**Fonte: o autor.**

Os resultados de massa unitária obtidos para GR e GC são superiores ao valor mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) de 600 kg m<sup>-3</sup>, e aos reportados por Póvoas *et al.* (2014), Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018) de 649,38, 549,57, e 645,47 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente, em seus estudos com GR.

As amostras não atingiram os valores observados por Vimmrová *et al.* (2014) e Zhu *et al.* (2018) de 945 kg m<sup>-3</sup> e 880 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente. A principal hipótese da menor massa unitária verificada em relação a estes autores é a granulometria do material. Quanto menor a dimensão das partículas, menos vazios entre o material, e conseqüentemente, maior será a massa no mesmo volume. A segunda hipótese é porque estes autores reciclaram gesso comum, e não gesso proveniente de chapas

de gesso acartonado, que apresentam aditivos em sua composição, como amido, alumina, perlita e agentes espumantes.

Outra hipótese para o menor valor obtido 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, com grande volume de vazios entre eles. Tal fenômeno também foi observado por Bardella (2011) e Savi (2017).

Ambas as amostras apresentaram distribuição normal entre os dados do conjunto, e foram observadas diferenças significativas ( $p$ -valor =  $2,55 \cdot 10^{-6}$ ) entre as massas unitárias do GC e GR. Demonstrando-se que a massa unitária do GC é superior a do GR.

#### 4.5.3 Massa Específica

Na Tabela 21 são apresentados os valores obtidos no ensaio de massa específica das amostras de GC e GR.

**Tabela 21 - Massa específica das amostras analisadas**

| <b>Amostra</b> | <b>Massa específica<br/>(kg m<sup>-3</sup>)</b> | <b>Número de<br/>amostras</b> | <b>p-valor</b> |
|----------------|---|-------------------------------|----------------|
| GC             | 2567,59 (29,21)                                 | 5                             | 0,04187        |
| GR             | 2524,74 (22,39)                                 | 5                             |                |

**Legenda: Valor médio (desvio padrão)**

**Fonte: o autor.**

A amostra de GC apresentou massa específica pouco superior a amostra de GR, e atribuiu-se esta variação ao formato, dimensão e arranjo dos cristais. O valor obtido no ensaio de massa específica do GC foi inferior ao observado de  $2600 \text{ kg m}^{-3}$  por Bardella; Camarini (2011), Magallanes-Rivera *et al.* (2012), Moura *et al.* (2016) e Shiroma *et al.* (2016). O GR apresentou valor pouco inferior a  $2580$  e  $2570 \text{ kg m}^{-3}$  obtidos por Bardella; Camarini (2011) e Pinheiro (2011), respectivamente. Estes autores produziram GR a partir de resíduos de gesso comercial, compostos somente por gesso comum.

As amostras de GC e GR apresentam distribuição normal entre os dados do conjunto. Verificou-se que há diferenças significativas ( $p$ -valor =  $0,04187$ ) entre as massas específicas destas amostras e que massa unitária do GC é superior a do GR.

Estima-se que a inserção de aditivos no processo de produção das chapas de gesso acartonado possa ter influenciado o resultado da massa específica. No item 4.9.3 será explanado sobre os elementos químicos que compõem as duas amostras.

#### 4.5.4 Superfície Específica

Os valores obtidos para o ensaio de superfície específica das amostras de GC e de GR são apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22 - Superfície específica das amostras de GC e GR**

| Amostra | Superfície específica<br>(m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> ) | Número de amostras | p-valor |
|---------|---|--------------------|---------|
| GC      | 448,36 (20,74)  | 5                  | 0,00062 |
| GR      | 358,18 (25,90)  | 5                  |         |

**Legenda: Valor médio (desvio padrão)**  
**Fonte: o autor.**

Os resultados obtidos no ensaio para determinação da superfície específica das amostras comprovam que as partículas do GC são menores que as do GR, pois possuem maior superfície específica. A superfície específica do GC obtida nos ensaios foi superior àquela verificada por Camarini *et al.* (2016), Geraldo *et al.* (2017) e Zhu *et al.* (2018), que obtiveram 231, 309 e 281 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, respectivamente, demonstrando-se que a amostra de GC possuía maior finura, se comparada ao material utilizado por estes autores.

O GR possui menor área de superfície específica em relação ao GC. Moura *et al.* (2014) também observaram este tipo de comportamento em seus experimentos. Na presente pesquisa, atribuiu-se a redução da superfície específica primeiramente à granulometria do material, pois através de inspeção tátil foi possível observar partículas grossas ao toque, imperceptível na amostra de GC.

A superfície específica da amostra de GR resultou em valor superior aos obtidos por Camarini *et al.* (2016) e Geraldo *et al.* (2017) de 231 e 351 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Por outro lado, a superfície específica foi inferior ao valor encontrado por Zhu *et al.* (2018) de 416 m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup> que reciclou gesso proveniente de resíduos de placas de gesso comerciais, sem qualquer contaminação, aditivo ou papel de revestimento, diferente da origem do resíduo utilizado nesta pesquisa.

As amostras apresentaram distribuição normal entre os dados do conjunto, com diferenças significativas ( $p$ -valor = 0,00062) entre as superfícies específicas do GC e GR. Desta forma, afirma-se a superfície específica do GC é superior à do GR. Conhecidas as características físicas, no item 4.6 serão abordados os requisitos químicos do GC e do GR.

#### 4.6 Determinação dos requisitos químicos do gesso reciclado

Em 2017, na atualização da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) foram inseridos os requisitos químicos na classificação do gesso - água livre, água de cristalização, teor de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Na Tabela 23 são apresentados os valores da norma, assim como valores obtidos nos ensaios do GR e de GC.

**Tabela 23 - Requisitos químicos do gesso**

| Determinações químicas                | Limites da NBR 13207 (%) | Amostra | Limites (%)  | Número de amostras | p-valor               |
|---------------------------------------|--------------------------|---------|--------------|--------------------|-----------------------|
| água livre                            | ≤ 1,3                    | GC      | 1,19 (0,09)  | 5                  | 0,39043               |
|                                       |                          | GR      | 1,11 (0,17)  | 5                  |                       |
| água de cristalização                 | 4,2 a 6,2                | GC      | 5,90 (0,25)  | 5                  | 5,85 10 <sup>-6</sup> |
|                                       |                          | GR      | 4,40 (0,17)  | 5                  |                       |
| óxido de cálcio (CaO)                 | Mín 38                   | GC      | 41,37 (1,17) | 3                  | 0,00599               |
|                                       |                          | GR      | 34,54 (1,89) | 3                  |                       |
| anidrido sulfúrico (SO <sub>3</sub> ) | Mín 53                   | GC      | 46,57 (2,54) | 3                  | 0,00619               |
|                                       |                          | GR      | 42,35 (2,75) | 3                  |                       |

**Legenda: Valor médio (desvio padrão)**

**Fonte: o autor.**

Segundo o requisito químico apresentado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), a água livre presente no gesso deve apresentar valor máximo de 1,3%. As amostras de GR e de GC atenderam este valor, conforme pode ser observado na Tabela 23.

As amostras utilizadas para determinação da água livre apresentam distribuição normal, e não foram observadas diferenças estatísticas significativas ( $p$ -valor = 0,39043) entre os teores de água livre do GC e GR. Sendo assim, comprova-se que os teores de água livre do GC e GR são estatisticamente iguais.

Na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) é apresentado como requisito o intervalo de 4,2 a 6,2% para a água de cristalização presente no gesso. As duas

amostras atenderam este requisito. O GC e GR apresentaram distribuição normal dos dados, e com diferença significativa ( $p$ -valor =  $5,85 \cdot 10^{-6}$ ). O teor de água de cristalização das amostras de GC é maior se comparado às amostras de GR.

Na determinação do óxido de cálcio, o GC superou o mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), assim como nos estudos de Marmól *et al.* (2013) que apurou o teor de 43,26% e Medina *et al.* (2016) de 38,08%.

A amostra do GR por sua vez não atendeu o valor mínimo de 38%, assim como relatado por Chandara *et al.* (2009) que obtiveram o teor de óxido de cálcio de 37,00% e Mendonça *et al.* (2016) de 31,00%. Atribuiu-se o baixo valor do teor de óxido de cálcio à origem do material, proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado, que possuem impurezas e aditivos oriundos do processo de produção, como amido, alumina, perlita, e agentes espumantes.

As amostras indicaram distribuição normal dos resultados, e com diferenças significativas ( $p$ -valor = 0,00599) entre as amostras de GC e GR quanto ao teor de óxido de cálcio. Desta maneira afirma-se que o GC atende o requisito mínimo de 38% no teor de óxido de cálcio, diferentemente das amostras de GR que ficaram 3,46% abaixo deste limite.

Nenhuma das amostras atingiu o valor mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) de 53% de anidrido sulfúrico. Diversos autores descreveram não terem observado este valor mínimo, como Chandara *et al.* (2009), Mendonça *et al.* (2016) e Medina *et al.* (2016) que obtiveram 42,00, 43,21 e 44,52 % em seus estudos com GR. Os autores apontaram a falta de pureza observada nas amostras como principal fator.

Os resultados obtidos no ensaio de teor de anidrido sulfúrico apresentam distribuição normal, e com diferença estatística significativa ( $p$ -valor = 0,00619) entre as amostras de GC e GR. Analisando-se estatisticamente nenhuma das amostras atende os 53% mínimos de teor de anidrido sulfúrico estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017).

Segundo Santos (1996), caso o gesso não apresentasse qualquer tipo de impureza, como o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de magnésio ( $\text{MgCO}_3$ ) ou óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); e todo sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) fosse convertido em hemihidrato durante a calcinação da gipsita, seriam obtidos 6,21% de água combinada, 38,62% de óxido de cálcio e 55,17% de anidrido sulfúrico. Porém, durante o processo



de calcinação, observa-se que nem todo di-hidrato é convertido em hemi-hidrato. Assim como dificilmente encontra-se gipsita com 100% de pureza na natureza.

Não foi observada presença de magnésio, dióxido de carbono e alumínio durante a execução do ensaio de EDS na amostra de GC. Estes elementos são apontados pela literatura como impurezas oriundas da calcinação da gipsita. Na amostra de GR por sua vez foi verificado silício e alumínio no ensaio de EDS, oriundos de aditivos utilizados no processo de produção das chapas de gesso acartonado. Desta forma, justifica-se parcialmente o baixo teor de CaO e SO<sub>3</sub> determinados nos ensaios químicos.

O ensaio de EDS deve ser utilizado de maneira qualitativa, pois analisa uma pequena área da amostra analisada. Os resultados do ensaio de DRX confirmaram que os baixos teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico estão relacionados a impurezas e presença de di-hidratos não convertidos em hemi-hidratos durante a calcinação, conforme será discutido no item 4.9.3.

Bardella (2011) cita que quanto maior a temperatura de calcinação, menor o teor de água de cristalização presente no gesso, o que desequilibra a estequiometria dos elementos, e gera menos CaO e SO<sub>3</sub>.

A NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) poderia ser revista, pois em duas etapas do procedimento para determinação do óxido de cálcio é descrita a expressão “adicionar algumas gotas”, sem deixar claro o volume ou quantidade a ser adicionada à solução. No mesmo ensaio há descrição na norma NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) de “aquecer à ebulição”, sem indicar a temperatura ou o tempo de fervura.

Não há descrição na norma NBR 12130 (ASSOCIAÇÃO..., 2019) quanto à indicação da temperatura a ser utilizada no banho-maria, durante o ensaio de determinação do óxido de cálcio. Também não há descrição da temperatura utilizada para lavar a amostra com água e com solução de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (20 g L<sup>-1</sup>) até a eliminação de cloretos.

Finalizados os ensaios do material no estado pulverulento, no item 4.7 são descritos os resultados obtidos nos ensaios do estado fresco.

## 4.7 Propriedades dos materiais no estado fresco

No estado fresco são abordados os resultados obtidos na preparação da pasta, na determinação da consistência normal e a classificação segundo o tempo de início e fim de pega do GR e do GC.

### 4.7.1 Consistência normal

No ensaio de consistência normal, obteve-se a relação a/g de 0,7 para o GR e 0,6 para o GC, as quais foram utilizadas na moldagem dos corpos de prova de cada material.

Observou-se que a consistência normal do GR é maior que para o GC, pois o GR tem menor superfície específica e maior volume de vazios em relação ao GC. Portanto, é necessário excesso de água livre para envolver a superfície das partículas e preencher os vazios entre as partículas, a fim de alcançar a consistência normal (ERBS *et al.*, 2018; ZHU *et al.*, 2018).

De maneira geral durante a preparação da pasta, as amostras de GR apresentavam aspecto mais pastoso, se comparado ao aspecto mais fluido das amostras de GC. Confirma-se que as pastas de GR demandam de mais água para hidratação (RIBEIRO, 2011; ERBS *et al.*, 2015; SAVI, 2017). A relação a/g de 0,7 utilizada na moldagem de corpos de prova de GR é comumente utilizada em obras, assim como também foi a relação a/g utilizada nos estudos de Roque *et al.* (2005), Pinheiro (2011), Ribeiro (2011), Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018).

### 4.7.2 Tempo de pega

Segundo a NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), para o gesso ser classificado como de fundição, o tempo de início de pega deve ser menor ou igual a 10 minutos e o fim de pega menor ou igual a 20 minutos. Para ser classificado como gesso de revestimento sem aditivos, o início de pega deve ser maior ou igual a 10 minutos e o fim maior ou igual a 35 minutos. Na Tabela 24 são resumidos os valores de início e fim de pega obtidos nas amostras de GC e GR.

**Tabela 24 – Tempo de início e fim de pega das amostras analisadas**

| Classificação do gesso                    | Tempo de pega (min)<br>(NBR 13207) |                 | Número de amostras | p-valor                |
|---|------------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------|
|   | Início                             | Fim             |                    |                        |
| Gesso para fundição                       | ≤ 10                               | ≤ 20            | -                  | -                      |
| Gesso para revestimento<br>(sem aditivos) | ≥ 10                               | ≥ 35            | -                  | -                      |
| GC  | 6:50<br>(0:40)                     | 18:30<br>(0:39) | 5                  | 5,43 10 <sup>-8</sup>  |
| GR  | 15:45<br>(0:46)                    | 48:25<br>(1:44) | 5                  | 3,70 10 <sup>-10</sup> |

**Legenda: Valor médio (desvio padrão)**

**Fonte: o autor.**

A amostra de GC, adquirida no mercado local como gesso rápido para fundição, mais comumente comercializado, atendeu os patamares estipulados na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), o que confirma sua classificação segundo o requisito tempo de pega.

A amostra de GR atendeu os dois parâmetros de tempo de início e fim de pega para gessos de revestimento simultaneamente, o que também foi relatado por Bardella; Camarini (2011) em ensaios com GR. Atribui-se o início de pega do GR ser posterior em relação ao GC devido à relação a/g, pois quanto maior a quantidade de água de amassamento, maior será o período de indução e retardo no início da precipitação dos cristais de di-hidrato, aumentando-se o tempo de pega (BARDELLA, 2011).

Inicialmente as pastas não apresentavam endurecimento, pois a agulha do aparelho não encontrava resistência para penetrar a pasta e chegar à base. Após o início de pega, no caso do GR 15 minutos e 45 segundos, as pastas ganhavam viscosidade e prendiam a agulha por atrito lateral, o que confirma o início de pega, permanecendo desta forma até o fim de pega, onde a agulha não penetrava na pasta pois esta estava totalmente enrijecida.

Outro aspecto referente ao retardamento do início e fim de pega do GR é o formato dos cristais (CAMARINI *et al.*, 2016). O endurecimento do gesso é dado pelo crescimento e entrelaçamento dos cristais. De maneira geral, os cristais de GR são ortorrômbicos, o que dificulta o entrelaçamento e retarda o início e o fim de pega, se comparados aos de GC que possuem formato de agulhas e apresentam maior comprimento depois da hidratação.

A granulometria do material também exerce influência no tempo de pega, visto que a hidratação do material ocorre da superfície para o interior. Logo, materiais de

tamanho maiores, precisam de mais tempo para hidratar, como é o caso da amostra do GR em relação à do GC.

Foi possível observar a mudança na coloração nas amostras do GR no fim do processo de pega, assim como apontado por Erbs *et al.* (2018), conforme pode ser observado na Figura 54.

**Figura 54 – Coloração característica do GR**



**Fonte: o autor.**

A hipótese sobre a mudança de coloração do GR é a presença de partículas de papel cartão aderidas nas partículas do GR, pois tal coloração não foi observada nos ensaios com GC. Erbs *et al.* (2018) observaram a presença de partículas de papel cartão durante a realização do ensaio de MEV, conforme relatado no item 4.1, confirmando-se a hipótese da mudança de coloração.

As amostras do GC e GR, no ensaio de início de pega e fim de pega, apresentam distribuição normal entre os elementos das amostras analisadas. Foi obtida diferença significativa ( $p\text{-valor} = 5,43 \cdot 10^{-8}$ ) entre as amostras do GC e GR nos ensaios de início e de fim de pega ( $p\text{-valor} = 3,70 \cdot 10^{-10}$ ). Sendo assim comprova-se estatisticamente que há diferenças entre o comportamento das amostras de GC e GR quanto ao requisito de início e fim de pega. No item 4.8 serão discutidos os resultados obtidos pelos corpos de prova no estado endurecido.

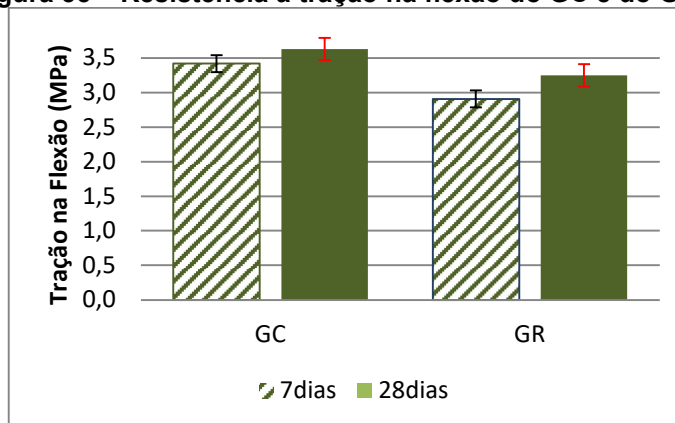
## 4.8 Propriedades da pasta no estado endurecido

Neste item são abordadas as características mecânicas observadas nos ensaios de tração na flexão, compressão axial, dureza superficial e aderência para amostras do GC e de GR.

### 4.8.1 Resistência à tração na flexão

O ensaio de tração na flexão não é regulamentador em qualquer norma brasileira para classificação do gesso, e desta forma, optou-se em utilizar o valor mínimo de 2 MPa apontado na norma espanhola UNE-EN 13279-1:2006 para os ensaios de tração na flexão das amostras. Os valores encontrados nos ensaios do GC e GR são apresentados na Figura 55.

Figura 55 – Resistência à tração na flexão do GC e do GR



Fonte: o autor.

Se fosse utilizado o critério mínimo de resistência à tração na flexão, as amostras de GC e GR atenderiam o valor especificado na norma europeia UNE-EN 13279-1:2006 de 2,0 MPa.

Todas as amostras apresentaram acréscimo em seus valores de resistência à tração na flexão de 7 para 28 dias. As amostras do GC, moldadas com relação a/g de 0,6 obtiveram resultados superiores se comparadas com as do GR, moldadas com relação a/g 0,7.

As amostras do GC moldadas com relação a/g 0,6 não atingiram os valores obtidos por Serna *et al.* (2012), Yakovlev *et al.* (2015) e Zhixin *et al.* (2016) de 5,11, 4,20 e 5,29 MPa, respectivamente, aos 28 dias.

As amostras de GR apresentaram valores muito próximos aos obtidos por Jiménez-Rivero *et al.* (2014) de 3,20 Mpa e Suárez *et al.* (2016) de 3,10 MPa. Os valores para o GR foram superiores aos valores obtidos por Bardella; Camarini (2011); Savi (2017) e Erbs *et al.* (2018) de 2,90, 2,90 e 2,53 MPa, respectivamente, nos ensaios de resistência à tração na flexão, que utilizaram relações a/g de 0,7 em seus estudos. Guan *et al.* (2011) e Zhu *et al.* (2018) relatam valores de 3,40 e 3,90 MPa, porém, estes autores utilizaram gesso reciclado provenientes de resíduos gesso comum, não de resíduos de chapas de gesso acartonado como proposto no trabalho.

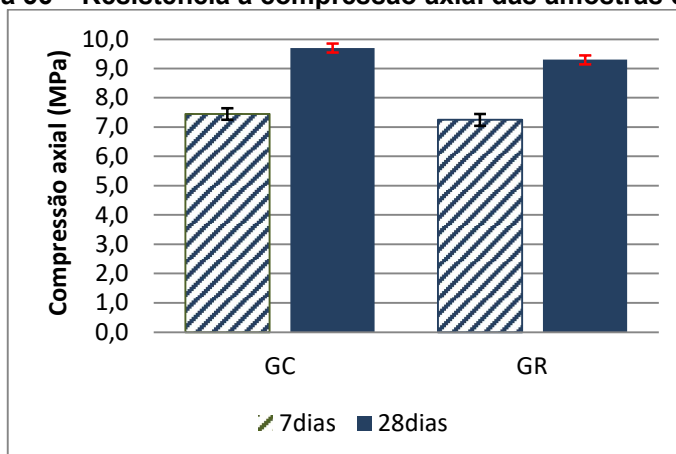
Os conjuntos de dados analisados estatisticamente, da amostra do GC com período de cura de 7 e 28 dias, assim como a amostra do GR com o mesmo tempo de cura apresentam distribuição normal.

Ao comparar as amostras do GC e GR com tempo de cura de 7 dias, observou-se diferença significativa ( $p$ -valor = 0,00065) entre as amostras de GC e GR. Com relação às amostras com período de cura de 28 dias, não foi verificada diferença significativa entre estas amostras ( $p$ -valor = 0,10409). Conclui-se que no requisito tração na flexão as amostras de GC e GR apresentam resistências similares estatisticamente.

#### 4.8.2 Resistência à compressão

Na Figura 56 são representados valor de resistência à compressão axial com a utilização da Equação 9, apresentada no item 3.5.5.

Figura 56 – Resistência à compressão axial das amostras do GC e GR



Fonte: o autor.

Após a atualização da NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), em 2017, o requisito mecânico de compressão axial não é mais utilizado para classificação do gesso. Na versão anterior, a NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994), o valor mínimo estipulado no critério da compressão axial era de 8,4 MPa. Caso fosse considerado este critério de 1994, tanto as amostras do GC quanto as do GR atenderiam o valor mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 1994) de 8,4 MPa aos 28 dias.

A amostra do GC apresentou valores de resistência à compressão axial inferiores aos observados por Serna *et al.* (2012), Vimrová *et al.* (2014) e Zhixin *et al.* (2016) de 9,80, 12,00 e 13,08 MPa, respectivamente, e superior ao encontrado por Yakovlev *et al.* (2015) de 9,00 MPa, moldados com a mesma relação a/g. Se comparada a amostra fabricada com a relação a/g 0,6 com os autores que realizaram ensaios de compressão axial com relação 0,7 a amostra do GC superou todos os autores comparados, com exceção de Dai; Fan (2015) que obtiveram 10,59 MPa. Desta forma comprova-se que o aumento da relação a/g tende a diminuir os resultados da compressão axial.

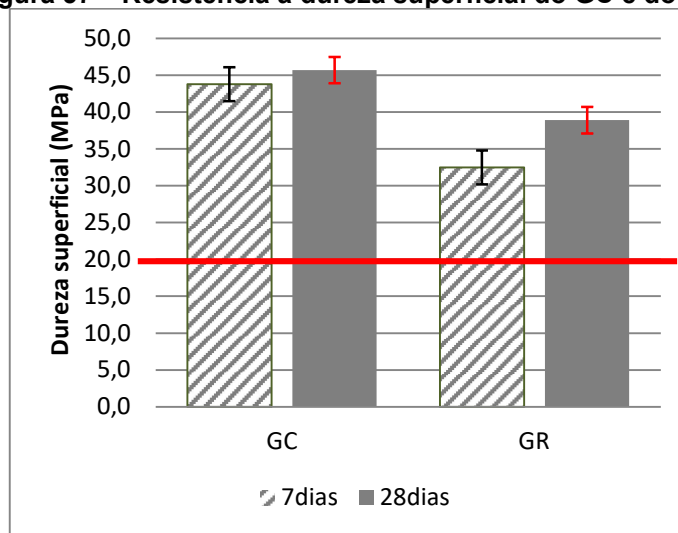
Segundo Barbosa *et al.* (2014), maiores teores de anidrido sulfúrico resultam em maior quantidade de produtos hidratados e, portanto, em maior densidade e resistência à compressão. Embora as amostras tenham apresentado teores de SO<sub>3</sub> abaixo do mínimo estipulado na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017), as amostras do GR, moldadas com relação a/g 0,7 apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores aos descritos por Cardoso *et al.* (2009), Bardella; Camarini (2011), Lima; Camarini (2011), Serna *et al.* (2012), Moura *et al.* (2014), Dai; Fan (2015), Erbs *et al.* (2018) e Zhu *et al.* (2018) de 8,9 MPa, 6,1 MPa, 8,20 MPa, 7,54 MPa, 4,20 MPa, 8,68 MPa, 9,24 e 9,20 MPa, respectivamente, aos 28 dias.

Com relação à análise estatística, os grupos de amostras do GC e GR, com tempo de cura de 7 e 28 dias apresentam distribuição normal. Não foram verificadas diferenças significativas (p-valor = 0,18903) aos 7 dias de cura, demonstrando-se que as amostras atingem valores similares. Aos 28 dias de cura, foram observadas diferenças significativas (p-valor = 0,01586). Pode-se afirmar que a amostra de GC apresenta incremento superior de resistência aos 28 dias, visto que estatisticamente a resistência à compressão axial entre as amostras de GC e GR aos 7 dias são estatisticamente semelhantes.

### 4.8.3 Dureza Superficial

Os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial dos corpos de prova moldados com GC e GR são apresentados na Figura 57.

**Figura 57 – Resistência à dureza superficial do GC e do GR**



**Legenda:** — limite mínimo estipulado na NBR 13207:2017

**Fonte:** o autor.

As amostras ensaiadas atendem o valor mínimo de dureza superficial descrito na NBR 13207 (ASSOCIAÇÃO..., 2017) de 20 N mm<sup>-2</sup>, aos 7 e 28 dias, representado pela linha vermelha na Figura 56. A amostra do GC moldada com relação a/g de 0,6 atingiu valores inferiores aos obtidos por Serna *et al.* (2012) e Medina *et al.* (2016) de 82,50 e 58,00 N mm<sup>-2</sup>, respectivamente.

A dureza superficial de 38,90 N mm<sup>-2</sup> da amostra GR foi superior a 31,20 N mm<sup>-2</sup> encontrado por Lima; Camarini (2011), 31,12 N mm<sup>-2</sup> por Moura *et al.* (2014) e 32,03 N mm<sup>-2</sup> por Erbs *et al.* (2018).

Todos os resultados obtidos no ensaio de dureza superficial, aos 7 e 28 dias de cura, para as amostras de GC e GR apontam distribuição normal. Estas amostras também apresentam diferenças estatísticas significativas entre si aos 7 dias ( $p = 4,91 \cdot 10^{-5}$ ) e aos 28 dias de cura ( $p = 4,91 \cdot 10^{-5}$ ). Comprova-se estatisticamente que as amostras de GC apresentam valores de dureza superficial superiores às de GR.



#### 4.8.4 Aderência

Os resultados obtidos no ensaio de resistência de aderência a tração foram compilados e são demonstrados na Tabela 25.

**Tabela 25 - Resistência de aderência a tração**

| Amostra | Limite mínimo da NBR 13528:2010 (MPa) | Substrato         | Aderência à tração (MPa) | Espessura do revestimento (mm) | Número de amostras | p-valor |
|---------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------|---------|
| GC      | 0,2                                   | Bloco de concreto | 0,28 (0,06)              | 4,80                           | 12                 | 0,82150 |
| GR      |                                       |                   | 0,27 (0,05)              | 4,65                           | 12                 |         |
| GC      | 0,2                                   | Bloco cerâmico    | 0,10 (0,02)              | 5,17                           | 12                 | 0,00069 |
| GR      |                                       |                   | 0,08 (0,01)              | 5,07                           | 12                 |         |

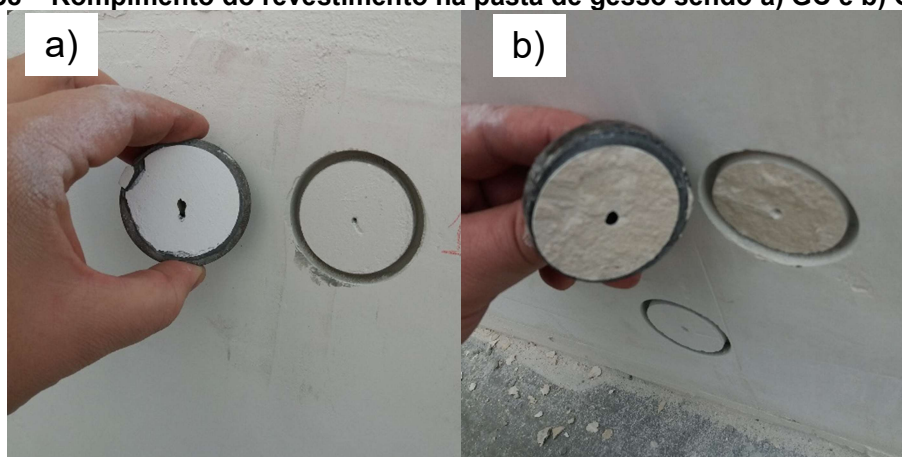
**Legenda: valor médio (desvio padrão)**

**Fonte: o autor.**

Com relação à resistência de aderência a tração observou-se que as amostras do GC e GR atendem o requisito mínimo estipulado na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) de 0,2 MPa, quando o revestimento é aplicado sobre a parede executada com blocos de concreto.

As doze amostras do GC, assim como as doze amostras do GR ensaiadas na parede de concreto romperam na pasta de gesso, o que indica forte conexão entre a pasta e o substrato, como pode ser verificado na Figura 58.

**Figura 58 – Rompimento do revestimento na pasta de gesso sendo a) GC e b) GR**



**Fonte: o autor.**

A resistência de aderência à tração do GC e GR na parede executada com blocos cerâmicos atingiu somente 0,10 e 0,08 MPa, respectivamente, inferior a 0,2

MPa mínimos estipulado na NBR 13528 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Todas as amostras do GC, assim como onze amostras do GR apresentaram ruptura no substrato, como pode ser visualizado na Figura 59.

**Figura 59 – Rompimento do substrato da parede executada com blocos cerâmicos sendo a) GC e b) GR**



Fonte: o autor.

Como as amostras do GC e GR ensaiadas sobre o substrato de concreto atingiram 0,28 e 0,27 MPa, respectivamente, afirma-se que a resistência do bloco cerâmico utilizado no substrato foi inferior à resistência à tração da pasta das amostras de GC e GR. Estes valores resultaram inferiores a 0,55 e 0,40 MPa obtidos por Morales-Conde *et al.* (2016) e Merino *et al.* (2018), respectivamente, que aplicaram GC sobre um substrato com chapisco, o que fortaleceu a aderência entre a camada de gesso e a superfície.

Araújo *et al.* (2016) obtiveram 0,15 MPa na resistência de aderência à tração em amostras de GC aplicadas sobre substrato de bloco cerâmico, superior a 0,10 MPa observado nesta pesquisa. Estes autores utilizaram resina sintética entre o gesso e o substrato, justificando o incremento da resistência.

As amostras do GC e GR apresentaram distribuição normal entre os dados no substrato de bloco de concreto e de bloco cerâmico. As amostras de GC e GR no ensaio de resistência de aderência à tração na superfície executada com blocos de concreto, não apresentam diferenças estatísticas significativas (p-valor = 0,8215). Afirma-se que a resistência de aderência à tração do GC e do GR são similares estatisticamente. Diferente do revestimento do GC e GR executado sobre substrato de blocos cerâmicos, onde foram notadas diferenças significativas (p-valor = 0,00069). Porém, como o rompimento ocorreu no substrato de bloco cerâmico, seria imprudente

afirmar que a aderência do GC é superior à do GR, visto que no substrato executado com blocos de concreto ambos apresentam valores estatisticamente semelhantes.

Finalizados os ensaios de resistência mecânica, serão discutidas a microestrutura e a composição química do GC e do GR no item 4.9.

#### 4.9 Microestrutura e composição química

As análises da microestrutura e da composição química podem ser utilizadas para explicar alguns dos resultados obtidos nas caracterizações prévias, do GC e do GR nos estados pulverulento, fresco e endurecido.

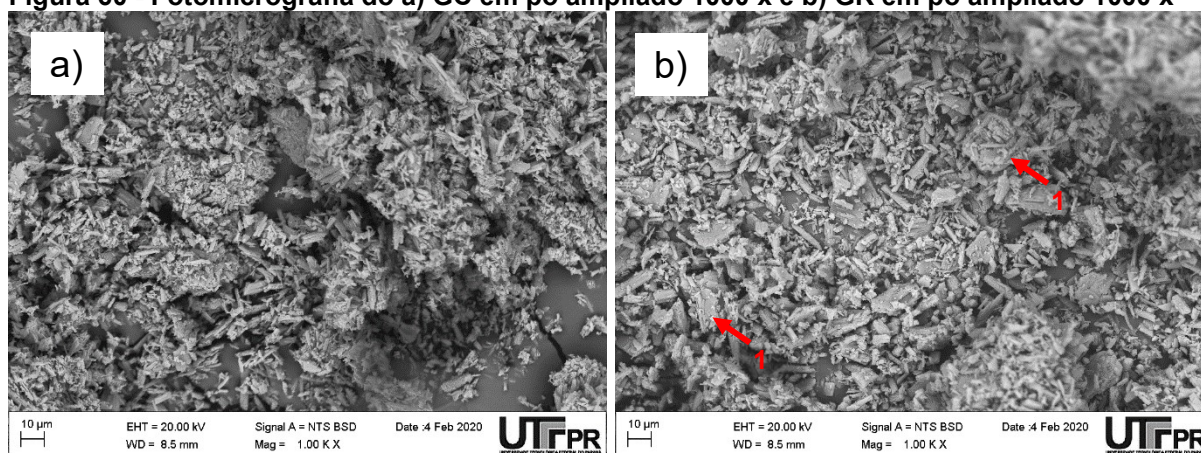
##### 4.9.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a observação morfológica das partículas do GC e do GR no estado pulverulento e endurecido após 28 dias de cura.

As fotomicrografias devem ser utilizadas de maneira qualitativa, pois representam pequenas porções da amostra. Para confirmação da morfologia deve ser utilizado o ensaio de DRX (CAPRARO *et al.*, 2017), apresentado no item 4.9.3.

Na Figura 61 é apresentada a micrografia das partículas do GC e GR na forma de pó, utilizando-se ampliação de 1000 x.

Figura 60 - Fotomicrografia do a) GC em pó ampliado 1000 x e b) GR em pó ampliado 1000 x

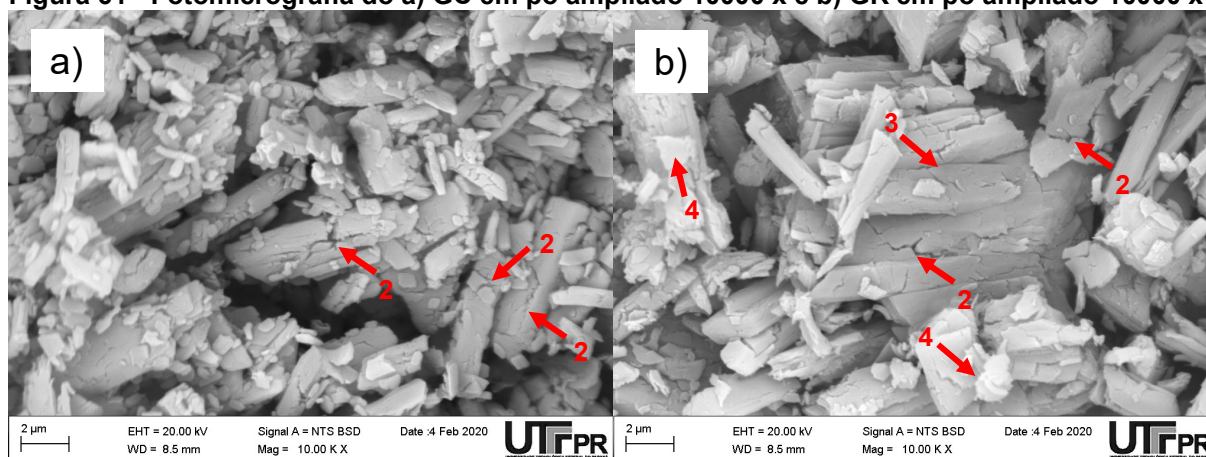


Fonte: o autor.

Observa-se na Figura 60a que as partículas do GC possuem formato de agulhas, uniformes e com pequenas dimensões. Visualiza-se na Figura 61b que as partículas do GR possuem formatos heterogêneos, partículas lamelares com maiores dimensões (1) dispersos entre partículas menores em forma de agulhas.

Na ampliação máxima de 10000 x foram verificados os cristais do GC e GR, conforme apresentado na Figura 61.

**Figura 61 - Fotomicrografia do a) GC em pó ampliado 10000 x e b) GR em pó ampliado 10000 x**



Fonte: o autor.

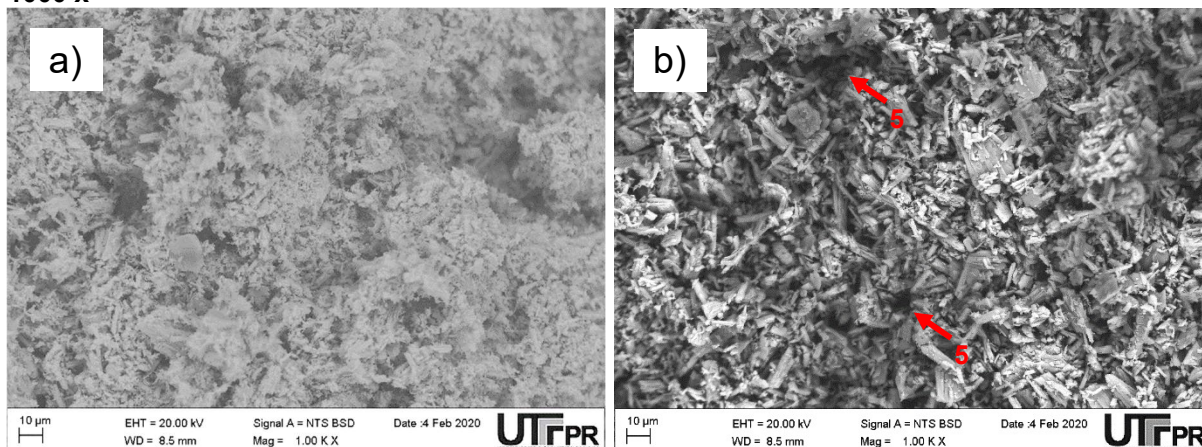
Os cristais do GC apresentaram comprimento médio de 6,3  $\mu\text{m}$ , com variação entre 4,3 a 8,2  $\mu\text{m}$  e largura média de 0,8  $\mu\text{m}$ . Estes cristais são formados por cálcio, enxofre e oxigênio, demonstrando-se a pureza da amostra.

Fraturas são observadas nos cristais do GC e GR (2). As duas hipóteses mais prováveis são esforços mecânicos provenientes do processo de trituração ou evaporação da água de cristalização durante a calcinação do material. Tais fraturas nos cristais do GR haviam sido reportadas anteriormente por Bardella; Camarini (2011) e Erbs *et al.* (2015).

Observa-se na Figura 61b presença de cristais grandes (3), com 12,1  $\mu\text{m}$  de comprimento por 6,7  $\mu\text{m}$  de largura envolvidos por pequenos cristais de 5,3  $\mu\text{m}$  de comprimento por 0,9  $\mu\text{m}$  de largura. Os pontos mais claros nas fotomicrografias representam materiais mais densos (4), como silício e alumínio.

Após a hidratação é possível observar morfologias distintas nos cristais do GR e GR decorridos 28 dias de cura, conforme demonstrado na Figura 62 com ampliação de 1000 x.

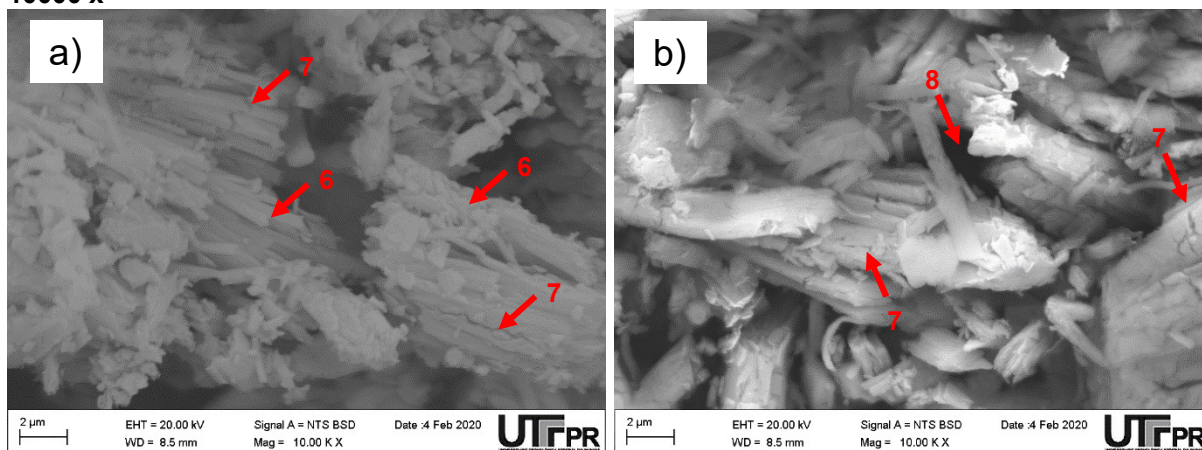
**Figura 62 - Fotomicrografia do a) GC hidratado ampliado 1000 x e b) GR hidratado ampliado 1000 x**



Fonte: o autor.

Na Figura 62a, referente ao GC hidratado, observa-se composição homogênea, entrelaçada e compacta. Na Figura 62b, do GR, nota-se cristais de diferentes dimensões, assim como vazios na matriz, caracterizados por pontos escuros (5). Constata-se grande diferença entre os cristais do GC e GR hidratados com ampliação de 10000 x (Figura 63).

**Figura 63 - Fotomicrografia do a) GC hidratado ampliado 10000 x e b) GR hidratado ampliado 10000 x**



Fonte: o autor.

Após a hidratação, os cristais do GC se aglomeram e formam grandes cadeias de cristais. Na Figura 63a, referente à amostra GC, é possível observar a aglutinação dos cristais, e que alguns cristais (6) mantêm contato direto entre si. Observa-se a formação de grandes núcleos, entrelaçamento dos cristais e preenchimento de toda matriz.

Observa-se fratura nos cristais das duas amostras (7), oriundas da evaporação da água de emassamento ou provenientes da moagem realizada para preparação das amostras para o ensaio do MEV.

As partículas do GC apresentam formato de agulhas alongadas, com comprimento médio dos cristais de 50,1  $\mu\text{m}$ . Na Figura 63b, é possível observar partículas menores, de 15,10  $\mu\text{m}$  de comprimento médio, desorganizadas e espalhadas ao longo da matriz na amostra do GR.

A fotomicrografia do GC demonstra formação de aglomerados de microcristais de forma alongada, com dimensões variadas, morfologicamente semelhante às fotomicrografias reportadas por Lewry; Williamson (1994), Gmouh *et al.* (2003), Guan *et al.* (2011) e Zhou *et al.* (2015).

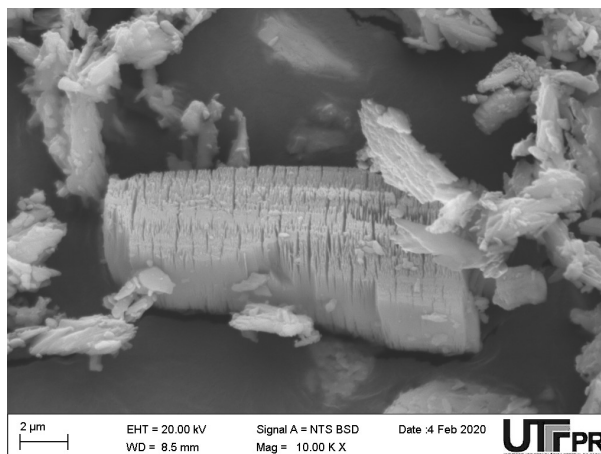
Nas amostras do GR os cristais possuem formas ortorrômbricas, diferente dos cristais observados no GC. Há formação de agulhas, porém, não tão desenvolvidas quanto às observadas para os gessos comerciais, o que dificulta seu entrelaçamento. Observam-se pequenos cristais e volume de vazios espalhados pela matriz (8).

De maneira geral, após a hidratação, os cristais que compõem o GR são menores se comparados aos do GC, e há mais espaços entre os cristais, o que indica maior porosidade na amostra.

Foi observada a presença de enxofre, cálcio e oxigênio na amostra hidratada de GC e de GR. Além destes elementos, observou-se na amostra de GR a presença de silício e alumínio oriundos de aditivos utilizados na produção de chapas de gesso acartonado.

Notou-se durante o ensaio MEV um cristal peculiar na amostra do GC, que apresenta diversos canais de evaporação de água em sua superfície, oriundos da cura ou do processo de preparação das amostras, que pode ser visualizado na Figura 64.

**Figura 64 - Fotomicrografia dos canais de evaporação da água presente no gesso comum ampliado 10000 x**



**Fonte: o autor.**

Descrita a morfologia dos cristais, no item 4.9.2 será abordado sobre a composição química do GC e do GR através do ensaio de espectrômetro de dispersão de energia.

#### 4.9.2 Composição química

Na análise qualitativa do EDS foi determinada a composição química dos elementos presentes nas amostras, conforme pode ser observado na Tabela 26.

**Tabela 26 - Composição química do GC e GR determinada através do EDS**

| Amostra | Elementos Químicos (%) |             |             |               |              | Total (%) |
|---------|------------------------|-------------|-------------|---------------|--------------|-----------|
|         | oxigênio (O)           | enxofre (S) | cálcio (Ca) | alumínio (Al) | silício (Si) |           |
| GC      | 31,10                  | 30,67       | 38,23       | -             | -            | 100,00    |
| GR      | 28,59                  | 31,35       | 39,40       | 0,34          | 0,32         | 100,00    |

**Fonte: o autor.**

As composições encontradas foram similares às apontadas na literatura, em que prevalecem oxigênio, cálcio e enxofre, como também verificado por Yu; Brouwers (2011). Nas amostras, a porcentagem do cálcio é ligeiramente superior à do enxofre, confirmando-se que estes dois minerais são os mais relevantes na composição da partícula de gesso.

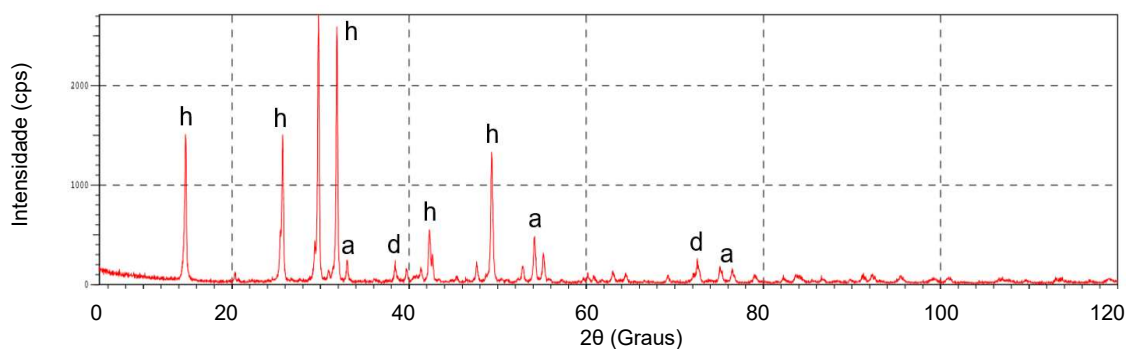
Observaram-se elementos diferentes nas amostras do GR devido aos aditivos utilizados durante o processo de produção das chapas de gesso acartonado. Atribuiu-se a presença do alumínio derivado de produtos à base de alumina ( $Al_2O_3$ ). A

observação do silício tem como origem produtos à base de perlita ( $\text{SiO}_2$ ), componente utilizado como agente espumante, gerador de porosidade no processo de produção das chapas de gesso acartonado.

#### 4.9.3 Difratometria de raio-X

O resultado do difratograma de raio-X da amostra do GC na forma de pó, antes da hidratação é apresentado na Figura 65.

**Figura 65 – Difrátograma do GC em pó.**



**Legenda: a) anidrita, d) di-hidrato e h) hemi-hidrato.**

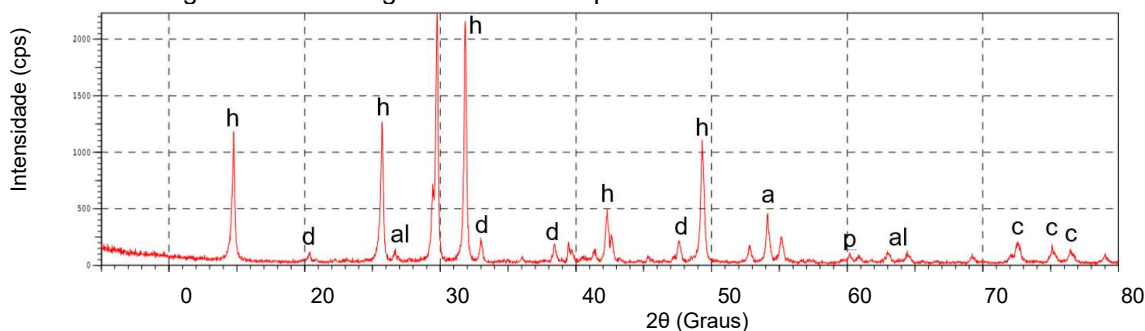
**Fonte: o autor.**

Observa-se no DRX do gesso comercial picos característicos de hemi-hidrato e anidrita, porém, aponta-se presença de di-hidrato, partículas de gipsita que não se desidrataram durante a calcinação. Tal fenômeno ocorre devido à baixa temperatura durante a calcinação, inferior a  $160\text{ }^\circ\text{C}$ , assim como o menor tempo de permanência durante a desidratação, geralmente inferior a uma hora.

Outra hipótese para a presença de di-hidratos na amostra é a quantidade de material no forno durante a calcinação, supostamente excessiva, visto que a queima acontece de fora para dentro, assim o material mais externo calcina, e preserva o material mais interno. Há diferenças significativas se comparado ao GR, Figura 66.



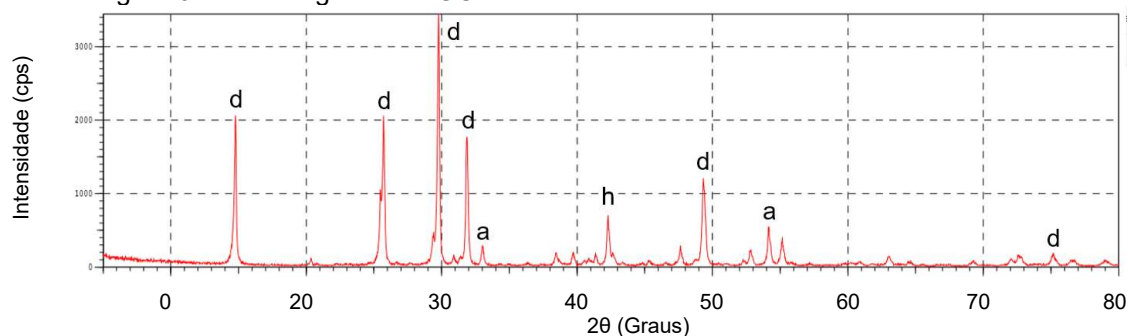
Figura 66 – Difratoograma do GR em pó



**Legenda: a) anidrita, al) alumina, c) celulose, d) di-hidrato, h) hemi-hidrato e p) perlita**  
**Fonte: o autor.**

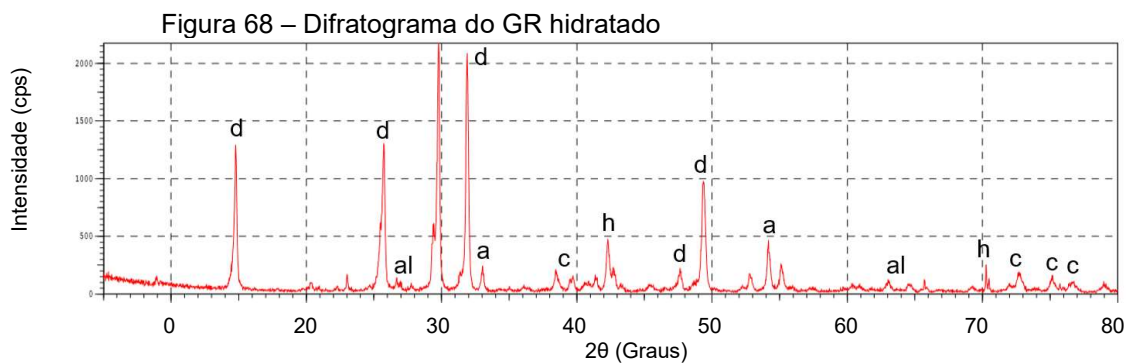
Na amostra em pó do GR, além das partículas presentes no GC, observa-se picos de alumina e perlita, oriundos de aditivos utilizados no processo de produção da chapa de gesso acartonado. Captaram-se também picos referentes à celulose, com origem no papel cartão de revestimento das chapas de gesso acartonado. Confirma-se desta forma que a coloração marrom, característica da hidratação do GC é resultante destas partículas de papel cartão que se unem às partículas de gesso. Na Figura 67 é apresentado o difratograma do GC hidratado.

Figura 67 – Difratoograma do GC hidratado



**Legenda: a) anidrita, d) di-hidrato e h) hemi-hidrato.**  
**Fonte: o autor.**

É possível visualizar na amostra do GC os picos de di-hidrato, oriundos da hidratação do hemi-hidrato. Há presença de hemi-hidrato, decorrente da não conversão de todo hemi-hidrato em di-hidrato. Tais aspectos também foram observados por Ahmed *et al.* (2011) e Medina *et al.* (2016). Observam-se picos de anidrita, possivelmente resultantes do estado pulverulento. O difratograma da amostra de GR hidratado é apresentado na Figura 68.



Legenda: a) anidrita, al) alumina, c) celulose, d) di-hidrato e h) hemi-hidrato

Fonte: o autor.

Assim como observado na amostra do GC, na amostra do GR há presença de partículas de di-hidrato, comprovando-se a reversibilidade da reação de calcinação e hidratação. Nesta amostra foi verificada presença de hemi-hidrato não convertido assim como observado por Moura *et al.* (2016) em seus estudos com GR. Há presença de alumina e celulose na amostra hidratada, comprovando que há presença de impurezas, conforme apontado nos ensaios do EDS.

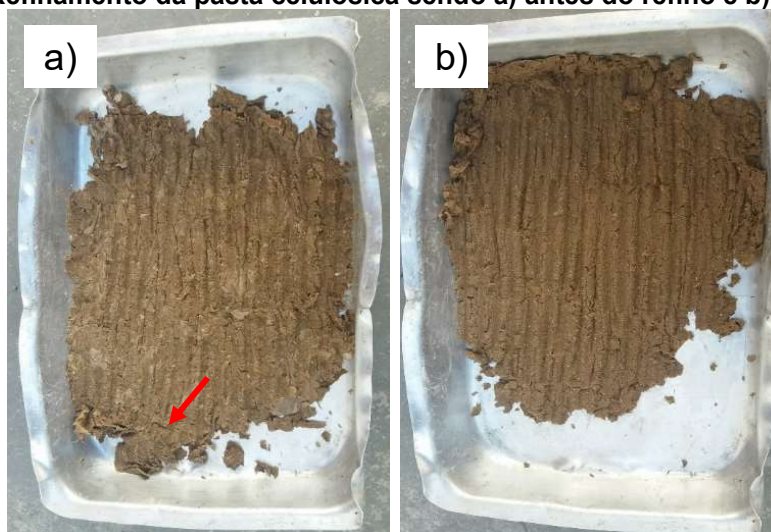
Caracterizado o GC e o GR, no item 4.10 são descritos os resultados obtidos na produção do papel cartão reciclado oriundo do resíduo de papel cartão utilizado na pesquisa.

## 4.10 Papel cartão reciclado

### 4.10.1 Considerações sobre o processo de preparo da pasta celulósica

O refinamento da pasta celulósica foi realizado estirando-se a pasta celulósica úmida com um martelo de madeira corrugado. Foi possível perceber visualmente a desagregação da pasta celulósica, conforme pode ser observado na Figura 69.

**Figura 69 – Refinamento da pasta celulósica sendo a) antes do refino e b) após o refino**



**Fonte: o autor.**

A utilização da argamassadeira modelo I-3010 da marca Contenco no lugar do desagregador de pasta celulósica pode não ter sido a ideal, pois era possível observar pedaços de papel que não foram desagregados totalmente mesmo após as 1000 rotações, como apontado pela seta vermelha na Figura 69a.

Assumiu-se que a mesma força aplicada nos golpes, assim como distribuída em toda amostra de pasta celulósica úmida. Após o segundo processo de desagregação (1000 rotações) e nova filtragem foi determinado o teor de massa seca da pasta de celulose, que resultou em 32,54%.

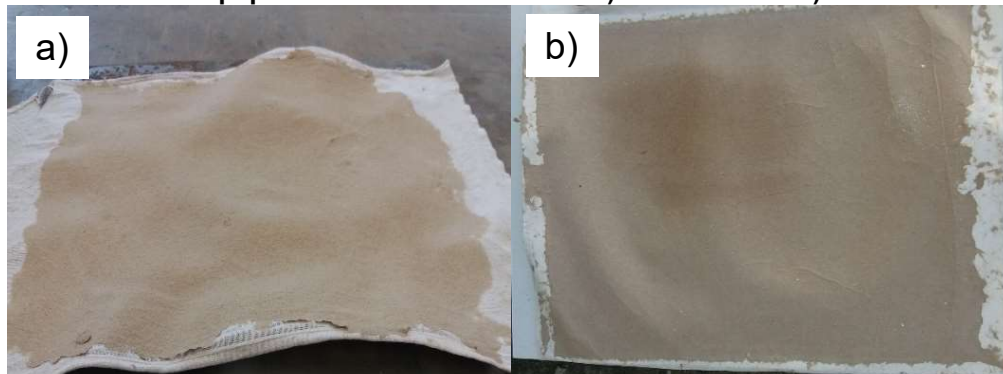
#### 4.10.2 Formação de folhas de papel cartão reciclado

Observou-se durante o processo de formação da folha de celulose reciclada que a moldura de madeira utilizada para fixação da tela metálica deveria ser substituída por uma moldura metálica. Durante o processo, a madeira tendia a flutuar depois de submersa, além de emergir inclinada em relação à superfície da suspensão, gerando-se uma folha desigual e com falhas (setas vermelhas na Figura 70).

**Figura 70 – Formação da folha úmida com falhas**

Fonte: o autor.

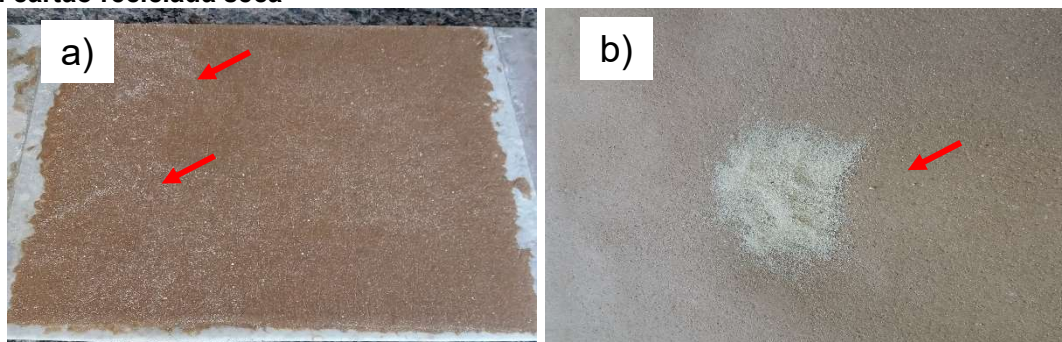
Após a prensagem, o papel absorvente era fixado à chapa metálica com fita adesiva. Mesmo após várias tentativas de fixação do papel absorvente, após a cura o papel entortava significativamente. Foi possível obter folhas recicladas mais planas com secagem à sombra, Figura 71.

**Figura 71 – Folha de papel cartão reciclada sendo a) seca ao sol e b) seca à sombra**

Fonte: o autor.

Durante o processo de formação das folhas de papel reciclado observaram-se partículas de gesso junto às folhas de papel cartão reciclado, demonstradas através das setas vermelhas, que eram facilmente removidas com utilização de uma escova com cerdas macias, Figura 72.

Figura 72 – Partículas de gesso sendo a) folha de papel cartão reciclada úmida e b) folha de papel cartão reciclada seca



Fonte: o autor.

Este resíduo de gesso, proveniente de partículas de gesso restantes do processo de produção das folhas de papel recicladas foram removidos de todas as folhas.

#### 4.11 Caracterização das folhas de papel cartão

Os resultados de caracterização das folhas de papel cartão comercial (PC) e das folhas de papel cartão reciclado (PR) são resumidos na Tabela 27.

Tabela 27 – Resumo da caracterização das amostras de PC e PR

|                  | Ensaio                          | Sentido      | PC               | PR               | Número de amostras | p-valor              |
|------------------|---------------------------------|--------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------|
| Ensaio físicos   | Gramatura ( $\text{g m}^{-2}$ ) | -            | 191,02<br>(2,46) | 235,60<br>(2,97) | 5                  | $5,39 \cdot 10^{-9}$ |
|                  | Espessura (mm)                  | -            | 0,25             | 0,31             | 5                  | -                    |
| Ensaio Mecânicos | Resistência à compressão (MPa)  | -            | 0,76<br>(0,02)   | 0,56<br>(0,02)   | 5                  | $3,22 \cdot 10^{-7}$ |
|                  | Resistência à tração (MPa)      | Longitudinal | 12,60<br>(1,02)  | 2,41<br>(0,28)   | 5                  | $3,13 \cdot 10^{-8}$ |
|                  |                                 | Transversal  | 4,79<br>(0,83)   | 1,44<br>(0,51)   | 5                  | $5,86 \cdot 10^{-5}$ |

Legenda: Valor médio (desvio padrão)

Fonte: o autor.

Os dados presentes na Tabela 27 da caracterização do PC e PR são descritos detalhadamente nos itens 4.12 a 4.13.

#### 4.12 Ensaios físicos das folhas de papel cartão

Os resultados obtidos nos ensaios de gramatura e espessura do PC e do PR foram compilados na Tabela 28.

**Tabela 28 – Resultados obtidos nos ensaios de gramatura e espessura das folhas de papel cartão**

| Amostra | Gramatura (g m <sup>-2</sup> ) | Espessura (mm) | Número de amostras | p-valor               |
|---------|--------------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| PC      | 191,02 (2,46)                  | 0,25           | 5                  | 5,39 10 <sup>-9</sup> |
| PR      | 235,60 (2,97)                  | 0,31           | 5                  |                       |

**Legenda:** Valor médio (desvio padrão)

**Fonte:** o autor.

A gramatura superior do PR deve-se à presença de pequenas partículas de resíduo de gesso distribuídas entre as fibras de celulose reciclada, que foram observadas qualitativamente no ensaio de EDS e confirmadas no ensaio de DRX, conforme discutido posteriormente no item 4.14.

A espessura do PR foi superior à do PC, utilizando-se prensagem descrita na NBR ISO 5269 (ASSOCIAÇÃO..., 2006) com carga de 410 kPa por 5 minutos.

Na análise estatística, foi verificada distribuição normal dos conjuntos de dados para as amostras do PC e PR, com diferença significativa (p-valor = 5,39 10<sup>-9</sup>) entre as amostras. Demonstra-se estatisticamente que as amostras de PR e PC apresentam distinções significativas em relação à gramatura.

A maior gramatura e espessura do PR em relação ao PC não refletiu em superioridade nos resultados de resistência mecânica, conforme será discutido no item 4.13.

#### 4.13 Ensaios mecânicos das folhas de papel cartão

Os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração das folhas de papel cartão são resumidos na Tabela 29.

**Tabela 29 – Resumo da caracterização das amostras de PC e PR**

| Ensaio                                | PC           | PR           | Número de amostras | p-valor               |                       |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Resistência à compressão (MPa)</b> | 0,76 (0,02)  | 0,56 (0,02)  | 5                  | 3,22 10 <sup>-7</sup> |                       |
| <b>Resistência à tração (MPa)</b>     | Longitudinal | 12,61 (1,02) | 2,41 (0,28)        | 5                     | 3,13 10 <sup>-8</sup> |
|                                       | Transversal  | 4,79 (0,83)  | 1,44 (0,51)        | 5                     | 5,86 10 <sup>-5</sup> |

**Legenda:** Valor médio (desvio padrão)

**Fonte:** o autor.

No quesito resistência à compressão, o PC apresenta mais de 25% de resistência se comparado ao PR. Atribui-se esta diferença ao comprimento das fibras de celulose recicladas, inferior às do PC e à ligação intrafibrilar, isto é, o entrelaçamento das fibras. Estatisticamente ambas amostras apresentam distribuições normais, com diferença significativa entre as amostras ( $p$ -valor =  $3,22 \cdot 10^{-7}$ ). Afirma-se que resistência à compressão do PC é superior à do PR.

A resistência à tração do PC foi mais de 523% superior à do PR no sentido longitudinal e mais de 332% no sentido transversal. Esta diferença se justifica pela observação da fotomicrografia apresentada no item 4.14. A fibra de celulose que compõe o PC é espessa, longa e preenche todos os vazios da matriz. A fibra reciclada, de maneira geral é mais curta, com vazios interfibrilares, conforme observado por Takahashi e Hanahama (2010), além de apresentar partículas de resíduo de gesso espalhados pela matriz. A resistência à tração foi superior à obtida por Alda (2008) de 4,51 MPa em ensaios com reciclagem de papel cartão.

Evidencia-se que o processo de reciclagem, utilizando-se prensagem para produção das folhas de papel somente com resíduos de papel cartão não foi eficiente, considerando-se o requisito mecânico. A superfície do PR é áspera, se comparada ao PC. Visualmente é possível observar a fragilidade e a descamação das camadas que formam o PR.

Mesmo assim, a baixa resistência à tração observada na folha de papel cartão reciclada não comprometeu o desempenho mecânico da chapa de gesso reciclada, isto é, do conjunto formado pelo gesso reciclado unido com o papel reciclado, conforme será discutido no item 4.15.

As amostras do PC e PR apresentaram distribuição normal dos dados obtidos para ensaio no sentido longitudinal e transversal. Foram observadas diferenças estatísticas significativas entre si no ensaio sentido longitudinal ( $p$ -valor =  $3,13 \cdot 10^{-8}$ ) e transversal ( $p$ -valor =  $5,86 \cdot 10^{-5}$ ). Comprava-se através da diferença estatística que o PC apresenta valores superiores no quesito resistência à tração em relação ao PC.

No item 4.15 será descrita a influência do revestimento de papel cartão nas chapas de gesso acartonado, visto que as diferenças observadas no ensaio de tração na flexão das amostras de GC e GR foram similares, conforme descrito no item 4.8.1.

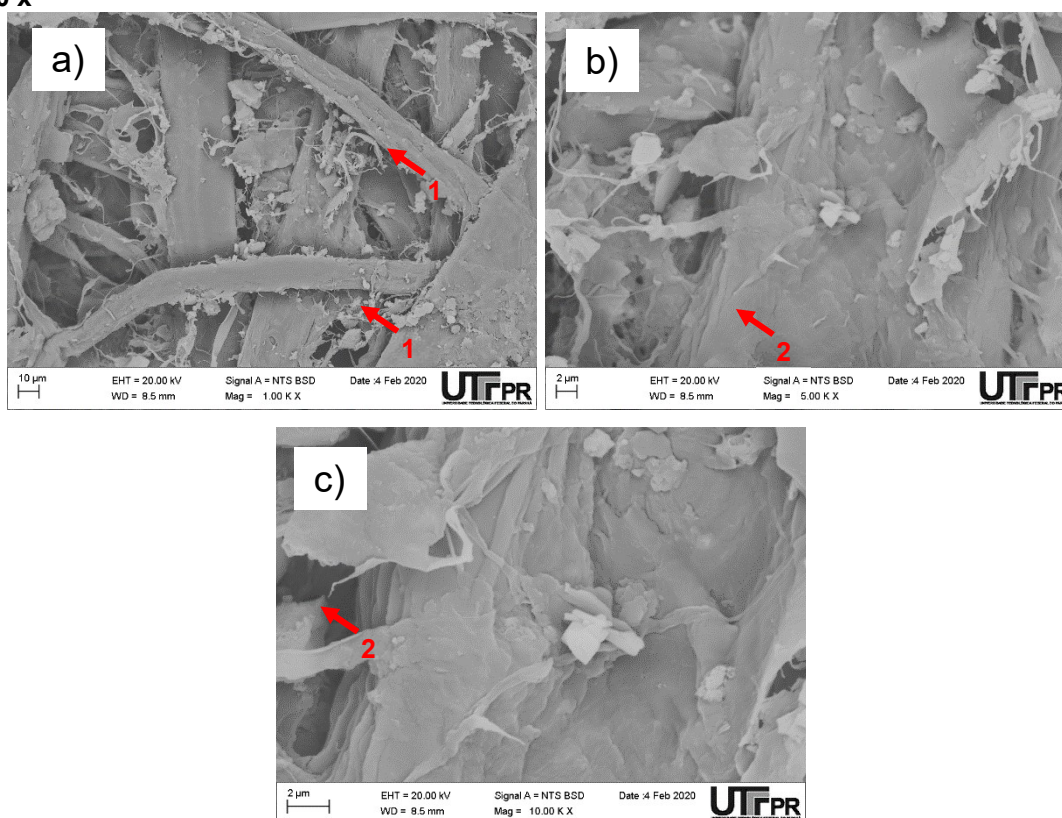
Como forma de visualizar a morfologia e determinar a composição química do papel cartão, no item 4.14 serão apresentados os aspectos químicos e microscópicos.

#### 4.14 Composição química e mineralógica do papel cartão

O processo e o procedimento para observação da microestrutura do papel cartão reciclado e de sua composição química foram os mesmos utilizados para análise microscópica do gesso descrito no item 4.9.

A utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu a observação morfológica das fibras que compõem o papel cartão reciclado (PR), o papel cartão comercial (PC) e a pasta de celulose utilizada na formação das folhas. Na Figura 73 são apresentadas as fotomicrografias obtidas na análise do PC.

**Figura 73 - Fotomicrografias do PC sendo a) ampliado 1000 x, b) ampliado 5000 x e c) ampliado 10000 x**



**Fonte: o autor.**

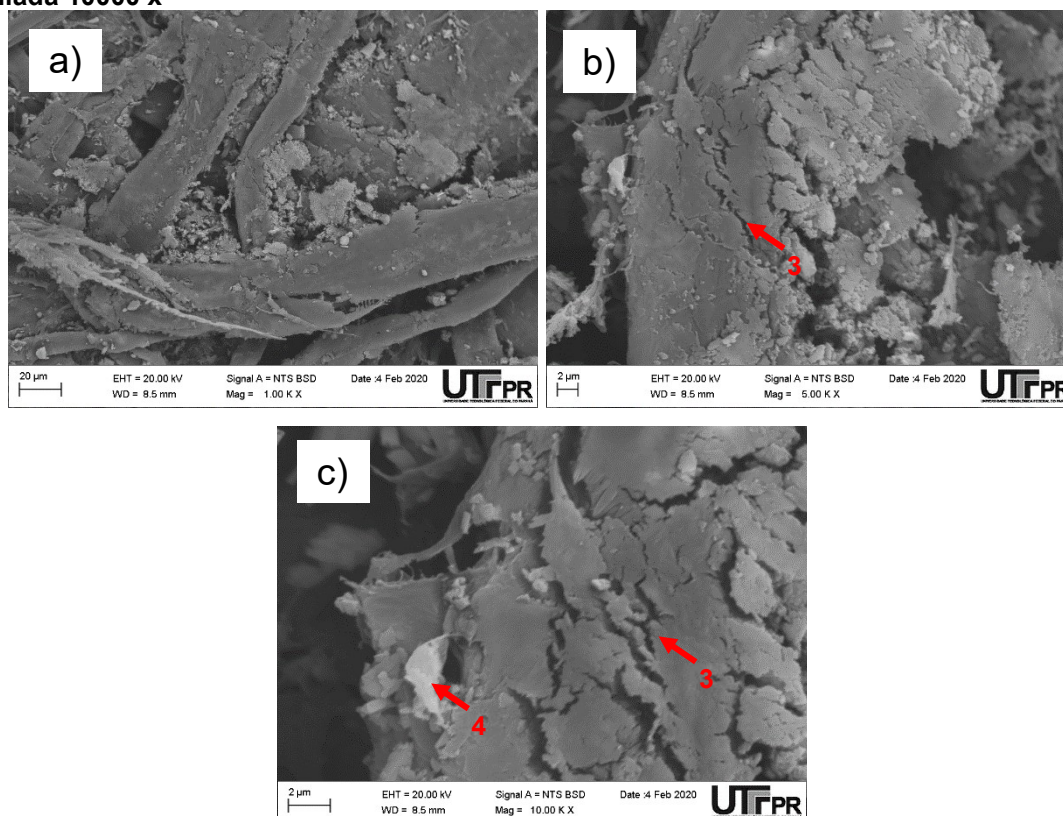
Na Figura 74a é possível observar camadas de fibras entrelaçadas (1), características de folhas de papel cartão. As fibras do PC apresentam comprimento médio de 2,094 mm e 54,57  $\mu\text{m}$  de espessura. É possível observar várias camadas de lâminas de papel sobrepostas (2).



De maneira qualitativa, as fibras de PC são compostas por 58,40% de carbono, 34,28% de oxigênio, e em menor porcentagem observa-se alumínio, silício e sódio, com 3,50, 2,03 e 1,79%, respectivamente.

Na Figura 74 são apresentadas as fotomicrografias da polpa de celulose obtida após as etapas de desagregação e refino. Tal pasta foi utilizada na formação das folhas do PR.

**Figura 74 - Fotomicrografia da polpa de celulose sendo a) ampliada 1000 x, b) ampliada 5000 x e c) ampliada 10000 x**



Fonte: o autor.

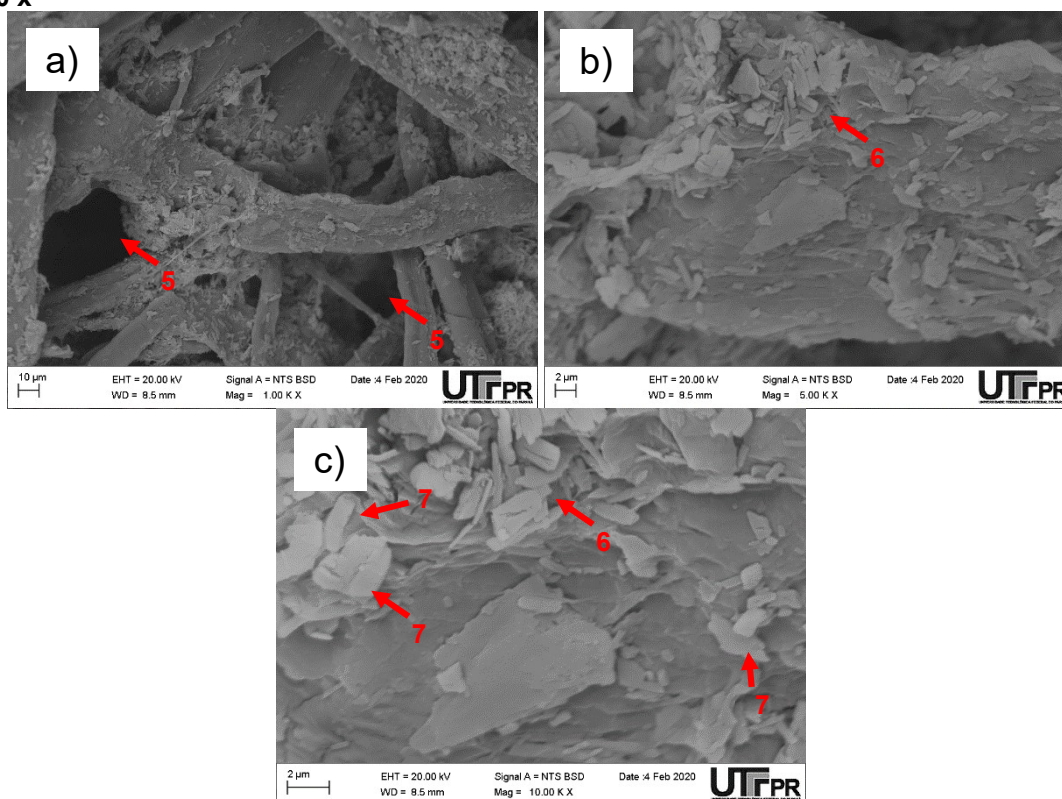
Observa-se nas fotomicrografias da Figura 74b que ocorreu desfragmentação da fibra de celulose, representada por diversas fissuras ao longo da fibra (3). Tal desfragmentação da fibra foi observada por Nazhad (2004), ao caracterizar a hornificação da fibra celulósica. Nesta fotomicrografia nota-se que as fibras possuem dimensões inferiores às do PC, com comprimento médio de 1,124 mm e 17,89 µm de espessura, inferiores aos observados por Oksanen *et al.* (2000).

Capturou-se na Figura 74c a presença de partículas de resíduo de gesso, caracterizadas no ensaio do MEV por partículas de coloração mais clara (4). Durante o processo de produção da polpa de celulose observou-se a sedimentação de

partículas de resíduo de gesso no fundo do recipiente, que foram removidas no processo. Mesmo assim, comprova-se pela Figura 74c que havia resíduo de gesso aderido nas fibras de celulose oriundas do resíduo de papel cartão das chapas de gesso acartonado.

Na Figura 75 referente à fotomicrografia da amostra do PR, é possível observar camadas de fibras entrelaçadas, porém, além do comprimento ser menor se comparado ao do PC, com comprimento médio de 1,305 mm e 25,57  $\mu\text{m}$  de espessura, observam-se vazios entre as fibras (5).

**Figura 75 - Fotomicrografia do PR sendo a) ampliado 1000 x, b) ampliado 5000 x e c) ampliado 10000 x**



**Fonte: o autor.**

Visualizam-se na Figura 75b pequenas e curtas partículas de papel dispersas na matriz do PR (6), que espalham-se ao longo da matriz, o que dificulta o entrelaçamento das fibras.

Observa-se na Figura 75c diversas partículas de gesso dispersas no PR (7), que aderem na superfície da fibra, dificultando o entrelaçamento e a formação de camadas de fibras. Tais partículas eram previstas, uma vez que estavam presentes

na polpa de celulose e também foram removidas após a cura das folhas de papel recicladas, como discutido no item 4.10.2.

De maneira qualitativa foram analisadas as amostras do PC, PR e da pasta de celulose, e os resultados são apresentados na Tabela 30

**Tabela 30 - Composição química do PC, PR e da pasta de celulose determinada através do EDS**

| Amostra           | Elementos químicos (%) |              |             |             |               |              |            | Total (%) |
|-------------------|------------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|--------------|------------|-----------|
|                   | Carbono (C)            | Oxigênio (O) | Cálcio (Ca) | Enxofre (S) | Alumínio (Al) | Silício (Si) | Sódio (Na) |           |
| PC                | 58,40                  | 34,28        | -           | -           | 3,50          | 2,03         | 1,79       | 100,00    |
| PR                | 59,75                  | 31,25        | 4,56        | 3,45        | 0,56          | 0,24         | 0,19       | 100,00    |
| Pasta de celulose | 58,96                  | 35,02        | 2,78        | 2,38        | 0,36          | 0,40         | 0,10       | 100,00    |

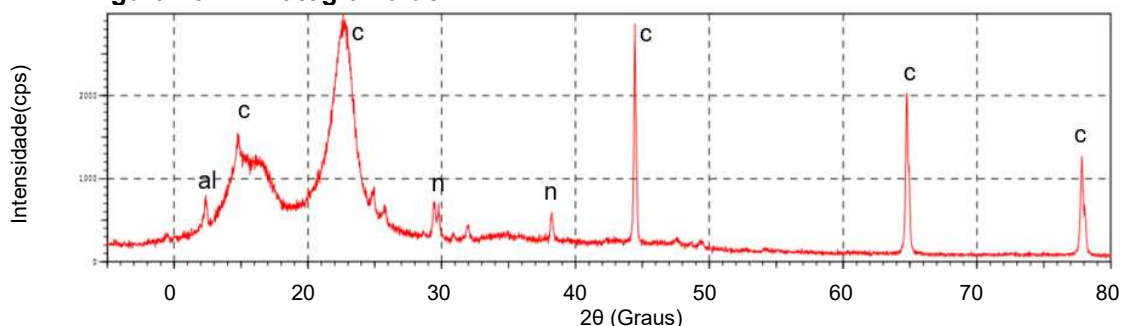
Fonte: o autor.

Na composição química do PC são observados elementos característicos da celulose ( $C_6H_{10}O_5$ ), assim como elementos presentes em aditivos utilizados na fabricação do papel, como argilo-minerais ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot H_2O$ ) utilizados para fortalecimento das pontes de hidrogênio e o carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ) utilizado na desfragmentação das fibras.

A amostra de polpa de celulose e PR, além dos elementos presentes no PC, apresentam cálcio e enxofre, elementos característicos do gesso ( $CaSO_4$ ), comprovando-se a existência de resíduo de gesso nestas amostras.

Para averiguação quantitativa dos compostos presentes no PC foi realizado o ensaio de difratograma de raio-X, representado na Figura 76.

**Figura 76 – Difratograma do PC**



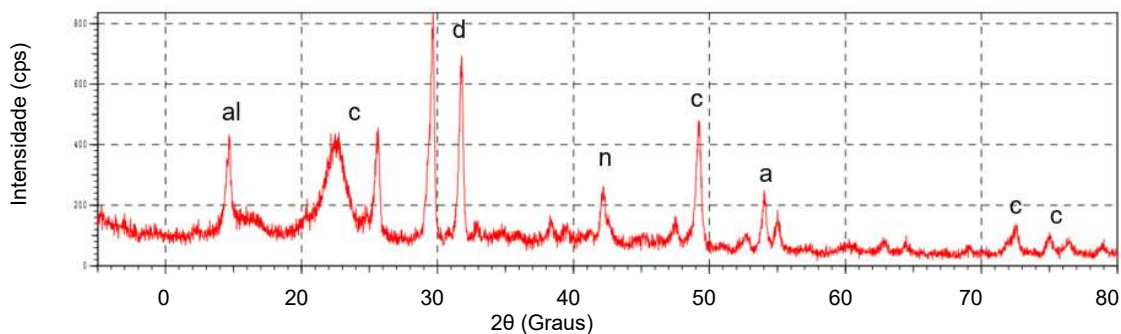
Legenda: al) alumina, c) celulose e n) carbonato de sódio

Fonte: o autor.

Observam-se no DRX do PC picos característicos de celulose ( $C_6H_{10}O_5$ ), alumina, proveniente de argilo-minerais utilizados na fabricação do papel e carbonato

de sódio. A polpa de celulose proveniente de resíduos de papel cartão das chapas de gesso acartonado apresentam maior quantidade de compostos, como pode ser visualizado na Figura 77.

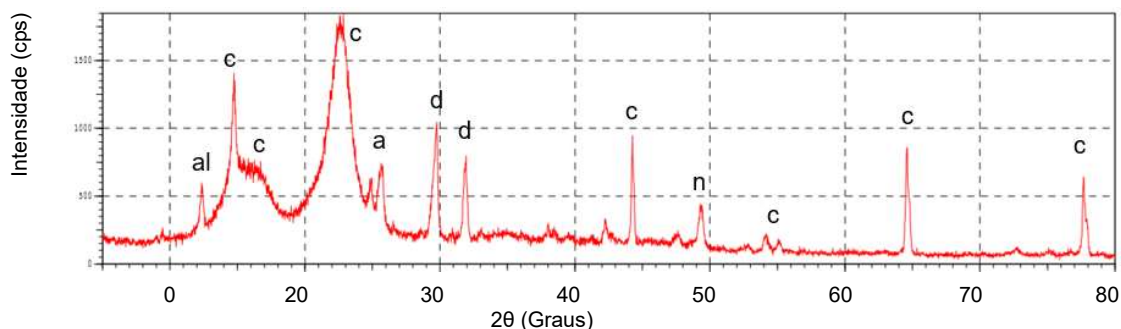
**Figura 77 – Difratoograma da polpa de celulose**



**Legenda: a) anidrita, al) alumina, c) celulose, d) di-hidrato e n) carbonato de sódio**  
**Fonte: o autor.**

Além dos compostos observados no PC, a polpa de celulose apresenta em sua difratometria picos de di-hidrato e anidrita, oriundos do resíduo de gesso proveniente das chapas de gesso acartonado. Estes compostos foram captados no DRX do PR, Figura 78.

**Figura 78 – Difratoograma do PR**



**Legenda: a) anidrita, al) alumina, c) celulose, d) di-hidrato e n) carbonato de sódio**  
**Fonte: o autor.**

As análises do DRX finalizam a caracterização do papel reciclado. No item 4.15 serão abordados aspectos relativos às chapas de gesso acartonado recicladas fabricadas somente gesso e papel cartão reciclado.

#### 4.15 Chapas de gesso acartonado recicladas

Foram comparadas as propriedades mecânicas das chapas de gesso acartonado comerciais (CGC) e das chapas de gesso acartonado recicladas (CGR) em relação aos valores mínimos estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

Foram moldadas placas de gesso com GC e GR, denominadas PGC e PGR, respectivamente, sem papel cartão de revestimento, como forma de averiguar a influência do papel cartão de revestimento no ensaio de resistência mínima de ruptura na flexão.

Os resultados obtidos na caracterização das CGC e CGR são demonstrados na Tabela 31.

**Tabela 31 – Resumo da caracterização das amostras de GC e GR**

| Ensaio           | Ensaio  | Limites (NBR 14715-1)                      |       | PGC | PGR               | CGC               | CGR               | N                 | p-valor |
|------------------|---|--|-------|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------|
|                  |   |  |       |     |                   |                   |                   |                   |         |
| Ensaio físico    | Densidade superficial de massa (kg m <sup>-2</sup> )  | Entre 8,0 e 12,0                           |       | -   | -                 | 8,90              | 11,20             | 5                 | -       |
|                  |   | Resistência mínima à ruptura na flexão (N) | Long  | 550 | 361,07<br>(58,33) | 312,60<br>(43,40) | 697,18<br>(35,53) | 556,99<br>(47,13) | 5       |
| Ensaio Mecânicos | Dureza superficial pelo diâmetro máximo da massa (mm) |  | Trans | 210 | 177,70<br>(38,61) | 201,75<br>(43,63) | 280,79<br>(57,40) | 443,57<br>(74,68) | 5       |
|                  |   | Máx 20 mm                                  |       | -   | -                 | 17,78<br>(1,91)   | 16,05<br>(1,85)   | 5                 | 0,18428 |
|                  |   | Compressão axial (MPa)                     | -     | -   | -                 | 9,74<br>(1,52)    | 14,37<br>(2,63)   | 5                 | 0,00931 |

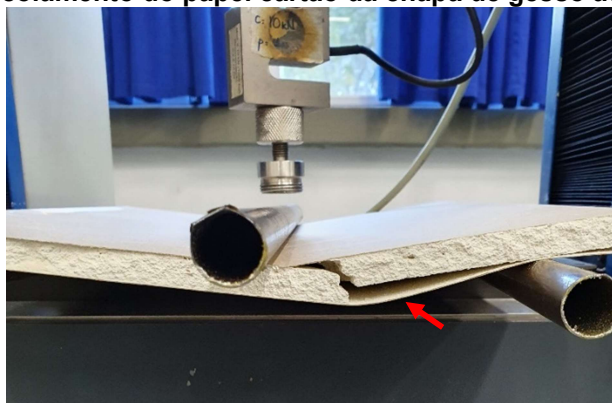
**Legenda: Valor médio (desvio padrão); Long – Longitudinal; Trans – Transversal; N – Número de amostras.**

**Fonte: o autor.**

A densidade superficial da CGC é menor do que a do CGR, sendo 8,90 e 11,20 kg m<sup>-2</sup>, respectivamente. Tal diferença é justificável devido à incorporação de ar utilizada no processo de produção das CGC devido aos agentes espumantes como a perlita (SiO<sub>2</sub>). Tal porosidade, além de fornecer maior leveza ao sistema, auxilia na fixação da chapa de gesso acartonado na estrutura, visto que a chapa deforma mais facilmente durante o parafusamento. Ambas as amostras atendem o intervalo de densidade superficial de massa para chapas de gesso acartonado descrito na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) entre 8,0 e 12,0 kg m<sup>-2</sup>.

Com relação à resistência mínima à ruptura na flexão, a CGC atingiu 697,18 N no sentido longitudinal e 280,79 N no sentido transversal, 26,76% e 33,71% superior aos valores mínimos estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) de 550 e 210 N, respectivamente. Observou-se durante o ensaio que a fissura ocorria inicialmente no gesso e depois se propagava nas camadas do papel, descolando-o sem que houvesse ruptura, apontado pela seta vermelha na Figura 79.

**Figura 79 – Descolamento do papel cartão da chapa de gesso acartonado comercial**



Fonte: o autor.

A CGR superou os limites mínimos estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) no ensaio de resistência mínima à ruptura na flexão, atingindo-se 556,99 N no sentido longitudinal, inferior a 592 e 585 N obtidos por Yu; Brouwers (2012) e Leiva *et al.* (2010), respectivamente, em chapas de gesso acartonado comerciais. Em relação ao sentido transversal, a CGR atingiu 443,57 N, superior à chapa de gesso comercial ensaiada por Bouterf *et al.* (2015) com 271 N. Atribui-se os 112,24% de resistência transversal superior à norma e os 57,97% em relação à CGC ao papel cartão de revestimento. O papel cartão comercial é fabricado de forma que as fibras fiquem transversais ao sentido de maior esforço mecânico, o que fortalece o sentido longitudinal. O papel reciclado não possui orientação específica de distribuição das fibras, o que uniformiza a resistência à ruptura na flexão em ambos os sentidos.

Diferentemente das CGC, o PR e o GR que compunham a CGR rompiam simultaneamente, sem que houvesse descolamento do papel. Atribui-se este aspecto ao comprimento inferior da fibra do PR e à baixa resistência à tração, conforme discutido anteriormente no item 4.13.

Confirma-se que o papel cartão de revestimento proporciona forte influência na resistência à ruptura na flexão. A CGC apresentou incremento de 93,20% na resistência à ruptura na flexão se comparada à PGC no sentido longitudinal e 58,01% no sentido transversal. A CGR apresentou 78,18% de incremento no sentido longitudinal e mais que o dobro da resistência no sentido transversal se comparada a PGR. Comprova-se desta forma que o papel reciclado, com índice de resistência à tração cinco vezes inferior ao papel cartão comercial, quando unido ao GR é capaz de superar os limites mínimos estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) para resistência à ruptura na flexão.

Todas as amostras ensaiadas no requisito resistência mínima à ruptura na flexão apresentam distribuição normal dos dados. Observaram-se diferenças estatísticas significativas entre as amostras do CGC e CGR no ensaio sentido longitudinal (p-valor = 0,00072) e transversal (p-valor = 0,00478). Em relação às placas de gesso moldadas sem papel de revestimento, não foram observadas diferenças significativas no sentido longitudinal (p-valor = 0,17438) e transversal (p-valor = 0,40608). Comprava-se estatisticamente que a resistência à mínima à ruptura na flexão da CGC é superior em relação à CGR, tanto no sentido longitudinal como transversal.

Ambas as amostras do CGC e CGR atendem o requisito mínimo de dureza superficial pelo diâmetro máximo da moosa, sendo de 17,78 e 16,05 mm, respectivamente. Ambas apresentaram valor superior ao estudo de Leiva *et al.* (2010) de 16 mm.

Estatisticamente, as amostras do CGC e CGR apresentam distribuição normal, e sem diferenças significativas entre as amostras (p-valor = 0,18428). Deste modo, pode-se afirmar através da análise estatística que a dureza superficial das amostras de GCG e CGR apresentam valores similares.

Nas normas brasileiras não são estipulados valores mínimos para resistência à compressão axial de chapas de gesso acartonado. Na norma espanhola UNE-EN 13279-1:2006 é estabelecida resistência à compressão superior a 2 MPa.

A CGC obteve 9,74 MPa de resistência à compressão axial, 47,54% abaixo dos 14,37 MPa da CGR. Leiva *et al.* (2010) e Yu; Brouwers (2012) obtiveram valores de 12,1 e 9,1 MPa, respectivamente, para a compressão de chapas de gesso acartonado comerciais, inferior a 14,37 MPa da CGR.

Atribui-se a resistência inferior obtida no ensaio de dureza superficial e compressão axial da CGC aos poros oriundos do processo de fabricação, o que ocasiona deformação da chapa.

As amostras do CGC e CGR utilizadas na determinação da resistência à compressão axial apresentam distribuição normal dos dados, e diferenças significativas entre as amostras ( $p$ -valor = 0,009311). Afirma-se que a resistência à compressão axial das amostras de CGR é superior à de CGC.

O fato do PR ser áspero facilitou a aderência na superfície do GR, e ainda assim, observa-se que o ponto crítico na CGR é o papel cartão reciclado, pois apresenta resistência à tração inferior quando comparado ao PC.

Observa-se que a coloração escura característica do GR e do PR divergem se comparada ao do GC e do PC, o que proporciona uma coloração diferenciada do CGR em relação a do CGC. Embora todo sistema construtivo à base de gesso deva receber acabamento, como aplicação de pintura, vislumbra-se que comercialmente tal aspecto possa opor resistência pelo consumidor, sendo recomendados estudos adicionais para aprimoramento desta questão.

Mesmo produzindo-se a CGR em escala de bancada não se obtiveram protótipos de espessuras uniformes se comparados às do CGC. É possível observar dobras e ondulações na CGR, oriundas do PR.

A CGR atende os parâmetros mínimos de resistência à tração estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), mesmo assim, acredita-se que um PR com qualidade superior ampliaria os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração, como observado nos ensaios da CGC.

Visualizou-se descamação na superfície da CGR durante o manuseio nos ensaios, comprovando-se a fragilidade das camadas de PR.

Apesar da baixa qualidade do PR, os protótipos de CGR produzidos utilizando somente GR e PR oriundos de resíduos de chapa de gesso acartonado atendem simultaneamente às características físicas e os requisitos mecânicos de resistência mínima à ruptura na flexão e dureza superficial pelo diâmetro máximo da moesa estipulados na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

Caracterizadas a CGC e a CGR, no item 4.16 são estimados os custos de produção da CGR.



#### 4.16 Custo de produção das chapas de gesso acartonadas recicladas

Neste capítulo são demonstrados os equipamentos, materiais auxiliares e custos estimados para produção das 45 amostras de chapas de gesso acartonado recicladas de dimensões 30 x 40 cm utilizadas neste trabalho. Na Tabela 32 são descritos os equipamentos e materiais auxiliares utilizados para processamento dos resíduos de chapas de gesso acartonado.

**Tabela 32 – Equipamentos utilizados para produção das chapas de gesso acartonado recicladas**

| Equipamento  | Potência (W) | Marca              |
|--|--------------|--------------------|
| Cilindro manual de cana de açúcar  | -            | Botini             |
| Cilindro eletromecânico  | 600          | Fabricação própria |
| Peneira redonda normatizada de abertura 0,29 mm  | -            | Solotest           |
| Moinho de bolas Q298   | 150          | Quimilo            |
| Estufa elétrica de esterilização e secagem com renovação e circulação de ar forçado com termostato digital | 2500         | Biopar             |
| Argamassadeira modelo I-3010   | 700          | Contenco           |
| Tela de inox com abertura de malha nominal de 125 µm   | -            | Solotest           |
| Prensa hidráulica manual   | -            | Bouvenau           |
| Materiais auxiliares   |              |                    |
| Estilete retrátil, espátula inox, Régua metálica de 40 cm  |              | Vonder             |
| Formas de alumínio, recipientes plásticos  |              | Nadir              |
| Sacos plásticos, Folhas de EVA de 5 mm   |              | Empaplast          |
| Martelo de madeira corrugado, Moldes metálicos de 12,4 mm  |              | Fabricação Própria |
| Chapas metálicas de 3 mm   |              | Gerdau             |
| Papel absorvente qualitativo   |              | Induslab           |
| Cera líquida incolor   |              | Canário            |

Fonte: o autor.

A quantidade estimada de recursos utilizados nos processos de formação das chapas de gesso acartonado recicladas está descrita na Tabela 33.

**Tabela 33 – Recursos utilizados na produção das chapas de gesso acartonado recicladas**

| Processo   | Recursos     |            |                |
|--|--------------|------------|----------------|
|  | Energia (kW) | Água (L)   | Homem-hora (h) |
| Preparação dos filetes de resíduos de chapas de gesso acartonado | -            | -          | 6              |
| Trituração manual  | -            | -          | 9              |
| Trituração eletromecânica  | 21           | -          | 35             |
| Trituração no moinho de bolas                                    | 14           | -          | 30             |
| Calcinação do resíduo de gesso                                   | 120          | -          | 2              |
| Preparação do resíduo de papel cartão                            | -            | 150        | 6              |
| Desfragmentação do resíduo de papel reciclado                    | 7            | 30         | 10             |
| Refino da polpa de celulose                                      | -            | -          | 5              |
| Desagregação da polpa de celulose                                | 48           | 60         | 20             |
| Formação das folhas de papel reciclado                           | -            | 120        | 20             |
| Preparação da pasta de gesso reciclado                           | -            | 54         | 4              |
| Formação das chapas de gesso recicladas                          | -            | -          | 15             |
| <b>Total</b>   | <b>210</b>   | <b>414</b> | <b>162</b>     |

Fonte: o autor.

Para realizar a somatória do valor total foi realizado o levantamento do custo do kW de energia elétrica, da concessionária distribuidora de energia COPEL, do m<sup>3</sup> de água, da Companhia de Saneamento local - SANEPAR, ambos do Paraná, o salário mínimo nacional acrescido dos encargos na construção civil e a cotação do dólar do dia 20 de maio de 2020 de R\$ 5,69. Os dados coletados estão demonstrados na Tabela 34.

**Tabela 34 – Custo dos recursos para produção das chapas de gesso acartonado recicladas**

| Recurso                             | Quantidade | Custo (R\$) | Total (R\$) |
|-------------------------------------|------------|-------------|-------------|
| Energia elétrica (kW) <sup>a</sup>  | 210,00     | 0,62801     | 131,88      |
| Água (m <sup>3</sup> ) <sup>b</sup> | 0,41       | 7,43        | 3,05        |
| Homem-hora (h) <sup>c</sup>         | 162,00     | 5,94        | 962,28      |
| Encargos sociais (%) <sup>d,e</sup> | 130,60     | 1256,74     | 1256,74     |
| Total Geral                         |            |             | 2353,95     |

<sup>a</sup> considerado consumo mensal entre 101 kWh e 220 kWh – tarifa convencional subgrupo B1;

<sup>b</sup> considerado a proporcionalidade da taxa mínima de 10m<sup>3</sup>;

<sup>c</sup> proporcional ao salário mínimo nacional;

<sup>d</sup> segundo Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC);

<sup>e</sup> porcentagens detalhadas no anexo A.

Fonte: a) COPEL (2020); b) SANEPAR (2020); c) Medida Provisória nº 919/2020 e d) CBIC (2020)

Considerando-se o custo de R\$ 2353,95 (U\$ 413,70) para produção de 45 chapas de gesso acartonado recicladas de dimensões de 40 x 30 cm, conclui-se que o metro quadrado da chapa de gesso acartonado reciclada é R\$ 432,92 (U\$ 76,08). Tal custo, revela-se superior ao custo atual da chapa de gesso acartonado, comercializada no município de Curitiba em maio de 2020 por R\$ 12,92 m<sup>-2</sup> (U\$ 2,27).

Não seria adequado extrapolar estes valores para uma linha de produção industrial, visto que o processo de produção foi realizado em escala de bancada a fim de atender às prescrições contidas na NBR 14715-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

A chapa de gesso acartonado reciclada incorpora benefícios ambientais associados (não extração de recursos não-renováveis, menos energia, menos água, reciclagem contínua, não descarte em aterros, dentre outros), decorrentes do fato de ser produzida integral e exclusivamente com resíduos.

Em sistemas construtivos ou empreendimentos sustentáveis, certificados ou não, há demanda por produtos com estas características, o que justificaria a realização de estudos sobre a viabilidade econômico-financeira de uma planta em escala industrial, vez que a própria economia de escala poderia reduzir sensivelmente os custos associados.

## 5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa corrobora com uma série de estudos sobre a reciclagem de resíduos de chapas de gesso acartonado. Foi possível reciclar o gesso contido no interior de chapas de gesso acartonado e respectivos papeis-cartão de revestimento, formando-se assim novas chapas de gesso acartonado recicladas somente com materiais secundários, sem necessidade de utilização de novas matérias-primas (materiais primários). O reaproveitamento integral deste material revelou-se tecnicamente possível, o que viabiliza a adoção de um modelo de economia circular, em detrimento ao destino atual destes resíduos, os aterros.

O método utilizado para reciclagem do resíduo de gesso, em escala de laboratório, confirmou que após sua calcinação e reidratação é possível moldar corpos de prova sólidos utilizando-se somente gesso reciclado, o que comprovou a reversibilidade das reações.

Tanto na etapa de separação do papel cartão da massa de gesso das chapas de gesso acartonado quanto na cominuição das partículas de GR o processo de trituração mostrou-se eficiente. A taxa de aproveitamento da massa de gesso em relação à massa de resíduo foi de 68,08%.

Quanto ao estado pulverulento, o GR foi classificado como gesso de fundição, suprimindo os critérios normativos brasileiros quanto à massa unitária e material passante na peneira de abertura 0,29 mm. Apesar de não ter atingido os valores mínimos normatizados para o óxido de cálcio e anidrido sulfúrico, não foi observada redução de trabalhabilidade ou de resistência mecânica nas amostras.

Durante o preparo da pasta, as amostras de GR apresentaram aspecto mais pastoso, se comparadas às amostras de GC, com aspecto mais fluido. As amostras formadas somente com GR atenderam os dois patamares do tempo de início e fim de pega para o gesso de revestimento simultaneamente.

Nos ensaios de MEV foram averiguadas as características morfológicas, geometria e formação dos cristais do GC e GR. Foi possível observar microscopicamente que após a hidratação, os cristais de GR são mais curtos se comparados aos de GC, o que dificulta o entrelaçamento das partículas de GR.

Foi possível reciclar o gesso proveniente de resíduos de chapas de gesso acartonado, atendendo-se simultaneamente às prescrições normativas brasileiras quanto às características físicas e mecânicas.

Comprovou-se que a metodologia utilizada para reciclagem de papel cartão de revestimento foi eficiente, pois foi possível fabricar folhas de papel cartão reciclado utilizando-se somente resíduos de papel cartão provenientes de resíduos de chapas de gesso acartonado. Todavia, acredita-se que tanto a aparência quanto a resistência mecânica do papel cartão reciclado obtido possam ser aprimoradas em pesquisas futuras.

Conclui-se neste estudo que é possível fabricar chapas de gesso acartonado utilizando-se somente gesso reciclado e papel reciclado, ambos oriundos de resíduos de chapa de gesso acartonado. Atendendo-se simultaneamente todos os parâmetros físicos e mecânicos estipulados na norma brasileira.

Acredita-se, desta forma, que resíduos de chapas de gesso acartonado, cuja principal destinação é o acúmulo nos aterros, devam ser reciclados, tornando-se fonte de matéria-prima valiosa e possibilitando a adoção de modelo de economia circular deste produto.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se ampliação e aprofundamento do tema investigado através do estudo dos seguintes temas:

- Propor um processo de logística reversa para coleta dos resíduos de chapas de gesso e encaminhamento para reciclagem, para fomentar uma economia circular;
- Desenvolver um processo diferente do utilizado no estudo para reciclagem do papel cartão de revestimento, que amplie a resistência à tração do papel cartão reciclado;
- Investigar a influência de aditivos espumantes e da porosidade no desempenho mecânico das chapas de gesso acartonado recicladas e;
- Verificar os parâmetros de desempenho de um sistema *drywall* construído com chapas de gesso acartonado recicladas segundo critérios descritos na NBR 15575-4 (ASSOCIAÇÃO..., 2013).

## REFERÊNCIAS

AAGLI, A.; TAMER, N.; ATBIR, A.; BOUKBIR, L.; EL HADEK, M. Conversion of phosphogypsum to potassium sulfate. Part I. The effect of temperature on the solubility of calcium sulfate in concentrated aqueous chloride solutions. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 82, p. 395-399, nov. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0908-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-005-0908-y#citeas>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY. Estados Unidos da América. **Historical Document**, 1996. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/hs/hsees/annual96.html>. Acesso em: 18 mar. 2019.

AGULLÓ, L.; AGUADO, A.; GARCIA, T. Study of the use of paper manufacturing waste in plaster composite mixtures. **Building and Environment**, v. 41, jun. 2006, p. 821-827, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132305001344>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

AHMED, A.; UGAI, K., A. M.; KAMEI, T. Investigation of recycled gypsum in conjunction with waste plastic trays for ground improvement. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 208-217, jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810002850>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

AHMED, A.; UGAI, K. Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. **Cold Regions Science and Technology**, v. 66, p. 84-92, mai. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.12.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X10002442>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.014>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061500116X>. Acesso em: 08 nov. 2017.

AJAYI, S.; OYEDELE, L.; BILAL, M.; AKINADE, O.; ALAKA, H.; OWOLABI, H.; KADIRI, K. Waste effectiveness of the construction industry: Understanding the impediments and requisites for improvements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 102, p. 101-112, ago. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915300203>. Acesso em: 18 nov. 2017.

ALDA, J. A. G. O. Feasibility of recycling pulp and paper mill sludge in the paper and board industries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 965-972, mai. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.02.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344908000347>. Acesso em: 03 mar. 2019.

ALENCAR, L.H.; MOTA, C. M. M.; ALENCAR, M. H. The problem of disposing of plaster waste from building sites: Problem structuring based on value focus thinking methodology. **Waste Management**, v. 31, p. 2512-2521, ago. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11002807>. Acesso em: 08 nov. 2018.

ANG, C. N.; WANG, Y. C. The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 675-686, fev. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061804000480>. Acesso em: 18 nov. 2018.

ARAÚJO, A. R. B.; ALVES, B. C. A.; SARTI, F.; TAVARES, Y. V. P. Influence of sodium citrate on resistance of adherence of gypsum re-used. **Revista Geama**, v. 2, p. 112-117, set. 2016. Disponível em: <http://www.journals.ufrpe.br/index.php/geama/article/view/857>. Acesso em: 08 nov. 2018.

ARIKAN, M.; SOBOLEV, K. The optimization of a gypsum-based composite material. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 1725-1728, nov. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00858-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00858-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888460200858X>. Acesso em: 23 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 638**: Paper, board and pulps — Determination of dry matter content — Oven-drying method. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 1924**: Papel e cartão - Determinação das propriedades de tração Parte 2: Método da velocidade constante de alongamento (20 mm/min). Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 5263**: Pastas celulósicas - Desagregação a úmido em laboratório Parte 1: Desagregação de pastas celulósicas químicas. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 5269**: Pastas celulósicas - Preparação de folhas em laboratório para ensaios físicos Parte 2: Método Rapid-Köthen. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 9895**: Papel e cartão - Resistência à compressão - Ensaio short-span. Rio de Janeiro, 2009.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12127:** Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12128:** Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12129:** Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12130:** Gesso para construção - Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 13207:** Gesso para construção civil – Especificação. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13528:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 14527:** Pasta celulósica - Determinação das propriedades físicas em folhas formadas em laboratório. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 14715-1:** Chapas de gesso para drywall Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 14715-1:** Chapas de gesso para drywall Parte 2: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO DRYWALL. **Mercado do Drywall no Brasil.** São Paulo: Drywall. Disponível em: <https://drywall.org.br/blogabdrywall/drywall-no-brasil-reflexoes-tecnologicas-2/>. Acesso em: 19 jun. 2019.



ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-EN 13279-1**: Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción – Parte 1: Definiciones y especificaciones. Madrid, 2006.

AZIMI, G.; PAPANGELAKIS, V. G. Mechanism and kinetics of gypsum–anhydrite transformation in aqueous electrolyte solutions. **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 122–129, jun. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.03.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X11000703>. Acesso em: 05 jun. 2019.

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**, v. 36, p. 12-19. jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00269-008-0285-8> Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/225483442\\_Thermal\\_behaviour\\_and\\_kinetics\\_of\\_dehydration\\_of\\_gypsum\\_in\\_air\\_from\\_in\\_situ\\_real-time\\_laboratory\\_parallel-beam\\_X-ray\\_powder\\_diffraction](https://www.researchgate.net/publication/225483442_Thermal_behaviour_and_kinetics_of_dehydration_of_gypsum_in_air_from_in_situ_real-time_laboratory_parallel-beam_X-ray_powder_diffraction). Acesso em: 05 jun. 2019.

BALTAR, L. M. ; BALTAR, A. M.; BENACHOUR, M. Effect of Carboxymethylcellulose on Gypsum Re-Hydration Process. **International Journal of Mineral Processing (Print)**, v. 125, p. 5-9, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.08.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751613001725>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso  $\beta$  obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, v. 60, p. 501-508, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000400007>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132014000400007&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132014000400007&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 05 jun. 2019.

BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J. R.; POON, C. S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 129-138, mar. 2012. DOI: <http://10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035>. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Statistical-analysis-of-recycled-aggregates-derived-Barbudo-Agrela/23cd2e44c78d2cc09e1a0aac00f388d67b5f4d9d>. Acesso em: 05 fev. 2019.

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. 2019.

BARDELLA, P. S.; CAMARINI, G. Recycled Plaster: Physical and Mechanical Properties. **Advanced Materials Research**, v. 374, p. 1307-1310, out. 2011. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.374-377.1307>. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/272612660\\_Recycled\\_Plaster\\_Physical\\_and\\_Mechanical\\_Properties](https://www.researchgate.net/publication/272612660_Recycled_Plaster_Physical_and_Mechanical_Properties). Acesso em: 05 jun. 2019.

BASPINAR, M. S.; KAHRAMAN, E. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 3327-3333, aug. 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/251621551\\_Modifications\\_in\\_the\\_properties\\_of\\_gypsum\\_construction\\_element\\_via\\_addition\\_of\\_expanded\\_macroporous\\_silica\\_granules](https://www.researchgate.net/publication/251621551_Modifications_in_the_properties_of_gypsum_construction_element_via_addition_of_expanded_macroporous_silica_granules). Acesso em: 15 out. 2019.

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. 2019.

BALTAR, L. M.; BALTAR, C. A. M.; BENACHOUR, M. Effect Of Carboxymethylcellulose On Gypsum Re-Hydration Process. **International Journal of Mineral Processing**, v. 125, p. 5-9, dez. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.08.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751613001725>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BEER, M.; 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, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.010>. Disponível em: <http://www.elsevier.com/locate/wasman>. Acesso em: 05 jun. 2019.

BICER, A.; KAR, F. Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth. **Thermal Science and Engineering Progress**, v. 1, p. 59–65, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.02.008> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904917300082>. Acesso em: 08 nov. 2018.

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, jul. 2016. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/ENGINEERING-PROPERTIES-OF-COMPOSITES-CONTAINING-%2C-%2C-Binici-Aslan/44ffaeb4aa66bb2f1e4224486d421a960e28a2b0>. Acesso em: 08 nov. 2018.

BOJIC, M.; DJORDJEVIC, S.; MALESEVIC, J.; MILETIC, M.; CVETKOVIC, D. A simulation appraisal of a switch of district to electric heating due to increased heat efficiency in an office building. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 324-330, abr. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.04.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877881200206X>. Acesso em: 18 jan. 2019.

BOUTERF, A.; ROUX, S.; HILD, F.; VIVIER, G.; BRAJER, X.; MAIRE, E.; MEILLE, S. Damage law identification from full field displacement measurement: Application to four-point bending test for plasterboard. **European Journal of Mechanics A/Solids**, v. 49, p. 60-66, abr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2014.06.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997753814000783?via%3Dihub>. Acesso em: 04 jun. 2019.

BORTOLETO, G. G.; GORAIEB, K.; SOUSA, R. A.; BUENO, M. I. M. S. Simultaneous Determination of Ca, P, Na, K, Mg, Cl, Urea, Glucose and Creatinine in Urine by Energy Dispersive X-Ray Spectrometry and Partial Least Squares Regression. **Atomic Spectroscopy**, v. 32, p. 145-151, abr. 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/286965987\\_Simultaneous\\_determination\\_of\\_Ca\\_P\\_Na\\_K\\_Mg\\_Cl\\_urea\\_glucose\\_and\\_creatinine\\_in\\_urine\\_by\\_energy\\_dispersive\\_X-ray\\_spectrometry\\_and\\_partial\\_least\\_squares\\_regression](https://www.researchgate.net/publication/286965987_Simultaneous_determination_of_Ca_P_Na_K_Mg_Cl_urea_glucose_and_creatinine_in_urine_by_energy_dispersive_X-ray_spectrometry_and_partial_least_squares_regression). Acesso em: 04 jun. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Audiência Pública – **Incentivos para fomentar a indústria de reciclagem**. Brasília, ago. 2019. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/component/agendadirigentes/?view=autoridade&dia=2019-08-13&id=24>. Acesso em: 18 nov. 2019.

BRASIL. Medida Provisória nº 919, de 30 de janeiro de 2020. Altera a Medida Provisória nº 916, de 31 de dezembro de 2019, e Dispõe sobre o valor do salário mínimo a vigorar a partir de 1º de fevereiro de 2020. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 jan. 2020. Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/medida-provisoria-n-919-de-30-de-janeiro-de-2020-240824899>. Acesso em: 18 nov. 2019.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (Brasil). **Encargos previdenciários e trabalhistas no setor da construção civil**. CBIC, 2020.

CAMARINI, G.; PINTO, M. C. C.; MOURA, A. G.; MANZO, N. R. Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 383-390, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816312120>. Acesso em: 04 jun. 2019.

CAMARINI, G.; PINHEIRO, S. M. M. Microstructure of Recycled Gypsum Plaster by SEM. **Advanced Materials Research**, v. 912, p. 243-246, abr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.912-914.243>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/271203524\\_Microstructure\\_of\\_Recycled\\_Gypsum\\_Plaster\\_by\\_SEM](https://www.researchgate.net/publication/271203524_Microstructure_of_Recycled_Gypsum_Plaster_by_SEM). Acesso em: 04 jun. 2019.

CAMPBELL, S. Lead by Example. **Walls & Ceilings**, v. 1, p.1-6, 2003. Disponível em: [http://www.wconline.com/Articles/Feature\\_Article/6f999d146a768010VgnVCM100000f932a8c0](http://www.wconline.com/Articles/Feature_Article/6f999d146a768010VgnVCM100000f932a8c0). Acesso em: 04 jan. 2019.

CANUT, M. M. C.; JACOMINO, V. M. F.; BRATVEIT, K.; GOMES, A. M.; YOSHIDA, M. I. Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries. **Materials Characterization**, v. 54, p. 365-373, abr. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580307000575>. Acesso em: 04 jun. 2019.

CAPRARO, A.P.; SCREMIM, C.B.; MEDEIROS, M. H.; POLEGATO, N. S. Velocidade de Propagação de Ondas de Ultrassom e Resistividade Elétrica para a Detecção do Ataque por sulfatos de Origem Interna. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, p. 38-47, mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.25286/rep.v2i3.684>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319337283\\_Velocidade\\_de\\_Propagacao\\_d\\_e\\_Ondas\\_de\\_Ultrassom\\_e\\_Resistividade\\_Eletrica\\_para\\_a\\_Deteccao\\_do\\_Ataque\\_p\\_or\\_sulfatos\\_de\\_Origem\\_Interna](https://www.researchgate.net/publication/319337283_Velocidade_de_Propagacao_d_e_Ondas_de_Ultrassom_e_Resistividade_Eletrica_para_a_Deteccao_do_Ataque_p_or_sulfatos_de_Origem_Interna). Acesso em: 04 jun. 2019.

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, out. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061808001980>. Acesso em: 04 jun. 2019.

CARDOSO, M. T.; CARNEIRO, A. C. O.; OLIVEIRA, R. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PATRÍCIO, J. W.; MARTINS, M. C.; SANTOS, R. C.; SILVA, J. C. Propriedades físicas e mecânicas de papéis reciclados utilizados para fabricação de tubetes. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 1349–1353, jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050985748>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-50982012000200403](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-50982012000200403). Acesso em: 04 jun. 2019.

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, p. 391-397, dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392008000400002>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392008000400002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392008000400002). Acesso em: 04 jun. 2019.

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, p. 370-380, jul. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000400008>. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/pat/v44n4/v44n4a08.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2018.

CAVALCANTI, R.; PÓVOAS, Y. V. Análise da Influência da Composição granulométrica do resíduo de gesso nas propriedades do revestimento interno de parede. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, p. 25-30, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.25286/rep.v2i1.348>. Disponível em: <http://revistas.poli.br/index.php/rep/article/view/348>. Acesso em: 12 jan. 2020.

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

CHANDARA, C.; AZIZLI, K. A. M.; AHMAD, Z. A.; SAKAI, E. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in portland cement. **Waste Management**, v. 29, p. 1675-1679, mai. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003991>. Acesso em: 12 jan. 2019.

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. 2018.

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. 2018.

CONDEIXA, K.; QUALHARINI, E.; BOER, D.; HADDAD, A. An Inquiry into the Life Cycle of Systems of Inner Walls: Comparison of Masonry and Drywall. **Sustainability**, v. 7, p. 87-93, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su7067904>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/279206657\\_An\\_Inquiry\\_into\\_the\\_Life\\_Cycle\\_of\\_Systems\\_of\\_Inner\\_Walls\\_Comparison\\_of\\_Masonry\\_and\\_Drywall](https://www.researchgate.net/publication/279206657_An_Inquiry_into_the_Life_Cycle_of_Systems_of_Inner_Walls_Comparison_of_Masonry_and_Drywall). Acesso em: 12 jan. 2020.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (Brasil). **Tabela de Tarifas**. Paraná: SANEPAR, 2020.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (Brasil). **Taxas e Tarifas**. Paraná: COPEL, 2020.

CORDON, H. S. F.; CAGNONI, F. C.; FERREIRA, F. F. Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 504-512, mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218306223>. Acesso em: 04 jun. 2019.

COSTA, A. S. V.; HORN, A. H.; DONAGEMMA, G. K.; POLIDORO, J. C.; GIACOMINI, R. P. 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. **Embrapa Solos**, v. 2, p. 63-72, mar. 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/921105/efeitos-no-solo-do-gesso-produzido-em-diferentes-reacoes-quimicas-da-solucao-de-acido-sulfurico-reciclada-com-carbonato-de-calcio-residual-e-oxido-de-calcio>. Acesso em: 08 nov. 2018.

CUNHA, P. W. S. **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. 2019.

DAI, D.; FAN, M. Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum. **Industrial Crops and Products**, v. 74, p. 417–424, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.036>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015301175>. Acesso em: 04 jun. 2019.

DINIZ, J.; GIL, H.; CASTRO, J. A. A. M. Hornification - its origin and interpretation in wood pulps. **Wood Science and Technology**, v. 37, p. 489-494, abr. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0216-2>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/227274043\\_Hornification-its\\_origin\\_and\\_interpretation\\_in\\_wood\\_pulps](https://www.researchgate.net/publication/227274043_Hornification-its_origin_and_interpretation_in_wood_pulps). Acesso em: 02 mai. 2018.

ERBS, A.; NAGALLI, A.; CARVALHO, K. Q.; MYMRINE, V.; PASSIG, F. H.; MAZER, W. Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente das chapas de gesso acartonado. **Cerâmica**, v. 61, p. 482-487, dez. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613601930>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000400482&script=sci\\_abstract&lng=pt/](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132015000400482&script=sci_abstract&lng=pt/). Acesso em: 04 jun. 2018.

ERBS, A.; NAGALLI, A.; MYMRINE, V.; CARVALHO, K. Q. Properties of recycled gypsum from gypsum plasterboards and commercial gypsum throughout recycling cycles. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 1314-1322, mai. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.189>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618305080>. Acesso em: 04 jun. 2019.

EUROGYPSUM (Bélgica). **The European gypsum industry**. Disponível em: <http://www.eurogypsum.org/>. Acesso em: 06 mai. 2020.

FERNANDES, S.; ESPINOSA, J. **Práticas de Engenharia em Laboratório de Reciclagem de Papel**. São Paulo, 2011. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2579.2408>.

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.researchgate.net/publication/228994770\\_ESTUDO\\_DA\\_VIABILIDADE\\_DO\\_REAPROVEITAMENTO\\_DO\\_GESSO-QUEIMA\\_RAPIDA](https://www.researchgate.net/publication/228994770_ESTUDO_DA_VIABILIDADE_DO_REAPROVEITAMENTO_DO_GESSO-QUEIMA_RAPIDA). Acesso em: 12 jan. 2020.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J.; FERNANDO, B. In Situ Adherence Evaluation of Coating Materials. **Experimental Techniques**, v. 33, p. 51-60, mai. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2008.00372.x>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/245348619\\_In\\_Situ\\_Adherence\\_Evaluation\\_of\\_Coating\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/245348619_In_Situ_Adherence_Evaluation_of_Coating_Materials). Acesso em: 04 jun. 2018.

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. 2018.

FREYER, D.; VOIGT, W. Crystallization and Phase Stability of  $\text{CaSO}_4$  and  $\text{CaSO}_4$  – Based Salts. **Monatshefte für Chemie**. v. 134, p. 693–719, jun. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00706-003-0590-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00706-003-0590-3#citeas>. Acesso em: 04 jun. 2019.

GARTNER, E. M. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions — the case of gypsum plasters. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 289–295, jun. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.008>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884609000234>. Acesso em: 04 jun. 2018.

GENCEL, O.; DIAZ, J. J. C.; SUTCUC, M.; KOKSAL, F.; RABANAL, F. P. A.; GONZALO, M. B.; BROSTOW, W. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 135–144, fev. 2014. Disponível em: [https://www.academia.edu/12182360/Properties\\_of\\_gypsum\\_composites\\_containing\\_vermiculite\\_and\\_polypropylene\\_fibers\\_Numerical\\_and\\_experimental\\_results](https://www.academia.edu/12182360/Properties_of_gypsum_composites_containing_vermiculite_and_polypropylene_fibers_Numerical_and_experimental_results). Acesso em: 09 jun. 2019.

GERALDO, H. R.; PINHEIRO, S. M. M.; SILVA, J. S.; ANDRADE, H. M. C.; DWECK, J.; GONÇALVES, J. P.; CAMARINI, G. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 288–300, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.188>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617313586>. Acesso em: 09 jun. 2019.

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, abr. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00938-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00938-3). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509302009383>. Acesso em: 09 jun. 2019.

GODINHO-CASTRO, A. P.; TESTOLIN, R. C.; JANKE, L.; CORRÊA, A. X. R.; RADETSKI, C. M. Incorporation of gypsum waste in ceramic block production: Proposal for a minimal battery of tests to evaluate technical and environmental viability of this recycling process. **Waste Management**, v. 32, p. 153–157, jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X11003837#!> Acesso em: 09 jun. 2018.

GOVINDAN, K.; AZEVEDO, S.; CARVALHO, H.; CRUZ-MACHADO, V. Impact of supply chain management practices on sustainability. **Journal of Cleaner**

**Production**, v. 85, p. 212-225, dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.068>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/272491031\\_Impact\\_of\\_supply\\_chain\\_management\\_practices\\_on\\_sustainability](https://www.researchgate.net/publication/272491031_Impact_of_supply_chain_management_practices_on_sustainability). Acesso em: 18 nov. 2018.

GUAN, B.; YANG, L.; FU, H. B.; KONG, B.; LI, T.; YANG, L.  $\alpha$ -calcium sulfate hemihydrate preparation from FGD gypsum in recycling mixed salt solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 174, p. 296-303, set. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.09.033>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894711010916>. Acesso em: 09 jun. 2018.

GRECO, A.; MAFFEZZOLI, A.; MANNI, O. Development of polymeric foams from recycled polyethylene and recycled gypsum. **Polymer Degradation and Stability**, v. 90, p. 256-263, nov. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391005000844>. Acesso em: 09 jun. 2019.

GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, S.; GADEA, J.; RODRÍGUEZ, A.; BLANCO-VARELA, M. T.; CALDERÓN, V. Compatibility between gypsum and polyamide powder waste to produce lightweight plaster with enhanced thermal properties. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 179-185, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.061>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812001389>. Acesso em: 09 jun. 2019.

GYPSUM S/A (Brasil). **Tudo sobre as chapas drywall**. Disponível em: <https://gypsum.com.br/>. Acesso em: 14 jul. 2019.

GYPSUM ASSOCIATION (Estados Unidos da América). **Industry Statistics**. Disponível em: <https://gypsum.org/>. Acesso em: 06 mai. 2020.

GYPSUM RECYCLING INTERNATIONAL (Estados Unidos da América). **The recycling technology**. Disponível em: <http://www.gypsumrecycling.biz/>. Acesso em: 12 jan. 2019.

GYPSUM TO GYPSUM (Bélgica). **The perfect loop: the path to circular economy**. Disponível em: <https://gypsumtogypsum.org/>. Acesso em: 06 mai. 2020.

HAO, Y.; LI, Q.; PAN, Y.; LIU, Z.; WU, S.; XU, Y.; QIAN, G. Heavy metals distribution characteristics of FGD gypsum samples from Shanxi province 12 coal-fired power plants and its potential environmental impacts. **Fuel**, v. 209, p. 238-245, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.094>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236117309560>. Acesso em: 09 jun. 2019.

HANAY, A.; BIYIKSONMEZ, F.; KIZILOGLU, F.; CANBOLAT, M. Reclamation of Saline-Sodic Soils with Gypsum and MSW Compost. **Compost Science & Utilization**, v. 12, p. 212-217, jul. 2013. DOI: <https://10.1080/1065657X.2004.10702177>.



Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/252405451\\_Reclamation\\_of\\_Saline-Sodic\\_Soils\\_with\\_Gypsum\\_and\\_MSW\\_Compost](https://www.researchgate.net/publication/252405451_Reclamation_of_Saline-Sodic_Soils_with_Gypsum_and_MSW_Compost). Acesso em: 15 out 2019.

HURTADO, P. L.; ROUILLY, A.; VANDENBOSSCHE, V.; RAYNAUD, C. A review on the properties of cellulose fibre insulation. **Building and Environment**, v. 96, p. 170-177, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132315301311>. Acesso em: 09 jun. 2019.

ISLAM, R.; NAZIFA, T. H.; YUNIARTO, A.; UDDIN, A.S.M.S.; SALMIATI, S.; SHAHID, S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10–21, mai. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0319-x>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/292801264\\_Estimation\\_of\\_gypsum\\_hemihydrate\\_content\\_in\\_recycled\\_gypsums\\_derived\\_from\\_gypsum\\_boards](https://www.researchgate.net/publication/292801264_Estimation_of_gypsum_hemihydrate_content_in_recycled_gypsums_derived_from_gypsum_boards). Acesso em: 09 jun. 2019.

IUCOLANO, F.; CAPUTO, D.; LEBOFFE, F.; LIGUORI, B. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 184–191, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815303810>. Acesso em: 09 jun. 2019.

JIMÉNEZ-RIVERO, A.; 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, jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814000518>. Acesso em: 09 jun. 2019.

JIMÉNEZ-RIVERO, A.; NAVARRO, J. G. Best practices for the management of end-of-life gypsum in a circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1335-1344, mai. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261730999X>. Acesso em: 09 jun. 2018.

JIMÉNEZ-RIVERO, A.; NAVARRO, J. G. Exploring factors influencing post-consumer gypsum recycling and landfilling in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 116, p. 116–123, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916302476>. Acesso em: 09 jun. 2019.

JEULIN, D.; MONNAIE, P.; PÉRRONET, F. Gypsum morphological analysis and modeling. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 299-311, abr. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00066-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00066-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946500000664>. Acesso em: 09 jun. 2018.

KAMEI, T.; AHMED, A.; UGAI, K. Durability of soft clay soil stabilized with recycled Bassanite and furnace cement mixtures. **Soils and Foundations**, v. 53, p. 155-165, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.12.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080612001308>. Acesso em: 15 out. 2019.

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. 2020.

KARNI, E.; KARNI, J. Gypsum in construction: origin and. **Materials and Structures**, v. 28, p. 98-100, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02473176>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02473176#citeas>. Acesso em: 09 jun. 2018.

KHALIL, A. A.; TAWFIK, A.; HEGAZY, A. A.; EL-SHAHAT, M. F. Effect of some waste additives on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 580–586, mai. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814007004>. Acesso em: 09 jun. 2019.

KIM, S. Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum–rice husk boards for wall and ceiling materials for construction. **Industrial crops and products**, v. 29, p. 381–387, jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.07.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092666900800157X>. Acesso em: 09 jun. 2019.

KIRCHHEIM, A.; RODRÍGUEZ, E.; MYERS, R.; GOBBO, L.; MONTEIRO, P.; DAL MOLIN, D; SOUZA, R; CINCOTTO, M. Effect of Gypsum on the Early Hydration of Cubic and Na-Doped Orthorhombic Tricalcium Aluminate. **Materials**, v. 11, p. 568-574, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11040568>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/324422747\\_Effect\\_of\\_Gypsum\\_on\\_the\\_Early\\_Hydration\\_of\\_Cubic\\_and\\_Na-Doped\\_Orthorhombic\\_Tricalcium\\_Aluminate](https://www.researchgate.net/publication/324422747_Effect_of_Gypsum_on_the_Early_Hydration_of_Cubic_and_Na-Doped_Orthorhombic_Tricalcium_Aluminate). Acesso em: 04 jun. 2018.

KNAUF DO BRASIL (Brasil). **Produção nacional bate record em 2019**. Disponível em: <http://www.knauf.com.br/>. Acesso em: 06 mai. 2020.

KREJSOVÁ, J.; DOLEŽELOVÁ, M.; PERNICOVÁ, R.; SVORAA, P.; VIMMROVÁ, A. The influence of different aggregates on the behavior and properties of gypsum mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 188-197, jun, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.007>. Acesso em: 04 jun. 2018.

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, jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.06.018>. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221905005789>. Acesso em: 04 jun. 2018.

KONDRATIEVA, N.; BARRE, M.; GOUTENOIRE, F.; SANYTSKY, M. Study of modified gypsum binder. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 535-542, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.140>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817310255>. Acesso em: 04 jun. 2019.

KOST, D.; CHEN, L.; DICK, W. Predicting plant sulfur deficiency in soils: Results from Ohio. **Biology and Fertility of Soils**, v. 44, p. 1091-1098, set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0298-y>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/225518168\\_Predicting\\_plant\\_sulfur\\_deficiency\\_in\\_soils\\_Results\\_from\\_Ohio](https://www.researchgate.net/publication/225518168_Predicting_plant_sulfur_deficiency_in_soils_Results_from_Ohio). Acesso em: 15 out. 2019.

KUTTAH, D.; SATO, K. Review on the effect of gypsum content on soil behavior. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 28–37, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221439121500015X>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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. 2018.

LEE, J.; OGURA, H. Reaction characteristics of various gypsum as chemical heat pump materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 50, p. 1557-1563, fev. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.05.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431112003894>. Acesso em: 04 jun. 2019.

LEI, D.; GUO, L.; SUN, W.; LIU, J.; MIAO, C. Study on properties of untreated FGD gypsum-based high-strength building materials. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 765-773, out. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.166>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817315106>. Acesso em: 04 jun. 2019.

LEIVA, C.; ARENAS, C. G.; VILCHES, L. F.; VALE, J.; GIMENEZ, A.; BALLESTEROS J. C.; FERNANDEZ-PEREIRA, C. Use of FGD gypsum in fire resistant panels. **Waste Management**, v. 30, p. 1123–1129, fev. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1000070X>. Acesso em: 04 jun. 2019.

LEWRY, A. J.; WILLIAMSON, J. The setting of gypsum plaster. **Journal of materials science**, v. 29, p. 5524-5528, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00349943>. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00354546>. Acesso em: 04 jun. 2019.

LIANG, W.; YANG, X.; GAO, H.; ZHANG, C.; ZHAO, Y.; DUSSEAUULT, M. B. Experimental study of mechanical properties of gypsum soaked in brine. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, v. 53, p. 142-150, jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.05.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160912000950>. Acesso em: 04 jun. 2019.

LIANG, H.; LI, J. The influence of hydration and swelling properties of gypsum on the preparation of lightweight brick using water supply reservoir sediment. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 691–700, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.111>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181530132X>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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/xviiiicongresso/paineis/083725.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2020.

LIU, J.; HUE, N. Amending subsoil acidity by surface applications of gypsum, lime, and composts. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 2117-2132, set. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1081/CSS-120000273>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/240546330\\_Amending\\_subsoil\\_acidity\\_by\\_surface\\_applications\\_of\\_gypsum\\_lime\\_and\\_composts](https://www.researchgate.net/publication/240546330_Amending_subsoil_acidity_by_surface_applications_of_gypsum_lime_and_composts). Acesso em: 15 out 2019.

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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1100-6>. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10973-010-1100-6>. Acesso em: 05 jun. 2018.

MAGALLANES-RIVERA, R. X.; JUAREZ-ALVARADO, C. A.; VALDEZ, P.; MENDOZA-RANGEL, J. M. Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 591–596, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061812005247>. Acesso em: 08 nov. 2019.

MANDAL, P.; MANDAL, T. Anion water in gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and hemihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 313-316, fev. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00675-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00675-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884601006755>. Acesso em: 23 jun. 2017.

MÁRMOL, G.; SANTOS, S.F.; SAVASTANO, H. J.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Mechanical and physical performance of low alkalinity cementitious composites reinforced with recycled cellulosic fibres pulp from cement kraft bags.

**Industrial Crops and Products**, v. 49, p. 422-427, abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.051>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092666901300229X>. Acesso em: 08 nov. 2017.

MEDINA, N. F.; BARBERO-BARRERA, M. M. Mechanical and physical enhancement of gypsum composites through a synergic work of polypropylene fiber and recycled isostatic grafite filler. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 165–177, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.073>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816318335>. Acesso em: 08 nov. 2017.

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, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.140>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816314039>. Acesso em: 08 nov. 2017.

MEDINA, N. F.; BARBERO-BARRERA, M. M.; BUSTAMENTE, R. Improvement of the properties of gypsum-based composites with recycled isostatic graphite powder from the milling production of molds for Electrical Discharge Machining (EDM) used as a new filler. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 17–27, jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.194>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815308655>. Acesso em: 08 nov. 2017.

MELO, D. C. P.; BENACHOUR, M. ; RIBEIRO, A. S. Estudo do processo de produção de gesso reciclado.... **Revista tecnológica**, v. 1, p. 1-7, mar. 2011. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/view/29994>. Acesso em: 23 jan. 2020.

MENDONÇA, R. S.; LEONARDO B.; SANTOS, L. B.; MOURA, A. E.; VASCONCELOS, E. C.; SARUBBO, L. A.; SANTOS, V. A. Optimisation of recyclable beta plaster using plaster waste in a continuous reactor with a mobile helical element. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 370-377, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616300634>. Acesso em: 21 nov. 2018.

MERINO, M. R.; ASTORQUI, J. S. C.; SÁEZ, P. V.; JIMÉNEZ, R. S.; CORTINA, M. G. Eco plaster mortars with addition of waste for high hardness coatings. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 649–656, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.037>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817320792>. Acesso em: 23 fev. 2019.

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, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.04.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674200114001175>. Acesso em: 21 nov. 2018.

MORALES-CONDE, M. J.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; PEDREÑO-ROJAS, M.A. Physical and mechanical properties of wood-gypsum composites from demolition material in rehabilitation works. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 6–14, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.137>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630441X>. Acesso em: 23 fev. 2019.

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. DOI: 10.17012/entac2014.528. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301435450\\_Avaliacao\\_da\\_adequacao\\_do\\_gesso\\_reciclado\\_as\\_prescricoes\\_da\\_NBR\\_13207](https://www.researchgate.net/publication/301435450_Avaliacao_da_adequacao_do_gesso_reciclado_as_prescricoes_da_NBR_13207). Acesso em: 12 jan. 2020.

MOURA, A. G.; MANZO, N. R.; CAMARINI, G. Effect of citric acid on properties of recycled gypsum plaster to building components. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 383–390, jul. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816312120>. Acesso em: 21 nov. 2019.

NAETH, M. A.; WILKINSON, S. R. Can we build better compost? Use of waste drywall to enhance plant growth on reclamation sites. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 503-509, set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479713005355>. Acesso em: 21 nov. 2019.

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

**NAZHAD, M. M. The influence of refining energy and intensity on enhancing the bonding potential of an OCC pulp. *Appita Journal*, v. 57, p. 191-198, mai. 2004. Disponível em: The Influence of Refining Energy and Intensity on Enhancing the Bonding Potential of an OCC Pulp. Acesso em: 02 mai. 2018.**

NDUKWE, I.; YUAN, Q. Drywall (Gyproc Plasterboard) Recycling and Reuse as a Compost-Bulking Agent in Canada and North America: A Review. **Recycling**, v.1, p. 311-320. 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/recycling1030311>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/309089266\\_Drywall\\_Gyproc\\_Plasterboard\\_](https://www.researchgate.net/publication/309089266_Drywall_Gyproc_Plasterboard_)

Recycling\_and\_Reuse\_as\_a\_Compost-Bulking\_Agent\_in\_Canada\_and\_North\_America\_A\_Review/citation/download. Acesso em: 03 mar. 2019.

NEW WEST GYPSUM RECYCLING. **Recovery process**. Disponível em: <http://www.nwgyypsum.com/>. Acesso em: 12 jan. 2018.

NETO, A. M.; CINCOTTO, M. A.; WELLINGTON, R. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 312-318, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946510000053>. Acesso em: 21 ago. 2019.

OKSANEN, T.; PERE, J.; PAAVILAINEN, L.; BUCHERT, J.; VIKARI, L. Treatment of recycled kraft pulps with *Trichoderma reesei* hemicellulases and cellulases. **Journal of Biotechnology**, v. 78, p. 39–48, jun. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00232-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165699002321>. Acesso em: 21 nov. 2019.

OLIVEIRA, I. R.; GARCIA, J. R.; PANDOLFELLI, V.C. Influência de aditivos dispersantes e acelerador na hidratação de cimento e cimento-matriz. **Cerâmica**, v. 52, p. 125-129, set. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132006000300012>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132006000300012](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132006000300012). Acesso em: 12 mai. 2020.

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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9750-7>. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9750-7>. Acesso em: 08 jan. 2019.

PAVASARS, I.; HAGBERG, J.; BORÉN, H.; ALLARD, B. Alkaline Degradation of Cellulose: Mechanisms and Kinetics. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 11, p. 39-47, abr. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024267704794>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/227266796\\_Alkaline\\_Degradation\\_of\\_Cellulose\\_Mechanisms\\_and\\_Kinetics](https://www.researchgate.net/publication/227266796_Alkaline_Degradation_of_Cellulose_Mechanisms_and_Kinetics). Acesso em: 02 mai. 2018.

PEDREÑO-ROJAS, M.A.; MORALES-CONDE, M. J.; PÉREZ-GÁLVEZ, F.; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, C.; Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 690-705, ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617317936>. Acesso em: 21 ago. 2019.

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, nov. 2010. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60203-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60203-X). Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100363260960203X>. Acesso em: 21 nov. 2019.

PERVYSHIN, G. N.; YAKOVLEV, G. I.; GORDINA, A. F.; KERIENE, J.; POLYANSKIKH, I. S.; FISCHER, H. B.; RACHIMOVAD, N. R.; BURYANOV, A. F. Water-resistant gypsum compositions with man-made modifiers. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 867-874, fev. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.087>. Disponível em: <https://pdf.sciencedirectassets.com/278653/1-s2.0-S1877705817X00039/1-s2.0-S1877705817305933/main.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2019.

PIMENTEL, L. L.; CAMARINI, G. **Gypsum plastering: waste evaluation**. In: International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, 2009, São Paulo. Anais do International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, v. 1, p. 1-15, mar. 2009.

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. 2018.

PINHEIRO, S. M. M.; CAMARINI, G. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, p. 215-218, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.794>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/270592276\\_Characteristics\\_of\\_Gypsum\\_Recycling\\_in\\_Different\\_Cycles](https://www.researchgate.net/publication/270592276_Characteristics_of_Gypsum_Recycling_in_Different_Cycles). Acesso em: 21 nov. 2019.

PLACO DO BRASIL. **Mercado de drywall segue em expansão**. Disponível em: <http://www.placo.com.br>. Acesso em: 19 jun. 2018.

PÓVOAS, Y.; RIBEIRO, A.C.A.S.; VIÉGAS, D.J. Influence of calcined gypsum residue in the heat of hydration of the plaster. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 9975-9986, jun. 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/297337595\\_Influence\\_of\\_calcined\\_gypsum\\_residue\\_in\\_the\\_heat\\_of\\_hydration\\_of\\_the\\_plaster](https://www.researchgate.net/publication/297337595_Influence_of_calcined_gypsum_residue_in_the_heat_of_hydration_of_the_plaster). Acesso em: 21 nov. 2019.

PRACOWNIA, P. **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. 2018.

QUINTANA, A.; ALBA, J.; REY, R.; GUILLÉN-GUILLAMÓN, G. Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 408-420, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618306930>. Acesso em: 21 nov. 2019.



RAGHAVENDRA, T.; UDAYASHANKAR, B. C. Engineering properties of controlled low strength materials using flyash and waste gypsum wallboards. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 548–557, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.070>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181530492X>. Acesso em: 21 nov. 2019.

REYNAUD, P.; SAADAoui, M.; MEILLE, S.; FANTOZZI, G. Water effect on internal friction of set plaster. **Materials Science and Engineering**, v. 442, p. 500–503, nov. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.152>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509306011087>. Acesso em: 21 nov. 2019.

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. 2020.

RIVERO, 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814000518>. Acesso em: 05 mai. 2018.

RIVERO, 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, mai. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9561-x>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/302064760\\_Indicators\\_to\\_Measure\\_the\\_Management\\_Performance\\_of\\_End-of-Life\\_Gypsum\\_From\\_Deconstruction\\_to\\_Production\\_of\\_Recycled\\_Gypsum](https://www.researchgate.net/publication/302064760_Indicators_to_Measure_the_Management_Performance_of_End-of-Life_Gypsum_From_Deconstruction_to_Production_of_Recycled_Gypsum). Acesso em: 04 jun. 2019.

RIVERO, 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, p. 171–181, fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916300143>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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. 2019.

ROSSETO, J. R. M.; CORREIA, L. S.; GERALDO, R. H.; CAMARINI, G. Gypsum plaster waste recycling: analysis of calcination time. **Key Engineering Materials**, v.

668, p. 312-323, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.312>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/283083080\\_Gypsum\\_Plaster\\_Waste\\_Recycling\\_Analysis\\_of\\_Calcination\\_Time](https://www.researchgate.net/publication/283083080_Gypsum_Plaster_Waste_Recycling_Analysis_of_Calcination_Time). Acesso em: 21 nov. 2019.

SAN-ANTONIO-GONZÁLEZ, A.; MERINO, M. R.; ARREBOLA, C. V.; VILLORIA-SÁEZ, P. Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste with enhanced thermal behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 57-63, set. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815005371>. Acesso em: 04 jun. 2019.

SANTOS, V. A. **Análise cinética da reação de desidratação térmica da gipsita na obtenção do hemidra to beta**. 1996. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, 1996. Disponível em: [file:///D:/tese/Artigos%20completamente%20lidos%20e%20utilizados%20-%20só%20fazer%20a%20referência/Santos\\_ValdemirAlexandredos\\_D.pdf](file:///D:/tese/Artigos%20completamente%20lidos%20e%20utilizados%20-%20só%20fazer%20a%20referência/Santos_ValdemirAlexandredos_D.pdf). Acesso em 05 mai. 2020.

SAVI, O. **Placas de Forro com Gesso Reciclado: Ecoeficiência na produção**. 1. ed. Curitiba: Editora e Livraria Appris Ltda, 2017.

SHAW, M. Riverwood carver deeper packaging niche with graphic packaging merger. **Pulp & Paper**, v. 3, p. 32-38, jun. 2003. Disponível em: <https://www.beveragedaily.com/Article/2003/03/27/Riverwood-and-Graphic-Packaging-merge>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.093>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812002954>. Acesso em: 04 jun. 2019.

SCHMITZ, I. B. T. A.; PÓVOAS, Y. V. Study of Properties of gypsum plaster with addition of waste. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), 2009, Bath. **Anais Eletrônicos**. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-862120100006&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1678-862120100006&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 14 jun. 2019.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, R. C.; BATALHA, L. R.; MANFREDI, M. Combination of enzymatic, mechanical and ultrasonic treatments for improvement of the properties of secondary pulps. **Cerne**, v. 4, p. 245-251, dez, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000400016>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602013000400016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602013000400016). Acesso em: 04 jun. 2018.

SHIROMA, L.; CAMARINI, G.; BERALDO, A. L. Effect of wood particle treatment on the properties of gypsum plaster pastes and composites. **Revista Matéria**, v. 21, p. 1032-1044, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620160004.0095>.

Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762016000401032](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762016000401032). Acesso em: 04 jun. 2019.

SOARES, J. P.; ZAMPIERON, J. V.; ROSSI, J. L. F. Low pressure powder injection moulding of stainless steel powder. **Key Engineering Materials**, v. 189-19, p. 610-615, jan. 2001. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.610>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/272909583\\_Low\\_Pressure\\_Powder\\_Injection\\_Moulding\\_of\\_Stainless\\_Steel\\_Powders](https://www.researchgate.net/publication/272909583_Low_Pressure_Powder_Injection_Moulding_of_Stainless_Steel_Powders). Acesso em: 12 jan. 2020.

SUÁREZ, S.; ROCA, X.; GASSO, S. Product-specific life cycle assessment of recycled Gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 150-159, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616000792>. Acesso em: 12 jan. 2020.

SUN, W.; BARLAZ, M. Measurement of chemical leaching potential of sulfate from landfill disposed sulfate containing wastes. **Waste Management**, v. 36, p. 191-196, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14005649>. Acesso em: 12 jan. 2019.

TAKAHASHI, H.; KANAHAMA, H. A New Recycling System of Waste Gypsum Board Paper: Application of Waste Gypsum Board Paper for Soil Improvement. **Int. J. Soc. Mater. Eng. Resour.**, v. 17, p. 64-68, mar. 2010. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijsmer/17/1/17\\_1\\_64/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijsmer/17/1/17_1_64/_pdf). Acesso em: 12 jan. 2020.

THORMARK, C. Conservation of energy and natural resources by recycling building waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 33, p. 113–130, set. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00078-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344901000787>. Acesso em: 12 jan. 2020.

TUBAIL, K.; CHEN, L.; MICHEL, F.; KEENER, H.; RIGOT, J.; KLINGMAN, M.; KOST, D.; DICK, W. Gypsum Additions Reduce Ammonia Nitrogen Losses During Composting of Dairy Manure and Biosolids. **Compost Science & Utilization**, v. 16, p. 285-293, out. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2008.10702390>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/261630187\\_Gypsum\\_Additions\\_Reduce\\_Ammonia\\_Nitrogen\\_Losses\\_During\\_Composting\\_of\\_Dairy\\_Manure\\_and\\_Biosolids/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/261630187_Gypsum_Additions_Reduce_Ammonia_Nitrogen_Losses_During_Composting_of_Dairy_Manure_and_Biosolids/citation/download). Acesso em: 06 mai. 2020.

TURUNEN, M. P. K.; MARJAMAKI, P.; PAAJANEN, M.; LAHTINEN, J.; KIVILAHTI, J. K. Pull-off test in the assessment of adhesion at printed wiring board metallisation/epoxy interface. **Microelectronics Reliability**, v. 44, p. 993–1007, fev. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.01.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271404000022>. Acesso em: 04 jun. 2018.

UNIÃO EUROPEIA. Comissão Europeia. Project Gypsum to Gypsum, 2012. Bruxelas. Disponível em: <https://europa.eu/>. Acesso em: 18 nov 2018.

VRANCKEN, K. C.; LAETHEM, B. Recycling options for gypsum from construction and demolition waste. **Waste Management Series**, v, 1, p. 325-331, mar. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0713-2743\(00\)80045-8](https://doi.org/10.1016/S0713-2743(00)80045-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0713274300800458>. Acesso em: 12 jan. 2019.

VASCONCELOS, W. E.; SANTOS, A. V.; DANTAS, C. C.; LIRA, B. O.; ALBERTO, C.; RANJENDRA, N.; GAZINEU, P. M. H. Analysis of gypsum ore conversion with aid of gamma-ray transmission and CCRD. **Progress in Nuclear Energy**, p. 1185-1189, nov. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.08.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197011001648>. Acesso em: 12 jan. 2019.

VIMMROVÁ, A.; KEPPERT, M.; MICHALKO, O.; CERNY, R. Calcined gypsum–lime–metakaolin binders: Design of optimal composition. **Cement & Concrete Composites**, v. 52, p. 91–96, jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.05.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946514000882>. Acesso em: 04 jun. 2018.

VIMMROVÁ, A.; KEPPERT, M.; SVOBODA, L.; CERNY, R. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 84–89, jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946510001411>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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. 2019.

YAKOLEV, G.; POLYANSKIKH, I.; FEDOROVA, G.; GORDINA, A.; BURYANOV, A. Anhydrite and gypsum compositions modified with ultrafine manmade admixtures. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 13-21, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.195>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392008000400002](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392008000400002). Acesso em: 04 jun. 2018.

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, jul. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810006823>. Acesso em: 04 jun. 2019.

YU, Q.L.; BROUWERS, H. J. H. Development of a self-compacting gypsum-based lightweight composite. **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 1033–1043, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.05.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095894651200114X>. Acesso em: 04 jun. 2019.

ZHIXIN, L.; PENG, J.; HAIXIN, Z.; XINGXING, Q.; MIN, Z. Grindability, grading and wettability of recycled plaster. **Transactions of Tianjin University**, v. 22, p. 480-485, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12209-016-2742-7>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/309023941\\_Grindability\\_grading\\_and\\_wettability\\_of\\_recycled\\_plaster](https://www.researchgate.net/publication/309023941_Grindability_grading_and_wettability_of_recycled_plaster). Acesso em: 04 jun. 2019.

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, jan. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA01253A>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/299418673\\_Simultaneous\\_synthesis\\_of\\_ettringite\\_and\\_absorbate\\_incorporation\\_by\\_aqueous\\_agitation\\_of\\_mechanochemically\\_prepared\\_precursor](https://www.researchgate.net/publication/299418673_Simultaneous_synthesis_of_ettringite_and_absorbate_incorporation_by_aqueous_agitation_of_mechanochemically_prepared_precursor). Acesso em: 08 nov. 2018.

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, fev. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.09.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884614001938>. Acesso em: 04 jun. 2019.

ZHU, C.; ZHANG, J.; YI, W.; CAO, W.; PENG, J.; LIU, J. Research on degradation mechanisms of recycled building gypsum. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 540–549, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.060>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818308584>. Acesso em: 08 nov. 2018.

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, p. 357-265, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.06.024>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0926860X>. Acesso em: 04 jun. 2018.

**APÊNDICE A**

## Análise estatística dos dados

## Massa Unitária

| GC             |        | GR             |                           |
|----------------|--------|----------------|---------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9297 | Shapiro-Wilk W | 0,9046                    |
| N:             | 5      | N:             | 5                         |
| Mean:          | 688,22 | Mean:          | 657,37                    |
| Variance:      | 21,177 | Variance:      | 13,406                    |
| t :            | 11,729 | p (same mean): | 2,55E-06 Critical t 2,306 |

## Massa específica

| GC             |        | GR             |                           |
|----------------|--------|----------------|---------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9608 | Shapiro-Wilk W | 0,8536                    |
| N:             | 5      | N:             | 5                         |
| Mean:          | 2567,6 | Mean:          | 2524,7                    |
| Variance:      | 1066,7 | Variance:      | 501,41                    |
| t :            | 2,4196 | p (same mean): | 0,041874 Critical t 2,306 |
| Uneq. var. t : | 2,4196 | p (same mean): | 0,045731                  |

## Superfície específica

| GC             |        | GR             |                           |
|----------------|--------|----------------|---------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8518 | Shapiro-Wilk W | 0,8162                    |
| N:             | 5      | N:             | 5                         |
| Mean:          | 448,36 | Mean:          | 358,18                    |
| Variance:      | 537,84 | Variance:      | 838,32                    |
| t :            | 5,4355 | p (same mean): | 0,000619 Critical t 2,306 |
| Uneq. var. t : | 5,4355 | p (same mean): | 0,000725                  |

## Água Livre

| GC             |         | GR             |                          |
|----------------|---------|----------------|--------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9506  | Shapiro-Wilk W | 0,8907                   |
| N:             | 5       | N:             | 5                        |
| Mean:          | 1,192   | Mean:          | 1,114                    |
| Variance:      | 0,00747 | Variance:      | 0,02943                  |
| t :            | 0,90796 | p (same mean): | 0,39043 Critical t 2,306 |
| Uneq. var. t : | 0,90796 | p (same mean): | 0,39942                  |

## Água de cristalização

| GC             |        | GR             |                           |
|----------------|--------|----------------|---------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8425 | Shapiro-Wilk W | 0,8132                    |
| N:             | 5      | N:             | 5                         |
| Mean:          | 5,9    | Mean:          | 4,4                       |
| Variance:      | 0,0721 | Variance:      | 0,02975                   |
| t :            | 10,51  | p (same mean): | 5,85E-06 Critical t 2,306 |
| Uneq. var. t : | 10,51  | p (same mean): | 1,85E-05                  |

## Óxido de cálcio

| GC             |        | GR             |                            |
|----------------|--------|----------------|----------------------------|
| Shapiro-Wilk W | 0,958  | Shapiro-Wilk W | 0,8921                     |
| N:             | 3      | N:             | 3                          |
| Mean:          | 41,373 | Mean:          | 34,543                     |
| Variance:      | 1,3684 | Variance:      | 3,5714                     |
| t :            | 5,3226 | p (same mean): | 0,005995 Critical t 2,7764 |
| Uneq. var. t : | 5,3226 | p (same mean): | 0,009835                   |

## Anidrido sulfúrico

| GC             |         | GR             |          |            |        |
|----------------|---------|----------------|----------|------------|--------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9618  | Shapiro-Wilk W | 0,7625   |            |        |
| N:             | 3       | N:             | 3        |            |        |
| Mean:          | 46,5667 | Mean:          | 42,3467  |            |        |
| Variance:      | 6,4466  | Variance:      | 7,5541   |            |        |
| t :            | 3,8275  | p (same mean): | 0,006198 | Critical t | 2,7764 |
| Uneq. var. t : | 3,8275  | p (same mean): | 0,001026 |            |        |

## Início de Pega

| GC             |         | GR             |          |            |       |
|----------------|---------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9351  | Shapiro-Wilk W | 0,8799   |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 06:50   | Mean:          | 15:45    |            |       |
| Variance:      | 0,46018 | Variance:      | 0,60591  |            |       |
| t :            | 19,28   | p (same mean): | 5,43E-08 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 19,28   | p (same mean): | 6,77E-08 |            |       |

## Fim de pega

| GC             |         | GR             |          |            |       |
|----------------|---------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8892  | Shapiro-Wilk W | 0,9889   |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 18:30   | Mean:          | 48:25:00 |            |       |
| Variance:      | 0,43112 | Variance:      | 2,9771   |            |       |
| t :            | 36,221  | p (same mean): | 3,70E-10 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 36,221  | p (same mean): | 2,19E-07 |            |       |

## Tração na flexão - 7 dias

| GC             |         | GR             |          |            |       |
|----------------|---------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,87    | Shapiro-Wilk W | 0,8937   |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 3,418   | Mean:          | 2,914    |            |       |
| Variance:      | 0,01797 | Variance:      | 0,02573  |            |       |
| t :            | 5,3911  | p (same mean): | 0,000653 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 5,3911  | p (same mean): | 0,000725 |            |       |

## Tração na flexão - 28 dias

| GC             |         | GR             |         |            |       |
|----------------|---------|----------------|---------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9437  | Shapiro-Wilk W | 0,9216  |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5       |            |       |
| Mean:          | 3,63    | Mean:          | 3,246   |            |       |
| Variance:      | 0,20325 | Variance:      | 0,01608 |            |       |
| t :            | 1,8334  | p (same mean): | 0,10409 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 1,8334  | p (same mean): | 0,13087 |            |       |

## Compressão axial - 7 dias

| GC             |         | GR             |         |            |       |
|----------------|---------|----------------|---------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9315  | Shapiro-Wilk W | 0,9138  |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5       |            |       |
| Mean:          | 7,452   | Mean:          | 7,246   |            |       |
| Variance:      | 0,04112 | Variance:      | 0,06183 |            |       |
| t :            | 1,4356  | p (same mean): | 0,18903 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 1,4356  | p (same mean): | 0,19052 |            |       |

## Compressão axial - 28 dias

| GC             |        | GR             |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9315 | Shapiro-Wilk W | 0,9138   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 9,7    | Mean:          | 9,3      |            |       |
| Variance:      | 0,0236 | Variance:      | 0,0625   |            |       |
| t :            | 3,0482 | p (same mean): | 0,015864 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 3,0482 | p (same mean): | 0,019866 |            |       |

## Dureza superficial - 7 dias

| GC             |        | GR             |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8035 | Shapiro-Wilk W | 0,8486   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 43,8   | Mean:          | 32,5     |            |       |
| Variance:      | 4,885  | Variance:      | 5,42     |            |       |
| t :            | 7,8712 | p (same mean): | 4,91E-05 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 7,8712 | p (same mean): | 4,98E-05 |            |       |

## Dureza superficial - 28 dias

| GC             |        | GR             |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9315 | Shapiro-Wilk W | 0,9138   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 45,7   | Mean:          | 38,9     |            |       |
| Variance:      | 2,645  | Variance:      | 3,925    |            |       |
| t :            | 5,9321 | p (same mean): | 3,49E-04 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 5,9321 | p (same mean): | 4,03E-04 |            |       |

## Aderência - substrato de bloco de concreto

| GR             |          | GC             |          |            |        |
|----------------|----------|----------------|----------|------------|--------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9195   | Shapiro-Wilk W | 0,9094   |            |        |
| N:             | 12       | N:             | 12       |            |        |
| Mean:          | 0,27333  | Mean:          | 0,27917  |            |        |
| Variance:      | 0,003533 | Variance:      | 0,004299 |            |        |
| t :            | 0,22833  | p (same mean): | 0,8215   | Critical t | 2,0739 |
| Uneq. var. t : | 0,22833  | p (same mean): | 0,82152  |            |        |

## Aderência - substrato de bloco cerâmico

| GR             |          | GC             |          |            |        |
|----------------|----------|----------------|----------|------------|--------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8715   | Shapiro-Wilk W | 0,8318   |            |        |
| N:             | 12       | N:             | 12       |            |        |
| Mean:          | 0,074167 | Mean:          | 0,095833 |            |        |
| Variance:      | 0,000136 | Variance:      | 0,000227 |            |        |
| t :            | 3,9442   | p (same mean): | 0,000691 | Critical t | 2,0739 |
| Uneq. var. t : | 3,9442   | p (same mean): | 0,00076  |            |        |

## Gramatura

| PC             |        | PR             |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8479 | Shapiro-Wilk W | 0,8966   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 191,02 | Mean:          | 235,6    |            |       |
| Variance:      | 6,067  | Variance:      | 8,8      |            |       |
| t :            | 25,853 | p (same mean): | 5,38E-09 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 25,853 | p (same mean): | 8,59E-09 |            |       |



## Compressão papel

| PC             |          | PR             |          |            |       |
|----------------|----------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8877   | Shapiro-Wilk W | 0,9053   |            |       |
| N:             | 5        | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 0,7558   | Mean:          | 0,56     |            |       |
| Variance:      | 0,000413 | Variance:      | 0,0004   |            |       |
| t :            | 15,353   | p (same mean): | 3,22E-07 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 15,353   | p (same mean): | 3,23E-07 |            |       |

## Tração longitudinal

| PC             |        | PR             |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8971 | Shapiro-Wilk W | 0,8976   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 12,606 | Mean:          | 2,406    |            |       |
| Variance:      | 1,1357 | Variance:      | 0,08068  |            |       |
| t :            | 20,68  | p (same mean)  | 3,13E-08 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 20,68  | p (same mean)  | 1,09E-05 |            |       |

## Tração transversal

| PC             |         | PR             |          |            |       |
|----------------|---------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,8846  | Shapiro-Wilk W | 0,8108   |            |       |
| N:             | 5       | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 4,786   | Mean:          | 1,434    |            |       |
| Variance:      | 0,69173 | Variance:      | 0,26128  |            |       |
| t :            | 7,6779  | p (same mean): | 5,86E-05 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 7,6779  | p (same mean): | 0,000154 |            |       |

## Flexão longitudinal

| CGC            |        | CGR            |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9477 | Shapiro-Wilk W | 0,8228   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 697,18 | Mean:          | 556,99   |            |       |
| Variance:      | 1262,1 | Variance:      | 2221,1   |            |       |
| t :            | 5,3115 | p (same mean): | 0,000718 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 5,3115 | p (same mean): | 0,000912 |            |       |

## Flexão transversal

| CGC            |        | CGR            |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| N              | 5      | N              | 5        |            |       |
| Shapiro-Wilk W | 0,8546 | Shapiro-Wilk W | 0,9162   |            |       |
| Mean:          | 280,79 | Mean:          | 443,57   |            |       |
| Variance:      | 3294,9 | Variance:      | 5577,4   |            |       |
| t :            | 3,8641 | p (same mean): | 0,004781 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 3,8641 | p (same mean): | 0,005406 |            |       |

## Flexão longitudinal

| PGC            |        | PGR            |         |          |       |
|----------------|--------|----------------|---------|----------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,9861 | Shapiro-Wilk W | 0,9269  |          |       |
| N:             | 5      | N:             | 5       |          |       |
| Mean:          | 361,07 | Mean:          | 312,6   |          |       |
| Variance:      | 3402,6 | Variance:      | 1883,6  |          |       |
| t :            | 1,4907 | p (same mean): | 0,17438 | Critical | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 1,4907 | p (same mean): | 0,17744 |          |       |

## Flexão transversal

| PGC            |         | PGR            |         |            |       |
|----------------|---------|----------------|---------|------------|-------|
| N              | 5       | N              | 5       |            |       |
| Shapiro-Wilk W | 0,7635  | Shapiro-Wilk W | 0,8177  |            |       |
| Mean:          | 177,7   | Mean:          | 201,75  |            |       |
| Variance:      | 1490,4  | Variance:      | 2269,1  |            |       |
| t :            | 0,87693 | p (same mean): | 0,40608 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 0,87693 | p (same mean): | 0,40715 |            |       |

## Dureza chapa

| CGC            |        | CGR            |         |            |       |
|----------------|--------|----------------|---------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,7431 | Shapiro-Wilk W | 0,9061  |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5       |            |       |
| Mean:          | 17,78  | Mean:          | 16,052  |            |       |
| Variance:      | 3,6422 | Variance:      | 3,4291  |            |       |
| t :            | 1,453  | p (same mean): | 0,18428 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 1,453  | p (same mean): | 0,18432 |            |       |

## Compressão Chapa

| CGC            |        | CGR            |          |            |       |
|----------------|--------|----------------|----------|------------|-------|
| Shapiro-Wilk W | 0,7259 | Shapiro-Wilk W | 0,7644   |            |       |
| N:             | 5      | N:             | 5        |            |       |
| Mean:          | 9,742  | Mean:          | 14,366   |            |       |
| Variance:      | 2,3243 | Variance:      | 6,9041   |            |       |
| t :            | 3,4036 | p (same mean): | 0,009311 | Critical t | 2,306 |
| Uneq. var. t : | 3,4036 | p (same mean): | 0,013002 |            |       |

**ANEXO A****Encargos sociais incidentes sobre homem-hora**

|  |                |
|--|----------------|
| <b>Grupo I</b>                                     |                |
| Previdência Social (INSS)                          | 20,00%         |
| Sesi   | 1,50%          |
| Senai  | 1,00%          |
| Sebrae   | 0,60%          |
| Incra  | 0,20%          |
| Salário-educação                                   | 2,50%          |
| Seguro-acidente                                    | 3,00%          |
| FGTS   | 8,00%          |
| <b>Soma</b>  | <b>36,80%</b>  |
| <b>Grupo II</b>                                    |                |
| Descanso semanal remunerado                        | 17,63%         |
| Férias   | 11,22%         |
| 1/3 constitucional de férias                       | 3,74%          |
| Feriados   | 4,06%          |
| Aviso prévio trabalhado                            | 1,00%          |
| Enfermidade  | 1,48%          |
| Acidentes de trabalho                              | 0,09%          |
| Adicional noturno                                  | 0,66%          |
| Licença-paternidade                                | 0,04%          |
| 13º salário  | 11,22%         |
| <b>Soma</b>  | <b>51,14%</b>  |
| <b>Grupo III</b>                                   |                |
| Aviso prévio indenizado                            | 17,34%         |
| <b>Soma</b>  | <b>17,34%</b>  |
| <b>Grupo IV</b>                                    |                |
| Multa fundiária (Recisão sem justa causa)          | 4,09%          |
| Contribuição Social (Lei complementar 110)         | 1,02%          |
| <b>Soma</b>  | <b>5,11%</b>   |
| <b>Grupo V - Incidência do Grupo I no Grupo II</b> |                |
| $0,3680 \times 0,5114$                             | 18,82%         |
| <b>Soma</b>  | <b>18,82%</b>  |
| <b>Grupo VI - Incidência do FGTS no Grupo III</b>  |                |
| $0,08 \times 0,1734$                               | 1,39%          |
| <b>Soma</b>  | <b>1,39%</b>   |
| <b>TOTAL GERAL</b>                                 | <b>130,60%</b> |

Fonte: Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC)