

## Gesso conformado sob pressão: os efeitos dos parâmetros de conformação sobre as propriedades físicas e mecânicas

Pressure-molded gypsum plaster: the effects of forming parameters on physical and mechanical properties

Vanessa Rodrigues Campos<sup>1</sup>, Ricardo Fernandes Carvalho<sup>2</sup>, Cleber Marcos Ribeiro Dias<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rua Prof. Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630, Salvador, Bahia, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal da Bahia, Departamento de Construção e Estrutura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rua Prof. Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630, Salvador, Bahia, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal da Bahia, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Rua Prof. Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630, Salvador, Bahia, Brasil.

e-mail: vanessarocampos@gmail.com, ricardoc@ufba.br, cdias@ufba.br

### RESUMO

A baixa resistência mecânica e a suscetibilidade à água restringem a aplicação do gesso de construção em elementos sem fins estruturais e em locais protegidos da umidade. Em contrapartida, a conformação sob pressão tem sido apontada como uma alternativa para se obter peças de gesso de elevado desempenho. No entanto, a influência de fatores de processamento e relacionados à mistura sobre as propriedades das pastas de gesso conformado sob pressão é pouco conhecida. Este artigo tem como objetivo investigar os efeitos da pressão ( $P$ ), massa conformada ( $M$ ) e relação água/gesso ( $X$ ) nas propriedades físicas e mecânicas do gesso conformado sob pressão (GCP). Um projeto fatorial  $2^k$  foi utilizado para avaliar os efeitos destes fatores de conformação e das suas interações. Neste projeto,  $P$  variou de 5 a 15 MPa,  $M$  de 350 a 550 g e  $X$  de 0,18 a 0,22. A espessura ( $t$ ), a porosidade ( $\eta$ ), o módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ), a resistência à tração na flexão ( $R_f$ ) e a resistência à compressão ( $R_c$ ) de corpos de prova prismáticos foram as propriedades analisadas. Os resultados mostraram que a pressão e a relação água/gesso tiveram efeitos significativos em todas as propriedades, exceto na espessura, e a massa conformada afetou de forma significativa, apenas, a espessura dos corpos de prova. A conformação do gesso sob pressão mostrou-se ser uma técnica promissora para o desenvolvimento de pastas de elevado desempenho mecânico ( $E = 20,0$  GPa,  $R_f = 12,6$  MPa e  $R_c = 53,5$  MPa) e baixa porosidade ( $\eta = 20,1\%$ ). Os resultados apontaram a necessidade do uso de um aditivo retardador para garantir a compactação do gesso antes do início da pega e melhorar o empacotamento dos cristais de di-hidrato. A técnica de conformação por prensagem mostrou-se propícia para o desenvolvimento de componentes pré-fabricados de gesso de alta resistência mecânica para uso na construção civil.

**Palavras-chave:** Gesso conformado sob pressão; Projeto fatorial  $2^k$ ; Porosidade; Gesso de alta resistência.

### ABSTRACT

The low mechanical strength and susceptibility to water restrict the application of gypsum plaster in non-structural elements and places protected from moisture. On the other hand, pressure-formed gypsum plaster has been pointed out as an alternative to obtaining high performance plaster pieces. However, the influence of processing and mixing-related factors on the properties of pressure-formed gypsum plaster pastes has yet to be discovered. This article aims to investigate the effects of pressure ( $P$ ), formed mass ( $M$ ), and water/gypsum ratio ( $X$ ) on the physical and mechanical properties of pressure-molded gypsum plaster (PMG). A  $2^k$  factorial design was used to evaluate the effects of these forming factors and their interactions. In this project,  $P$  varied from 5 to 15 MPa,  $M$  from 350 to 550 g, and  $X$  from 0.18 to 0.22. Thickness ( $t$ ), porosity ( $\eta$ ), dynamic modulus of elasticity ( $E$ ), flexural tensile strength ( $S_f$ ), and compressive strength ( $S_c$ ) of prismatic specimens were the analyzed properties. The results showed that the pressure and the water/plaster ratio had significant effects on all

properties except thickness, and the formed mass affected only the specimens' thickness. Plaster molding under pressure proved to be a promising technique for developing plaster pastes with high mechanical performance ( $E = 20.0$  GPa,  $S_f = 12.6$  MPa, and  $S_c = 53.5$  MPa) and low porosity ( $\eta = 20.1\%$ ). The results indicated the need for a retarder to guarantee the plaster compaction before the setting and to improve the dihydrate crystals packaging. The press-forming technique proved suitable for developing prefabricated gypsum components with high mechanical strength for civil construction.

**Keywords:** Pressure-molded gypsum plaster;  $2^k$  factorial design; Porosity; High-strength gypsum plaster.

## 1. INTRODUÇÃO

O baixo custo, a alta disponibilidade, a leveza, o bom isolamento térmico e acústico, a resistência ao fogo e o baixo consumo de energia na sua produção tornam o gesso de construção, um dos materiais mais utilizados na construção civil. No entanto, seu comportamento frágil e baixa resistência mecânica limitam seu uso neste setor [1]. Estas características mecânicas conferem uma aplicabilidade limitada a peças não estruturais e em situações que não exigam segurança, resistência e confiabilidade [2].

O comportamento mecânico depende da natureza do gesso utilizado (gesso  $\alpha$  e  $\beta$ ), do processo de fabricação, da consistência (relação água/gesso) e da presença de aditivos. O uso de aditivos tende a elevar o custo do produto final, podendo dificultar a reciclagem após o uso, sem melhoria significativa na resistência [3]. O endurecimento do gesso resulta de reações de hidratação, em que o sulfato de cálcio hemi-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) combina com a água para formar o sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), resultando em uma suspensão fluida e trabalhável. O teor de água teórico (estequiométrico) necessário para que ocorra a reação completa de hidratação do hemi-hidrato é de 18,6% de sua massa [4, 5]. No entanto, o gesso conformado pelo método convencional (GCC) exige uma quantidade de água em excesso para alcançar uma pasta com a fluidez necessária à aplicação. Parte desta água é consumida na reação de hidratação e a outra, em excesso, é evaporada originando uma estrutura porosa e de baixa resistência [4, 6, 7].

A busca por um processo capaz de incorporar baixos teores de água na formação do di-hidrato para a conformação de componentes de gesso foi objeto de estudos e das patentes desenvolvidas por SOUZA [4] e SOUZA *et al.* [8]. Estes autores utilizaram a técnica de prensagem uniaxial ou isostática para a compactação de uma massa de gesso umedecida com um volume de água de 20% da massa do hemi-hidrato, quantidade abaixo da mínima necessária para produzir uma suspensão, e próxima do teor de água estequiométrico necessário à formação do di-hidrato. Este pequeno excesso de água teve como finalidade facilitar a aproximação entre os grãos de gesso, agindo como lubrificante, durante a prensagem. Assim, a água passou a agir como um lubrificante de fácil disponibilidade e baixo custo. No entanto, deve ser considerado um teor máximo de água, de forma preferencialmente, não causar exsudação durante a prensagem [4]. O método originou um gesso de elevada resistência mecânica e baixa permeabilidade [4, 8].

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico por meio da prensagem do pó de gesso umedecido, com uma quantidade de água próxima da mínima necessária à reação de hidratação. A técnica de moldagem sob pressão tem sido uma alternativa promissora para a redução da porosidade e aumento da resistência mecânica de peças pré-moldadas de gesso.

KANNO *et al.* [9] desenvolveram placas de gesso de elevada resistência à tração na flexão (22 MPa) e à compressão (65 MPa), a partir da umidificação, por aspersão do gesso  $\beta$  (gesso comercial), com relação água/gesso (0,20), seguida por compressão uniaxial, reação de hidratação e secagem, utilizando o método patenteado por SOUZA *et al.* [8].

CORREIA e SOUZA [10] obtiveram placas de gesso por prensagem, com dimensões ( $7,0 \times 3,0 \times 1,3$ ) cm<sup>3</sup>, a partir da metodologia de SOUZA *et al.* [8] que podem alcançar resistência à flexão e à compressão de 30 MPa e 100 MPa, respectivamente. Os autores estudaram a variação da pressão de compactação entre 0,5 e 10 MPa, com a relação água/gesso de 0,20.

GERALDO *et al.* [11] estudaram componentes para a construção civil produzidos por meio da prensagem uniaxial do gesso comercial e do gesso reciclado, com incorporação de resíduos de cerâmica vermelha e de porcelana, com relação água/gesso igual a 0,22 e pressão de conformação equivalente a 3 MPa. A água foi introduzida no pó de gesso através de uma esponja saturada dentro do molde. Os resultados obtidos para o gesso comercial prensado, sem incorporação de adições, nas idades de 7, 28 e 56 dias para a resistência à tração na flexão, foram 9,5 MPa; 8,25 MPa e 9,31 MPa, respectivamente, e para a resistência à compressão foram 26,1 MPa, 33,9 MPa e 29,98 MPa, respectivamente.

A prensagem de pós é comumente empregada na produção de materiais cerâmicos, incluindo cerâmicas magnéticas e dielétricas, ferramentas de corte, pisos, entre outros. Para a maioria dos materiais cerâmicos a

prensagem dos pós é acompanhada pela etapa de cozimento à altas temperaturas para redução de poros e ganho de resistência [12]. A pressão aplicada promove a redução no volume e tamanho dos poros, em materiais cerâmicos granulares [13, 14]. O mesmo princípio pode ser aplicado para a prensagem de misturas cerâmicas à base de gesso, no entanto, a mistura à base de gesso deve ser considerada como uma suspensão reativa altamente concentrada. Portanto, a eficiência da prensagem do gesso tem relação com a pressão aplicada e o momento da aplicação da pressão em relação ao tempo de pega.

A pega e o endurecimento do gesso são diretamente influenciados por aditivos [15], misturas minerais, impurezas, energia e tempo de mistura, relação água/gesso, temperatura, finura e forma das partículas [16]. Apesar de ser uma técnica promissora para o desenvolvimento de um gesso de alta resistência, os estudos sobre o gesso conformado sob pressão (GCP), ainda, são incipientes, e não há consenso sobre os efeitos dos parâmetros de conformação em suas propriedades. A técnica de prensagem aplicada à conformação de peças de gesso pode ser considerada um método potencialmente sustentável, que requer baixo consumo de energia, uma vez que não exige a etapa de cozimento, em altas temperaturas, para reduzir a porosidade, e consequente, ganho de resistência, como ocorre na prensagem de alguns materiais cerâmicos.

Este artigo visa investigar os efeitos da pressão (P), massa conformada (M) e relação água/gesso (X) nas propriedades físicas e mecânicas do gesso conformado sob pressão (GCP). A conformação sob pressão apresenta-se como uma técnica potencial para a obtenção de gesso com elevado comportamento mecânico. Assim sendo, este trabalho pretende contribuir para a ampliação do uso do gesso no setor da construção civil e para substanciar e preencher algumas lacunas existentes no uso da técnica de prensagem para a produção de componentes pré-fabricados de elevado desempenho mecânico.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Com a finalidade de analisar e compreender os fenômenos que envolvem a prensagem do gesso, foi utilizado apenas o hemi-hidrato e a água, como matéria-prima, sem a presença de aditivos retardadores de pega.

Neste estudo, utilizou-se uma amostra de gesso de fundição para construção civil, passado em uma peneira com abertura de malha igual a 2,0 mm, e água deionizada. O gesso apresentou densidade real, obtida por picnometria a gás hélio, em um analisador de densidade da *Micromeritics*, modelo *Accu Pyc II 1340*, igual a  $(2,5988 \pm 0,0023)$  g/cm<sup>3</sup>, que corresponde aproximadamente à densidade teórica do hemi-hidrato. O módulo de finura do gesso, foi igual a 1,06 (<1,10) e classificado como gesso fino para fundição, obtido conforme procedimento e classificação da ABNT NBR12.127 [17]. A composição química do pó de gesso obtida através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX), em espectrômetro *Bruker S2 Ranger*, é apresentada na Tabela 1. Verificou-se que a composição química do gesso utilizado atendeu aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 13.207 [18].

A Figura 1 mostra o difratograma do gesso obtido em um difratômetro de raios-X *Bruker D2 Phaser*, com um tubo de cobre ( $\lambda = 0,15406$  nm), ajustado em 30 kV e 10 mA. As fases mineralógicas foram identificadas

**Tabela 1:** Composição química do pó de gesso pela técnica de fluorescência de raios X (FRX).

DETERMINAÇÃO	MASSA (%)
CaO	38.40
SO <sub>3</sub>	55.29
SiO <sub>2</sub>	0.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
MgO	0.60
Na <sub>2</sub> O	4.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.23
SrO	0.09
PF*	8.76

\*PF = Perda ao fogo à 1000 °C.

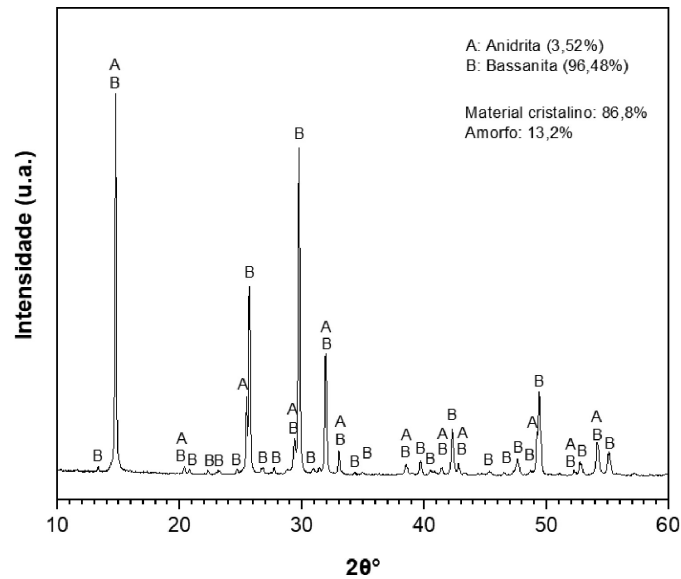


Figura 1: Padrões de DRX do gesso de construção.

usando o pacote de *software DifracEva* e o *Crystallography Open Database (COD)*. A quantificação das fases foi realizada pelo método de *Rietveld* pelo *software TOPAS da Bruker* e *CIF (Crystallography Information File)*. A aquisição foi realizada com faixa de varredura de  $10^\circ$  a  $60^\circ$  ( $2\theta$ ) e incremento de  $0,02^\circ/\text{segundo}$ . O DRX do pó de gesso mostrou que a amostra analisada é composta, essencialmente, por hemi-hidrato, pois foram identificados a presença de picos característicos de Bassanita (B) ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$ ).

A depender das condições de calcinação e eficiência do forno, além do hemi-hidrato, o gesso comercial, usado em construções, pode conter a presença de anidrita (A) ( $\text{CaSO}_4$ ), em menores proporções, podendo ser considerada um subproduto da calcinação da gipsita [19].

## 2.2. Método

### 2.2.1. Projeto fatorial $2^k$

Um planejamento fatorial completo  $2^k$  foi usado para investigar os efeitos dos parâmetros de conformação nas propriedades do GCP.

Três fatores numéricos foram usados: pressão de conformação (P), massa conformada (M) e relação água/gesso (X), em dois níveis. O ponto central (0) foi adicionado ao projeto experimental para avaliar efeitos de segunda ordem. Foram realizadas três replicatas do ponto central para a determinação da significância, da falta de ajuste dos modelos, e a estimativa do erro experimental. Os níveis mínimo e máximo de P e X foram estabelecidos considerando dados da literatura [20–22]. Os níveis de M, por sua vez, foram determinados a partir de experimentos preliminares, de modo a obter corpos de prova prismáticos com comprimento de 160 mm, largura de 40 mm e espessuras próximas de 40 mm. As seguintes propriedades compreenderam as respostas experimentais do projeto: espessura ( $t$ ), porosidade ( $\eta$ ), módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ), resistência à tração na flexão ( $R_f$ ) e resistência à compressão ( $R_c$ ) de corpos de prova prismáticos. A matriz experimental do projeto fatorial  $2^k$  e as respostas experimentais para as diferentes séries são apresentadas na Tabela 2. O sequenciamento foi produzido de forma aleatória.

### 2.2.2. Preparação das amostras

Para a conformação dos corpos de prova, foi desenvolvida uma matriz de aço galvanizado, composta por uma placa inferior, uma célula e um pistão.

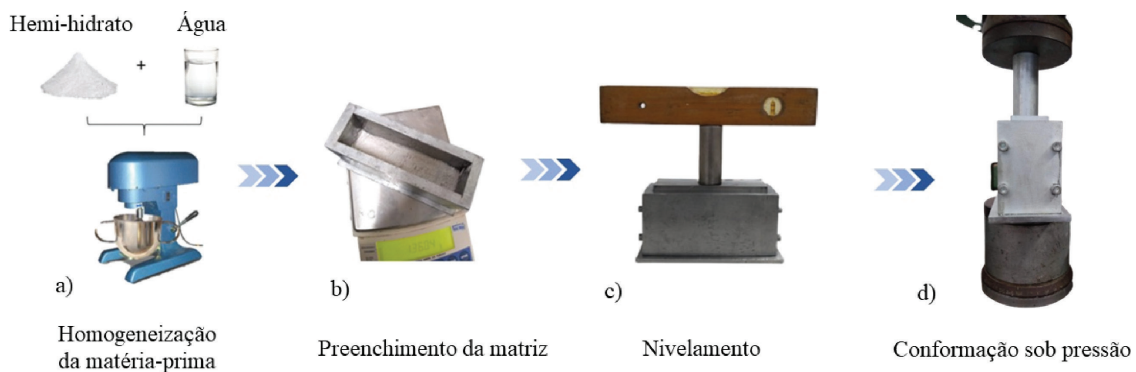
Os corpos de prova foram preparados com as seguintes etapas, como mostra a Figura 2: a) homogeneização da matéria-prima (gesso e água), em misturador mecânico planetário, em baixa rotação ( $62 \pm 5$ ) rpm, por 1 min; seguida de um intervalo de 30 s de homogeneização manual; e 30 s finais de homogeneização mecânica; b) preenchimento da matriz com a massa homogeneizada, c) nivelamento por intermédio de um nível de bolha e d) conformação do gesso sob pressão.

**Tabela 2:** Projeto fatorial  $2^3$  – nível dos fatores e respostas experimentais.

SÉRIE	NÍVEL DOS FATORES			RESPOSTAS EXPERIMENTAIS					$\rho_{ap}$ (g/cm <sup>3</sup> )
	P (MPa)	M (g)	X	$t$ (mm)	$\eta$ (%)	$E$ (GPa)	$R_t$ (MPa)	$R_c$ (MPa)	
1	(+1) 15**	(+1) 550	(+1) 0,22	44,9	26,2	14,7	5,6	21,0	1,73
2	(+1) 15	(+1) 550	(-1) 0,18	41,7	20,1	20,0	12,6	53,5	1,90
3	(+1) 15	(-1) 350	(+1) 0,22	29,1	28,1	12,2	5,1	19,4	1,69
4	(+1) 15	(-1) 350	(-1) 0,18	26,4	21,8	19,1	11,6	47,2	1,85
5	(-1) 5	(+1) 550	(+1) 0,22	53,2	36,8	5,52	2,2	5,51	1,49
6	(-1) 5	(+1) 550	(-1) 0,18	45,9	25,9	14,7	9,3	21,3	1,75
7	(-1) 5	(-1) 350	(+1) 0,22	30,3	29,6	10,8	4,0	14,7	1,65
8	(-1) 5	(-1) 350	(-1) 0,18	28,4	24,0	15,3	9,9	20,6	1,79
9*	(0) 10	(0) 450	(0) 0,20	35,0	22,7	16,9	9,7	43,9	1,84
10*	(0) 10	(0) 450	(0) 0,20	34,7	20,7	16,9	6,0	41,4	1,87
11*	(0) 10	(0) 450	(0) 0,20	35,7	23,9	15,0	7,5	28,8	1,80
Mínimo	(-1) 5	(-1) 350	(-1) 0,18	26,4	20,1	5,5	2,2	5,5	1,49
Máximo	(+1) 15	(+1) 550	(+1) 0,22	53,2	36,8	20,0	12,6	53,5	1,90
Moldagem convencional	—	—	0,52	—	46,8 ± 0,22	8,3 ± 0,10	4,6 ± 0,45	17,2 ± 0,39	1,25 ± 0,0051

Obs.: \*Pontos centrais; \*\*Os níveis codificados estão entre parênteses.

P = Pressão de conformação; M = Massa conformada e X = Relação água/gesso.


**Figura 2:** Esquema de produção do gesso conformado sob pressão (GCP).

A conformação sob pressão da massa homogeneizada foi realizada em uma prensa eletro-hidráulica universal, com capacidade de 30 t. As amostras foram conformadas por pressão de carga uniaxial, com controle da taxa de deslocamento do pistão em aproximadamente 1 mm/s, até atingir a carga máxima de estudo (5, 10 ou 15 MPa). Esta pressão foi mantida por 1 min. Após a desmoldagem, as amostras foram levadas à estufa à 45 °C por 14 dias, onde foi realizada a cura. O tempo de preparação da massa, entre o instante em que o pó de gesso entra em contato com a água, o processo de mistura, o preenchimento da matriz e o nivelamento até o início da prensagem variou entre 15 a 30 min. O processo completo para a conformação de cada amostra, envolvendo a prensagem e a desmoldagem, até a amostra ser levada à estufa para cura totalizou 40 a 50 min.

Para comparação, corpos de prova de gesso foram produzidos por conformação convencional (sem pressão), utilizando o procedimento descrito na ABNT NBR 12.128 [23]. Neste caso, o gesso de construção foi polvilhado na quantidade total de água, no intervalo de 1 min, permanecendo em repouso por 2 min, logo após, para homogeneização da mistura, foram realizados movimentos circulares, com uma espátula, por 1 min [23]. As pastas obtidas com este procedimento foram colocadas em moldes prismáticos com dimensões iguais a (40 × 40 × 160) mm<sup>3</sup>. Neste caso, as pastas foram preparadas com relação água/gesso igual a 0,52, que corresponde à quantidade de água para a obtenção da consistência normal. Os tempos do início de pega (13,5 min.) e do fim de pega (28,5 min.) foram obtidos a partir da média de duas determinações, por meio do aparelho de Vicat.



A relação água/gesso para a obtenção da consistência normal e os tempos de início e fim de pega, foram obtidos conforme procedimentos descritos na ABNT NBR 12.128 [23].

### 2.2.3. Propriedades físicas e mecânicas

A espessura dos corpos de prova ( $t$ ) foi medida no centro e nas duas extremidades dos corpos de prova usando um paquímetro com resolução de 0,02 mm. A porosidade ( $\eta$ ) foi determinada usando a Equação 1.

$$\eta = \left( 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Em que,  $\eta$  é a porosidade,  $\rho_{ap}$  é a densidade aparente e  $\rho_{real}$  é a densidade real.

A densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ) é a razão entre a massa seca e o volume total da amostra, calculado multiplicando suas dimensões externas (largura, espessura e comprimento), medidas com um paquímetro com resolução de 0,02 mm. A densidade real ( $\rho_{real}$ ) é a razão entre a massa seca e o volume real do corpo de prova, e foi determinada em picnômetro de gás hélio *Micromeritics*, modelo *AccuPyc II 1340*. Para este caso, os corpos de prova foram moídos em almofariz com pistilo de porcelana/madeira e passados em peneira com malha de 150  $\mu\text{m}$ . As amostras foram secas a 45 °C, em estufa até massa constante.

O módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ) dos corpos de prova foi determinado usando o *software* *Sonelastic®* da ATPC, modelo de suporte SA-BC, usando o modo de vibração flexional, conforme procedimentos da ASTM E1876:2015 [24] e ASTM C215:2019 [25]. Os ensaios de flexão de três pontos foram realizados com a distância entre os apoios de 100 mm, a uma taxa de carregamento de 50 kN/s e os ensaios de compressão foram realizados a uma taxa de carregamento de 500 N/s. Ambos os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios servo controlada, com capacidade de 20 t, seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 13.279 [26].

De forma complementar, micrografias de amostras extraídas de corpos de prova de gesso foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio eletrônico JEOL JSM 6610LV. As amostras extraídas dos corpos de prova de GCP que apresentaram maiores resistências e dos corpos de provas de GCC foram revestidas com ouro para análise no microscópio.

### 2.2.4. Análises estatísticas

Os resultados experimentais, com exceção das micrografias, foram analisados por meio do *software* *Design Expert®*, versão 13.

A correlação linear entre as variáveis (Equação 2) foi o primeiro parâmetro analisado. Devido à curvatura estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) em algumas respostas experimentais, optou-se por utilizar o modelo de superfície de resposta de segunda ordem (Equação 3) para ajustar os dados experimentais. Os modelos de segunda ordem foram reduzidos usando o método de retroeliminação e o critério de informação de Akaike (AIC) [27].  $R^2$ ,  $R^2_{adj}$  e  $R^2_{pred}$  e as significâncias das faltas de ajuste dos modelos para  $\alpha = 0,05$ , foram usados para avaliar a qualidade de ajuste dos modelos. Além disso, foi realizada uma análise da distribuição dos resíduos para verificar a normalidade dos dados e para tomada de decisão quanto à aplicação de transformações não lineares e eliminação de valores espúrios.

$$r = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})}{s_x} \cdot \frac{(y_i - \bar{y})}{s_y} \quad (2)$$

Em que,  $r$  é a correlação linear entre as variáveis  $X$  e  $y$ .  $X_i$  e  $y_i$  são os  $i$ ésimos valores das variáveis  $X$  e  $y$ , respectivamente.  $\bar{X}$  e  $\bar{y}$  são as médias dos valores  $X$  e  $y$ , respectivamente.  $s_x$  e  $s_y$  são os desvios padrão dos valores  $X$  e  $y$ , respectivamente, e  $N$  é o número de pares  $X$  e  $y$ .

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j}^k \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 \quad (3)$$

Em que,  $\hat{y}$  é o valor previsto para a resposta experimental,  $\beta_0$  é intersecção da superfície de resposta,  $\beta_j$ ,  $\beta_{ij}$  e  $\beta_{jj}$  são os coeficientes do modelo, e  $x_i$  e  $x_j$  são os níveis dos fatores.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Espessura

As espessuras dos corpos de prova ( $t$ ) variaram de 26,4 mm a 53,2 mm (ver Tabela 2). Os resultados mostraram que há forte correlação linear entre a espessura e a massa conformada, conforme Tabela 3.

A espessura dos corpos de prova pode ser estimada usando a Equação 4 ( $R^2 = 0,98$ ,  $R^2_{adj} = 0,97$ ). A análise estatística mostrou que a massa conformada ( $M$ ) afetou de forma significativa ( $\alpha = 0,05$ ) a espessura. Portanto, estes resultados apontaram a massa conformada como o fator mais importante a ser considerado para a determinação da espessura de amostras conformadas sob pressão, considerando o intervalo e as condições de conformação analisadas.

$$t = -8,414 - 0,2239P + 0,0809M + 52,465X \tag{4}$$

Em que,  $t$  é a espessura prevista.  $P$ ,  $M$  e  $X$  são respectivamente, os níveis de pressão, massa conformada e relação água/gesso.

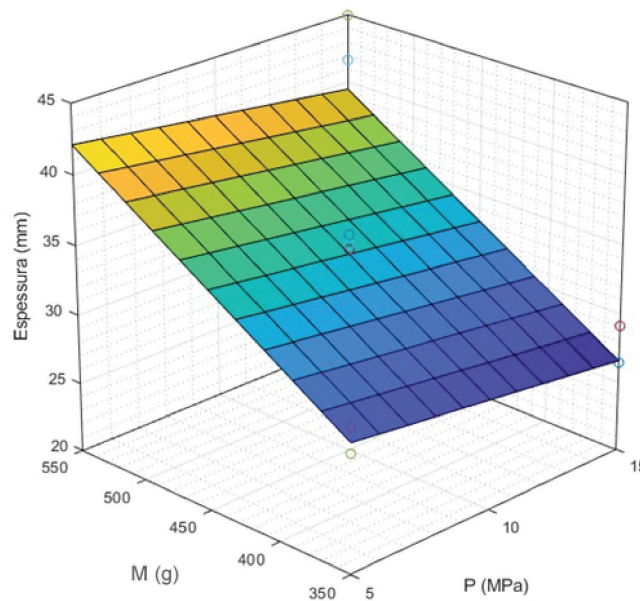
A Figura 3 apresenta o gráfico da superfície de resposta para a espessura. É possível identificar que a espessura aumenta significativamente quando  $M$  aumenta, reduz ligeiramente quando  $P$  aumenta, e aumenta ligeiramente quando ocorre o aumento de  $X$ .

Segundo SOUZA [4], para uma compactação adequada dos grãos de gesso, a aplicação da pressão deve ocorrer antes do início da reação de hidratação para que a água possa atuar como lubrificante, e facilitar a aproximação entre os grãos durante a prensagem.

O tempo de produção da amostra até o início da prensagem (ver 2.2.2) foi maior que o tempo do início de pega do gesso comercial utilizado neste trabalho (ver 2.2.2), demonstrando que as amostras foram prensadas

**Tabela 3:** Correlação linear entre variáveis.

VARIÁVEL	P	M	X	$t$ (mm)	$\eta$ (%)	$R_t$ (MPa)	$R_c$ (MPa)	$E$ (GPa)
$t$ (mm)	0,043	<b>0,9750</b>	-0,053	1,0000	-0,076	0,074	0,018	0,140
$\eta$ (%)	-0,4680	0,129	0,6730	-0,076	1,0000	-0,802	-0,883	-0,9430
$R_t$ (MPa)	0,325	-0,033	-0,898	0,074	-0,802	1,0000	0,779	0,845
$R_c$ (MPa)	0,576	-0,004	-0,5980	0,018	-0,883	0,779	1,0000	0,918
$E$ (GPa)	0,434	0,340	-0,715	0,140	<b>-0,943</b>	<b>0,8450</b>	<b>0,9180</b>	1,0000



**Figura 3:** Superfície de resposta das amostras para a espessura, para  $X = 0,20$  (relação a/g no ponto central).

com diferentes graus de hidratação, e que parte da água que atuaria como lubrificante, durante a prensagem, foi consumida na formação do di-hidrato. Sendo a quantidade de água insuficiente para permitir a mobilidade adequada dos grãos durante a prensagem, a contribuição da pressão e da relação água/gesso ficou subestimada. O que explica a massa conformada (M) como fator predominante, e a contribuição pouco expressiva da pressão de compactação e da relação água/gesso na determinação da espessura (*t*) (ver Tabela 3 e Figura 3).

### 3.2. Porosidade

As porosidades dos corpos de prova variaram de 20,1% a 36,8%. Estes valores são significativamente inferiores aos obtidos para os corpos de prova conformados pelo método convencional (GCC) (ver Tabela 2). As porosidades dos corpos de prova podem ser estimadas usando a Equação 5 ( $R^2 = 0,83$ ,  $R^2_{adj} = 0,76$ ).

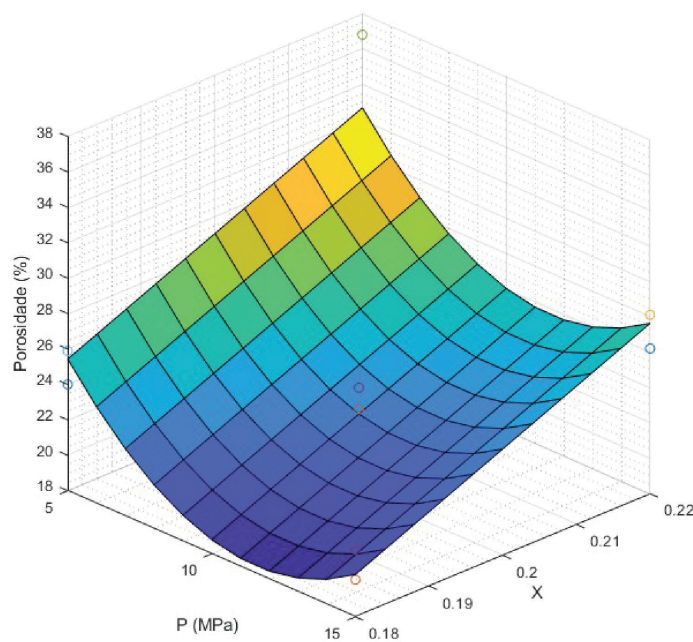
$$\eta = 7,775 - 3,797P + 180,75X + 0,1647P^2 \tag{5}$$

Em que,  $\eta$  é a porosidade prevista. P e X são respectivamente, os níveis de pressão e relação água/gesso.

Apenas P e X afetaram de forma significativa ( $\alpha = 0,05$ ) a porosidade. No gráfico da superfície de resposta apresentado na Figura 4 é possível identificar que a porosidade dos corpos de prova aumenta quando X aumenta, independentemente da pressão aplicada. Os resultados mostraram que a porosidade dos corpos de prova reduz drasticamente quando a pressão é aumentada de 5 MPa para 10 MPa, mas é levemente modificada quando a pressão passa de 10 MPa para 15 MPa, independentemente do valor de X. Estes resultados apontaram a necessidade do uso de retardadores para possibilitar o empacotamento adequado dos grãos de gesso, principalmente, em aplicações de pressões mais altas, para misturas à base de gesso, conforme CORREIA e SOUZA [10].

Observa-se que, P apresentou um efeito significativo de segunda ordem na porosidade (Equação 5). Este efeito de segunda ordem pode ser explicado pela teoria da compactação de sistemas cerâmicos particulados que estabelece três estágios de compactação [13, 14]:

- a) Estágio I (baixa pressão): a aproximação das partículas ocorre sem deformar ou destruir aglomerados ou partículas, início de redução da porosidade intergranular.
- b) Estágio II (pressão moderada): responsável pela maior parte da compactação; os aglomerados mais fracos de partículas são destruídos e a área de contato entre as partículas aumenta; a porosidade intragranular permanece inalterada e apenas se observam reduções no volume e tamanho dos poros intergranulares.
- c) Estágio III (alta pressão): o aumento da pressão provoca a destruição de aglomerados mais fortes e a porosidade intergranular torna-se teoricamente nula; partículas porosas fraturam e a redução da porosidade é alcançada eliminando a porosidade intragranular.



**Figura 4:** Superfície de resposta das amostras para a porosidade, para M = 450 g (massa conformada no ponto central).



Para as pastas de gesso, devemos considerar que o sistema é composto pelo material granular (gesso em pó) e água, e que a água funciona inicialmente como lubrificante, facilitando a organização das partículas durante a prensagem [4]. Então, a água da mistura, que faz com que os vazios intergranulares permaneçam no estágio II, funciona como um reagente para a formação do di-hidrato. Se a pega do gesso acontece antes da prensagem, parte da água que funcionaria como lubrificante se combina com o hemi-hidrato, reduzindo a lubrificação. Além disso, aglomerados de di-hidrato formados prejudicam o empacotamento durante a prensagem. Assim, em pastas de gesso prensadas, deve-se considerar o nível de pressão aplicado e o momento da prensagem em relação ao tempo de início de pega.

Como já relatado, os resultados apontaram que a pega dos GCP iniciou antes da prensagem (ver item 2.2.2). Assim, parte da água que atuaria como lubrificante durante a prensagem foi consumida nas reações de hidratação do gesso, fazendo prevalecer o efeito da água como formador de poros e os aglomerados de cristais de di-hidrato prejudicaram a compactação dos corpos de prova. Com os cristais já formados, provavelmente, não foi possível uma aproximação das partículas, e sim um esmagamento com deformação e destruição dos aglomerados, sem haver a redução adequada do tamanho dos poros intergranulares e intragranular, prejudicando o empacotamento dos grãos e a redução da porosidade.

### 3.3. Propriedades mecânicas

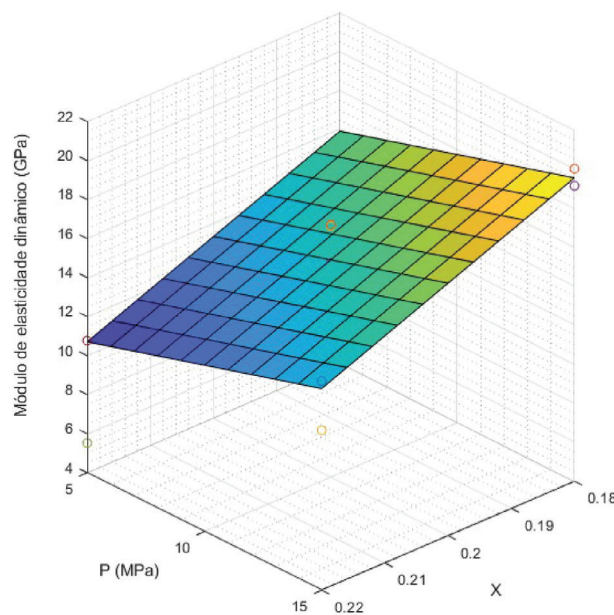
O módulo de elasticidade dinâmico ( $E$ ) dos corpos de prova variou de 5,5 a 20,0 GPa (ver Tabela 2). Estes valores são predominantemente mais elevados do que os obtidos para o GCC (ver Tabela 2). A Tabela 3 mostrou que existem fortes correlações lineares negativas entre ( $E$ ) e a porosidade ( $\eta$ ).

O módulo de elasticidade pode ser estimado pela equação 6 ( $R^2 = 0,82$ ,  $R^2_{adj} = 0,77$ ). Apenas P e X afetaram de forma significativa ( $\alpha = 0,05$ ) o módulo de elasticidade. No gráfico da superfície de resposta na Figura 5 é possível observar que o módulo de elasticidade reduz significativamente com o aumento de X e aumenta ligeiramente quando P aumenta.

$$E = 37,52 + 0,3636P - 130,14X \tag{6}$$

Em que,  $E$  é o módulo de elasticidade dinâmico previsto. P e X são respectivamente, os níveis de pressão e relação água/gesso.

A Figura 6 apresenta o gráfico de  $E$  versus  $\eta$ , com ajuste de um modelo linear, com  $R^2 = 0,9498$ . Constatou-se a forte correlação linear negativa entre a porosidade e o módulo de elasticidade (ver Tabela 3), ou seja, quanto menor a porosidade maior o módulo de elasticidade. O aumento do módulo de elasticidade confere rigidez às amostras de GCP, e conseqüentemente, uma menor deformação elástica quando submetido à uma tensão, o que confirma a melhoria no comportamento mecânico das amostras conformadas sob pressão, como mostra a Figura 6.



**Figura 5:** Superfície de resposta das amostras para o módulo de elasticidade dinâmico, para M = 450 g (massa conformada no ponto central).

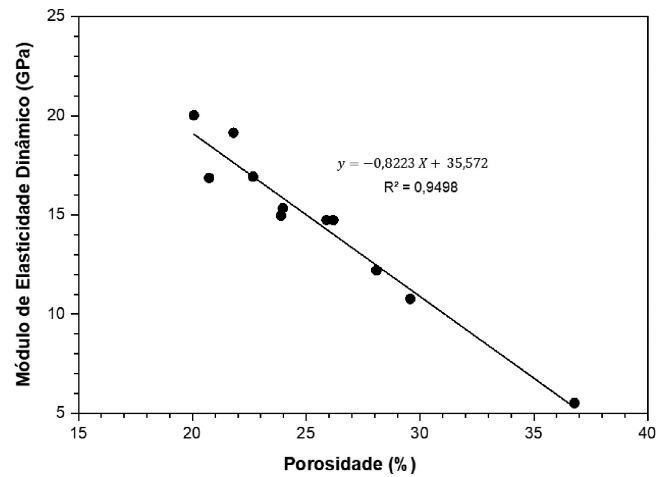


Figura 6: Módulo de elasticidade dinâmico versus porosidade das amostras.

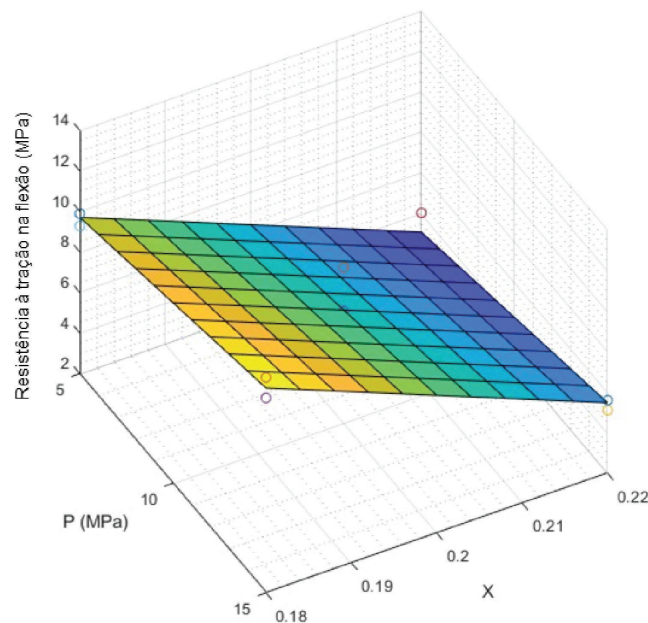


Figura 7: Superfície de resposta das amostras para a resistência à tração na flexão, para M = 450 g (massa conformada no ponto central).

A resistência à tração na flexão ( $R_t$ ) e a resistência à compressão ( $R_c$ ) máximas dos corpos de prova foram iguais a 12,6 MPa e 53,5 MPa, respectivamente. Estes valores são significativamente maiores dos que os obtidos para os corpos de prova do GCC ( $R_t = 4.6$  MPa) e ( $R_c = 17.2$  MPa), (ver Tabela 2).

A resistência à tração na flexão dos corpos de prova pode ser estimada usando a Equação 7 ( $R^2 = 0,91$ ,  $R^2_{adj} = 0,89$ ), enquanto a Equação 8 ( $R^2 = 0,89$ ,  $R^2_{adj} = 0,84$ ), por sua vez, pode ser usada para estimar a resistência à compressão. Observa-se que apenas P e X afetaram de forma significativa ( $\alpha = 0,05$ ) a resistência à tração na flexão, e que para a resistência à compressão, além da influência de P e X evidenciou-se o efeito de segunda ordem da pressão.

$$R_t = 38,32 + 0,24P - 165,63X \tag{7}$$

$$R_c = 56,30 + 15,79P - 512,25X - 0,6909P^2 \tag{8}$$

Em que,  $R_t$  é a resistência à tração na flexão e  $R_c$  é a resistência à compressão, previstas. P e X são os níveis de pressão e relação a/g, respectivamente.

A Figura 7 apresenta a superfície de resposta da resistência à tração na flexão. É observado que a resistência à tração na flexão reduz significativamente quando X aumenta e aumenta ligeiramente quando P aumenta (Figura 7).

A Figura 8 mostra a superfície de resposta da resistência à compressão, observa-se que a área da superfície de resposta da resistência à compressão dos corpos de prova é o inverso do comportamento da superfície de resposta da porosidade. Resultado este, em conformidade com a teoria para cerâmicas porosas em que se observa a tendência da redução das propriedades mecânicas, como módulos elásticos, resistência e tenacidades com o aumento da porosidade [28]. P afetou de forma significativa ( $\alpha = 0,05\%$ ) a resistência à compressão, enquanto que o aumento de X provocou a sua redução. Evidenciou-se o efeito de segunda ordem da pressão, demonstrando a importância deste fator no empacotamento das partículas e no crescimento das forças de adesão, e consequente, melhoria na resistência à compressão [10].

A resistência mecânica dos corpos de prova tende a aumentar à medida que há um melhor empacotamento dos grãos (maior densidade aparente), ver Tabela 2, e consequentemente, redução da porosidade. A Figura 9 apresenta o gráfico de  $\eta$  versus  $R_c$ , com ajuste de um modelo exponencial, com  $R^2 = 0,9415$ . Um dos fatores que influenciaram estes resultados foram as ligações inter cristalinas que se formaram nas superfícies de contato entre os cristais de di-hidrato, em consequência da aplicação da pressão, propiciando um aumento da resistência do material [29].

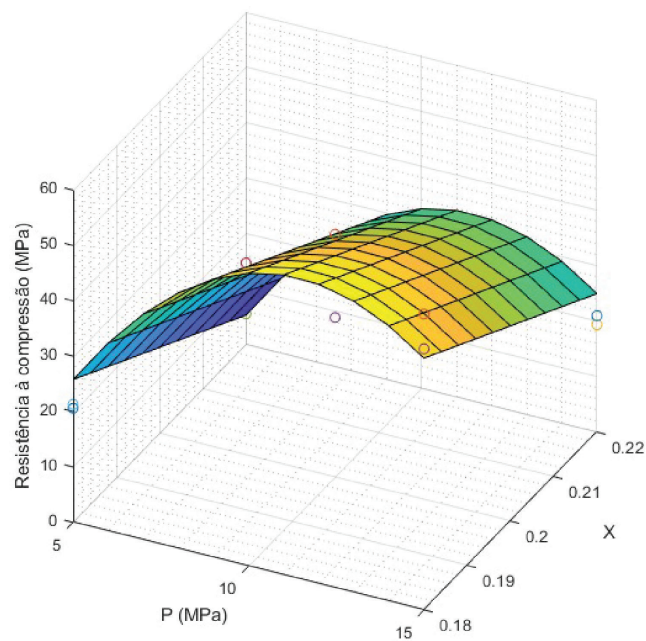


Figura 8: Superfície de resposta das amostras para a resistência à compressão, para M = 450 g (massa conformada no ponto central).

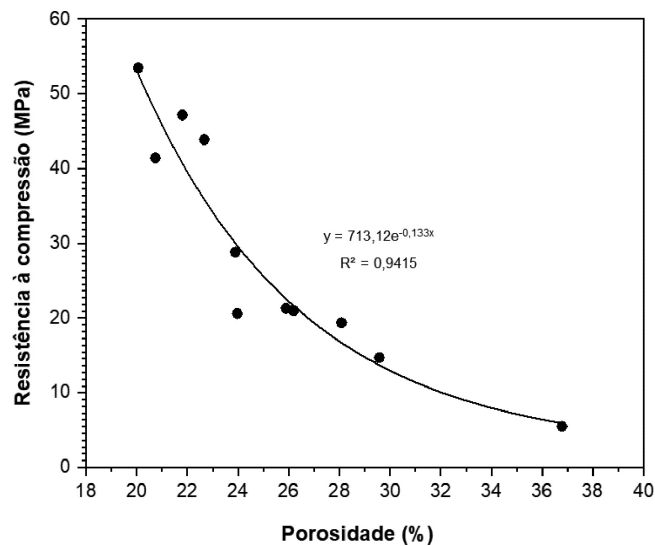


Figura 9: Resistência à compressão versus Porosidade.

Na compactação do gesso, a água apresenta três funções a seguir: a de lubrificante, auxiliando no empacotamento e adesão das partículas e a de reagente, participando da dissolução-hidratação do HH [10, 29].

Os resultados apontaram que à medida que a densidade aumenta, a distância entre os cristais do gesso diminui, mais próximos, permitem o desenvolvimento das forças de adesão [10, 29]. O aumento da densidade ( $\rho_{ap} = 1,90 \text{ g/cm}^3$ ) do GCP mostra corpos de prova menos porosos ( $\eta = 20,1\%$ ), mais resistentes ( $R_t = 12,6 \text{ MPa}$  e  $R_c = 53,5 \text{ MPa}$ ) e com elevado módulo de elasticidade ( $E = 20,0 \text{ GPa}$ ), em relação ao GCC (ver Tabela 2).

Embora não tenham sido observadas diferenças significativa entre as densidades reais nas diferentes séries, após o procedimento de secagem, as amostras mantiveram uma relação água/gesso (a/g) igual a 0.135, em média. Não foi observada diferença significativa entre as relações a/g das diferentes séries após a secagem. Além disso, a relação a/g não atingiu o mínimo necessário para completar a hidratação do pó de gesso. Estes resultados apontaram a necessidade da cura após a desmoldagem, e antes dos corpos de prova serem levados à estufa, para garantir uma completa reação de hidratação do gesso.

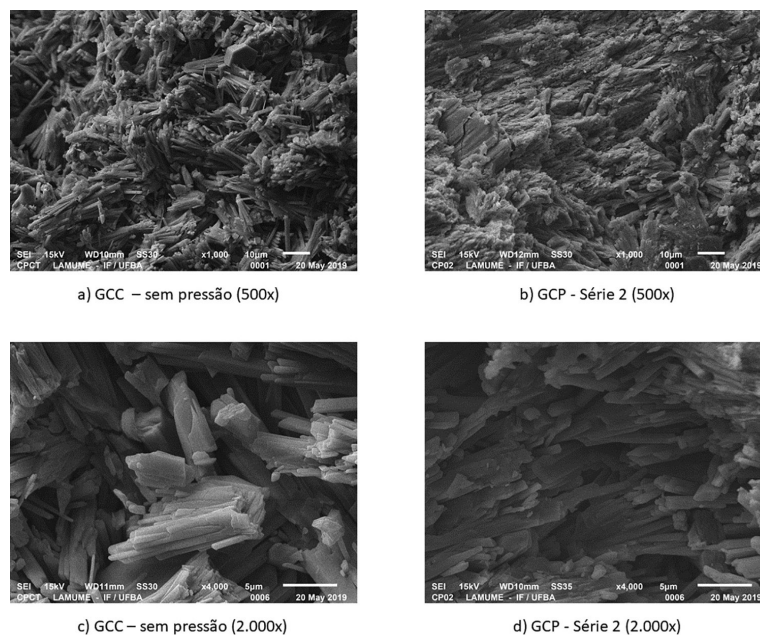
Concluiu-se que, a partir de, somente, dois componentes, água e gesso, com modificação apenas no método de conformação é possível a obtenção de um gesso de elevado desempenho mecânico, através do empacotamento dos cristais e redução da porosidade. Os resultados apontaram que a conformação do gesso sob pressão deve levar em consideração, além do nível de pressão aplicado, o momento da prensagem em relação ao tempo de início de pega. Assim sendo, o uso de retardadores de pega pode contribuir para impedir a cristalização antes da prensagem, o que permitiria um melhor empacotamento dos cristais [29] com influência na microestrutura, no grau de compactação [11, 29] e, conseqüentemente, na melhoria do comportamento mecânico do gesso conformado sob pressão.

### 3.4. Microestrutura

As micrografias obtidas pelo MEV do GCC, conformado sem pressão, e do GCP, conformado sob pressão, foram registradas, em diferentes ampliações, e estão apresentadas na Figura 10.

As amostras conformadas pelo método convencional, GCC – sem pressão, Figuras 10a e 10c, apresentaram cristais alongados aciculares e em forma de placas, com predominância de cristais pequenos e malformados e em organização aleatória. Observou-se um crescimento radial em forma de tufos, alguns cristais mantêm contato direto entre si, e há cristais que se entrelaçam. Foi observado, também, a presença de vazios entre os cristais, causada pela perda excessiva de água [11, 30]. A elevada porosidade e o reduzido desempenho mecânico do GCC (ver Tabela 2) encontraram justificativa na morfologia dos cristais e no arranjo microestrutural.

As Figuras 10b e 10d apresentaram as micrografias de amostra extraída do GCP, série 2, conformado com pressão de 15 MPa e relação a/g igual a 0,18 (ver Tabela 2). Nesta micrografia notou-se a predominância



**Figura 10:** Micrografias da seção fraturada: (a) GCC – sem pressão (500×), (b) GCP – Série 2 (500×), (c) GCC – sem pressão (2.000×) e (d) GCP – Série 2 (2.000×).



de cristais aciculares alongados e bem formados, em aglomerados alinhados e interconectados. Foi possível a identificação de uma microestrutura mais densa e compacta, com menos vazios, o que justifica o alto grau de compactação ( $\rho_{ap} = 1,90 \text{ g/cm}^3$ ) e a alta resistência à compressão ( $R_c = 53,5 \text{ MPa}$ ) alcançados por esta série.

O di-hidrato geralmente consiste em um material frágil e sua resistência mecânica depende das forças de adesão entre seus cristais [9]. Os resultados mostraram que o método de prensagem do gesso contribuiu para melhorar a adesão entre os cristais. As Figuras 10b e 10d mostraram cristais bem conectados que favoreceram a formação de um emaranhado alinhado de cristais, que proporcionaram uma microestrutura mais compacta, contribuindo para a conformação de um gesso de elevado desempenho mecânico [9, 11].

#### 4. CONCLUSÕES

Este estudo investigou os efeitos da pressão, massa conformada e relação água/gesso nas propriedades do gesso conformado sob pressão (GCP) através do planejamento fatorial  $2^k$ , para a produção de componentes de gesso com elevado desempenho mecânico para uso na construção civil.

Constatou-se que as espessuras dos corpos de prova foram fortemente correlacionadas linearmente com a massa conformada, o que torna a massa um fator chave para controlar as espessuras dos corpos de prova, considerando o intervalo e as condições de prensagem deste estudo. Foram identificadas, também, fortes correlações lineares negativas entre o módulo de elasticidade e a porosidade.

Verificou-se que os parâmetros de conformação, pressão e relação a/g afetaram, significativamente, a porosidade, o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão e à compressão, e que a massa somente teve influência significativa para a espessura dos corpos de prova, nas condições de estudo apresentadas.

Os resultados mostraram que houve uma redução significativa da porosidade e um aumento substancial das propriedades mecânicas analisadas ( $E$ ,  $R_t$  e  $R_c$ ) do GCP, em relação ao GCC. As investigações mostraram que algumas séries foram prensadas após o início da pega, com diferentes graus de hidratação e que sendo a pasta de gesso uma suspensão reativa altamente concentrada, a eficiência da compactação está relacionada com o nível de pressão aplicada, e o momento de prensagem, em relação ao tempo de pega.

Para o GCP – série 2 observou-se a predominância de cristais bem formados, em formato de agulhas, alinhados e interconectados. A região fraturada do GCP apresentou uma microestrutura mais densa e compacta, com cristais bem conectados e com menos vazios, o que justifica o alto grau de compactação ( $\rho_{ap} = 1,90 \text{ g/cm}^3$ ) e, conseqüentemente, elevado comportamento mecânico ( $E = 20,0 \text{ GPa}$ ,  $R_t = 12,6 \text{ MPa}$  e  $R_c = 53,5 \text{ MPa}$ ) alcançado pelo GCP, quando comparado com o GCC.

A técnica de compactação do gesso por pressão, com relação a/g próxima da estequiométrica, apresentou-se como um método de conformação promissor na produção de um gesso de baixa porosidade. Os resultados mostraram que o GCP chegou a alcançar uma redução de 57% da porosidade, quando comparada com a conformação do gesso pelo método convencional. Os resultados indicaram que as combinações adequadas de níveis dos parâmetros de conformação resultaram em um gesso prensado de alta resistência. Os resultados, ainda, apontaram a importância do uso de um aditivo retardador de pega na conformação do GCP, para garantir uma prensagem antes do início da pega. Assim, contribuindo para uma uniformidade no processo de prensagem, melhorando, desse modo, a adesão entre os grânulos de gesso ao garantir o empacotamento e não o esmagamento dos mesmos, e conseqüentemente, alcançando maiores valores para a resistência mecânica.

Desta forma, compreender os parâmetros de conformação (P, M e X) e o fatores que influenciam no comportamento mecânico, como a adesão entre os cristais e os elementos que tem influência no processo de hidratação do GCP, faz-se fundamental para a aplicação da técnica de prensagem em materiais à base de gesso. Os resultados apontaram que o gesso conformado sob pressão é um material com potencial para a produção de componentes pré-fabricados de gesso com elevado desempenho mecânico.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa da Bahia), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). Os autores também agradecem ao CETA/UFBA (Centro Tecnológico de Argamassa), LEDMA/UFBA (Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais), LAMUME/UFBA (Laboratório de Microscopia Eletrônica) e IFBA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia).

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] MARTIAS, C., JOLIFF, Y., FAVOTTO, C., “Effects of the addition of glass fibers, mica and vermiculite on the mechanical properties of a gypsum-based composite at room temperature and during a fire test”, *Composites. Part B, Engineering*, v. 62, pp. 37–53, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.019>.



- [2] PORTO, J.A.S., LIMA, Y.C.C., OLIVEIRA, R.R., *et al.*, “Caracterização mecânica de placas de gesso utilizados em forro residencial”, In: *22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat)*, 2016.
- [3] XIUCHUN, H., CUIYU, Y., BAIPING, Y., “Action mechanism of water reducer on Portlans cement”, *Journal of the Chilean Chemical Society*, v. 14, n. 4, pp. 392–399, 1986.
- [4] SOUZA, M.F., *Gesso e compósitos de alta resistência mecânica e baixa permeabilidade e seu processo de fabricação – Patente – PI 0303814-9 A*, 2005.
- [5] FERREIRA, F.C., “*Estudo de caracterização do gesso para revestimento produzido no polo gesseiro do Araripe*”, Tese de M.Sc., UFPE, Recife, 2017.
- [6] KARNI, J., KARNI, E., “Gypsum in construction: origin and properties”, *Materials and Structures*, v. 28, pp. 92–100, Mar. 1995. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02473176>.
- [7] HERNÁNDEZ-OLIVARES, F., BOLLATI, M.R., DEL RIO, M., *et al.*, “Development of cork-gypsum composites for building applications”, *Construction & Building Materials*, v. 13, n. 4, pp. 179–186, 1999. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)00021-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(99)00021-5).
- [8] SOUZA, M.F., ROSSETTO, H.L., KANNO, W.M., *Peças de gesso de alta resistência e método de obtenção de tais peças – BR n. PI0506033-8*, 2007.
- [9] KANNO, W.M., ROSSETTO, H.L., SOUZA, M.F., *et al.*, “High strength phosphogypsum and its use as a building material”, *AIP Conference Proceedings*, v. 1034, pp. 307–310, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2991234>.
- [10] CORREIA, C.M.P., SOUZA, M.F., “Mechanical strength and thermal conductivity of low-porosity Gypsum Plates”, *Materials Research*, v. 12, n. 1, pp. 95–99, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392009000100012>.
- [11] GERALDO, R.H., SOUZA, J.D., CAMPOS, S.C., *et al.*, “Pressured recycled gypsum plaster and wastes: characteristics of eco-friendly building componentes”, *Construction & Building Materials*, v. 191, pp. 136–144, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.193>.
- [12] REED, J.S., *Principles of ceramics processing*, 2 ed., New York, Wiley, 1995.
- [13] AMORÓS ALBARO, J.L., *A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial – parte II: a compactação*, Castellón, Instituto de Tecnologia Cerâmica, Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas, Universitat Jaume I, 2000.
- [14] AMORÓS ALBERO, J.L., *A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial – parte I: o preenchimento das cavidades do molde*, Universidad de Valência, Instituto de Tecnologia Cerâmica, 2000.
- [15] SINGH, N.B., MIDDENDORF, B., “Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization”, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, v. 53, n. 1, pp. 57–77, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2007.01.002>.
- [16] CAMARINI, G., PINHEIRO, S.M.M., “Microstructure of recycled gypsum plaster by SEM”, *Advanced Materials Research*, v. 912–914, pp. 243–246, Apr. 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.912-914.243>.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 12.127 – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas do pó*, Rio de Janeiro, p. 6, 2019.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 13.207 – Gesso para construção civil – Requisitos*, Rio de Janeiro, p. 3, 2017.
- [19] JOHN, V.M., CINCOTTO, M.A., “Gesso de construção civil”, In: Isaia, G.C. (ed), *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*, 1 ed., São Paulo, IBRACON, 2007, v. 1, pp. 727–760.
- [20] KANNO, W.M., “*Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho*”, Tese de D.Sc., UFSCar, São Carlos, 2009.
- [21] CÔRTE REAL, J.C., “*Determinação de condições operacionais adequadas para produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica*”, Tese de M.Sc., Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2009.
- [22] ZHOU, J., LIU, C., SHU, Z., *et al.*, “Preparation of specific gypsum with advanced hardness and bending strength by a novel in-situ loading-hydration process”, *Cement and Concrete Research*, v. 67, pp. 179–183, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.09.004>.

- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 12.128 – Gesso para construção civil – Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso*, Rio de Janeiro, 2019.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, “ASTM E 1876 – Standard test method for dynamic young’s modulus, shear modulus, and poisson’s ratio by impulse excitation of vibration”, In: *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, 2015.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, “ASTM C215 – Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens”, In: *Annual Book of ASTM Standards*, West Conshohocken, 2014.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 13.279 – Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*, Rio de Janeiro, 200.
- [27] MONTGOMERY, D., RUNGER, G.C., *Applied statistics and probability for engineers*, 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 817 p., 1999.
- [28] GIBSON, L.J., ASHBY, M.F., *Cellular solids-structure and properties*, New York, Pergamon, 1988.
- [29] KANNO, W.M., “*Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho*”, Tese de D.Sc., UFSCar, São Carlos, 2009.
- [30] PINHEIRO, S.M.M., “*Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes*”, Tese de D.Sc., UNICAMP, Campinas, 2011.