

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE TELHA FABRICADA COM GESSO
RECICLADO REFORÇADA POR FIBRA DE SISAL****EXPERIMENTAL STUDY OF DRYING TILE MANUFACTURED WITH
RECYCLED GYPSUM REINFORCED BY SISAL FIBER**Romeu da Silva¹Leonete Cristina de Araújo Ferreira Medeiros Silva²**RESUMO:**

Os materiais compósitos com matriz de gesso são amplamente utilizados na construção civil devido às suas propriedades versáteis. No entanto, seu uso levanta preocupações devido ao baixo potencial de reaproveitamento e reciclagem desses materiais. Atualmente, diversas pesquisas vêm sendo realizadas acerca do processo de secagem de materiais fabricados com gesso reciclado, com foco em métodos experimentais. Ao comparar os resultados experimentais com métodos teóricos é possível validar e aprimorar a suas abordagens, sendo viável a melhoria e ajustes necessários nos métodos de secagem. A boa concordância entre os dados experimentais e teóricos é essencial para garantir a aplicabilidade das descobertas na indústria e na reutilização de gesso reciclado. Reformulação baseada em teorias ou princípios físicos, químicos, biológicos derivam da compreensão do fenômeno investigado, os modelos utilizados foram Page, Henderson, Midili. Foi possível observar a curva de secagem que apresentou uma evolução da redução do teor de água ao longo do tempo. A variação da secagem apresentou características distintas em diferentes intervalos de tempo, o que levou a observar o comportamento do gesso reciclado em várias fases. Essa análise temporal revela informações valiosas sobre a eficiência e a durabilidade do material reciclado. Durante o processo de secagem é factível identificar mudanças nas propriedades físicas e químicas do gesso reciclado, influenciando diretamente sua utilização e aplicabilidade em diferentes cenários.

Palavras-chave: gesso, reciclagem; modelos, variação.

ABSTRACT

Composite materials with a gypsum matrix are widely used in construction due to their versatile properties. However, their use raises concerns due to the low potential for reuse and recycling of these materials. Currently, several research studies are being conducted on the drying process of materials manufactured with recycled gypsum, focusing on experimental methods. By comparing experimental results with theoretical methods, it is possible to validate and improve their approaches, enabling necessary enhancements and adjustments in drying methods. Good agreement between experimental and theoretical data is essential to ensure the applicability of findings in industry and the reuse of recycled gypsum. Reformulation based on theories or physical, chemical, and biological principles stems from the understanding of the investigated phenomenon. The models used were Page, Henderson, and Midili. It was possible to observe the drying curve showing a decrease in water content over time. The drying variation exhibited distinct characteristics at different time intervals, leading to observations of recycled gypsum behavior in various phases. This temporal analysis reveals valuable information about the efficiency and durability of the recycled material. During the drying process, it is feasible to identify changes in the physical and chemical properties of recycled gypsum, directly influencing its use and applicability in different scenarios.

Key words: *Plaster, Recycling, Models, Variation*

¹Graduando em Engenharia Civil, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: romeu3540@gmail.com

²Professora orientadora, Departamento de Engenharias, Ufersa, Campus Caraúbas, e-mail: leonete.cristina@ufersa.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Anuário estatístico de transformação de não metálicos brasileiros do ano de 2021, o Brasil aparece na 13ª no ranking mundial de produção de gesso, correspondendo a apenas 3,2 milhões de toneladas (BRASIL, 2021). O gesso possui uma grande diversidade de uso industrial, sendo um dos materiais mais utilizados na construção civil no mundo (OIT, 2021).

O grande volume empregado em diversas aplicações na construção civil (revestimento, placas de forro, *dry-wall* etc.) gera, por sua vez, uma grande quantidade de resíduos. Os resíduos da construção e demolição são classificados pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307/2002 em função de suas características nas classes A, B, C, D e E. Na primeira emissão da referida norma, o gesso era classificado com resíduos Classe C, ou seja, aqueles passíveis de reutilização, para os quais ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem. No entanto, em 2011, a resolução foi alterada o gesso foi reclassificado para Classe B, considerados são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.

Com o aprimoramento de um método de reciclagem específico para o gesso, é possível reutilizar esse resíduo. Esse processo não apenas contribui para a redução do impacto ambiental, mas também pode impulsionar a criação de empresas e empregos por meio do estabelecimento de indústrias de reciclagem de gesso (Melo, 2008).

Na literatura científica, já é possível identificar diversas maneiras de processar o resíduo de gesso para diversas aplicações. Tais como desenvolvimento de telha branca ecológica a partir de resíduo de gesso da construção civil, as telhas brancas conseguem ser fabricadas a partir do gesso, o processo inclui triturar o gesso, moldá-lo em telhas, secá-las e aplicar acabamentos com esmaltes. As telhas brancas ajudam a refletir a energia solar, reduzindo a absorção de calor e contribuindo para temperaturas mais baixas no interior da edificação. Este método de fabricação pode oferecer uma solução sustentável para reduzir calor nas residências de áreas urbanas (Teske, 2014).

Cavalcante *et al.*; (2017), realizou uma análise da viabilidade de utilização do gesso reciclado para aplicação de painéis de revestimento decorativo 3D. Para realizar a pesquisa, foi comparando os resultados das placas comercializadas com placas de gesso produzidas de gessos reciclado, enfatizando os possíveis impactos positivos econômicos e ambientais. Foi possível observar algumas características em placas feitas com material reciclado como, menor custo no traço, chegando a uma economia de 38%, e com uma menor emissão de até 1050 kg a menos de CO₂.

Pesquisando formas de amenizar o desperdício de gesso e preservar os polos de gipsita, Amorim *et.al.*; (2017), confeccionaram tijolos sustentáveis para a reutilização do gesso, buscando tornar a obra limpa, racionalizando os resíduos de gesso e tornando produtos para serem reutilizado na obra. É possível observar que os tijolos de gesso são uma opção viável, preservando as propriedades físicas e mecânicas do gesso tradicional. Eles podem ser reintegrados ao canteiro de obras de maneira reciclável e sustentável, destacando-se pela ausência de emissão de dióxido de carbono durante o processo de fabricação.

Buscando avaliar a viabilidade técnica da produção de uma telha fabricada com gesso reciclado e reforçada com fibra de sisal, Cavalcante Filho (2018), comprovou que, após o processo trituração, peneiramento e calcinação dos resíduos, foi possível obter uma telha que

atendia aos critérios de resistência mecânica à flexão e, ao serem pintadas com esmalte sintético, cumpria os requisitos normativos de absorção de água.

Durante a etapa de secagem, se não houver um controle adequado, é possível que ocorram variações significativas de umidade e temperatura dentro do material sólido. Essas variações podem resultar em defeitos permanentes, tais como rachaduras, deformações e empenamento. Esses problemas comprometem a qualidade do produto, podendo até mesmo levá-lo à perda total, o que, por sua vez, reduz a eficiência do processo produtivo e aumenta os custos operacionais (Nascimento, 2018).

Adamski; Adamska; Pakowski (2018), determinou que as propriedades mecânicas dos produtos de gesso são influenciadas pelos processos de transferência de calor e massa que ocorrem na peça de gesso, sendo necessário conhecer as mudanças microestruturais e das interações da água e o material.

Nesse contexto, o desenvolvimento de novos materiais ecologicamente amigáveis precisar contemplar todos os aspectos normativos relacionados ao seu desempenho. No caso das telhas, compreender os fenômenos envolvidos na secagem é fundamental para o desenvolvimento do material proposto. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo teórico e experimental da secagem ao ar livre de uma telha fabricada com gesso reciclado oriundo de placas de *dry-wall*, reforçadas por fibras de sisal dispostas ao longo de seu comprimento longitudinal.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa é de carácter experimental e foi conduzida de acordo com os materiais e métodos descritos a seguir.

2.1. Materiais

2.1.1 Resíduo de Gesso

O resíduo utilizado foi coletado a partir de um material disposto em terreno, localizado na cidade de Caraúbas/RN, oriundo de revestimento de gesso e placas de *dry-wall* (Figura 01). Após a coleta, empregando os Equipamentos de Proteção Individual (EPI) necessários, os resíduos foram armazenados separadamente para que não ocorresse contaminação no laboratório.

2.1.2 Fibra de Sisal

A fibra de sisal (*Agave sisalana pierre*) é de origem vegetal e, na indústria, transformada em diversos tipos de fios, cordas, tapetes, capachos e mantas (EMBRAPA, 2021). Sua contribuição é significativa na indústria gesseira, sendo utilizada como um importante elemento de reforço na ligação das placas de gesso. A fibra utilizada no trabalho (Figura 02) foi obtida através de doações da empresa TS Gesso com obras em execução na localidade.

Figura 01 – Local do resíduo coletado



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 02 – Fibra de sisal como recebido



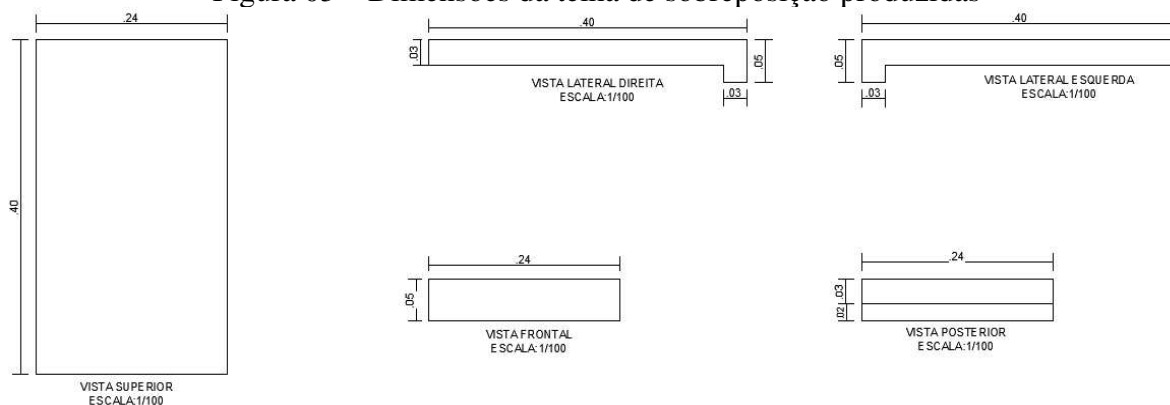
Fonte: Autoria própria, 2024.

2.2. Produção da Telha

2.2.1 Configuração da Telha

Baseado no trabalho desenvolvido por Cavalcante Filho (2018), no qual a configuração da telha reforçada com fibra de sisal na direção longitudinal (TRL) *telha reforçada com fibra de sisal na longitudinal*, apresentou os melhores resultados relacionados à resistência à flexão, o presente estudo visa complementar informações sobre essa proposta, agora sob a ótica do processo de secagem do material em desenvolvimento. A telha utilizada nessa pesquisa, foi produzida no formato de sobreposição, conforme preconizado pela NBR 15.310 (ABNT, 2005), cujas dimensões podem ser visualizadas na Figura 03.

Figura 03 – Dimensões da telha de sobreposição produzidas



Fonte: Adaptado de Cavalcante Filho (2018).

2.2.2 Trituramento do Resíduo

Inicialmente, realizou o cálculo da quantidade necessária do resíduo em pó para confecção da telha. O resíduo oriundo do canteiro de obras foi previamente reduzido para menores dimensões por meio de quebra manual com martelo. Para refinamento do resíduo de gesso, realizou-se o processo de moagem do material através do equipamento o qual é utilizado para o ensaio abrasão Los Angeles, localizado no Laboratório de Materiais de Construção, da Ufersa, Campus Caraúbas. O equipamento tem capacidade de operação de 5kg e foi programado para realizar 700 voltas por minuto. Foram feitas duas bateladas de moagem.

Foi possível observar quem em determinado momento o gesso já não era mais triturado, o próprio material amortecia o impacto das esferas.

2.2.3 Calcinação do Gesso

O material retirado do equipamento de ensaio de abrasão Los Angeles, totalizaram 10 kg e, posteriormente, foram distribuídos em duas formas de alumínio. O resíduo, agora em pó, foi disposto em estufa a uma temperatura de 205°C ao longo de 24 horas, conforme representado na Figura 04. Segundo Cipriano *et al.* (2021), durante a calcinação, o resíduo de gesso passa por uma desidratação em estufa a uma determinada temperatura e por um período para obtenção do gesso reciclado. Podem ser obtidos hemihidrato e anidritas cuja presença pode influenciar que nas reações de hidratação e, conseqüentemente, nas propriedades do gesso reciclado.

Figura 04 – Disposição do resíduo de gesso triturado em estufa



Fonte: Autoria própria, 2024.

2.2.4 Preparação da Pasta

A pasta de gesso reciclado foi preparada através da mistura homogênea de gesso reciclado e água, utilizando inicialmente a relação água/gesso (a/g) de 0,6. No entanto, observou-se que essa proporção resultou em uma trabalhabilidade insatisfatória. Por isso, optou-se por alterar a relação para 0,7. O procedimento seguiu a NBR 12.128 (ABNT,1991). Para a preparação, foram utilizados baldes, nos quais o pó de gesso foi adicionado sobre a água e agitado de forma manual até formar a pasta. Logo em seguida foi adicionada à forma, com isso, foi obtida uma pasta de gesso livre de matérias granulares.

2.2.5 Moldagem da Telha

Para a configuração adotada, TRL, foi utilizada uma quantidade de 0,10 kg de fibra. Posteriormente, a pasta de gesso foi depositada na forma em duas camadas de gesso intercaladas com uma camada de fibra. A Figura 05 apresenta da fibra de sisal disposta de forma mais linear possível, cortada no tamanho do comprimento longitudinal da telha. A Figura 06 apresenta a forma de madeira compensada empregada para moldagem da telha de sobreposição.

Figura 05 – Fibra de sisal preparada para ser incorporada à TRL



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 06– Forma utilizada na fabricação da TRL



Fonte: Autoria própria, 2024.

2.3. Ensaio de Secagem

O procedimento experimental para o ensaio de secagem foi realizado para investigar o processo de secagem da telha produzida de resíduo de gesso e analisar a perda de umidade ao longo do tempo. Inicialmente a telha foi moldada como descrito no tópico anterior em seguida a balança foi calibrada para que não ocorresse erros na pesagem. (FARIAS, 2011).

Durante o ensaio, foram realizadas pesagens periódicas do protótipo produzido em intervalos de tempo. Para cada medição a mostra foi posicionado de forma cuidadosa sobre a balança para que não se danifique-se o mesmo. Os valores de massa foram registrados a cada 5 minutos, 15 minutos, 30 minutos e 1 hora. Na Figura 07, é possível verificar a pesagem da telha.

Figura 07 – Demonstração da pesagem da telha de gesso reciclado incorporada com fibra de sisal



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ao longo do experimento, é esperada uma redução gradual na massa, indicando a perda de umidade presente na amostra. Todos esses dados foram meticulosamente coletados e registrados em uma tabela para posterior análise. O ensaio foi finalizado quando houve estabilização na massa, ou seja, quando não foram observadas mais alterações significativas, alcançando-se a massa de equilíbrio da telha de resíduo de gesso. Em seguida, a telha foi colocada dentro de uma estufa elétrica por 48 horas para obtenção da massa seca.

Após a realização do ensaio foi possível calcular os seguintes parâmetros: Conteúdo de Umidade de base seca (X_{bs}), em relação à massa seca do produto; Base Úmido (X_{bu}) – Em relação à massa total do produto, calculados pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente. As curvas de secagem foram construídas com uso do *software Origin, estudantil 2024*.

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (1)$$

$$X_{bu}(\%) = 100 \frac{m_{H_2O}}{m_t} = 100 \frac{m_{H_2O}}{(m_{H_2O} + m_{ms})} \quad (2)$$

$$Ur = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} total} \quad (3)$$

Onde:

m_{H_2O}	Massa de água em relação ao tempo
m_t	Massa total da telha
m_{ms}	Massa seca da telha
$m_{H_2O} total$	Massa de água total
Ur	Umidade Relativa

2.4. Modelos de Secagem

Segundo Bungueia (2016), a adoção de Modelos Não Lineares (MNL) em detrimento dos Modelos Lineares (ML) está relacionada a alguns fatores, tais como: sustentação baseada em teoria ou princípios físicos, químicos ou biológicos ou qualquer outra informação prévia; oferecem a possibilidade de predição de valores fora da zona de estudo; menor número de parâmetros; originam-se na noção sobre o fenômeno estudado.

Os modelos empíricos disponibilizados na literatura foram empregados para modelar a curva de secagem ao ar livre da telha, sendo eles: Modelo de Page, de Henderson e de Midili, descritos nas Equações 4, 5 e 6, respectivamente (Ramaj; Schockand; Müller, 2021).

$$X_{bs} = e^{-kt^n}, \text{ no que } k \text{ e } n \text{ são parâmetros do modelo} \quad (4)$$

$$X_{bs} = ae^{-kt}, \text{ no que } a \text{ e } k \text{ são parâmetros do modelo} \quad (5)$$

$$X_{bs} = ae^{-kt^n} + bt, \text{ na qual } a, k, n \text{ e } t \text{ são parâmetros do modelo} \quad (6)$$

Os parâmetros de dos modelos foram obtidos inicialmente por meio da função Solver do *Microsoft Excel 2023*. Esses dados serviram para uma previsão mais acertada no ajuste da curva. O ajuste matemático foi realizado nos *softwares Origin versão 2024 estudantil* seguindo a sequência: geração do gráfico de dispersão do X_{bs} experimental ao longo tempo; análise, ajuste, ajuste não linear, inserção das equações dos modelos empíricos com os parâmetros previamente determinados, aplicação aos dados experimentais. Após os devidos cálculos, foram retirados os dados referentes aos parâmetros do ajuste final para cada modelo, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de secagem ao ar livre foi acompanhado ao longo de 4 horas, sendo interrompido após a verificação de que a massa da telha úmida não variou por três medições consecutivas. Com base nos dados coletados, foi possível calcular as umidades necessárias para a elaboração da curva de secagem do material, conforme apresentado no Quadro 01. Encerradas as medições ao ar livre, o material foi transferido para uma estufa. Após 24 horas, foi realizada a primeira pesagem e, após mais 24 horas, foi pesado novamente. Os teores de umidade obtidos após 24 e 48 horas de secagem na estufa foram de 1,31% e 0,00%, respectivamente.

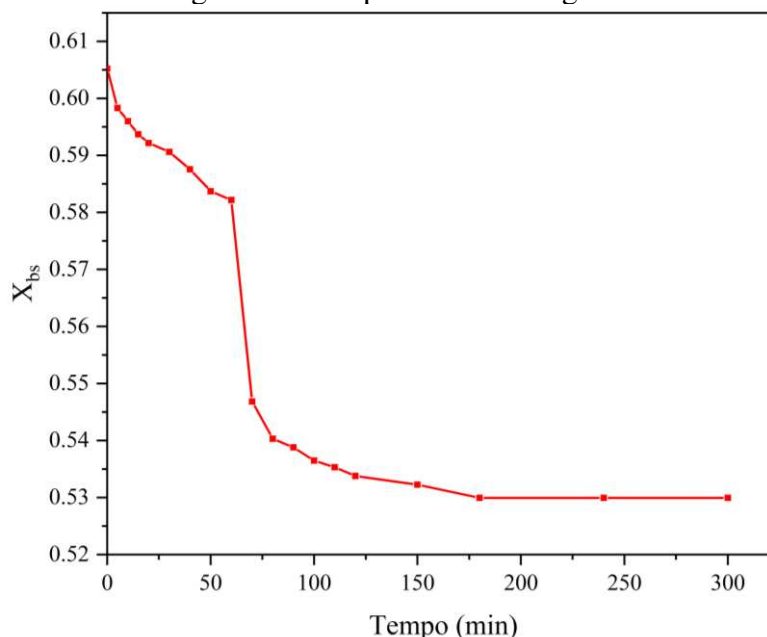
Quadro 01 – Dados experimentais das curvas de secagem da telha fabricada com gesso reciclado incorporado com fibra de sisal

Tempo (min)	X_{bs}	X_{bu}	UR
0	0,605	0,377	1,000
5	0,598	0,373	0,989
10	0,596	0,371	0,985
15	0,592	0,370	0,981
20	0,591	0,369	0,978
30	0,588	0,368	0,976
40	0,584	0,366	0,971
50	0,580	0,364	0,964
60	0,547	0,363	0,962
70	0,540	0,341	0,904
80	0,539	0,337	0,893
90	0,536	0,336	0,890
100	0,535	0,334	0,886
110	0,534	0,333	0,885
120	0,532	0,333	0,882
150	0,530	0,332	0,879
180	0,530	0,330	0,876
240	0,530	0,330	0,876
300	0,530	0,330	0,876

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A análise da curva de secagem pode ser feita por meio de diversos arranjos das variáveis calculadas partir dos dados obtidos no experimento. Adotando o proposto por Silva et al. (2022), foi adotado o gráfico que relaciona o Conteúdo de Umidade de base seca ($X_{s_{bs}}$) com a variação do tempo. Ou seja, da moldagem da telha até as 4h em que a telha permaneceu secando ao ar livre. A Figura 08 apresenta a curva de secagem do material em estudo.

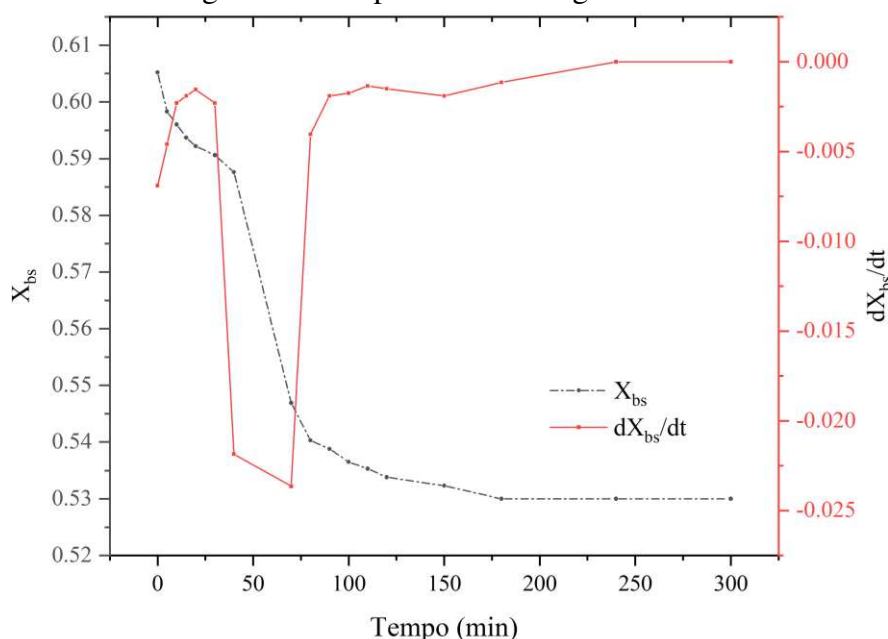
Figura 08 – Curva de secagem da telha produzida com gesso reciclado e fibra de sisal



Fonte: Autoria própria, 2024.

A curva de secagem do material apresentou a evolução da redução do teor de água ao longo do tempo. No entanto, a variação da secagem ao longo tempo é distinta em diversos intervalos. Para verificar o comportamento da taxa de secagem foi elaborado o Gráfico representado na Figura 09. Nessa figura, a sobreposição do parâmetro dX_{bs}/dt em relação à curva de secagem, indicando uma queda acentuada da quantidade de água nos 30 minutos iniciais, seguida por uma certa estabilização, passando por uma redução brusca da umidade seguida pela lenta redução da secagem do material, culminando com o final do monitoramento mantendo-se constante a quantidade de água na peça. Dessa forma, é necessário compreender os fenômenos físicos relacionados a esses comportamentos.

Figura 09 – Taxa de secagem da telha produzida com gesso reciclado e fibra de sisal



Fonte: Autoria própria, 2024.

A presença da água tem grande influência no processo de pega e endurecimento do gesso convencional, aqui considerando em sua primeira utilização. Como explicado em (IBRACON 2007), A hidratação é um processo químico no qual o material em pó se converte em dihidrato, resultado da interação química entre a água e o pó. A mistura de gesso com água é realizada até obter uma pasta uniforme e maleável. A consistência aumenta gradualmente até que ocorra o endurecimento, momento em que a pasta adquire resistência. Na sua primeira fase, ocorre o processo químico da dissolução; seguida pela cristalização, que é um fenômeno físico; finalizando com o endurecimento, que é um fenômeno mecânico.

Identificar o mecanismo de hidratação é possível a partir das curvas calorimétricas que revelam a cinética do processo, já que o calor liberado durante a hidratação permite um controle preciso da qualidade e velocidade da reação dos gessos (IBRACON, 2007). O Quadro 02 sintetiza as quatro etapas do processo.

Quadro 02 – Descrição dos mecanismos de hidratação do gesso a partir da curva da curva calorimétrica

Etapas	Descrição
1	Trata-se, assim como os aglomerantes, de um inicial pico de umedecimento. Esse estágio se inicia quando o pó é adicionado à água. Durante esse período, que dura cerca de 30 segundos, as superfícies do material são molhadas pela água, desencadeando uma reação física entre o sólido e a água, dando início ao processo de dissolução.
2	Refere-se a uma fase de tempo ajustável, conhecida como período de indução. Durante este estágio, que geralmente ocorre após 2 ou 3 minutos, os hidratos existentes se estabilizam tanto química quanto fisicamente, iniciando a organização para formar uma estrutura cristalina.
3	No final do período de indução, que coincide com o início da pega, a solução se torna supersaturada e os hidratos começam a precipitar-se, formando cristais. Isso é acompanhado por um aumento de temperatura, indicando um aumento na velocidade da reação.
4	Após atingir o seu pico, a velocidade da reação diminui progressivamente, sinalizando o término do processo de hidratação.

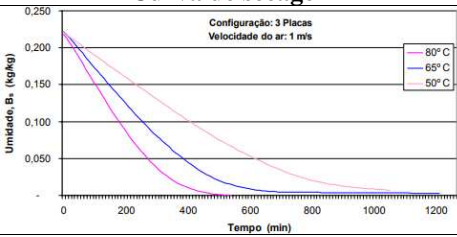
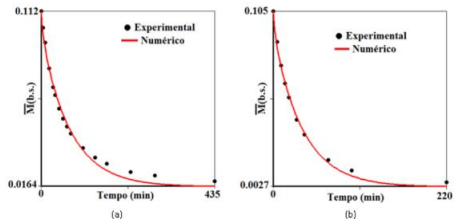
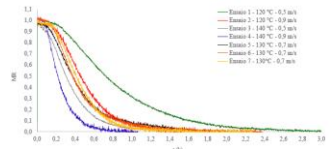
Fonte: Adaptado de IBRACON (2007).

Conforme obtido Silva, et. al, (2019) o tempo de pega para a argamassa obtida com relação a/g:0,70, adotada para produção da massa da telha, foi estabelecido entre 25 min e 24 segs. e 36 min e 15 seg. dessa forma, pode-se inferir que nos primeiros trinta minutos ocorreram as etapas 1 e 2 e foi iniciada a etapa 3 do processo de hidratação. Entre os minutos 50 e 70 minutos foi verificado o aumento da temperatura da telha, coincidindo com a redução considerável da água presente na telha. Sinalizando o final da etapa 3. Por fim, a etapa 4 foi refletida após os 70 minutos, já que foi verificada uma pequena redução na taxa de secagem até tornar-se constante.

Segundo Adamski; Adamska; Pakowski (2018), todas as mudanças na variação da secagem do gesso refletem em mudanças de pressão no interior das peças que contribuem para o transporte da umidade no sólido.

Outros autores estudaram a cinética da secagem do gesso reciclado e de outros materiais, descrevendo tanto os resultados experimentais obtidos quanto a validação de modelos teóricos, numéricos e computacionais. O Quadro 03 apresenta uma compilação de alguns trabalhos considerados relevantes para efeito de comparação com o presente trabalho.

Quadro 03 – Compilação de curvas de secagem obtidas a partir de estudos experimentais e modelagem matemática e computacional

Estudo	Material	Descrição dos resultados	Curva de secagem	Fonte
1	Placas de argila	Analizou as curvas de secagem das à 50°C e 90°C, verificando o impacto evidente da temperatura na taxa de secagem e que o aumento da temperatura não segue uma relação linear com o tempo de secagem.		(1)
2	Gesso	Ao comparar dois modelos (um com difusividade efetiva constante e outro com difusividade variável), foi evidenciado que o modelo com difusividade variável descreveu com maior precisão o processo de secagem. após os estágios iniciais da secagem, foi observada uma discrepância entre os dados experimentais e a curva simulada, indicando uma possível diminuição na difusividade efetiva de massa à medida que o teor de água diminui.		(2)
3	gesso reciclado	Estudando as curvas experimentais de secagem do gesso, revela diferentes estágios durante o processo de secagem. Inicialmente, observa-se um período de acomodação nos primeiros minutos, seguido por períodos de secagem constante e decrescente. Esses padrões são consistentes em todas as condições estudadas.		(3)
4				(4)

NOTA:
 1 Chalewicz *et al*, (2004),
 2 Aires *et al*, (2014)
 3 Domingues *et al*, (2018)

Fonte: Autoria própria, 2024.

Baseado nos dados experimentais já apresentados no Quadro 01 e nos diversos modelos matemáticos de secagem validados na literatura, para diversos materiais e para o gesso reciclado, foi possível estabelecer os parâmetros para os Modelos de Page, Henderson e Midili. O Quadro 04 traz os coeficientes dos modelos e coeficiente de determinação (R^2). Percebendo-se, portanto, que o maior R^2 foi obtido quando ao ajustado ao Modelo de Midili. Ainda assim, o ajuste não foi tão próximo ao valor de 1,00, indicando que os modelos tendem a não explicar completamente o experimento desenvolvido.

Quadro 04 – Parâmetros de modelos matemáticos ajustados à curva de cinética de secagem da telha de gesso reciclado reforçada com fibra de sisal

Modelo	Parâmetro				R ²
Page	k	N	-	-	0.80747
	0,43096	0,07259	-	-	
Henderson	a	K	-	-	0.66390
	0,58784	0,00053	-	-	
Midili	a	K	n	b	0.90856
	0,60491	0,00233	1,08062	0,00112	

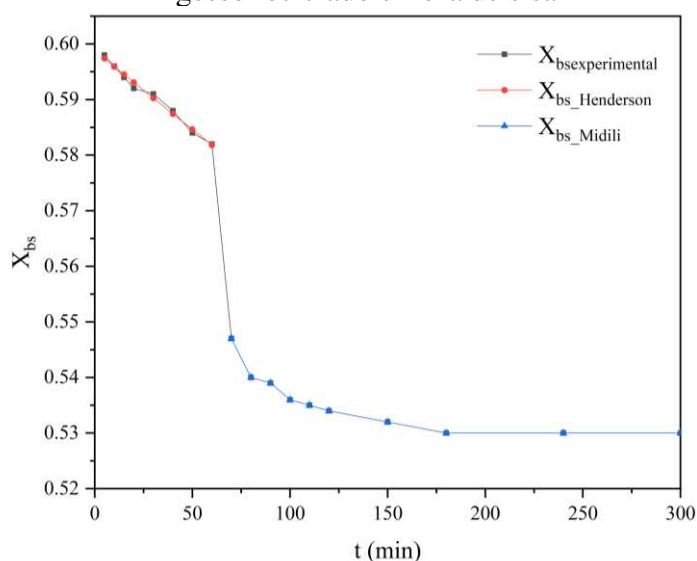
Fonte: Autoria própria, 2024.

Considerando as diversas etapas de hidratação do gesso e o comportamento observado no experimento, é possível perceber que até os primeiros 60 min há uma primeira fase na secagem da telha de gesso com fibra de sisal e, logo em seguida, após perda considerável de umidade, há uma nova fase. Sendo assim, buscou-se verificar o ajuste desses dois trechos aos modelos testados com os dados correspondentes a duração total do ensaio.

Tanto o Modelo de Henderson quanto o de Midili são derivados da segunda lei de difusão de Fick. O Modelo de Henderson prevê com eficácia a taxa de secagem no início do processo de secagem, mas parece, às vezes, ser menos eficiente nos últimos estágios do processo. A inclinação desse modelo, "k", está relacionada à difusividade efetiva quando o processo de secagem ocorre somente no período de queda da taxa e a difusão de líquido controla o processo. O Modelo de Midili é semelhante ao modelo de Henderson com a adição de um termo empírico para a variável tempo (t) (Ertekin & Firat, 2017).

No primeiro trecho, verificou-se que o ajuste ao Modelo de Henderson obteve um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,9858$, com os parâmetros a e k, sendo 0,598798 e 0,000479, respectivamente. Já no segundo, verificou-se que o ajuste ao Modelo de Midili obteve um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,95508$, com os parâmetros a, k, n e b, sendo 3,16513, 1,52946, 0,03558 e 1,49111E-4, respectivamente. Baseado nos coeficientes de determinação para ambos os trechos, pode-se concluir que o processo de secagem da telha de gesso reforçada com fibra de sisal é controlado pela difusão da água. A Figura 09 apresenta o gráfico do ajuste dos dados experimentais aos modelos propostos.

Figura 09 – Ajuste da curva de secagem e modelagem do processo da telha produzida com gesso reciclado e fibra de sisal



Fonte: Autoria própria, 2024.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho comprovou a viabilidade da fabricação de telha de gesso reciclado com fibra de sisal incorporada, demonstrando que o método previamente estabelecido para a fabricação desse material ambientalmente amigável é reproduzível e viável. No aspecto desempenho da secagem da telha confeccionada, foi possível obter a curva de secagem e estudar o comportamento do material, que indicou a redução gradual da quantidade de água ao longo do tempo, disposta em duas zonas bem definidas que foram atribuídas aos processos intrínsecos da hidratação do gesso.

Os Modelos de secagem derivados da Lei de Fick foram capazes de descrever o processo, com as aproximações que geraram equações com coeficiente de determinação superiores a 0,95. Havendo, portanto, uma boa capacidade de descrever o fenômeno estudado. O Modelo de Henderson foi compatível com os estágios iniciais da secagem da telha e, no início do seu endurecimento, o Modelo de Midilli apresentou melhor ajuste da curva aos dados experimentais.

As observações macroscópicas observadas no que diz respeito à umidade e à temperatura da peça demonstrar que não são suficientes para desvendar todos os processos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a secagem da telha. Logo, recomenda-se a investigação microscópica dos eventos químicos e físicos, bem como a busca de modelos computacionais que consigam descrever o processo como um todo empregando-se uma modelagem que considere menos simplificações do que as escolhidas.

5. REFERÊNCIAS

ADAMSKI, Robert; ADAMSKA, A.; PAKOWSKI, Z. Identification of moisture transport mechanism in gypsum during convective drying. **Proceedings Of 21Th International Drying Symposium**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-8, 11 set. 2018. Universitat Politècnica València. <http://dx.doi.org/10.4995/ids2018.2018.7527>.

AIRES, Juarez Everton de Farias; SILVA JÚNIOR, Aluizio Freire da; AIRES, Kalina Lígia Cavalcante de Almeida Farias; CASTRO, Deise Sousa de; SILVA, Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e; SILVA, Wilton Pereira da. **Secagem de placas de argila: predição por meio de modelos difusivos unidimensionais com parâmetros variáveis**. Researchgate, [s. l], v. 10, n. 3, p. 1-15, jan. 2014.

AMORIM, Wesley de Oliveira. SOUZA, Elaine Moura de. FERNANDES, Carlos Eduardo. **Reutilização do resíduo de gesso para produção de tijolos de gesso sustentáveis: Na construção civil**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 06, Ed. 02, Vol. 08, pp. 59-81. Fevereiro de 2021. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/reutilizacao-do-residuo>.

Anuário estatístico 2021-**Setor de transformação de não metálicos- ano base 2020**.pdf — Ministério de Minas e Energia. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anuario-estatitico-2021-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos-ano-base-2020.pdf/view>. Acesso em 8 de abril de 2024

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 12128, “Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta”, Rio de Janeiro, RJ (1991).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15310, “Componentes cerâmicos -Telha – Terminologia, Requisitos e Métodos de ensaio”, Rio de Janeiro, RJ (2005).

BUNGUEIA, Nélia Clara Moisés. **Modelos não lineares (Gompertz e Logístico) na descrição do crescimento do fruto cajueiro (Anacardium Occidental L.) clone Nhacundela em Diferentes variáveis e alinhamentos**. 2016. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Produção Agrícola, Departamento de Produção Agrária, Universidade Eduardo Modlane, Vilankulo, 2016.

Cadeia produtiva do gesso – **Avanços e desafios rumo à promoção do trabalho decente: Análise Situacional** 26 de agosto de 2021, http://www.ilo.org/brasil/publicacoes/WCMS_817898/lang--pt/index.htm

CAVALCANTE, Jesimiel Pinheiro; CARVALHO, Eliedson Rafael de; MATTIAS, Lucas Willian Aguiar. **Gesso reciclado: análise da viabilidade de sua aplicação em painéis de revestimento decorativo 3d**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Belém, v. 8, n. 1, p. 1-5, ago. 2017.

Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
CIPRIANO, Pâmela Bento; GALDINO, Tássila Saionara Gomes; SÁ, Clebiano Santos; FERRAZ, Andréa de Vasconcelos. **Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado. Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-12, mar. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13026>

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2002). Resolução No 307, de 5 de julho de 2002.Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em

CRUZ, Anyelly Cristina. **Otimização do processo de produção de telhas por meio da utilização das ferramentas do lean manufacturing**. 2016. 66 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção, Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016. Cap. 3. Engineering, v. 179, p. 55-67, 2016

DOMINGUES, Bianca da Silva; SOUZA, Luciane Franquelin Gomes de; CORDON, Heloísa Cristina. **Estudo da cinética de secagem de gesso reciclado aplicado na construção civil**. 2018. 25 f. TCC (Graduação) - Curso de E Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá, EEM/CEUN-IMT, Mauá, 2018.

EMBRAPA. SISAL. 2021. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-sisal/atividades-economicas/cultivos/sisal>.

ERTEKIN, Can; FIRAT, M. Ziya. A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 4, p. 701-717, 2017.

FARIAS, Vera Solange de Oliveira. **Difusão 3d em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizada**. 2011. 303 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Centro de

CAVALCANTE FILHO, e José Jesu. **Estudo de concepção de melhorias, adequações e ampliação da gestão de resíduos sólidos na cidade de Caraúbas-RN**. abril de 2018. repositorio.ufersa.edu.br, <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/1897>.

GOMEZ, Ricardo Soares; MAGALHÃES, Hortência Luma Fernandes; PORTO, Túlio Rafael Nascimento; LIMA, Elisiane Santana de; SANTANA, Renato Alexandre Costa de; GOMES, Kelly Cristiane; LIMA, Wanderson Magno Paiva Barbosa de; LIMA, Antônio Gilson Barbosa de. **Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão. Research, society and development**, [S.L.], v. 9, n. 11, p. 3-4, 3 dez. 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i11.10300>.

IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto). **MATERIAIS DA CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios da Ciência e Engenharia dos Materiais** – ed. G. C. Isaia.-São Paulo: IBRACON,2007. 2V

CAVALCANTE, JESIMIEL PINHEIRO, et al. **Gesso reciclado: análise da viabilidade de sua aplicação em painéis de revestimento decorativo 3d**. 2017.

JESU, José; PEDROSA, Juliana Araújo; SILVA, Leonete Cristina de Araújo Ferreira Medeiros. **Incorporação de resíduos de gesso de construção na fabricação de telha plana para construção civil**. Unpublished, [S.L.], p. 1-7, fev. 2019. Unpublished. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.15146.77762>.

Melo, Daniele de Castro Pessoa de. **Estudo Teórico-experimental da Desidratação da Gipsita para Obtenção de um Gesso Beta Reciclável**. 31 de janeiro de 2008, <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6355>.

MICHALEWICZ, Jacek S.; DUTRA, Charamba; HENRIQUEZ, Jorge; ISMAIL, Mal A.R. **Análise experimental do processo de secagem de placas de gesso; Estudo paramétrico**. Researchgate, Pernambuco, v. 12, n. 1, p. 1, jan. 2002.

RAMAJ, Iris; SCHOCK, Steffen; MÜLLER, Joachim. **Drying Kinetics of Wheat (Triticum aestivum L., cv. 'Pionier') during Thin-Layer Drying at Low Temperatures. Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 20, p. 9557, 14 out. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11209557>.

SANTOS, Rosilda Sousa. **Estudo do processo de secagem de blocos cerâmicos estruturais: modelagem e simulação**. 2019. 215 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

SILVA, Romeu da; SANTOS, Rosilda Sousa; DINIZ, Diego David Silva; FACUNDO, Eric de Araújo; SOUZA NETO, Vicente Fernandes de; CHAVES, Francisco Samuel; DANTAS, Rejane Ramos; SILVA, Gilsomaro Barbosa de Melo. **Behavior evaluation of the fluid dynamics of a drying process to obtain roof tiles. Revista Foco**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 1, 7 fev. 2024. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.54751/revistafoco.v17n2-026>.

Tecnologia Pós-colheita - Portal Embrapa. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/sisal/pos-producao/tecnologia-pos-colheit>. Acesso em 8 de abril de 2024.
TESKE, Suzane. **Desenvolvimento de telha ecológica a partir de resíduo de gesso**; Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.