

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE GESSO RECICLADO APLICADO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Bianca da Silva Domingues ¹; Luciane Franquelin Gomes de Souza ²; Heloísa Cristina Cordon ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O gesso é um dos principais materiais utilizados na construção civil, sendo que o Brasil é o maior produtor da América do Sul. Devido ao seu curto tempo útil para utilização após mistura com água, o gesso utilizado como revestimento na construção civil gera um grande desperdício. Por isso, sua reciclagem tem crescido com o aumento de práticas sustentáveis de construção. Dessa forma, torna-se importante o estudo do processo a fim de qualificar a sua reciclagem. O presente trabalho visa estudar a secagem do resíduo do gesso de construção em secador de bandejas e avaliar o tempo de pega para aplicação na construção civil, por meio da análise da influência da temperatura e da velocidade do ar no tempo de secagem para atingir umidade do gesso comercial (6 %). Tanto a temperatura quanto a velocidade do ar influenciaram significativamente no tempo de modo que maiores valores resultaram em menores tempos de secagem. O modelo linear proposto foi significativo e preditivo. Para a modelagem do período decrescente de secagem, o modelo empírico de Midilli obteve melhor ajuste. Os gessos reciclados secos possuem valores de diâmetros médios e tempos de pega menores que o comercial, indicando aumento da reatividade do material.*

Introdução

O gesso é um dos principais materiais utilizados na construção civil. Segundo dados publicados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em seu Sumário Mineral (Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015), a produção mundial de gipsita – um dos minerais constituintes do gesso – em 2014 foi igual a 246 milhões de toneladas (Mt). O Brasil é o maior produtor da América do Sul e o 13º do mundo, com aproximadamente 3,4 Mt em 2014. O estado de Pernambuco é responsável pela maior produção brasileira, sendo que em 2014, o estado produziu 84,3 % do total de gipsita produzida no país.

A norma NBR 13207 (ABNT, 1994) define gesso para construção como um “material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores do tempo de pega” como, segundo John e Cincotto (2007), sulfato de cálcio hemidratado (hemidrato- β – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), anidrita solúvel (anidrita III – $\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$), anidrita insolúvel (anidrita II e anidrita I – CaSO_4), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas teóricas das espécies químicas presentes no gesso.

Tabela 1 - Composição química teórica das espécies químicas presentes no gesso.

Sulfatos	Fórmula	Massa Molecular ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Composição			Relação CaO/SO_3
			H ₂ O	CaO	SO ₃	
Anidrita	CaSO_4	136,14	0,00	41,19	58,81	0,7
Hemidrato	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	145,15	6,20	38,63	55,15	0,7
	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,66\text{H}_2\text{O}$	148,02	8,03	37,88	54,08	0,7
Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	172,17	20,99	32,57	46,50	0,7

Fonte: JOHN; CINCOTTO (2007).

No mercado brasileiro, há três tipos de gesso para a construção civil: gesso para revestimento, gesso para fundição e gessos especiais, sendo apenas este último não normatizado (PERES *et al.*

2001). As exigências químicas, físicas e mecânicas dos gessos de construção definidas pela NBR 13207 (ABNT, 1994) estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Exigências químicas do gesso para construção civil.

Classificação do Gesso	Tempo de pega (min)		Módulo de Finura (NBR 12127)
	Início	Fim	
Gesso fino para revestimento	>10	>45	<1,10
Gesso grosso para revestimento	>10	>45	>1,10
Gesso fino para fundição	4-10	20-45	<1,10
Gesso grosso para fundição	4-10	20-45	>1,10

Fonte: NBR 13207 (ABNT, 1994)

De acordo com Pinheiro (2011), os maiores responsáveis pela geração de resíduos de gesso na construção civil são: utilização de pasta de gesso para revestimento de paredes e tetos, execução de divisórias e paredes com chapas de gesso acartonado, produção de alvenarias compostas por blocos de gesso e aplicação de placas para forro e de elementos decorativos. John e Cincotto (2003) afirmam que a quantidade de resíduo gerado pelo gesso aplicado como revestimento de paredes e tetos se deve ao rápido endurecimento da pasta (tempo de pega) e à mão-de-obra pouco qualificada responsável pela aplicação manual desse material. Por isso, sua reciclagem tem crescido, crescimento este acentuado com o aumento de práticas sustentáveis de construção.

A reciclagem do gesso é facilmente realizada, o que contribui ainda mais a sustentabilidade na construção civil. Basta apenas calcinar o resíduo (20 % de umidade em base úmida) com baixo consumo energético até a umidade do gesso comercial (6 % de umidade em base úmida). Apesar da vantagem, o gesso reciclado apresenta tempo de pega ainda menor que o gesso natural (Cordon, 2017), o que provavelmente aumentaria ainda mais o seu desperdício. Dessa forma torna-se importante o estudo de seu processo a fim de qualificar a sua reciclagem.

O presente trabalho tem como objetivo estudar a cinética de secagem do resíduo do gesso de construção em secador de bandejas, bem como o impacto dessa operação unitária nas propriedades físicas e químicas do material, quando comparadas com a do gesso comercial de revestimento normatizado. A fim de avaliar a influência da temperatura e da velocidade do ar no tempo de secagem requerido para atingir a umidade desejada (6 % em base úmida), fez-se o uso de uma matriz de planejamento experimental de dois níveis com repetição no ponto central. O consumo específico de energia foi calculado para todas as condições estudadas. Para modelar as curvas de secagem obtidas experimentalmente, foram utilizados os modelos empíricos da literatura (Page, Page Modificado e Midilli) nos períodos de taxas decrescentes, e o ajuste linear para os períodos de taxa constantes.

Material e Métodos

A produção do resíduo de gesso foi utilizada o gesso da marca *Gypway* hidratado com um teor de 60 % em massa de água, seguindo as etapas: hidratação, secagem e moagem. A etapa de hidratação do gesso comercial foi realizada de acordo com a norma NBR 12128 (ABNT, 1991b), em que o gesso foi disperso sobre a água (60 % em massa) por 1 minuto, permanecendo em repouso por 2 minutos e misturando-se com o auxílio de uma espátula por um 1 minuto até a obtenção de uma pasta lisa e homogênea. As pastas foram transferidas para formas de alumínio forradas com plástico, formando camadas de 1 a 1,5 cm de espessura, as quais secaram naturalmente. As placas foram quebradas manualmente para posterior moagem em moinho de martelos. O pó obtido pela moagem foi recolhido e armazenado em dessecador para evitar a absorção da umidade do ar. O resíduo de gesso hidratado com 60 % em massa de água possui aproximadamente 20 % de umidade em base úmida (determinada por meio do analisador de umidade Shimadzu, MOC63u).

Após produzido o resíduo de gesso laboratorialmente, aproximadamente 30 g do mesmo foi disperso sobre a bandeja de alumínio com dimensões de 27,1 x 18 cm, ocupando cerca de 80 % de sua área e inserido no suporte de bandejas do secador de bandejas. Esse secador encontra-se instalado nas dependências do Instituto Mauá de Tecnologia, em São Caetano do Sul - SP. O equipamento possui seção transversal retangular e dimensões iguais a 0,3 x 0,3 x 0,4 m. As dimensões externas máximas do secador são iguais a 2,95 x 0,73 x 1,40 m. A circulação do ar de secagem é feita por um soprador com motor de 200 / 220 V, 125 W e 3000 rpm. O soprador é acoplado internamente ao secador e impulsiona o ar dentro do túnel com velocidades de 0,3 até 2,1 m/s. A variação da velocidade do ar é feita por um inversor de frequência. A temperatura do ar de secagem é controlada por um potenciômetro elétrico. O secador possui nove resistências elétricas – duas resistências de 1000 W e sete resistências de 500 W, localizadas logo após a entrada de ar e dispostas em conjuntos de 3 em 3. O suporte das bandejas é apoiado em uma balança analítica Mettler Toledo®, modelo PB3002- S, utilizada para registrar a variação de massa das amostras durante os ensaios.

A velocidade foi determinada por meio de um anemômetro após o túnel de secagem, e a temperatura do ar de entrada das bandejas foi determinada por um termômetro suspenso perpendicular em relação a direção do ar de secagem. A secagem foi conduzida até atingir a umidade de equilíbrio. A variação de massa das amostras durante os ensaios foi obtida por meio de balança semi-analítica (Mettler Toledo®, PB3002-S), acoplada ao secador e conectada a um computador. As medidas de massa foram monitoradas com o auxílio do software LabX (Mettler Toledo®), em intervalos de tempo de 5 segundos. Com os valores de massa do material foi calculado o adimensional de umidade para cada intervalo de tempo (Equação 1). As curvas de secagem foram construídas com os valores do adimensional de umidade (MR) em função do tempo de secagem, em que M_0 representa o teor de umidade inicial, M o teor de umidade no tempo (t) e M_e é o teor de umidade de equilíbrio, todos expressos em base seca.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

Os experimentos foram realizados seguindo uma matriz de planejamento fatorial de dois níveis, com três repetições no ponto central (Tabela 3). As variáveis de entrada estudadas foram: temperatura do ar (T) (120 a 140 °C) e velocidade do ar (v) (0,50 a 0,90 m·s⁻¹).

Tabela 3 – Matriz de Planejamento Experimental Fatorial Completo 2²

Codificadas		Não codificadas	
T	v	T (°C)	v (m/s)
-1	-1	120	0,5
1	-1	140	0,5
-1	1	120	0,9
1	1	140	0,9
0	0	130	0,7
0	0	130	0,7
0	0	130	0,7

Para o período de secagem decrescente, foram ajustados os modelos empíricos de Page, Page Modificado e Midilli — Equações 2, 3 e 4. Os parâmetros foram obtidos utilizando-se a ferramenta Solver do Excel[®] para cálculo de regressão não-linear.

$$M_{R_{calc}} = \exp(-kt^n) \quad (2)$$

$$M_{R_{calc}} = \exp(-kt)^n \quad (3)$$

$$M_{R_{calc}} = a \cdot \exp(-kt^n) + bt \quad (4)$$

A determinação dos períodos de secagem foi realizada com o melhor valor de R² (Equação 5) obtido na modelagem do período decrescente. Para seu cálculo, foram utilizadas as Equações 6 e 7, em que \overline{M}_R é a média das umidades em base adimensional calculadas pela Equação 1 no período decrescente.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{total}} \quad (5)$$

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (M_R - \overline{M}_R)^2 \quad (6)$$

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^n (M_R - M_{R_{calc}})^2 \quad (7)$$

Para a determinação das taxas de secagem constante, derivou-se a função linear ajustada no período constante de secagem. Já para o período decrescente, as taxas foram obtidas por meio das derivadas das Equações 2, 3 e 4.

As variáveis do ar ambiente (h_0 - entalpia do ar ambiente; H_e , umidade absoluta do ar ambiente) foram obtidas por meio das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar de secagem medidas por um psicrômetro. De acordo com Tadini *et al.* (2016), secadores nos quais o aquecimento e o arraste da umidade do produto é efetuado pelo uso do ar quente, pode-se fazer a hipótese simplificadora que consiste em assumir que o secador opera de modo adiabático. Portanto, nesse trabalho considerou-se que a entalpia do ar de secagem na entrada (h_e) é igual ao da saída (h_2), simplificando o balanço de massa (Equação 8), sendo possível determinar as variáveis do ar na saída do secador (h_2 - entalpia do ar de saída; H_s - umidade absoluta do ar de saída), em que M_s é a massa seca do resíduo de gesso a ser seco, X_e e X_s , as suas umidades inicial e final expressas em base seca, respectivamente; M_g , a massa de ar seco e M_a é a massa de água evaporada no processo.

$$M_s(X_e - X_s) = M_g(H_s - H_e) = M_a \quad (8)$$

A massa de ar seco foi determinada pela Equação 9, por meio da massa de ar (Equação 10), em que $S_{túnel}$ é a área transversal do túnel de secagem; v , a velocidade do ar e t_R , o tempo necessário para o produto atingir 6 % de umidade em base úmida.

$$M_{Ar} = M_g + M_g H_e \quad (9)$$

$$M_{Ar} = v \cdot S_{túnel} \cdot t_R \cdot \rho_{ar} \quad (10)$$

A partir dos dados medidos e obtidos do ar de entrada e saída do secador, respectivamente, o Consumo específico de energia, $C_{energia}$, para atingir a umidade de 6 % em base úmida foi calculado pela Equação 11.

$$C_{energia} = \frac{1}{H_s - H_e} (h_2 - h_0) \quad (11)$$

A distribuição granulométrica das partículas foi obtida com o auxílio de um granulômetro a laser Bettersizer 2600(Wet), equipado com uma unidade de dispersão úmida automática. Para a realização dos ensaios, uma quantidade de 0,15 g das amostras foi dispersada automaticamente em 5 L de álcool etílico anidro, para evitar a dissolução de partículas pequenas durante a medição, a 1200 rpm por 240 s.

O tempo de pega foi determinado por meio do ensaio de cinética de temperatura, estudado a partir de ensaios de calorimetria. Para a tomada de medidas de temperatura em função do tempo foi construído um calorímetro pseudo-adiabático semelhante aos utilizados por Pinheiro (2011), constituído por um recipiente fechado de isopor para isolamento do sistema do meio externo preenchido por esferas de isopor para aumento da eficiência de retenção do calor, um copo de isopor para a colocação da pasta de gesso, um termopar do tipo K (CromelAlumel), acoplado a um termômetro digital com 0,1 °C de resolução e um cronômetro. A pasta de gesso deve ser preparada de acordo com a norma NBR 12128 (ABNT, 1991a) já dentro do copo de isopor e imediatamente inserida no calorímetro em meio às esferas de isopor. O termopar utilizado para a medição da

temperatura é então inserido na pasta e o conjunto fechado para evitar exposição ao meio externo. Os valores de temperatura, em °C, são tomados a cada 15 s.

Resultados e Discussão

Na Figura 1 constam as curvas de secagem obtidas para cada condição estudada, e na Tabela 4 são apresentados os valores de tempo de secagem. Observa-se um período de acomodação, nos primeiros minutos de secagem, seguido dos períodos de secagem constante e decrescente, em todas as condições investigadas. O tempo de secagem para o produto atingir a umidade de equilíbrio de 6 % (base úmida) foi influenciado significativamente pela temperatura e velocidade do ar de secagem. Para maiores temperaturas e velocidades do ar, menor foi o tempo de secagem. Para as curvas referentes ao ponto central da matriz experimental, observou-se a boa reprodutibilidade dos dados, porém não houve superposição devido ao fato de que as amostras foram secas em dias com umidades relativas do ar diferentes (Tabela 6). O menor tempo de secagem foi obtido nas condições máximas de temperatura e velocidade do ar (Ensaio 4), enquanto que na condição mínima (Ensaio 1) foi obtido o maior tempo de secagem. A umidade de equilíbrio variou entre 0,31 % e 4,05 %, em base úmida, demonstrando que em todas as condições foi possível obter um produto com umidade final inferior à umidade desejada. O tempo de secagem para obter a umidade desejada (6 %) variou de 0,32 a 1,53 h (Tabela 4).

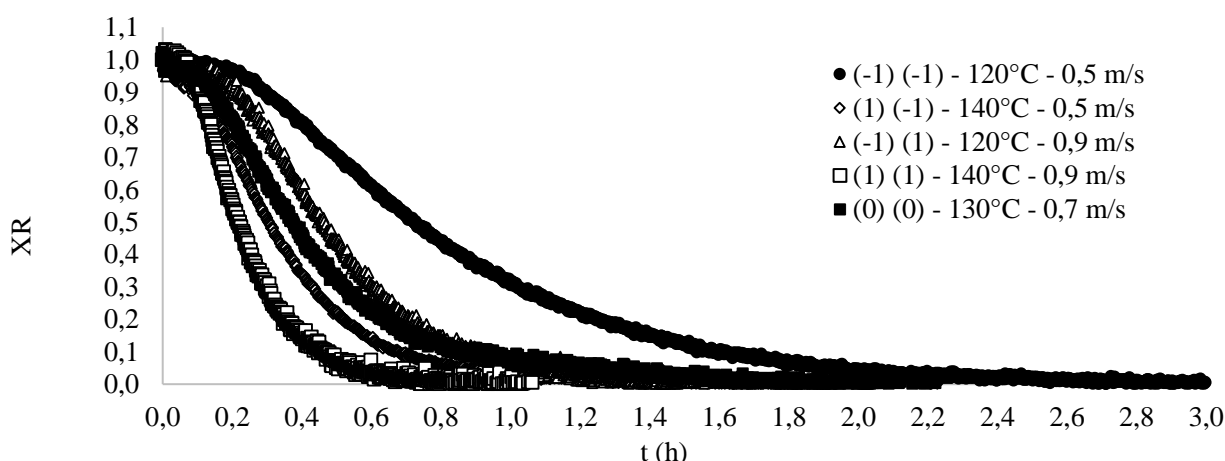


Figura 1 – Curvas experimentais de secagem do gesso.

Tabela 4 – Valores de tempo de secagem nas condições estudadas

Ensaio	T (°C)	v (m/s)	t _R (h)
1	120	0,50	1,533
2	140	0,50	0,718
3	120	0,90	0,496
4	140	0,90	0,317
5	130	0,70	0,656
6	130	0,70	0,607

Os resultados da análise de variância (ANOVA) e teste F de Fischer mostraram que para a regressão, $F_{\text{calculado}} (34,5) > F_{\text{tabelado}} (9,3)$ o que atesta que o modelo é significativo. Para a falta de ajuste, $F_{\text{calculado}} (7,9) < F_{\text{tabelado}} (18,5)$ que satisfaz a condição para o modelo ser preditivo. O coeficiente de determinação (R^2) do modelo explica de forma satisfatória a variação em torno do valor médio, 97,2 % de um máximo de 99,4 %. Além disso, a curvatura não foi estatisticamente significativa ($p = 0,106$). O modelo linear obtido é apresentado na Equação 11, em variáveis codificadas. A superfície de resposta é mostrada na Figura 2. Observa-se que menores tempo de secagem (t_R) são obtidos para maiores valores de temperatura e velocidade do ar. A variáveis temperatura e velocidade do ar influenciam significativamente o tempo de secagem (t_R). Os valores negativos dos efeitos das variáveis indicam que o aumento da temperatura e velocidade do ar proporcionam um menor tempo de secagem (t_R).

$$t_R = 0,7214 - 0,3575 \cdot T - 0,2475 \cdot v + 0,1575 \cdot Tv \quad (11)$$

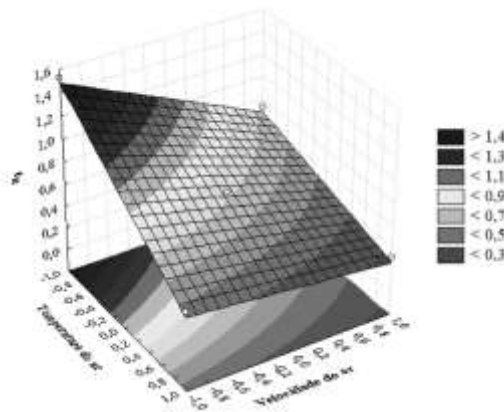


Figura 2 – Superfície de resposta do modelo linear

O modelo linear representado pela Equação 11 foi validado a partir de dados experimentais para os níveis de temperatura e do ar de secagem $124 \text{ }^\circ\text{C}$ e $0,7 \text{ m. s}^{-1}$, obtendo a umidade final de 5,91 % (base úmida).

Na Tabela 5 estão apresentados os três modelos empíricos ajustados por meio de regressão não linear aos dados experimentais da secagem de gesso reciclado, considerando as diferentes temperaturas e velocidade do ar de secagem.

Tabela 5 – Resultados dos modelos empíricos estudados.

Planejamento Fatorial	Page			Page Modificado			Midilli				
	k_p	n_p	R^2	k_{pm}	n_{pm}	R^2	a	b	k_m	n_m	R^2
(-1) (-1)	1,142	1,542	0,998	1,090	1,542	0,998	1,218	0,000	1,360	1,326	0,999
(1) (-1)	3,919	1,409	0,994	2,637	1,409	0,994	1,550	0,008	4,327	1,131	0,999
(-1) (1)	2,881	1,747	0,992	1,833	1,747	0,992	1,661	0,004	3,377	1,331	0,994
(+1) (+1)	7,986	1,579	0,994	3,729	1,579	0,994	1,661	0,000	6,930	1,150	0,997
(0) (0)	2,474	1,102	0,980	2,275	1,102	0,980	36,751	0,000	6,108	0,367	0,993
(0) (0)	2,833	1,291	0,981	2,240	1,291	0,981	6,977	0,000	4,693	0,588	0,993
(0) (0)	3,758	1,862	0,992	2,036	1,862	0,992	1,189	0,013	4,162	1,763	0,995

Pode-se notar que os três modelos utilizados (Page, Page Modificado e Midilli) para modelar o período decrescente apresentam bons ajustes. Porém, o modelo de Midilli se ajustou melhor em todos os ensaios, com coeficientes de determinação (R^2) próximos à unidade.

Na Figura 3 e na Tabela 6, observam-se as taxas de secagem, bem como as condições de processo de cada ensaio realizado. Os períodos de acomodação foram omitidos nas curvas da Figura 3, sendo que quanto menor a temperatura e velocidade do ar de secagem, maior o intervalo de tempo nesse período. No período de taxa decrescente, as taxas foram obtidas por meio da derivada do Modelo de Midilli.

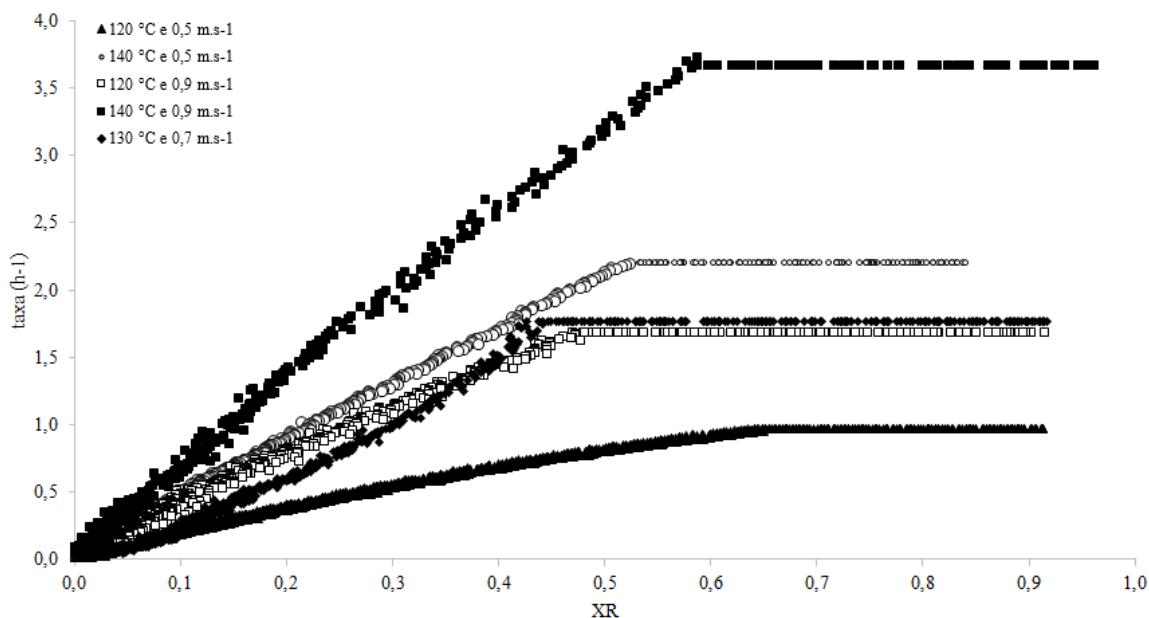


Figura 3 – Taxas de secagem do gesso reciclado.

Tabela 6 – Taxas de secagem do gesso reciclado.

Planejamento Fatorial	HR (%)	Taxa Constante		Taxa decrescente				
		Equação da Reta		Midilli				
		k cte (h^{-1})	R^2	a	b	k_m	n_m	R^2
(-1) (-1)	67	0,96	0,996	1,218	0	1,360	1,326	0,999
(-1) (+1)	71	2,20	0,997	1,550	0,008	4,327	1,131	0,999
(+1) (-1)	72	1,69	0,992	1,661	0,004	3,377	1,331	0,994
(+1) (+1)	69	3,67	0,992	1,719	0	6,906	1,131	0,997
(0) (0)	76	1,77	0,997	36,751	0	6,108	0,367	0,993
(0) (0)	73	2,14	0,995	6,896	0	4,687	0,591	0,993
(0) (0)	69	1,89	0,991	1,189	0,013	4,162	1,763	0,995

Na Figura 3 observa-se um período de taxa de secagem constante, demonstrando a presença de umidade superficial no gesso, em todas as condições investigadas. Após o período de taxa constante, verifica-se um período de taxa decrescente, que é predominante na secagem, prevalecendo o fenômeno de difusão, sendo o processo controlado pelas condições internas, comportamento característico de materiais cerâmicos, como o gesso. Nota-se ainda, que maiores temperaturas do ar e velocidades do ar resultaram em maiores taxas de secagem.

Os maiores valores de taxas no período constante na secagem do resíduo de gesso foram obtidos para as condições de maior temperatura (140°C, com taxas de 3,67 h^{-1} e 2,20 h^{-1} , respectivamente). Já os menores valores referem-se às condições de menor temperatura (120°C, com

taxas de 0,96 h⁻¹ e 1,69 h⁻¹). Nas condições máximas das variáveis de processo (140 °C e 0,9 m/s), o valor de taxa de secagem no período inicial foi cerca de 3,8 vezes maior em comparação com a taxa de secagem a 120 °C e 0,7 m/s, demonstrando a influência da temperatura do ar na retirada da umidade superficial.

Observa-se na Tabela 6, que o parâmetro k_m do modelo de Midilli aumentou com a elevação da temperatura, visto que quanto maior a temperatura do ar de secagem, mais facilmente o material perde água livre, corroborando com Silva *et al.* (2016). Os parâmetros a e b não possuem significado físico no processo de secagem segundo Silva *et al.* (2016), porém os valores da constante a para os dois primeiros ensaios do ponto central (36,751 e 6,896) apresentaram valores bastante distintos em relação aos outros experimentos. Tal fato deve-se provavelmente à elevada umidade relativa do ar ambiente presente nesses ensaios, variável de bastante influência no período constante do processo de secagem.

Os valores de massa de água evaporada e de ar seco; as umidades absolutas e a entalpia do ar, nas condições inicial e final, bem como os valores de consumo específico de energia para o gesso atingir o teor de água ideal para a sua comercialização (6 % b.u.), são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo específico de energia.

Ensaio	M _a	M _g	Umidades Absolutas do Ar		Entalpias do Ar		C _{energia} · 10 ⁶
			H ₀	H _s	h ₀	h _s	
	g de água	kg de ar seco	kg água.(kg ar seco) ⁻¹		kJ.(kg ar seco) ⁻¹		kJ.(kg água evap) ⁻¹
1	4,36	357,5	0,01410	0,01412	62,3	159,0	45,94
2	4,43	191,9	0,01600	0,01607	68,1	184,9	17,59
3	4,32	314,5	0,01609	0,01611	68,1	164,2	38,64
4	4,35	205,2	0,01560	0,01566	67,3	183,8	20,59
5	4,34	365,4	0,01630	0,01633	68,1	175,4	30,72
6	4,45	342,4	0,01640	0,01644	70,1	175,6	27,13
7	4,34	226,0	0,01640	0,01643	69,3	175,6	33,21

O consumo específico de energia calculado apresentou valores maiores (45,94.10⁶ kJ.(kg água evap.)⁻¹ e 38,64.10⁶ kJ.(kg água evap.)⁻¹) para as condições de menor temperatura de secagem (120 °C) e valores menores (17,59.10⁶ kJ.(kg água evap.)⁻¹ e 20,59.10⁶ kJ.(kg água evap.)⁻¹) para as condições de maior temperatura do ar de secagem (140 °C). Tal fenômeno pode ser explicado pela quantidade de água evaporada (M_a) ter sido praticamente constante em todos os ensaios, visto que a umidade inicial do gesso é de aproximadamente 20 % e a final de 6 %, ambas em base úmida e a variação de entalpia ter apresentado valores próximos a 106 kJ.(kg ar seco)⁻¹, em todos os ensaios. Já o consumo específico de ar seco apresentou valores distintos, na faixa de 191,9 kg de ar seco a 365,4 kg de ar seco.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados obtidos de distribuição granulométrica do resíduo de gesso úmido (20 % base úmida), bem como o material seco (6 % base úmida) nas condições de 140 °C e 0,9 m.s⁻¹ e 120 °C e 0,5 m.s⁻¹ e do gesso comercial (6 % base úmida).

Nota-se que em relação ao comercial, os gessos secos nas duas condições apresentadas resultaram em diâmetros médios (14,81 μm e 15,05 μm) inferiores ao do gesso comercial (18,32 μm). Já entre as amostras secas, percebe-se a diminuição do diâmetro médio com o aumento tanto da temperatura quanto da velocidade do ar de secagem.

Na Tabela 9 estão resumidos os valores de período de indução, definido por Ridge (1959) como o tempo necessário para que a taxa de aumento da temperatura exceda 0,1 °C.min⁻¹, a temperatura máxima atingida pelo material (T_{máx}) e o tempo para atingir a temperatura máxima no ensaio de cinética de temperatura para o gesso seco nas condições 140 °C e 0,9 m.s⁻¹ e 120 °C e 0,5 m.s⁻¹ e do gesso comercial.

Tabela 8 – Granulometria dos gessos secos e comercial.

Condição	Diâmetro a 10 % (μm)	Diâmetro a 50 % (μm)	Diâmetro a 90 % (μm)	Diâmetro médio (μm)
Resíduo úmido	2,035	8,035	35,01	13,94
140 °C e 0,9 m.s ⁻¹	2,149	9,171	36,37	14,81
120 °C e 0,5 m.s ⁻¹	2,165	10,01	38,36	15,05
Comercial	2,249	10,25	47,45	18,32

Tabela 9 – Cinética de temperatura da reação de hidratação.

Material	Período de Indução (min:seg)	T _{máx} (°C)	Tempo para atingir T _{máx} (min:seg)
140 °C e 0,9 m.s ⁻¹	< 5 min	31,44	7:30
120 °C e 0,5 m.s ⁻¹	< 5 min	46,04	11:00
Comercial	10:15	45,4	38:45

* não foi possível determinar.

Nota-se que o material seco nas duas condições obteve redução significativa do tempo para atingir a temperatura máxima em comparação com o gesso comercial, o que indica um aumento da absorção da água e de sua reatividade com a mesma. Esse tempo necessário para atingir a temperatura máxima superior a 40 °C aponta que o tempo de pega do gesso havia sido finalizado, como estudado em Cordon, 2017. Logo, para o gesso seco na condição de 120°C e 0,5 m.s⁻¹, seu tempo de pega é de aproximadamente 11 min, enquanto para o gesso seco 140 °C e 0,9 m.s⁻¹ não foi possível determinar seu tempo de pega, pois sua temperatura máxima (31,44 °C) foi inferior a 40 °C, indicando que não ocorreu hidratação completa do material. A diminuição do tempo de pega do material deve-se a maior quantidade de anidrita III na amostra após a secagem, uma vez que é o constituinte mais reativo do gesso, seguida do hemidrato, da anidrita II e, por fim, da anidrita I. Por ser altamente reativa, a anidrita III se transforma rapidamente em hemidrato ao entrar em contato com a água. Quando presente em altos teores, acelera o tempo de início de pega e reduz o período de indução, como indicado na Figura 4. Além disso, no gesso reciclado há aumento no número de núcleos de cristalização causado pela incorporação de partículas de dihidrato e pelo aumento da sua área específica em relação ao gesso comercial, que está relacionada à diminuição do seu diâmetro médio (Tabela 9) também concluído por Cordon, 2017. Esse aumento da área específica acelera a reação de hidratação, devendo, portanto, ser alterada a relação água/gesso para a amostra seca a 140 °C e 0,9 m.s⁻¹. Não foi possível realizar a determinação do tempo de indução das amostras secas, já que a taxa de aumento da temperatura desses gessos logo no início do ensaio (primeiros 5 min) já havia ultrapassado 0,1 °C·min⁻¹.

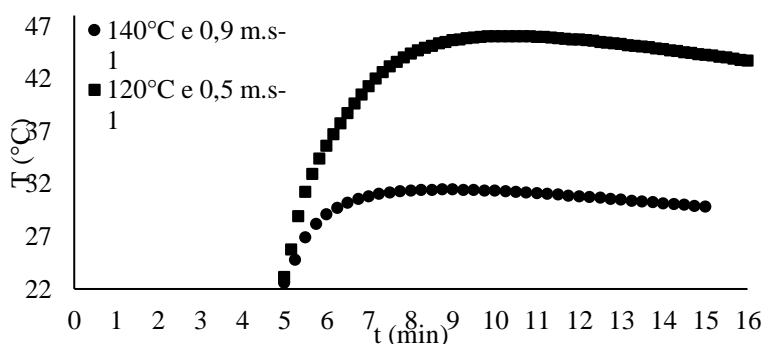


Figura 4 - Cinética de temperatura para os gessos secos nas duas condições estudadas

Conclusões

A secagem do resíduo do gesso de construção em secador de bandejas mostrou que a temperatura e a velocidade do ar nas faixas estudadas influenciaram no tempo de secagem requerido para atingir umidade de 6 % (base úmida). Os dois fatores influenciaram significativamente nesta resposta, de modo que maiores valores resultaram em menores tempos de secagem. O modelo linear proposto foi significativo e preditivo.

As curvas de secagem do resíduo de gesso de obra apresentaram períodos de secagem constante e decrescente em todas as condições de processo investigadas. Quanto maior a temperatura e a velocidade do ar, maior é a taxa de secagem. O modelo de Midilli foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais no período de secagem decrescente, com coeficientes de determinação próximas à unidade. Os consumos específicos de energia para o gesso obter a umidade desejada apresentaram valores maiores para as condições de menor temperatura de secagem e valores menores para as condições de maior temperatura do ar de secagem devido a maior quantidade de ar seco necessária para remover a mesma quantidade de água (em torno de 4,4 g).

O gesso seco na condição de 120 °C e 0,5 m.s⁻¹ não se adequou frente a NBR 13207, devido ao seu tempo ser drasticamente menor que o gesso comercial, tal fato deve-se ao aumento da sua área específica relacionada com o seu diâmetro médio, como já estudado em Cordon, 2017, não devendo, portanto, ser utilizado sozinho. Recomenda-se o estudo das proporções de sua mistura com o gesso comercial. Não foi possível avaliar o tempo de pega do gesso seco a 140 °C e 0,9 m.s⁻¹ devido a não total reatividade do gesso com a água, recomendando, portanto, o estudo da relação água/gesso para pasta de consistência normal a fim de determinar a nova relação água/gesso, superior a 60 % em massa.

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR12128: *Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta*, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. NBR13207: *Gesso para construção civil*, 1994.
- CORDON, HCF. *Caracterização estrutural e avaliação do processo de reciclagem de diferentes formas de gesso*. 2017. 231f. Tese. (Doutorado em Nanociências e Materiais Avançados) - Universidade Federal do ABC, Santo André, 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. *Sumário Mineral 2015*, 2015. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>>
- JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. *Alternativas de gestão dos resíduos de gesso*. Reformulação da resolução CONAMA. 2003. Disponível em: <[file:///C:/Users/HPPC/Downloads/159_Alternativas para gestao dos residuos de gesso.pdf](file:///C:/Users/HPPC/Downloads/159_Alternativas%20para%20gestao%20dos%20residuos%20de%20gesso.pdf)>.
- PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. *O gesso – produção e utilização na construção civil*. Recife: Bagaço, 2001.
- PINHEIRO, S. M. M. *Gesso reciclado: Avaliação de propriedades para uso em componentes*. [S.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2011.
- RIDGE, M. J. Acceleration of the set of gypsum plaster. *Australian J. Appl. Sci.*, v. 10, p. 218–231, 1959.
- SILVA, R. B. et al. Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. *R. bras. Tecnol. Agroindustr*, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, dez. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/viewFile/3261/3353>>.
- TADINI, C. C., TELIS, V. R. N., MEIRELLES, A. J. A., FILHO, P. A. P. *Operações unitárias na indústria de alimentos*. Rio de Janeiro: LTC, 2016. v. 2. 484 p.