



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**



**ANTÔNIO NUNES DE OLIVEIRA VIEIRA**

**ESTUDO DOS PROCESSOS DE SECAGEM E QUEIMA DE TIJOLOS CERÂMICOS  
COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE DIATOMITA**

**CAMPINA GRANDE  
2023**

ANTÔNIO NUNES DE OLIVEIRA VIEIRA

ESTUDO DOS PROCESSOS DE SECAGEM E QUEIMA DE TIJOLOS CERÂMICOS  
COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE DIATOMITA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial à obtenção do título acadêmico de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientadores: Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento; Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Luiza de Souza Rezende.

CAMPINA GRANDE  
2023

V658e

Vieira, Antônio Nunes de Oliveira.

Estudo dos processos de secagem e queima de tijolos cerâmicos com adição de resíduos de diatomita / Antônio Nunes de Oliveira Vieira. – Campina Grande, 2023.

177 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento, Profa. Dra. Maria Luiza de Souza Rezende".

Referências.

1. Desenvolvimento de Processos. 2. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos. 3. Tijolos Cerâmicos Vazados. 4. Cinética de Secagem. 5. Simulação Computacional. I. Nascimento, José Jefferson da Silva. II. Rezende, Maria Luiza de Souza. III. Título.

CDU 66.047(043)

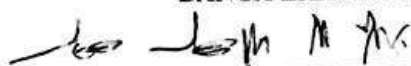
ANTÔNIO NUNES DE OLIVEIRA VIEIRA

**ESTUDO DOS PROCESSOS DE SECAGEM E QUEIMA DE TIJOLOS CERÂMICOS  
COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE DIATOMITA**

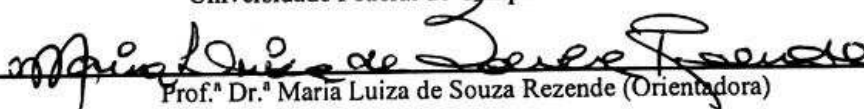
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial à obtenção do título acadêmico de Doutor em Engenharia de Processos.

Aprovado em: 30/11/2023


**BANCA EXAMINADORA**



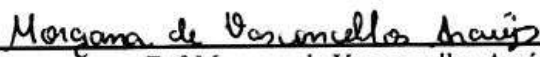
Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento (Orientador)  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof.ª Dr.ª Maria Luiza de Souza Rezende (Orientadora)  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

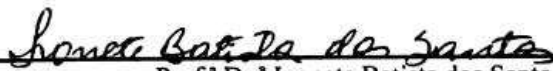


Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Dr.ª Morgana de Vasconcellos Araújo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof.ª Dr.ª Ivonete Batista dos Santos

Universidade Estadual da Paraíba – UEPB



Prof. Dr. Aluizio Freire da Silva Junior

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à memória de minha mãe, Francisca Nunes, e ao meu pai, Jonas Nunes, pelo amor e dedicação com que me criaram. Educar os filhos e proporcionar-lhes oportunidades que eles mesmos não tiveram na vida sempre foi uma determinação dos meus pais. É graças a eles que estou aqui hoje, vivenciando este momento de realização. Portanto, dedico essa conquista a eles.

Antônio Nunes de Oliveira Vieira

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família - minha mãe (in memoriam), meu pai, meu irmão (quem me indicou e encorajou a ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos), minhas irmãs, minha tia, a Camila e aos meus filhos - pelos incentivos e encorajamentos tão necessários.

Agradeço a todos os meus professores, desde o Ensino Fundamental até o Doutorado, pelos seus ensinamentos e exemplos. Sem a generosidade de cada um, e o conhecimento transmitido, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao Professor Dr. José Jefferson da Silva Nascimento e à Professora Dra. Maria Luiza de Souza Rezende, meus orientadores, por terem acreditado em minha capacidade, me acolhido e compartilhado comigo essa jornada, tornando essa conquista possível e mais suave.

Agradeço ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, aos estudantes e professores que foram fundamentais em todo o meu processo formativo, bem como na pesquisa desenvolvida.

Agradeço ao Raniere e ao Arnaldo, pelo apoio durante a aquisição dos materiais de pesquisa, e ao Vanderson, Francisca e Fabiana, pelo apoio durante a etapa de pesquisa laboratorial. Vocês foram amigos e companheiros nos momentos de dificuldade. Muito obrigado.

Agradeço ao coordenador do programa de Doutorado em Engenharia de Processos, o Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelas valiosas contribuições, acolhimento e paciência ao longo desse tempo.

Agradeço ao Alan e ao Romeu, docentes do IFCE, amigos e parceiros que compartilharam comigo o sonho de alcançar o doutorado e estiveram ao meu lado em inúmeras viagens do Ceará a Campina Grande.

Agradeço aos membros da banca, por suas valiosas contribuições e por aceitarem a tarefa de compartilhar comigo esse momento. Agradeço pelas críticas, considerações e sugestões preciosas para o aprimoramento deste trabalho.

Agradeço à Professora Lizandra, coordenadora da Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, pelo apoio e amizade.

Agradeço à Fátima, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, pelo apoio e amizade.

Agradeço ao Daniel, da empresa Mirasa Ltda e aos demais servidores, pelo acolhimento e doação do resíduo de diatomita empregado no estudo em questão.

Agradeço ao Carlos Vilar, da Cerâmica Carnaúba, pela atenção e pelo fornecimento da argila utilizada para conformação dos corpos de prova.

Agradeço ao Jorge, técnico externo a UFCG, pessoa que muito me ajudou na manipulação e uso da extrusora durante a confecção dos corpos de prova.

Agradeço a todos do Laboratório de Ciências e Tecnologia de Materiais (LTM-UFCG), em especial os professores: Romualdo, Gelmires e Reginaldo; e aos técnicos: Rafaela, Aluízio, Everaldo e Juliana, pelo acolhimento, incentivos e suportes indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a todos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos e do Laboratório do Grupo de Geotécnica e Ambiental, ambos da UFCG.

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí pela inestimável contribuição na realização das análises químicas das matérias-primas.

Agradeço, também, ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Cedro, pela concessão do afastamento integral das atividades docentes e pelo apoio que tenho recebido nesta instituição.

E por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este sonho seja realizado. Meu muito obrigado a todos.

## RESUMO

Para a manutenção das atividades industriais, o homem extrai da natureza uma imensa quantidade de matéria-prima, sendo que grande parcela desta se transforma em resíduos ou rejeitos sólidos. Dentre os materiais que geram volumes consideráveis de resíduo/rejeito está a diatomita, que tem grande importância na indústria como filtro e material refratário, em fertilizantes, catalizadores químicos, pesticidas e outros. Grande volume de rejeitos também é gerado na indústria cerâmica devido a perdas ocorridas durante o processo de fabricação nas etapas de secagem e queima, processos estes que podem gerar aumento de custos quando mal dimensionados. Com o intuito de apresentar uma alternativa para o aproveitamento do resíduo de diatomita no setor cerâmico, o presente estudo consiste numa pesquisa experimental e computacional usando o software Wolfram Mathematica, cujo principal objetivo é realizar estudos numéricos e experimentais dos processos de secagem e queima de corpos de prova referentes aos tijolos cerâmicos vazados de seis furos fabricados com o resíduo de diatomita adicionado à argila de cerâmica vermelha. Na confecção de corpos de prova, o resíduo de diatomita foi adicionado em percentuais de 5, 10 e 15%, sendo todos os resultados comparados a composições de referência, nas quais não houve adição de resíduo. A secagem foi avaliada nas temperaturas de 50, 70 e 90°C e a queima a 800, 900 e 1000°C. Os resultados indicam que a perda de umidade e a elevação de temperatura são afetadas pela composição química do tijolo. Para maiores percentuais de resíduo ocorre maior absorção de água, sendo que a redução da temperatura de secagem contribui para reduzir a absorção após a queima. Em todos os cenários analisados, a absorção de água se manteve dentro da faixa exigida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15270-1 (ABNT, 2017), que trata dos requisitos para componentes cerâmicos – blocos e tijolos para alvenaria. A porosidade do material apresentou um comportamento similar a absorção de água. No quesito resistência a compressão, apenas as amostras com 5% de resíduo, secas na temperatura de 90°C e sujeitas a queima até o patamar de 1000°C, numa taxa de aquecimento de 2 °C/min, se mantiveram dentro do que exige a NBR 15270-1 (ABNT, 2017). O problema físico foi abordado através de uma análise concentrada, e as curvas teóricas demonstram correspondências notáveis com as curvas experimentais. Isso permitiu a determinação dos coeficientes de transferência de massa convectivos e difusivos. Esses parâmetros aumentam à medida que a temperatura sobe, e a umidade relativa do ar diminui durante o processo de secagem. Além disso, observou-se que o coeficiente de transferência de massa convectivo na superfície externa do corpo de prova foi superior ao obtido na superfície interna, evidenciando claramente que a superfície externa do corpo de prova desempenha um papel central na perda de massa ao longo do processo de secagem.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento de resíduos sólidos. Tijolos cerâmicos vazados. Cinéticas de secagem. Simulação computacional.



## ABSTRACT

For the maintenance of industrial activities, humans extract a vast amount of raw materials from nature, a significant portion of which turns into waste or solid rejects. Among the materials that generate substantial volumes of waste/rejects is diatomite, which holds great importance in the industry as a filter and refractory material, in fertilizers, chemical catalysts, pesticides, and other applications. A significant volume of waste is also generated in the ceramic industry due to losses during the manufacturing process in the drying and firing stages, processes that can lead to increased costs when improperly dimensioned. With the aim of presenting an alternative for utilizing diatomite waste in the ceramic sector, the present study constitutes an experimental and computational research using Wolfram Mathematica software. Its primary objective is to conduct numerical and experimental studies of the drying and firing processes of test specimens related to six-hole hollow ceramic bricks manufactured with diatomite waste added to red clay. In the production of test specimens, diatomite waste was added in percentages of 5, 10, and 15%, and all the results were compared to reference compositions in which no waste was added. Drying was evaluated at temperatures of 50, 70, and 90 °C, and firing at 800, 900, and 1000 °C. The results indicate that moisture loss and temperature elevation are affected by the chemical composition of the brick. Higher percentages of waste led to greater water absorption, with the reduction of drying temperature contributing to a decrease in absorption after firing. In all the analyzed scenarios, water absorption remained within the range required by the Brazilian Association of Technical Standards, NBR 15270-1 (ABNT, 2017), which deals with requirements for ceramic components – blocks and bricks for masonry. The material's porosity exhibited a behavior similar to water absorption. Regarding compressive strength, only the samples with 5% of waste, dried at 90 °C, and subjected to firing up to 1000 °C at a heating rate of 2 °C/min, met the requirements of NBR 15270-1 (ABNT, 2017). The physical problem was addressed through a concentrated analysis, and the theoretical curves showed excellent correspondence with the experimental curves. This allowed for the determination of convective and diffusive mass transfer coefficients. These parameters increase as the temperature rises, and the relative humidity of the air decreases during the drying process. Furthermore, it was observed that the convective mass transfer coefficient on the outer surface of the test specimen was higher than that obtained on the inner surface, clearly indicating that the outer surface of the test specimen plays a central role in mass loss throughout the drying process.

**Keywords:** Solid waste reuse. Perforated ceramic bricks. Drying kinetics. Computational simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Argila para tijolos cerâmicos. ....	23
<b>Figura 2</b> – Fluxograma do processo industrial da diatomita. ....	27
<b>Figura 3</b> – Secagem natural da diatomita para perda de parte da matéria orgânica. ....	28
<b>Figura 4</b> – Diatomita calcinada. ....	29
<b>Figura 5</b> – Ciemil, Comércio Indústria e Exportação de Minérios Ltda. ....	32
<b>Figura 6</b> – Tijolos maciços crus (não queimados). ....	35
<b>Figura 7</b> – Tijolos de 9 furos. ....	37
<b>Figura 8</b> – Etapas envolvidas na produção de tijolos cerâmicos. ....	38
<b>Figura 9</b> – Secagem natural de blocos cerâmicos vazados. ....	44
<b>Figura 10</b> – Secador de talisca. ....	45
<b>Figura 11</b> – Esquema de funcionamento da estufa. ....	46
<b>Figura 12</b> – Curvas de secagem. ....	47
<b>Figura 13</b> – Forno industrial para queima de tijolos cerâmicos. ....	48
<b>Figura 14</b> – Fluxograma. ....	57
<b>Figura 15</b> – Estoque de diatomita bruta, em Rio do Fogo-RN. ....	58
<b>Figura 16</b> – Balança, termômetro, paquímetro e termo-higrômetro. ....	60
<b>Figura 17</b> – Extrusora. ....	60
<b>Figura 18</b> – Misturas argila-resíduo. ....	61
<b>Figura 19</b> – Extrusão de corpos de prova. ....	62
<b>Figura 20</b> – Boquilha de 6 furos e peça usada no corte das amostras. ....	63
<b>Figura 21</b> – Dimensões do tijolo. ....	65
<b>Figura 22</b> – Forno usado na queima. ....	68
<b>Figura 23</b> – Aparato de Arquimedes. ....	69
<b>Figura 24</b> – Capeamento e teste de resistência a compressão. ....	70
<b>Figura 25</b> – Condições de contorno do problema físico. ....	71
<b>Figura 26</b> – Curva granulométrica do resíduo de diatomita. ....	83
<b>Figura 27</b> – Curva granulométrica para o resíduo de diatomita e para a argila. ....	84
<b>Figura 28</b> – DRX do resíduo de diatomita. ....	86
<b>Figura 29</b> – DRX da argila. ....	87
<b>Figura 30</b> – Gráfico das análises térmicas TGA e DrTGA para o resíduo de diatomita. ....	88
<b>Figura 31</b> – Gráfico das análises térmicas TGA e DrTGA para a argila. ....	88
<b>Figura 32</b> – A0%R50°S fotografada nos instantes 0 min e 480 min de secagem. ....	90
<b>Figura 33</b> – A0%R50°S, (a), (b) e (c): Imagens da parte frontal da amostra posicionada para o lado direito do leitor, quando observada na estufa. (d), (e) e (f): Imagens da parte frontal da amostra posicionada para o lado esquerdo do leitor, quando observada na estufa. ....	90
<b>Figura 34</b> – Vista superior da A0%R50°S. ....	91
<b>Figura 35</b> – Amostra com trinca no septo central. ....	93
<b>Figura 36</b> – Imagens da A10%R50°S, nos tempos 0 e 360 min. ....	94
<b>Figura 37</b> – Trinca na lateral no instante 30 min (Figura 37a) e “ausência” de trinca em 120 min (Figura 37b). ....	95
<b>Figura 38</b> – Surgimento e desaparecimento de trincas na A15%R50°S. ....	96

<b>Figura 39</b> – Amostras durante o estudo experimental da secagem a 70° C.....	97
<b>Figura 40</b> – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 50°C.....	100
<b>Figura 41</b> – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C.....	100
<b>Figura 42</b> – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C.....	101
<b>Figura 43</b> – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 50°C.....	102
<b>Figura 44</b> – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C.....	102
<b>Figura 45</b> – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C.....	103
<b>Figura 46</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para o corpo de prova com 0% de resíduo. ....	104
<b>Figura 47</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C. ....	105
<b>Figura 48</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C. ....	105
<b>Figura 49</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 50°C. ....	106
<b>Figura 50</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 70°C. ....	107
<b>Figura 51</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 90°C. ....	107
<b>Figura 52</b> – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.....	108
<b>Figura 53</b> – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.....	109
<b>Figura 54</b> – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.....	110
<b>Figura 55</b> – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.....	110
<b>Figura 56</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.....	111
<b>Figura 57</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.....	112
<b>Figura 58</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade utilizando 0% de diatomita.....	112
<b>Figura 59</b> – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade utilizando 15% de diatomita.....	113
<b>Figura 60</b> – Presença de coração negro em corpos queimados até 800°C.....	115
<b>Figura 61</b> – Ausência de coração negro. ....	116
<b>Figura 62</b> – Cor dos tijolos queimados a 800°C e 1000°C. ....	117

<b>Figura 63</b> – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 50°C. ....	117
<b>Figura 64</b> – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 70°C. ....	118
<b>Figura 65</b> – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 90°C. ....	118
<b>Figura 66</b> – Absorção de água para queimas até 800°C. ....	119
<b>Figura 67</b> – Porosidade aberta da amostra para queimas até 800°C. ....	120
<b>Figura 68</b> – Absorção de água para queimas com patamar 1000°C. ....	121
<b>Figura 69</b> – Porosidade aberta da amostra para queimas até 1000°C. ....	122
<b>Figura 70</b> – Absorção de água para queimas até 900°C. ....	123
<b>Figura 71</b> – Porosidade aparente para amostras queimadas até 900°C. ....	123
<b>Figura 72</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=50°C, UR= 16,00%, 0,0% Diatomita). ....	125
<b>Figura 73</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=50°C, UR= 19,03%, 5,0 % Diatomita). ....	126
<b>Figura 74</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=50°C, UR= 15,23%, 10,0% Diatomita). ....	126
<b>Figura 75</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=50°C, UR= 16,38%, 15,0 % Diatomita). ....	127
<b>Figura 76</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=70°C, UR= 6,46%, 0,0% Diatomita). ....	127
<b>Figura 77</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=70°C, UR= 7,07%, 5,0% Diatomita). ....	128
<b>Figura 78</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=70°C, UR= 6,15%, 10,0% Diatomita). ....	128
<b>Figura 79</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=70°C, UR= 6,86%, 15,0% Diatomita). ....	129
<b>Figura 80</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=90°C, UR= 2,89%, 0,0% Diatomita). ....	129
<b>Figura 81</b> – Comparação Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=90°C, UR= 2,82%, 5,0 % Diatomita). ....	130
<b>Figura 82</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=90°C, UR= 2,93%, 10,0% Diatomita). ....	130
<b>Figura 83</b> – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, (T=90°C, UR= 2,57%, 15,0% Diatomita). ....	131

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Coeficiente de difusão de massa de tijolos cerâmicos em diferentes condições de secagem conforme reportado na literatura.....	53
<b>Tabela 2</b> – Coeficiente de transferência de massa convectiva de tijolos cerâmicos em diferentes condições de secagem conforme reportado na literatura. ....	54
<b>Tabela 3</b> – Planejamento experimental de secagem. ....	66
<b>Tabela 4</b> – Planejamento experimental de secagem para queima, amostras com resíduo.....	67
<b>Tabela 5</b> – Variáveis de saída estudadas e valores de referência. ....	68
<b>Tabela 6</b> – Umidade higroscópica do resíduo de diatomita.....	82
<b>Tabela 7</b> – Resíduo de diatomita e argila – distribuição por tamanho das partículas.....	85
<b>Tabela 8</b> – Resultado da FRX para o resíduo de diatomita. ....	85
<b>Tabela 9</b> – A0%R50°S - perda de massa por hora de secagem. ....	92
<b>Tabela 10</b> – A5%R50°S – perda de massa e aquecimento por hora de secagem. ....	93
<b>Tabela 11</b> – A10%R50°S – perda de massa e aquecimento por hora de secagem. ....	95
<b>Tabela 12</b> – Parâmetros experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.....	98
<b>Tabela 13</b> – Condições experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.....	114
<b>Tabela 14</b> – Resistência a compressão.....	124
<b>Tabela 15</b> – Coeficientes de transporte de massa convectivo e difusivo.....	132
<b>Tabela 16</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R50°S.....	144
<b>Tabela 17</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R50°S.....	146
<b>Tabela 18</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R50°S.....	148
<b>Tabela 19</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R50°S.....	150
<b>Tabela 20</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R70°S.....	152
<b>Tabela 21</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R70°S.....	154
<b>Tabela 22</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R70°S.....	156
<b>Tabela 23</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R70°S.....	158
<b>Tabela 24</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R90°S.....	160
<b>Tabela 25</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R90°S.....	162
<b>Tabela 26</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R90°S.....	164
<b>Tabela 27</b> – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R90°S.....	166
<b>Tabela 28</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R50°S800°Q. ....	168
<b>Tabela 29</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R50°S1000°Q. ....	168
<b>Tabela 30</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R70°S900°Q. ....	169
<b>Tabela 31</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R90°S800°Q. ....	169
<b>Tabela 32</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R90°S1000°Q. ....	170
<b>Tabela 33</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R50°S800°Q. ....	170
<b>Tabela 34</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R50°S1000°Q. ....	171
<b>Tabela 35</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R70°S900°Q. ....	171
<b>Tabela 36</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R90°S800°Q. ....	172
<b>Tabela 37</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R90°S1000°Q. ....	172
<b>Tabela 38</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R50°S800°Q. ....	173
<b>Tabela 39</b> – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R50°S1000°Q. ...	173

<b>Tabela 40</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R70°S900°Q. ....	174
<b>Tabela 41</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R90°S800°Q. ....	174
<b>Tabela 42</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R90°S1000°Q. ...	175
<b>Tabela 43</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R50°S800°Q. ....	175
<b>Tabela 44</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R50°S1000°Q. ...	176
<b>Tabela 45</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R70°S900°Q. ....	176
<b>Tabela 46</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R90°S800°Q. ....	177
<b>Tabela 47</b>	– Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R90°S1000°Q. ...	177

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de Água
AG	Análise Granulométrica
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios X
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LTM	Laboratório de Tecnologia e Ciências de Materiais
GGA	Laboratório do Grupo de Geotecnia Ambiental
NBR	Normas Brasileiras
PA	Porosidade Aparente
RD	Resíduo de Diatomita
RC	Resistência a Compressão
UR	Umidade Relativa
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>21</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	21
1.1.2 Objetivos específicos.....	21
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Argila .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Diatomita .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 Tijolos .....</b>	<b>33</b>
2.3.1 Tijolos cerâmicos.....	34
<b>2.4 Reaproveitamento de resíduos sólidos na produção de tijolos .....</b>	<b>39</b>
<b>2.5 Secagem e queima de materiais cerâmicos.....</b>	<b>42</b>
2.5.1 Secagem.....	42
2.5.2 Queima .....	47
<b>2.6 A simulação computacional .....</b>	<b>49</b>
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 Etapas da pesquisa .....</b>	<b>55</b>
3.1.1 Estudo teórico e revisão bibliográfica .....	55
3.1.2 Estudos experimentais .....	55
3.1.3 Simulação Computacional.....	56
3.1.4 Análise e discussão dos resultados .....	56
<b>3.2 Metodologia Experimental.....</b>	<b>57</b>
3.2.1 Materiais e equipamentos .....	57
3.2.2 Preparação da massa e confecção dos corpos de prova.....	60
3.2.3 Cálculos auxiliares com os dados de secagem .....	64
3.2.4 Secagem em estufa .....	66
3.2.5 A queima .....	68
3.2.6 Ensaio de absorção de água (AA).....	69
3.2.7 Ensaio de Resistência a Compressão (RC).....	69
<b>3.3 Metodologia Teórica.....</b>	<b>70</b>
3.3.1 O problema físico e a geometria.....	70
3.3.2 O modelo matemático concentrado .....	72
3.3.3 Estimativa dos coeficientes de transferência de calor e massa convectivos.....	73



3.3.4 Determinação da cinética de secagem .....	80
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>4.1 Resultados experimentais .....</b>	<b>82</b>
4.1.1 Umidade higroscópica .....	82
4.1.2 Peneiramento grosso e fino.....	83
4.1.3 Granulometria a laser .....	84
4.1.4 Análises químicas .....	85
4.1.4.1 Fluorescência de raios X .....	85
4.1.4.2 Difração de raios X .....	86
4.1.5 Análises térmicas .....	87
4.1.6 Estudo da secagem.....	89
4.1.6.1 Avaliação da secagem .....	89
4.1.7 Efeito da percentagem de resíduo de diatomita nas cinéticas de secagem, aquecimento e variação volumétrica.....	99
4.1.7.1 Cinéticas de secagem .....	99
4.1.7.2 Cinéticas de aquecimento.....	101
4.1.7.3 Cinéticas de variação volumétrica.....	104
4.1.8 Efeito das condições do ar nas cinéticas de secagem, aquecimento e variações dimensionais .....	108
4.1.8.1 Cinéticas de secagem .....	108
4.1.8.2 Cinéticas de aquecimento.....	109
4.1.8.3 Cinéticas de variações dimensionais.....	111
4.1.9 Queima .....	115
4.1.10 Testes de absorção de água e porosidade aparente.....	119
4.1.11 Teste de resistência a compressão .....	124
<b>4.2 Resultados teóricos .....</b>	<b>125</b>
4.2.1 Cinética de sorção de água .....	125
4.2.2 Estimativa do coeficiente de transporte de massa difusivo e convectivo.....	132
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>134</b>
<b>5.1 Conclusões .....</b>	<b>134</b>
<b>5.2 Sugestões.....</b>	<b>136</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS SECAGENS.....</b>	<b>144</b>

<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEIMA, ABSORÇÃO E POROSIDADE .....</b>	<b>168</b>
---	------------

## 1 INTRODUÇÃO

Em sua atividade diária, o homem produz inúmeros resíduos/rejeitos<sup>1</sup> sólidos que são descartados inadequadamente no meio ambiente, gerando uma gama de impactos ambientais, como a proliferação de doenças, a poluição do solo e das águas, o entupimento das redes de drenagem, enchentes, degradação ambiental e depreciação imobiliária. Os avanços em relação à disposição final dos resíduos e seu tratamento são lentos, por isso, grandes quantidades de resíduos continuam tendo destinação inadequada, representando risco à saúde da população e ao meio ambiente.

Inseridas neste contexto, as Universidades, Institutos Federais e demais instituições de pesquisa precisam dialogar com a sociedade e com as indústrias, buscando soluções para os problemas emergentes. Existe uma demanda crescente por novas formas de produção que levam em conta a utilização de resíduos industriais e que resultem em novos produtos com menor impacto sobre o meio ambiente, o qual tem sofrido consequências irreversíveis da ação humana. É preciso identificar, entre tantos materiais disponíveis, aqueles que podem ser utilizados ou reutilizados, bem como os setores em que isto pode ocorrer. A redução na geração e o reaproveitamento de resíduos sólidos vai ao encontro da necessidade da preservação ambiental e da redução do custo de produção de matérias-primas industriais.

No setor industrial, a terra diatomácea, ou diatomita, devido a suas características físico-químicas, tem aplicabilidade em diversos segmentos, e sua maior aplicação ocorre, como elemento de filtração (BRASIL, 2014), devido a sua estrutura semelhante a um favo de mel. Dessa forma, é empregada na clarificação e classificação do açúcar e como agente filtrante da água de piscinas, antibióticos, cera, cervejas, vernizes, vinagres, vinhos, xaropes de açúcar etc.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (BRASIL, 2014), no Brasil ocorre em média o beneficiamento de 3000 t de diatomita por ano. Uma empresa mineradora da diatomita no Rio Grande do Norte é a Mirasa Ltda., cuja produção anual gira em torno de 500 t. Desta quantidade, cerca 100 t passam a compor o resíduo industrial da diatomita, ou

---

<sup>1</sup> “Resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (...).

Rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010, p. 3).

seja, 20% do material extraído pela empresa transforma-se em resíduo industrial. Levando em conta o cenário brasileiro e tomando-se como referência dados do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (BRASIL, 2014), isto representa 600t de resíduo industrial por ano.

Segundo Braga (2008) e Costa (2022), a diatomita possui aplicabilidade na indústria cerâmica devido a algumas de suas propriedades, como leveza (densidade aparente: 0,20 a 0,50g/cm<sup>3</sup>; densidade real: 0,19 a 0,22 g/cm<sup>3</sup>), finura, dureza (abrasividade razoável entre 5,5 e 6,6 mohs) baixa condutividade térmica (0,49 a 0,77 kcal/(h.cm.°C)) e porosidade (80 a 90%). Uma aplicação potencial ocorre em materiais cerâmicos, tijolos, por exemplo. Tendo em vista as propriedades da diatomita, estudos envolvendo a aplicabilidade do resíduo de diatomita podem constituir um campo potencial para a pesquisa e o desenvolvimento de materiais.

Investigar a potencialidade da incorporação de resíduo de diatomita à massa vermelha de cerâmica para produção de tijolos pode nos conduzir a uma importante alternativa de destinação desse tipo de resíduo, o qual é geralmente dispensado no meio ambiente.

Pensando em contribuir com os estudos relativos aos testes experimentais em tijolos a partir da adição de materiais alternativos, a presente pesquisa traz os resultados de estudos experimentais envolvendo a caracterização da argila de cerâmica vermelha e do resíduo de diatomita, além de estudos analíticos e numéricos dos processos de secagem, queima e caracterização mecânica de tijolos vazados de cerâmica vermelha com a adição de resíduo de diatomita.

Estudos relacionados a testes experimentais com propriedades inerentes aos tijolos vazados, levando em conta a adição de resíduos, são muito bem-vistos pela indústria e possuem potencial para contribuir com a redução dos impactos ambientais. A importância deste trabalho reside, principalmente, na perspectiva de resultados com o estudo relacionado à incorporação de resíduo de diatomita a argila de cerâmica vermelha para a produção de tijolos vazados.

O estudo experimental apresentado corrobora a superação de problemas ambientais ao indicar um processo alternativo para a produção de tijolos, bem como condições ideais para os processos de secagem e queima que levam em consideração o aproveitamento de resíduos sólidos – neste caso, o resíduo de diatomita e o uso consciente da energia. Claramente uma pesquisa de interesse da academia e do setor cerâmico.

## 1.1 Objetivos

O propósito desta pesquisa é contribuir com a superação de problemas ambientais à medida que se oferece uma alternativa para o aproveitamento de um resíduo industrial na indústria cerâmica, buscando condições de maior eficiência dos processos de secagem e queima industrial de tijolos vazados fabricados com a adição do resíduo de diatomita à argila de cerâmica vermelha. A seguir apresentam-se os principais objetivos deste trabalho, os quais nortearam todo o processo investigativo, desde a coleta, a análise e a interpretação dos resultados.

### 1.1.1 Objetivo geral

A presente pesquisa tem como objetivo principal realizar estudos numéricos e experimentais dos processos de secagem e queima de corpos de prova relativos aos tijolos cerâmicos vazados de seis furos fabricados com a adição de resíduo de diatomita à argila de cerâmica vermelha.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a matéria-prima (argila + resíduo de diatomita) destinada a confecção dos corpos de prova.
- Investigar experimentalmente o processo de secagem dos corpos de prova, considerando diferentes teores de substituição da argila (0%, 5%, 10% e 15%) e as temperaturas de 50°C, 70°C e 90°C.
- Realizar estudos experimentais sobre o processo de queima dos corpos de prova, considerando as temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, e avaliar taxas de aquecimento que permitam otimizar o processo.
- Avaliar os efeitos gerados pelas trocas térmicas nas amostras durante os processos de secagem e queima.
- Determinar experimentalmente as curvas de secagem das amostras construídas, considerando diversas condições de secagem.
- Avaliar a absorção de água, a porosidade aparente e a resistência a compressão dos corpos de prova.

- Utilizar os dados coletados no estudo experimental para determinar as melhores condições das variáveis de entrada, visando alcançar resultados condizentes com aqueles indicados na NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

- Modelar a secagem e usar o programa Wolfram Mathematica para, com base em dados experimentais, reproduzir a secagem e determinar os coeficientes de transporte de massa convectivo e difusivo.

- Comparar os resultados experimentais e numéricos da cinética de secagem dos corpos de prova para validar a metodologia matemática empregada.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, fazemos uma revisão de literatura a fim de verificar o estado da arte, confirmar a viabilidade da pesquisa e checar parâmetros importantes a serem considerados no planejamento experimental.

Para que a revisão da literatura cumprisse seu papel, foi incluído nesta, estudos sobre os principais elementos deste trabalho, quais sejam: a argila (principal matéria-prima usada na produção de tijolos cerâmicos); a diatomita (matéria prima cujo estudo do resíduo e verificação do potencial na incorporação a argila para a produção dos tijolos foi desde o início o foco do estudo); os tijolos (características, classificação e processo de fabricação) e os processos de secagem e queima (processos importantes na obtenção de um produto de qualidade e na economia de matéria prima e energia).

### 2.1 Argila

A argila (Figura 1) é a principal matéria-prima usada na fabricação de tijolos cerâmicos. Sua importância se dá pela sua plasticidade, a qual permite a moldagem ou extrusão da peça cerâmica e a dureza apresentada por ela ao secar, bem como sua capacidade de resistir a infiltrações de água e às forças de compressão.

**Figura 1** – Argila para tijolos cerâmicos.



Fonte: <https://www.mineralex.net/tag/argila-residual/>. Acesso em: 19/11/2023.

Para Santos (1975, p. 1, grifo do autor), “A argila é um material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa *plasticidade* (propriedade da argila associada à sua deformação quando submetida a uma força e a conservação da deformação quando a força é anulada)”. A NBR 6502 (ABNT,1995) classifica a argila como “solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade” (ABNT, 1995, p. 9).

A argila é um produto natural encontrado em jazidas. As jazidas se formam pelo processo de depósito aluvial (partículas mais leves são elevadas pela corrente de água) e, segundo Silva (2009, p. 12), “se origina da desagregação de rochas que comumente contém feldspato<sup>2</sup>, por ataque químico (por exemplo pelo ácido carbônico) ou físico (erosão, vulcanismo), que produz a fragmentação em partículas pequenas”. Uma vez extraída das jazidas, ela passa por um processo de cura, sendo dispostas em camadas intercaladas de argila e silte<sup>3</sup>.

Segundo Santos (1975, p. 1), “as argilas são constituídas essencialmente por partículas cristalinas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como ‘argilominerais’. Uma argila qualquer pode ser composta por partículas de um argilomineral ou por uma mistura de diversos argilominerais”. Além dos argilominerais (compostos por silicatos hidratados de alumínio, ferro, magnésio, cálcio, sódio, potássio, lítio e outros), entram na composição das argilas: matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, piritita, mica, calcita, hematita, além de minerais não-cristalinos ou amorfos.

Segundo Zolin (2011), ao contrário dos materiais cristalinos, que possuem uma estrutura bem ordenada, nos materiais amorfos ou não-cristalinos, os átomos se encontram dispostos aleatoriamente. Os últimos possuem alta resistividade elétrica. Para Santos (1975), as principais propriedades das argilas são: *plasticidade*, *resistência mecânica a úmido*, *retração linear de secagem*, *compactação*, *tixotropia*<sup>4</sup> e *viscosidade de suspensões aquosas*, tais propriedades justificam suas aplicações na confecção de elementos cerâmicos empregados na construção civil, como o tijolo vazado/furado, objeto de estudo desta pesquisa.

Embora a plasticidade seja uma das principais características das argilas, existem exceções de materiais argilosos que, quando misturados com água, não apresentam plasticidade, mesmo assim mantêm outros atributos de argila. É este o caso das argilas do tipo

---

<sup>2</sup> Feldspato é uma importante família de minerais, do grupo dos tectossilicatos, constituintes de rochas que formam cerca de 60% da crosta terrestre.

<sup>3</sup> Material granulado oriundo de rochas menores que grãos de areia e que é misturado à argila a fim de reduzir o poder de retração da massa cerâmica que será usada na confecção de tijolos.

<sup>4</sup> Aumento da viscosidade no estado de repouso e uma diminuição da viscosidade quando submetido a uma tensão de agitação.



*flint-clays*. As argilas são caracterizadas também como materiais que resultam do “intemperismo, da ação hidrotermal ou que se depositam como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos” (SANTOS, 1975, p. 3).

No que se refere a composição química da argila, estão presentes: oxigênio (O), hidrogênio (H), silício (Si), alumínio (Al), Ferro (Fe), titânio (Ti), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na). Santos (1975) apresenta um glossário dos tipos de argila, onde se verificam 58 tipos. O autor destaca os seguintes fatores como controladores das propriedades de uma determinada argila:

- 1) A composição mineralógica dos argilominerais quantitativa e qualitativa, e a distribuição granulométrica das partículas.
- 2) A composição mineralógica dos não-argilominerais, quantitativa e qualitativa, e a distribuição granulométrica das partículas.
- 3) Teor em eletrólitos, quer dos cátions trocáveis, quer de sais solúveis, qualitativa e quantitativamente.
- 4) Natureza e teor de componentes orgânicos.
- 5) Características textuais da argila, tais como forma dos grãos de quartzo, grau de orientação ou paralelismo das partículas dos argilominerais, salificação e outros (SANTOS, 1975, p. 26).

Santos (1975) alerta-nos para o fato de que os dados da composição química (mineralógica), quando observados isoladamente, sem os dados da difração de raios X e da análise térmica diferencial (ATD ou DTA), trazem poucas informações sobre a argila e podem levar a conclusões errôneas. Para o autor, a complexidade das argilas nos impõe dificuldade para classificá-las e induz a conclusão de que “não existem duas argilas iguais” (SANTOS, 1975, p. 26).

Segundo Silva (2009), além da plasticidade, estão entre as principais propriedades da argila: os limites de Atherberg (definem a trabalhabilidade da argila); resistência mecânica da argila seca (propriedade ligada à sua composição granulométrica); perda de água sob ação da temperatura; retração por secagem (ocasionada pela evaporação a partir da superfície e a difusão de umidade do centro da massa para a sua superfície); absorção e liberação de energia térmica etc.

Os índices de Atherberg, limite de liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) definem o índice de consistência (IC) de uma argila:

$$IC = \frac{(LL - w)}{IP}, \quad (2.1)$$

em que  $w$  é a umidade natural da argila.

Conforme Silva (2009), tomando como referência o índice de consistência, as argilas podem ser classificadas como muito moles, moles, médias, rígidas e duras. As argilas moles, médias e rígidas são classificadas como argilas plásticas, ao passo que as muito moles são

classificadas como líquidas e as duras são classificadas como semissólidas. O Quadro 1 mostra a classificação das argilas segundo seu IC e suas respectivas indicações.

**Quadro 1** – Classificação das argilas segundo índices de consistência.

TIPOS DE ARGILAS	ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA	INDICAÇÕES
Muito mole	$IC < 0$	Corre com facilidade entre os dedos, ao ser apertada na palma da mão.
Moles	$0 < IC \leq 0,50$	Facilmente moldada nos dedos.
Médias	$0,50 < IC \leq 0,75$	Requer esforço médio para ser moldada.
Rígida	$0,75 < IC \leq 1,00$	Requer grande esforço para ser moldada.
Duras	$IC > 1,00$	Não pode ser moldada pelos dedos.

Fonte: Silva (2009).

Outra forma de classificação de argilas é usar como critério a sua plasticidade, “uma das formas mais usuais de classificação das argilas é a qualitativa, ou seja, em plástica e não plástica, no qual se diferencia na composição química e granulométrica dos minerais constituintes” (NUNES, 2021, p. 22).

Segundo Silva (2009, p. 18), “as argilas devem ser dosadas a fim de apresentarem plasticidade máxima, quando úmidas, máxima resistência quando secas ou quando queimadas, e mínimas retrações durante a secagem”. É costume, durante processos industriais, misturar dois tipos de argilas, uma mais dura com uma plástica. Isso corrobora com a obtenção das propriedades desejadas nos produtos cerâmicos.

As argilas usadas na produção de tijolos, em especial os tijolos extrudados, precisam ter alta plasticidade para garantir a trabalhabilidade e confecção do corpo cerâmico e, além disso, serem bastante resistentes a tensões, isto é, ter um módulo de ruptura a flexão/compressão alto, antes e após a queima.

É importante destacar que a aplicação da argila não se limita aos elementos cerâmicos empregados na construção civil, se aplica também em diversos outros objetos de grande importância comercial, como os semicondutores, que possuem demanda crescente na indústria da informática, por exemplo. As inúmeras aplicações encontradas para as argilas e a sua importância em diversos setores industriais têm gerado uma demanda crescente que ultimamente motiva pesquisadores a buscar alternativas para sua substituição parcial ou total, o que vai ao encontro de políticas de preservação dos recursos naturais e do meio ambiente.

## 2.2 Diatomita

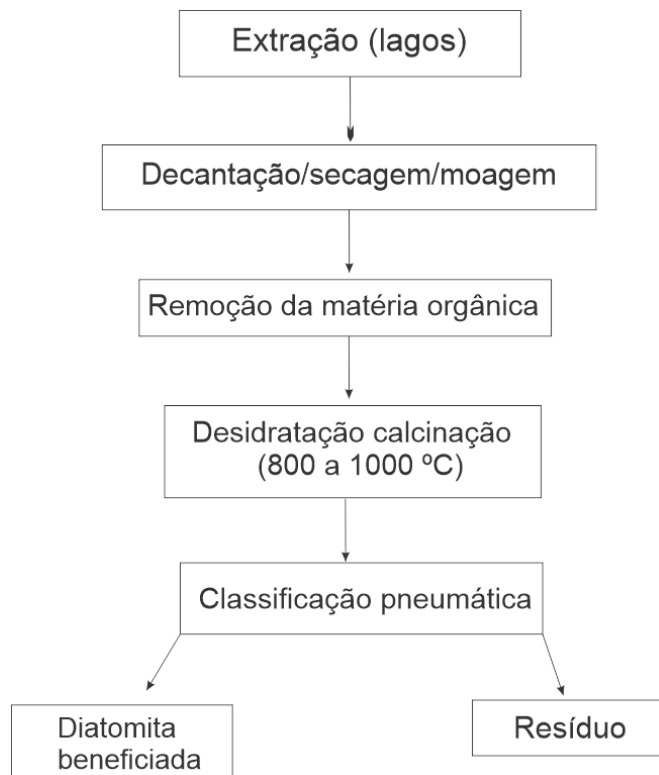
A diatomita, ou terra diatomácea, consiste em uma rocha que se origina a partir de sedimento amorfo, de natureza silicosa, que “pode ser originado a partir de frústulas ou carapaças de organismos unicelulares vegetais. Dentre estes organismos destacam-se as algas microscópicas aquáticas, marinhas ou lacustres, encontradas nas camadas geológicas da crosta terrestre” (GOULART *et al.*, 2011, p. 625).

Gomes, Furtado e Souza (2018, p. 1024), afirmam que “a terra diatomácea é um pó inerte proveniente de algas diatomáceas fossilizadas de mais de 12.000 espécies diferentes, que possui a sílica como principal componente”.

Segundo Carvalho *et al.* (1979), a diatomita pura pode conter em sua composição, além da opala ou sílica hidratada, componentes inorgânicos como a alumina, o ferro, metais alcalinos, além de outros. Além disso, a diatomita crua (não tratada) pode conter matéria orgânica e sais solúveis.

A Figura 2 mostra um fluxograma onde constam as principais etapas envolvendo o processamento industrial da diatomita, desde a extração até a geração de resíduo.

**Figura 2** – Fluxograma do processo industrial da diatomita.



Fonte: Modificado de Costa (2022).

Conforme Gomes, Furtado e Souza (2018, p. 1024), “a maioria das diatomáceas apresenta tamanho entre 4 e 500  $\mu\text{m}$ ”. Devido o alto teor de sílica, a diatomita é capaz de desidratar insetos e causar sua morte em um período que vai de um a sete dias. Devido a isso, um dos empregos da diatomita é como inseticida natural, em lavouras.

Segundo Costa (2022), depois de ser extraída das jazidas, a diatomita é transportada até um pátio, onde passa pelo processo de secagem natural e perda de parte da matéria orgânica que possa existir. A Figura 3 mostra blocos de diatomita em secagem natural, sujeitos a condições ambientes.

**Figura 3** – Secagem natural da diatomita para perda de parte da matéria orgânica.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Após a secagem natural, o mineral é transportado para a usina onde ocorre o seu beneficiamento (na Figura 3, é possível observar alguns detalhes dos prédios onde estão situados a usina e o depósito de armazenamento da diatomita e dos resíduos), passando por padronização e sendo levado, então, para fornos rotativos, onde é calcinado (Figura 4) a uma temperatura de aproximadamente 900°C. Durante a calcinação, são eliminadas as impurezas e contaminantes que possam estar presentes.

Após a calcinação (Figura 4), a diatomita passa por um processo de resfriamento, moagem e beneficiamento para o controle de granulometria e permeabilidade, sendo separada do resíduo e, em seguida, embalada, transferida para armazéns de estocagem e, finalmente, é transportada para as empresas de destino.

**Figura 4** – Diatomita calcinada.



Fonte: Costa (2022).

As principais propriedades da diatomita são: “estrutura microscópica, porosidade, densidade aparente baixa, elasticidade, capacidade de absorção, inércia química, baixa condutividade térmica, peso específico baixo, granulometria, alta superfície específica etc.” (CARVALHO SOBRINHO e LUZ, 1979, p. 10). Tais propriedades apontam para possíveis possibilidades de reaproveitamento em materiais nobres da construção civil.

Na antiguidade, a diatomácea foi usada pelos gregos como abrasivos e na construção de tijolos e blocos, atualmente são utilizadas principalmente como: agentes de filtração, agentes isolantes de calor, agente de carga industrial, agente suporte absorvente e agente abrasivo.

No Brasil, o maior centro consumidor de diatomácea é o estado de São Paulo, destacando o uso nas indústrias de tintas, esmaltes e vernizes como os principais consumidores da terra diatomácea como agente de carga e, as indústrias de bebidas como os principais consumidores das terras diatomáceas como agente de filtração (FLORIANI, 2017, p. 1).

As propriedades da diatomita e, conseqüentemente suas aplicações, são fatores que influenciam em seu preço de mercado. No Quadro 2 estão listadas as principais aplicações da diatomita. Segundo Goulart *et al.* (2011), a diatomita possui vida útil muito curta quando aplicada nos processos de filtração e clarificação da cerveja, uma vez que fica saturada rapidamente com material orgânico que deriva do processo de fermentação da cerveja. Uma vez saturada, ela não pode ser mais utilizada e, conseqüentemente, é descartada, tornando-se resíduo industrial. Segundo apontam os autores, “uma empresa cervejeira de grande porte pode gerar aproximadamente 30.000 kg/mês deste resíduo.” (GOULART *et al.*, 2010, p. 14).

Após o processo de purificação da diatomita, resta uma grande quantidade de resíduo que precisa encontrar um destino adequado. Mesmo a diatomita pura acaba perdendo sua pureza após uso em alguns setores, e com isso precisa ser descartada ou reaproveitada em outro setor.

Os problemas de poluição ambiental causados por resíduos de indústrias têm despertado grande interesse no Brasil nos últimos anos. As leis de controle ambiental tornaram-se mais severas e os órgãos de fiscalizações ambientais mais eficientes. Por outro lado, os custos de disposição de resíduos de forma ecologicamente correta são elevados. Isto tem motivado a busca por alternativas tecnológicas viáveis para a disposição de resíduos industriais (GOULART *et al.*, 2011, p. 621).

O Quadro 2 mostra as principais aplicações da diatomita.

**Quadro 2 – Aplicações da diatomita.**

<b>APLICAÇÕES DA DIATOMITA</b>	
Auxiliar de filtração	Ácidos; Açúcar; Adesivos; Água; Antibióticos; Banhas; Caldos de carne; Carbonatos; Catalisadores; Cera; Cervejas; Cítricos; Coalho; Cola e glicerina; Composto de petróleo; Corantes; Efluentes; Extratos alcoólicos; Gelatina; Gorduras (animal e vegetal); Insulinas; Licores; Mel; Óleos (industriais e comestíveis); Refrigerantes; Resinas; Sabões; Sebo; Soluções farmacêuticas; Solventes; Sucos; Vernizes; Vinagres; Vinhos; Xaropes de açúcar.
Cargas industriais	Papel (sanitários, especiais); Tinta; Extensor produtos tóxicos; Fertilizantes; Polietileno; Borracha; Concreto leve; Rebolos; Fósforo (ação antiexplosiva e controle de velocidade da queima); Sabões; Eletrodos; Antibióticos.
Abrasivos (polimento)	Prata / ouro; Jóias; Pedras preciosas; Ceras automotivas; Vidros; Dentes (creme dental).
Isolamento térmico	Refratários; Emulsão asfáltica; Silicato de cálcio; Cimentos isolantes.
Absorção	Cat litter; Impurezas na reciclagem de fibras; Inseticidas; Fungicidas; Pilhas dielétricas; Dynamite; Gás líquido explosivo; Líquidos catalisadores; Lama de perfuração; Borrachas (retentores).
Agente Antioxidante	Rações animais.
Agente antiaderente	Filmes de polipropileno.
Inseticida natural	Pragas de grãos em cilagem; Formigas; Pulgas.

Fonte: Informações coletadas na página da Diatomil.

A diatomita e o seu resíduo podem ser aproveitados na confecção de elementos importantes para a construção civil, fato já confirmado por autores como Gomes (2013), Costa *et al.* (2021) e Figueira (2021). Em meio a estes trabalhos, podemos destacar Gomes (2013), que conclui pela adequação da adição de diatomita em argamassas colantes do tipo AC1, segundo este autor, “a utilização da diatomita permite maior retenção de água nas argamassas

devido à estrutura molecular e com isso as reações de hidratação podem ocorrer de forma gradativa” (GOMES, 2013, p. 119). Por ser uma pozolana natural (possui propriedades cimentíceas, é capaz de preencher os espaços vazios no concreto, por exemplo, tornando-o mais denso, resistente e durável), a diatomita reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento e desta forma a sua resistência tende a se elevar.

Mais recentemente, surgiram trabalhos experimentais que estudaram a incorporação do resíduo de diatomita a produtos da construção civil. Propostas mais recentes envolvendo o reaproveitamento de resíduos de diatomita podem ser encontradas em Floriani (2017), Costa *et al.* (2021) e Figueira (2021).

É importante destacar aqui o trabalho de Floriani (2017), no qual se conclui pela inviabilidade de utilização de tijolos ecológicos moldados manualmente dentro de um percentual de adição do rejeito no intervalo de 30 a 60%, uma vez que, nas condições estudadas, a resistência à compressão dos tijolos confeccionados foi inferior a 2,0 MPa, não atendendo a norma vigente NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

Já na pesquisa de Costa *et al.* (2021), empregou-se um percentual de rejeito de 10 a 30%, verificando-se que, para um percentual de 10% de rejeito incorporado na massa cerâmica, os corpos de prova possuíam módulo de resistência à flexão e teor de absorção de água compatíveis com as normas para blocos de vedação, o que indica a viabilidade de reaproveitamento pelo setor da construção civil.

Como previamente apontado, existem resultados que comprovam a eficiência do reaproveitamento do resíduo/rejeito de diatomita na confecção de materiais como argamassas colantes, tijolos ecológicos, tijolos cerâmicos sólidos, pavimentos intertravados etc. Ficam como sugestões nestes trabalhos, testar novos percentuais de incorporação do resíduo/rejeito de diatomita, estudar outras propriedades e testar a incorporação deste material em outros produtos, como por exemplo, o tijolo vazado (COSTA *et al.*, 2021).

Na perspectiva de ir além do que já foi estudado, e colaborar com a disponibilização de novos resultados vindos do campo experimental, é que se objetivou neste trabalho, a realização de estudos experimentais conciliados com a simulação numérica, objetivando estudar o reaproveitamento do resíduo de diatomita na confecção de tijolos cerâmicos furados/vazados e investigar suas propriedades, bem como a possibilidade de emprego deste material como bloco de vedação e/ou blocos estruturais.

A Figura 5 mostra uma visão superior da Ciemil, uma empresa baiana produtora de diatomita, fundada em 1971 e situada em Vitória da Conquista, com capacidade de produção de 10 kt/ano.

**Figura 5** – Ciemil, Comércio Indústria e Exportação de Minérios Ltda.



Fonte: Ciemil. Disponível em: <https://www.diatomil.com.br/#>.

Na parte central superior da Figura 5, podemos observar o resíduo de diatomita depositado no solo do terreno nas proximidades do galpão onde certamente ocorre o beneficiamento. Segundo informações constantes num vídeo institucional da empresa, a Ciemil é a maior produtora de diatomita do Brasil.

Uma busca na literatura pelos termos “diatomita” e “terra diatomácea” possibilitou encontrar estudos envolvendo mais aplicabilidades da diatomita ou de seu resíduo em vários setores tecnológicos e industriais. Uma aplicação menos comum da terra diatomácea foi apontada por Ávila (2009) num estudo sobre a possibilidade de aplicação desta na modelagem odontológica. Mediante um estudo experimental, o autor conclui que: “diante dos resultados encontrados com a modificação da resina de poliuretano com 30% de diatomita, existe a viabilidade da utilização desse material para confecção de modelos odontológicos” (ÁVILA, 2009, p. 177).

Além dos estudos envolvendo novas aplicações da diatomita e do reaproveitamento do resíduo industrial de diatomita, existem aqueles que visam recuperar o produto já utilizado e prejudicado pelo uso, para reutilização no mesmo setor. Um exemplo de estudo da recuperação da terra diatomácea é o apresentado por Goulart (2010), nele o autor propõe uma metodologia para recuperar o mineral usado no processo de filtração e clarificação da cerveja, concluindo



que a diatomita recuperada foi “capaz de remover de 98 a 100% do Cu, independentemente da concentração inicial e do valor de pH” (GOULART, 2010, p.38).

### 2.3 Tijolos

Os tijolos são materiais de uso comum na construção civil e podem ser fabricados de forma artesanal ou industrial, sendo que a sua forma é a de um paralelepípedo (sólido ou vazado) com coloração avermelhada (no caso de tijolos que são sujeitos a queima). Segundo Barros (2017), o nome tijolo deriva do vocábulo “adobe” e, inicialmente, sua produção envolvia solo argiloso, areia e água, além de uma proporção de material orgânico que era inserido com a finalidade de possibilitar a confecção de um produto mais resistente. Nos primórdios, eram “fabricados por simples amassamento e evoluíram para a forma retangular que existe atualmente. Secado ao sol após o preparo da massa atingia forma, resistência e condições de serem utilizados na execução de paredes e habitações” (BARROS, 2017, p. 7).

Com o passar do tempo, percebeu-se que a queima do tijolo imprimia a ele maior resistência mecânica, além de outras propriedades. Atualmente são produzidos dois tipos de tijolos de uso frequente em construções de estruturas físicas: os tijolos cerâmicos e tijolos de solo-cimento, além dos blocos de concreto, cuja produção encontra-se em alta atualmente. O tijolo é um dos principais materiais de construção. Segundo Moura *et al.* (2021, p. 70), “o custo dos materiais de construção convencionais tem aumentado devido à energia necessária para a produção, contribuindo para a escassez de recursos naturais e o alto custo de transporte entre as fábricas e o canteiro de obras”.

No contexto da grande demanda existente pelos produtos cerâmicos, e levando em conta fatores como a preservação dos recursos naturais, bem como o custo de produção, torna-se urgente repensar a produção considerando as condições de cada região: os recursos disponíveis, as possibilidades de reaproveitamento de matéria-prima proveniente de indústrias e o uso adequado de bens e serviços, tendo em vista a economia dos materiais primários de maior valor comercial e a sua substituição total ou parcial por subprodutos industriais.

A preocupação com o ambiente, bem como a economia de bens e serviços, tem levado a própria indústria a pensar na produção alternativa e ecologicamente correta de determinados bens de consumo do setor industrial. Motivados por essa demanda, pesquisadores estão testando novas alternativas para a fabricação de produtos relacionados à construção civil, especialmente tijolos e blocos. Trata-se de produtos essenciais ao setor e que muito contribuem com a economia de cada região, mas cuja crescente demanda, ao mesmo tempo em que acelera a

extração de matéria-prima e o dispêndio de resíduos e rejeitos no meio ambiente, causa danos irreversíveis a ele.

### 2.3.1 Tijolos cerâmicos

A palavra cerâmica deriva da palavra grega *kéramos*, que significa “terra queimada” ou “argila queimada”. Segundo Gomes *et al.* (2008, p. 319), “Dados encontrados a quase 13 mil anos mostram evidências dos primeiros indícios de cerâmica nas escavações do Vale do Nilo, Egito”. Conforme Silva e Oliveira (2016), a cerâmica consiste numa atividade de produção de materiais inorgânicos, metálicos e não-metálicos (formados em proporções bem definidas), com baixa capacidade de condução elétrica e térmica, duros e ao mesmo tempo quebradiços. A cerâmica enquanto atividade industrial é responsável pela produção em larga escala de diversos materiais, entre os quais destacam-se os tijolos pela sua larga utilização como elemento de vedação (projetado para resistir ao seu próprio peso) e, também, como elemento estrutural (projetado para resistir a outras cargas e ações).

Conforme Silva e Maia (2016), o tijolo é um tipo de material cerâmico obtido, em geral, mediante tratamento térmico a elevadas temperaturas. Também são características dos materiais cerâmicos a resistência a altas temperaturas e ao tempo. Segundo Silva *et al.* (2017, p. 208), “O tijolo tradicional é fabricado com argila e possui cor avermelhada devido ao cozimento e pode ser maciço ou furado”. Os tijolos furados, também chamados de tijolos vazados, podem ter dimensões variadas, assim como a quantidade de furos existentes. Os mais comuns são os de 6, 8, 9, 14 e 17 furos. Os tijolos cerâmicos são geralmente produzidos a partir da combinação de argilas e, o que lhes imprime uma coloração avermelhada é a presença de óxidos e hidróxidos de ferro na matéria-prima. Para Oliveira (2008, p. 14), “a principal propriedade das argilas é tornar-se plástica quando umedecida com uma determinada quantidade de água, permitindo desta forma moldar peças”.

Após a cura<sup>5</sup>, é realizada a mistura da argila curada com o cascalho moído, sendo o produto (tijolo ou outro material cerâmico) moldado em formas (produção artesanal) ou extrudado (produção industrial) para depois passar pelo processo de secagem para retirada da umidade. Uma vez que se tenha o produto seco, ele passa por fornos a temperaturas de

---

<sup>5</sup> A cura da argila consiste num processo que a permite alcançar a consistência adequada para ser extrudada de forma eficiente. Durante o processo de cura a umidade se espalha por toda a matéria-prima, resultando numa argila mais maleável, com maior plasticidade e coesão. Ocorre também o processo de decomposição da matéria orgânica mediante transformações físicas e químicas, o que colabora com a redução de impurezas, melhoria da plasticidade e etc.

aproximadamente 1000°C, que enrijecem a massa, processo denominado de queima. Após todo o processo descrito, as peças com defeitos são descartadas e o produto é vendido e enviado para utilização, por exemplo, na construção de habitações.

O tijolo maciço é um tijolo sólido (sem furos) e pequeno, se comparado aos tijolos furados. Tijolos maciços são ainda denominados de tijolos comuns e costumam ser bastante resistentes, proporcionando conforto térmico e acústico adequado.

A Figura 6 é uma ilustração de tijolos maciços que ainda não passaram pela etapa de queima.

**Figura 6** – Tijolos maciços crus (não queimados).





Fonte: Acervo do autor (2023).

Como pode ser observado na Figura 6, os tijolos maciços possuem suas faces plenas de material (sem vazios), podendo, em alguns casos, como na Figura 6, apresentar rebaixos de fabricação nas faces usadas para acatamento. O aspecto cinza dos tijolos deve-se ao fato que eles ainda não passaram pelo processo de queima, quando lhe é impressa a coloração avermelhada devido à presença de óxido de ferro (quanto maior o teor de ferro mais avermelhado serão os tijolos após a queima).

Com 60 peças de tijolos maciços com dimensões (10,5 x 5,5 x 21,5) cm<sup>3</sup> pode-se construir 1 m<sup>2</sup> de parede com 10,5 cm de largura.

Em contraponto aos tijolos maciços, os tijolos furados ou vazados, também chamados de tijolos baianos, possuem estrutura que permite maior rendimento, conforto térmico e acústico. No Quadro 3 estão representados dois dos modelos mais usados para os tijolos furados.

**Quadro 3** – Tipos de tijolos cerâmicos furados comumente comercializados.

TIJOLOS FURADOS	INFORMAÇÕES
<p>6 furos</p> 	<p><b>Dimensões:</b> (9 x 14 x 19) cm<sup>3</sup></p> <p><b>Massa:</b> 2,0 kg</p> <p><b>Dimensões:</b> (9 x 14 x 24) cm<sup>3</sup></p> <p><b>Massa:</b> 2,4 kg</p> <p><b>Dimensões:</b> (11,5 x 14 x 24) cm<sup>3</sup></p> <p><b>Massa:</b> 2,8 kg</p>
<p>8 furos</p> 	<p><b>Dimensões:</b> (11,5x 19 x 24) cm<sup>3</sup></p> <p><b>Massa:</b> 3,7 kg</p>

Fonte: O autor (2023).

No Quadro 3 temos especificações dos dois principais tijolos furados comercializados em todo país. No entanto, outras configurações de tijolos vazados podem ser encontradas, como, por exemplo, 9, 14 e 17 furos. Uma das vantagens do uso de um maior número de furos é a redução da quantidade de argila necessária para extrusão dos corpos cerâmicos com um mesmo rendimento.

A Figura 7 mostra tijolos de 9 furos logo após a extrusão, passando pelo processo de secagem natural em um pátio aberto à circulação de ar.

**Figura 7** – Tijolos de 9 furos.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Devido à inevitável escassez de material e à degradação ambiental, tornou-se bastante comum a adição de resíduos e/ou rejeitos à argila. Isso favorece a proteção ao meio ambiente, mas pode influir nas principais características do material, como resistência à compressão/flexão do produto após os processos de secagem e queima e seu poder de absorção de água. Possíveis alterações em propriedades como as citadas anteriormente demandam estudos que investiguem a viabilidade e as condições para reaproveitamento de resíduos industriais no setor cerâmico. A produção de tijolos cerâmicos vazados com a adição de resíduos segue as etapas que vão desde a extração da matéria-prima até a expedição do produto.

Oliveira (2008), destaca que o setor ligado a produção de cerâmica vermelha no Brasil tem as seguintes características:

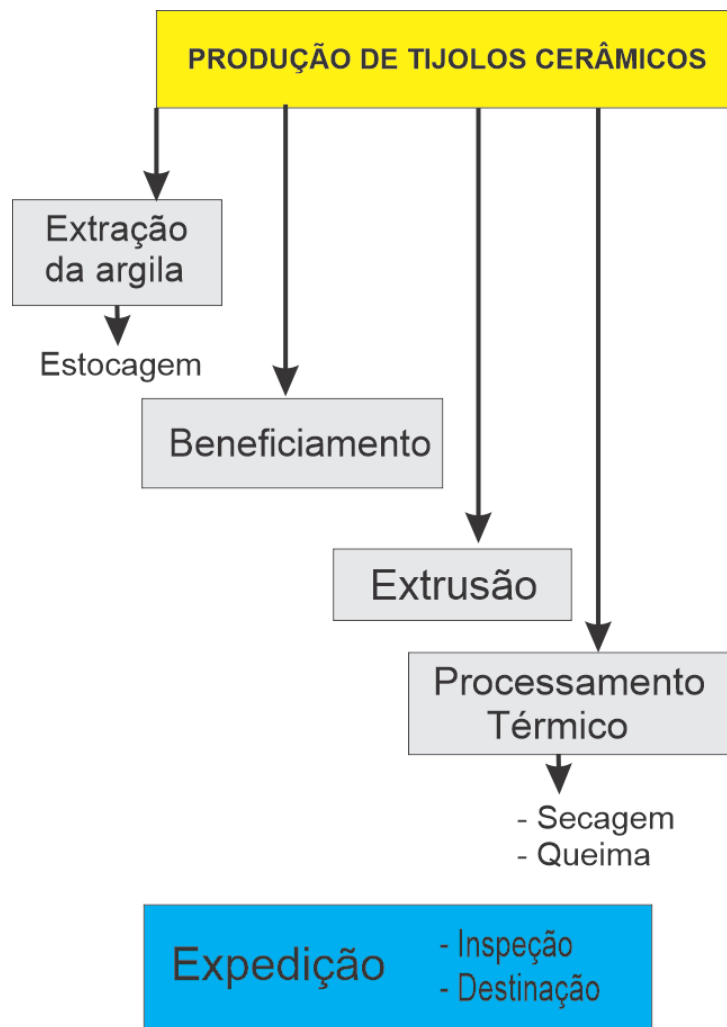
- (i) a mão de obra tem participação significativa na composição do custo de produção, constituindo-se assim num setor intensivo;
- (ii) apresenta deficiência de informações estatísticas e indicadores de desempenho, decorrentes do grande número de unidades produtivas e distribuídas por vários estados;
- (iii) a maioria das unidades produtivas é de pequeno e médio porte, utilizando, em geral, tecnologias defasadas;
- (iv) são grandes consumidoras de energia térmica, o que onera bastante o custo de produção;
- (v) a lenha ainda continua sendo o principal combustível utilizado pelas indústrias, embora o gás natural venha aumentando a sua participação;

(vi) é pequeno, porém crescente, o quantitativo de empresas que utiliza em seus processos produtivos tecnologias mais atuais, como sistemas semiautomáticos de carga e descarga e fornos túneis; [...]

(ix) constitui-se num celeiro para o aproveitamento de resíduos sólidos industriais, prática que favorece concomitantemente a preservação das matérias-primas cerâmicas e do meio ambiente (OLIVEIRA, 2008, p. 16).

A Figura 8 mostra as etapas que estão envolvidas no processo de fabricação de tijolos cerâmicos.

**Figura 8** – Etapas envolvidas na produção de tijolos cerâmicos.



Fonte: O autor (2023).

Conforme Oliveira (2008), entre os desafios a serem enfrentados pela indústria de cerâmica vermelha no país se encontram a redução da quantidade de energia empregada em seus processos produtivos, o emprego de tecnologias pelas empresas produtoras de forma a favorecer a consolidação de produtos de alto nível e o estudo de possibilidades de

reaproveitamento de resíduos industriais no setor, de forma a reduzir, por exemplo, a quantidade de argila utilizada e favorecer a preservação do meio ambiente.

#### **2.4 Reaproveitamento de resíduos sólidos na produção de tijolos**

No Brasil, diversos setores da indústria, além de gerarem produtos essenciais para subsistência humana, produzem uma grande quantidade de resíduos que preocupa o governo ao médio e longo prazo. A produção acelerada de determinados materiais pode ocasionar a escassez de algumas matérias primas, além de produzir milhares de toneladas de materiais, que se não reaproveitados ou reciclados virarão entulhos, demandando uma imensa área para destinação.

Neste contexto de avanço científico e tecnológico, em que há demanda crescente por determinadas matérias-primas, faz-se urgente investigar os resíduos industriais com potencial de uso na confecção de outros produtos industriais. A necessidade de identificar, entre tantos materiais disponíveis, aqueles que podem ser utilizados ou reutilizados por setores industriais, gerando menor impacto ambiental, reduzindo o preço de produção e utilização e contribuindo com a melhoria da qualidade dos produtos, tem motivado diversos pesquisadores a desenvolverem pesquisas experimentais, as quais vêm apontando novas possibilidades neste campo.

Uma alternativa envolvendo a fabricação de tijolos com a adição de rejeito de vidro moído, resultante da lapidação em vidrarias, pode ser encontrada no trabalho de Galvão, Farias e Souza (2013). Segundo esses autores, o pó de vidro é um resíduo industrial inerte, cujo descarte inadequado pode levá-lo aos rios, aumentando a turbidez das águas. Para Galvão, Farias e Souza (2013, p. 59), “uma utilização prática do compósito seria a produção de um bloco construtivo mais leve, com maior resistência térmica e mais barato que os fabricados por materiais convencionais”.

Miranda *et al.* (2011), avaliaram o potencial do grits<sup>6</sup> como material de construção empregando-o na produção de tijolos de solo-cimento. As análises realizadas se deram por meio de ensaios de análise granulométrica, limite de liquidez e limite de plasticidade. Os autores concluíram pela viabilidade de sua proposta para os traços 1:14; 1:10,5:3,5; 1:7:7 de cimento, solo e grits, nessa ordem, situando-o como uma excelente alternativa para destinar corretamente

---

<sup>6</sup> Segundo Miranda *et al.* (2011), o grits é um resíduo sólido de características arenosas e coloração acinzentada, gerado pela indústria de polpa kraft durante a etapa de recuperação do licor branco empregado no cozimento dos cavacos de madeira.

esse tipo de material gerando benefício ambiental e colaborando com a indicativa de novos materiais para a construção civil.

Uma proposta similar é feita Herek *et al.* (2009), que, por sua vez, estudam a incorporação do lodo de lavanderia industrial à fabricação de tijolos cerâmicos, justificando a importância do trabalho pelo fato de existir grande produção de lodo, a qual tem demandado alto custo para sua destinação em aterros industriais. Os autores avaliaram, por meio de ensaios de resistência à compressão, absorção de água, lixiviação e solubilização, a qualidade dos tijolos cerâmicos de vedação fabricados com lodo de lavanderia industrial incorporado em massa cerâmica vermelha, concluindo pela estabilidade química do produto obtido quando o teor de lodo é de 20%. Para a construção civil, por exemplo, são gerados produtos como: tijolos, concreto, telhas, gesso etc. e, desse processo, resultam enormes quantidades de resíduos, sendo que alguns deles têm potencial para serem reaproveitados no próprio setor.

Buscando contribuir com alternativas para produção de tijolos a partir da adição de resíduos, Kizinievič e Kizinievič (2016) propõem o uso de cinzas de madeira obtidas a partir de rejeitos de biomassa utilizadas na produção de energia. Através de testes experimentais como incorporação de 5% a 60% de aditivo de cinza de madeira queimada a várias temperaturas. Os autores concluíram que o aditivo influencia as propriedades do corpo cerâmico, reduzindo a secagem, o encolhimento ardente, a densidade, a força compressiva, a condutibilidade térmica e, além do mais, aumenta a absorção de água e a porosidade do produto. Em um trabalho semelhante, mas com a adição de um outro tipo de resíduo, Kizinievič, Kizinievič e Malaiškienė (2018) analisaram o efeito do lodo de resíduos da indústria de papel (lodo de papel) sobre as propriedades físicas e mecânicas de tijolos de argila, sua microestrutura e resistência.

Buscando contribuir com propostas de reutilização de resíduos sólidos, Giffoni e Lange (2005) desenvolveram uma pesquisa na qual discutem a utilização da borra de fosfato como matéria-prima para a produção de tijolos. As autoras concluíram que, em termos físicos, para a composição do produto cerâmico com a inclusão de até 10% de borra de fosfato, obtém-se um produto indicado para uso como bloco cerâmico de vedação classe 10. Já análises físico-químicas dos tijolos nas condições estabelecidas o incluem na classe II-A (não perigoso e não inerte).

A partir da revisão de literatura, foi possível construir o Quadro 4, no qual apresentamos algumas categorias relativas aos trabalhos publicados ao longo das duas últimas décadas com o fim de contribuir para o cenário de reaproveitamento de resíduos sólidos e preservação do meio ambiente.



**Quadro 4** – Exemplos de resíduos e rejeitos reaproveitáveis na construção civil.

<b>TIPO DE RESÍDUO/REJEITO</b>	<b>PESQUISADORES</b>
Resíduo sólido de siderurgia	Oliveira e Holanda (2004a; 2004b)
Borra de fosfato	Giffoni e Lange (2005)
Pó de vidro	Galvão, Farias e Souza (2013)
Resíduos sólidos de tornearias mecânicas	Siqueira <i>et al.</i> (2016)
Resíduos de mineração e resíduos agrícolas	Vilela (2019)
Resíduo/Rejeito de diatomita	Gomes (2013); Costa <i>et al.</i> (2021); Figueira (2021)

Fonte: O autor (2023).

Diante da dificuldade da destinação ambientalmente adequada de resíduos industriais, aliada à crescente escassez de matéria-prima, o reaproveitamento mostra-se uma saída viável para o problema, contribuindo com o desenvolvimento de tecnologias e a preservação ambiental. De acordo com Giffoni e Lange (2005, p. 128), “Os resíduos provenientes das atividades industriais crescem em importância no cenário ambiental, uma vez que são gerados por vários tipos de processos, representando uma produção de milhões de toneladas por dia em todo o mundo”.

Segundo Oliveira e Holanda (2004b), o setor siderúrgico possui papel importante na economia nacional, no entanto, sua atividade gera grandes volumes de resíduos, muitos deles ricos em óxidos de ferro e compostos por partículas de pequenas dimensões. Para esses autores, “o reaproveitamento de resíduos provenientes de processos industriais no campo da cerâmica visando a obtenção de produtos para a construção civil constitui-se, na atualidade, em uma das melhores soluções para o problema ambiental associado ao descarte de resíduos sólidos” (OLIVEIRA; HOLANDA, 2004b, p. 185).

O crescimento populacional resulta no crescimento da demanda por matéria-prima relacionada à produção de estruturas físicas de alvenaria. Esse fato, associado ao crescente desgaste ambiental, tem nos motivado a pensar em alternativas que possam contribuir de forma qualitativa e quantitativa para o setor da construção civil. Nesse sentido, estudos relacionados ao reaproveitamento de resíduos industriais têm ganhado importante espaço na própria indústria e nas universidades.

## 2.5 Secagem e queima de materiais cerâmicos

A secagem e a queima são dois processos importantes para a obtenção de tijolos cerâmicos de qualidade. Tanto durante a secagem quanto durante a queima, ocorrem perdas significativas de umidade, além de transformações na estrutura e na composição dos tijolos, o que lhes imprime características importantes como cor, porosidade, absorção de água, e resistência mecânica.

### 2.5.1 Secagem

Os corpos cerâmicos recém conformados/extrudados contêm uma grande porção de água proveniente da etapa de preparação da massa – de 18 a 32% da massa total. A secagem ou eliminação preliminar da água presente nos corpos cerâmicos se faz necessária a fim de se evitarem defeitos, como trincas, bolhas, empenos e quebras. Além disso, a eliminação parcial de água dos corpos cerâmicos contribui para um melhor desempenho do forno durante a queima.

A secagem é um processo termodinâmico que ocorre imediatamente após a consolidação das peças e visa, através do fornecimento de energia térmica, evaporar a maior parte da água adicionada durante o processo de conformação/extrusão. É durante a secagem que ocorrem as primeiras perdas de água (perdas de umidade) dos corpos cerâmicos, sendo que a retirada de água neste processo deve ocorrer de forma lenta e gradual para que não acarrete defeitos que resultem no descarte do produto.

A secagem é a operação unitária que promove a remoção de um líquido volátil agregado a um sólido através de vaporização térmica, acontecendo por meio do aquecimento do corpo devido ao calor. Segundo Martins *et al.* (2020), através da secagem, muitos produtos passam a ter vida útil maior. Além disso, em geral produtos secos são de mais fácil distribuição e comercialização. A secagem é um mecanismo muito usado na conservação de alimentos, uma vez que não há crescimento de micro-organismos decompositores na ausência de água e, ademais, algumas enzimas responsáveis pelo escurecimento enzimático são desativadas na ausência de água.

Conforme Batista *et al.* (2009) e Martins *et al.* (2020), durante a secagem ocorrem os processos de transferência de calor e de massa, o que resulta no encolhimento de corpos porosos. “O parâmetro principal para se obter um ótimo processo de secagem é a taxa de secagem” (BATISTA *et al.*, 2009, p. 47). Segundo Martins *et al.* (2020), a transferência de

massa (ou de umidade) está relacionada à difusão de água do interior do sólido para a sua superfície. A resistência a esse processo é determinada pelo coeficiente convectivo de massa e de difusão. Por outro lado, a transferência de energia que se dá pelo calor ocorre inicialmente na superfície do sólido, fazendo com que a água que ali está sofra evaporação. A resistência à transferência de calor é mensurada pelo coeficiente convectivo de calor. O estudo da secagem de materiais cerâmicos possibilitará obter as condições ideais de controle deste parâmetro, sendo possível prevenir rachaduras, fissuras e deformações que podem ocorrer durante a extração de líquido do material.

Durante a secagem de sólidos, tem-se o fenômeno de encolhimento, que altera a cinética de secagem e as dimensões do sólido. Este fenômeno acontece simultaneamente com o transporte de umidade e é mais intenso em materiais cerâmicos com umidade inicial alta, e principalmente em produtos de granulação fina. Dependendo das condições de secagem, da estrutura do material e da geometria do produto, o fenômeno de encolhimento pode causar rachaduras, deformações e até mesmo fraturas dentro dos sólidos. Então, é muito importante estudar a secagem junto com o encolhimento (BATISTA *et al.*, 2008, p. 47).

De acordo com Batista *et al.* (2009), na produção de tijolos vazados deve-se observar as seguintes Normas Brasileiras: NBR 6461 (ABNT, 1983), NBR 8043 (ABNT, 1983), NBR 7171 (ABNT, 1992) e NBR 8042 (ABNT, 1992). Em geral, os produtos encontrados no mercado não atendem a essas normas devido à predominância do caráter artesanal de produção, o que evidencia a necessidade de estudos na área a qual ainda se encontra em desenvolvimento.

Conforme Silva (2016), a retirada da água de um corpo cerâmico deve ocorrer de forma lenta e gradual, com bastante cuidado para que a retração do corpo ocorra de forma uniforme e simétrica. De outra forma, durante a secagem ou após, no processo de queima, podem surgir trincas no material, de forma a inutilizá-lo, gerando resíduos que, por não serem úteis à construção civil, muitas vezes são descartados no meio ambiente, acarretando prejuízos.

A secagem de corpos cerâmicos pode ocorrer de forma natural, sob exposição dos corpos ao ambiente em condições favoráveis, ou de forma artificial, quando os objetos cerâmicos são levados a secadores que forcem a extração de água dos corpos de forma controlada, proporcionando a qualidade desejada aos materiais cerâmicos. Tanto os secadores intermitentes quanto os secadores contínuos expõem os corpos a temperaturas no intervalo de 50 a 150°C.

No processo natural, os tijolos são dispostos e empilhados em prateleiras num galpão coberto. Segundo Araújo (2019, p.13), “a duração da secagem depende da temperatura e umidade relativa do ar e da ventilação do local, necessitando de períodos de até seis semanas”.

A Figura 9 mostra blocos cerâmicos vazados em processo de secagem natural (sujeitos às condições ambientes).

**Figura 9** – Secagem natural de blocos cerâmicos vazados.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Os tijolos apresentados na Figura 9 estão dispostos em um galpão com circulação natural de ar. O processo de secagem envolve a circulação de ar com os seguintes objetivos: “o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor d’água produzido, a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça e o movimento de líquido e/ou vapor no interior da peça” (SILVA, 2009, p. 39).

A porosidade do material cerâmico tem grande contribuição para a velocidade de secagem, uma vez que esse processo se refere à retirada de umidade do interior do corpo cerâmico, e a umidade está concentrada no interior dos poros. A forma e a microestrutura dos poros em um material cerâmico “terão uma grande influência sobre a secagem, de modo que, mesmo sob um ambiente termodinamicamente favorável à evaporação da água, a água pode vir a ficar presa no interior dos poros da argila” (SILVA, 2009, p. 39).

O processo de secagem em geral é dividido em quatro fases distintas: adaptação, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial. Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura, umidade relativa e pressão), nas quais será efetuada a secagem. Em seguida evapora a água coloidal ocorrendo variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação das partículas da sua microestrutura. Ainda nesta fase a água continuamente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante e função principalmente da porosidade da peça. Na terceira fase ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior da peça e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma consequente redução da velocidade de evaporação e de

secagem. A última fase da secagem, que nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos próprios fornos de queima, é a de expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial, onde a velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero (HARTKE, 2003 apud SILVA, 2009, p. 39).

O encolhimento do tijolo durante a secagem é um fenômeno que pode ser observado na prática experimental e ocorre à medida que acontece a difusão de umidade no interior do corpo cerâmico. Além do encolhimento ocasionado pela perda de umidade, também é possível registrar a expansão térmica (dilatação térmica), devido ao aquecimento.

A redução do tempo de secagem pode ser obtida empregando-se a secagem artificial, sendo esta realizada em câmeras ou fornos de secagem. Dondi (2006) e Araújo (2019) ao discorrerem sobre a secagem, destacam que o tempo empregado na secagem artificial de tijolos cerâmicos varia de acordo com algumas características da matéria-prima, como a forma das peças, o tipo de secador e a temperatura utilizada, e pode levar de 12 a 40 horas. “A secagem artificial é realizada normalmente em uma temperatura entre 80 e 110°C, e com umidade relativa muito elevada” (ARAÚJO, 2019, p.13).

A Figura 10 mostra o secador rápido de talisca, que funciona como um túnel por onde passam as peças a serem secas. As peças são colocadas numa esteira que percorre o túnel no sentido oposto à corrente de ar aquecido de forma controlada. Trata-se de uma opção de secagem mais rápida que vem sendo empregada por ceramistas.

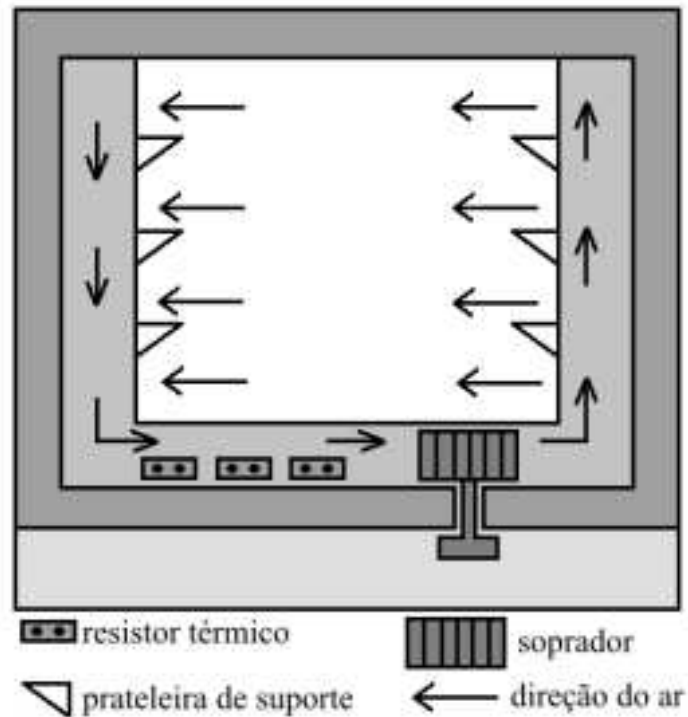
**Figura 10** – Secador de talisca.



Fonte: Associação Nacional de Indústrias Cerâmicas (Anicer).

Para secagens experimentais, é comum o uso de estufas com circulação mecânica de ar (Figura 11).

**Figura 11** – Esquema de funcionamento da estufa.



Fonte: Araújo (2019).

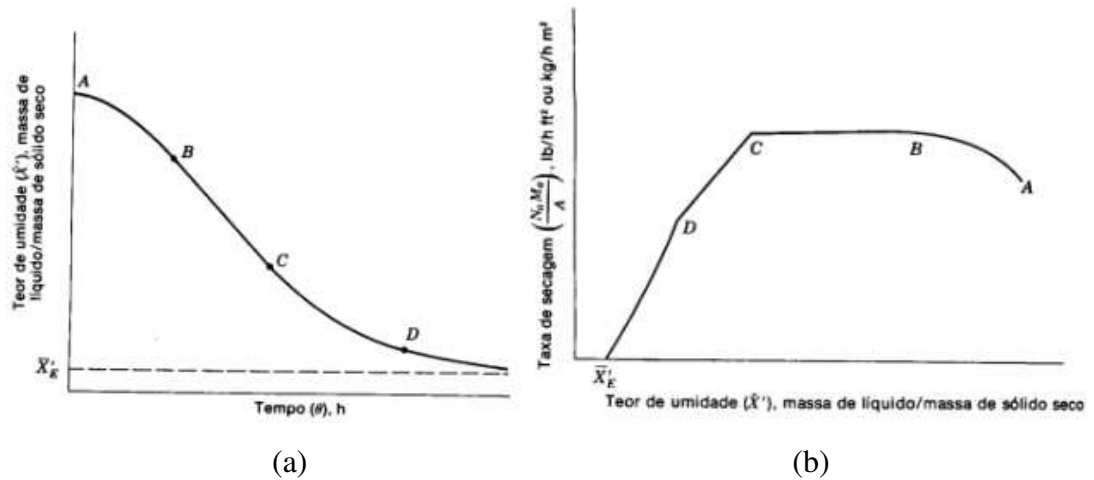
Segundo Silva (2009, p. 36), “diversos autores consideram a difusão de água líquida como principal mecanismo de transporte de umidade em sólidos cerâmicos”. Neste contexto é razoável uma descrição do fenômeno através da lei de Fick:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M), \quad (2.2)$$

em que  $M$  é o teor de umidade,  $D$  é o coeficiente de difusão e  $t$  é o tempo.

Conforme Santos (2018), modelos que consideram a difusão líquida como sendo o único mecanismo responsável pelo transporte de umidade no interior de corpos cerâmicos têm recebido fortes críticas, uma vez que os resultados experimentais costumam divergir razoavelmente dos preditos pelos modelos teóricos. As principais causas para as divergências de resultados podem estar ligadas a considerações que envolvem a constância do coeficiente de difusão, a condições de contorno inadequadas e à não consideração do acoplamento dos fenômenos de difusão térmica e mássica.

A Figura 12 apresenta curvas características do processo de secagem. A Figura 12a relaciona o tempo de secagem ( $h$ ) *versus* teor de umidade ( $X$ ), ao passo que a Figura 12b fornece o teor de umidade ( $X$ ) *versus* taxa de secagem ( $h$ ).

**Figura 12** – Curvas de secagem.

Fonte: Martins *et al.* (2020).

O intervalo AB nos dois gráficos representa o primeiro período de secagem, durante o qual a temperatura do sólido e a taxa de secagem aumentam até entrar no segundo período, BC, no qual a taxa de secagem permanece constante. O segundo período permanece até que a umidade no interior do sólido adquira valores muito baixos, fazendo com que a difusão de água para a superfície se reduza. O terceiro período, equivalente ao intervalo CD, ocorre quando as forças resistivas à transferência de massa se tornam maiores do que a vaporização da água presente na superfície do sólido, isto faz com que a taxa de secagem decresça (trecho da curva meio concavo para cima na Figura 12a). Concluído o período CD, no ponto D, em que o teor de umidade no sólido é muito baixo, o processo de secagem continua até que a pressão de vapor no sólido se torne igual à pressão parcial do vapor no ar.

### 2.5.2 Queima

A queima consiste num processo que ocorre logo após a secagem. Durante a queima os corpos cerâmicos são expostos a temperaturas que normalmente variam de 800 a 1100°C em um determinado intervalo de tempo. Durante a queima, ocorrem transformações físicas (como perda de água) e transformações químicas (como desidratação, oxidação e vitrificação). A qualidade de um artigo cerâmico depende muito da quantidade de vidro formada pela ação do calor, sendo que esta é responsável pelo aumento da massa específica, da resitência mecânica e dureza do material.

Ao discorrer sobre o processo de queima, Araújo (2019, p. 13) afirma que este “pode durar vários dias e ocorre em fornos que alcançam uma temperatura variando entre 750°C e



900°C”. Para a mesma autora, o processo de secagem e o modo de operação do forno terão influência na resistência mecânica do material, assim como em sua retração linear, absorção e porosidade, o que confirma a importância de estudos que considerem a secagem de tijolos cerâmicos visando a otimização do processo de fabricação desses itens essenciais para o setor da construção civil.

A Figura 13 mostra vista frontal de um dos fornos industriais onde ocorre a queima de tijolos cerâmicos, nela pode-se perceber parte da lenha (canto esquerdo) que é empregada como combustível de queima.

**Figura 13** – Forno industrial para queima de tijolos cerâmicos.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Segundo Batista *et al.* (2009), os primeiros tijolos empregados na construção civil datam de 4000 a.C. Nesta época não se queimavam os tijolos, tendo a prática sido iniciada por volta de 3000 a.C. Embora a queima de tijolos seja um processo envolvido na produção que vem sendo praticado há milhares de anos, as indústrias produtoras de materiais cerâmicos ainda desenvolvem produtos com baixa qualidade devido à falta de conhecimento acerca dos processos adequados de secagem e queima.

A queima constitui uma das fases mais importantes na produção de cerâmica vermelha, sendo ela caracterizada, segundo Oliveira (2008, p. 19), “pela aplicação de uma certa quantidade de energia térmica, proveniente do uso de algum tipo de combustível e com a consequente liberação de gases para atmosfera”. Para este autor, a redução na temperatura de sinterização, juntamente com a energia empregada, resultaria na diminuição dos custos de



fabricação dos tijolos, contribuiria com o meio ambiente uma vez que menos poluentes seriam lançados na atmosfera.

Segundo Schneider e Moreiras (2021), na etapa de queima de tijolos cerâmicos costuma-se empregar bastante tempo (podendo chegar a 10 dias), no decorrer do qual obtêm-se temperaturas elevadas (cerca de 900°C). O tempo empregado e as temperaturas alcançadas são parâmetros importantes que indicam a quantidade de energia empregada, e as grandes taxas de energia utilizadas pelo setor são um grande problema que requer soluções alternativas, tanto para a secagem quanto para a queima.

Visando a preservação de recursos naturais e energéticos, Schneider e Moreiras (2021) realizaram um estudo experimental com tijolos vazados onde concluíram que é possível obter produtos que se enquadrem nas normas ABNT vigentes empregando temperaturas de queima de 600 e 700°C. A pesquisa demonstrou que “a queima nas temperaturas de 600°C e 700°C produz corpos de prova com resultados dos ensaios que evidenciam a viabilidade da produção de tijolos cerâmicos com temperatura de queima reduzida” (SCHNEIDER; MOREIRAS, 2021, p. 28852).

Por fim, tanto a secagem quanto a queima constinuem processos importantes de tratamento térmicos de tijolos cerâmicos. Tais procedimentos são fundamentais e, portanto, indispensáveis para a consolidação desse tipo de produto, uma vez que é na secagem e na queima que ocorre o desenvolvimento das propriedades finais de grande importância para a qualidade dos tijolos. A otimização desses processos pode favorecer a otimização dos produtos cerâmicos e o uso adequado de recursos naturais.

## **2.6 A simulação computacional**

Quem trabalha com a fabricação de produtos e a otimização de processos costuma enfrentar problemas com custos de desenvolvimento de protótipos, realizar testes físicos que falham, o que obriga a realização de novos testes e torna o trabalho no mínimo dispendioso. Além dos gastos, esse ciclo pode levar a atrasos, falta de controle financeiro e perda de participação de mercado. Nesse contexto, a Simulação Computacional apresenta-se como uma solução capaz de enfrentar esse tipo de desafio. A Simulação Computacional já é realidade em empresas de todos os segmentos e vem contribuindo para a otimização de produtos e processos.

Para Vieira (2006), “O conceito de simulação pode ser descrito como uma tentativa de replicar ou imitar formas do comportamento de um sistema, real ou sendo projetado, através da construção de um modelo matemático desenvolvido em um computador”.

Ao simular um processo, consegue-se diminuir seus custos, garantir sua segurança e confiabilidade, além de reduzir o tempo necessário para disponibilizá-lo aos consumidores. Com a ajuda da simulação computacional, é possível otimizar testes e obter um produto com maior potencial, de forma que venha a atender às exigências regulatórias. Simular processos possibilita uma produção melhor, mais rápida e mais barata. Como já foi mencionado, a produção de protótipos costuma ser muito cara, o que faz do investimento em computadores e programas um retorno rápido.

A simulação é indiscutivelmente uma grande aliada no processo de tomada de decisões. A flexibilidade permitida na análise de diferentes cenários, ou configurações de um modelo, trás inúmeras vantagens no uso desta tecnologia. Vários pontos de vista podem ser abordados, ganhando-se com isto uma melhor orientação dos investimentos rumo ao diferencial competitivo desejado (VIEIRA, 2006, p. 9).

Ao falar sobre a tomada de decisão baseada em simulação, Vieira (2006) destaca que a simulação computacional consegue entre outras coisas: Ajudar uma empresa a melhorar sua estrutura organizacional; indicar quais setores devem ser automatizados e quais equipamentos precisam ser adquiridos; precisar como um novo sistema produtivo ou a substituição parcial dele irá afetar no sistema de produção e quão significativa será a mudança; avaliar os benefícios oriundos de uma nova reestruturação na produção e, se determinado investimento em produtos e/ou processos terá o retorno desejado.

A grande novidade é que está facilmente disponível – falta apenas tornar-se conhecida e utilizada. Gerentes e diretores podem agora se beneficiar com o auxílio desta tecnologia, de fato, espera-se que em breve, os tomadores de decisão terão nos computadores de seus escritórios, ferramentas de simulação que rapidamente os auxiliem nas suas tarefas diárias.

Qualquer projeto de tamanho razoável em uma corporação de médio ou grande porte, que envolva recursos (pessoas, máquinas, carros, infra-estrutura, ferramentas, material) terá certamente a necessidade de investimento financeiro de valor considerável. É claro que se espera um retorno significativamente maior que o investimento feito e em tempo adequado, para que as alterações propostas sejam consideradas viáveis. Entretanto, normalmente defronta-se com a problemática de como comprovar que os benefícios serão maiores que os investimentos, e que, portanto, o projeto proposto deve receber a atenção devida. Felizmente hoje já existem ferramentas que permitem aos projetistas avaliar, ou quantificar, se de fato, as novas idéias trarão os benefícios imaginados. Essas ferramentas simulam o processo atual e o novo processo e a partir das comparações entre os dois cenários, pode-se inferir sobre a viabilidade ou não do novo projeto. (VIEIRA, 2006, p. 1).

Para Vieira (2006, p. 3), “A simulação traz inúmeras vantagens se comparadas as de outros métodos analíticos ou experimentais, ou mesmo, baseados puramente na experiência do projetista ou tomadas de decisão”. Os ganhos com a simulação computacional podem incluir, por exemplo, a redução de custos de estoque e de produção, além do aumento da *performance* de processos, permitindo que a indústria alcance um nível de excelência em otimização de recursos financeiro e de pessoal.

São vantagens do uso da simulação computacional, segundo Vieira (2006):

- Fazer várias alterações ou modificações em um modelo de simulação para avaliar projetos e políticas propostas;
- Uma vez que se tenha recursos computacionais suficientes, é possível analisar uma grande quantidade de dados (longos períodos) em um curto espaço de tempo (tempo de execução);
- Por meio de um modelo de simulação computacional é possível separar os parâmetros controláveis daqueles que não são controláveis e estudar a influência de cada um deles sobre os sistemas;
- Testar hipóteses sobre como ou por que certos fenômenos ocorrem;
- Simular o funcionamento de um sistema para contrapor com a intuição do pesquisador;
- Servir de apoio para a tomada de decisões permitindo-se que se alcance soluções potencialmente boas.

Conforme Vieira (2006), como todas as técnicas, a simulação computacional pode apresentar algumas desvantagens:

- Desenvolver um modelo de simulação de alta qualidade pode ser um processo dispendioso, podendo se estender por vários meses, especialmente quando se trata de obter dados de difícil acesso;
- A obtenção de resultados sólidos em simulações depende fortemente da qualidade dos dados de entrada. A construção e alimentação do modelo exigem um esforço minucioso e diligente;
- A interpretação dos resultados da simulação pode ser complexa, já que os modelos buscam capturar a variabilidade dos sistemas. Isso pode tornar difícil determinar se uma observação durante a execução é resultado de uma relação significativa no sistema ou de processos aleatórios incorporados no modelo;
- O desenvolvimento do modelo requer habilidades e treinamento especializados, com aprendizado contínuo e aquisição de experiência ao longo do tempo.

Sobre a eficiência da simulação no estudo de processos, Vieira (2006, p. 8) nos remete aos seguintes exemplos de sucesso:

A Exxon Mobil avaliou a instalação de novos equipamentos e mudanças nos processos para a divisão de Filmes para determinar o impacto no resto das suas operações. Através da simulação, inúmeras restrições envolvendo AGV's (automated guided vehicles) foram identificadas. Uma vez que o equipamento foi comprado e o processo alterado, a planta foi capaz de produzir 40% acima das expectativas. Milhões de dólares em benefícios foram obtidos.

Através da simulação, recomendações foram feitas à GM as quais economizaram milhões de dólares. Por exemplo, uma restrição inesperada teria causado uma perda de 30%.

Carrier Corporation usou simulação para modelar sua linha de pintura de equipamentos de refrigeração. Eles provaram que se um novo forno de pintura fosse instalado, isto melhoraria a produtividade, trazendo um benefício anual de \$370K, resultando à Carrier uma economia de mais de \$1 milhão.

Modelando toda a planta laser ajudou a Cymer aumentar sua produção em 400% em um ano, o que gerou um aumento de receita de \$180 milhões. Simulação foi usada para otimizar o projeto do novo layout, avaliar mudanças nos processos, programar pessoal, controlar WIP (work-in-progress ou estoque em processo) e investigar o impacto de novas técnicas.

Na FIAT, simulação permitiu a eles modelarem seus processos com precisão, reduzindo o WIP em 48%, lead times e a necessidade de espaço físicos. Simulação permitiu a eles identificarem mudanças específicas na programação e melhoramentos nos processos, resultando em grande ROI (return on investment) e mais do que um milhão de dólares em economia.

ProModel precisamente modelou o complexo processo de produção de bacon da Wright, ajudando-os a melhor selecionar novos equipamentos, e a fazer mudanças nos processos e nas programações de funcionários. Esta solução permitiu a Wright Brand Foods dobrar sua capacidade produtiva e economizar mais do que \$10 milhões.

Eastman Chemicals usa simulação para continuamente analisar e avaliar oportunidades de melhoria, para determinar se novas idéias serão válidas antes de se tomar o risco de implementação. Quantidade incontável de dólares tem sido economizada através de melhores tempos de ciclo, avaliação de novos equipamentos, melhoramento na produtividade, projetos otimizados de pessoal e de manuseio de materiais.

A Boeing usou simulação para implementar com sucesso manufatura enxuta e reduzir consideravelmente custos produtivos. WIP, por exemplo, foi reduzido em 33%.

Nos últimos 10 anos, simulação tem ajudado a DuPont a economizar milhões de dólares. Uma das aplicações levou apenas duas semanas para ser implementada e economizou \$500,000.

Volkswagen economizou mais do que US\$ 20 milhões por ano com uma solução customizada para sua logística de distribuição (planta-centro de distribuição-revendedor). Melhoramentos incluíram mudança da localização de centros de distribuição e substituição de caras rotas de caminhões por rotas mais baratas (marítimas ou de trem).

Simulação tem sido usada para modelar e melhorar a complexa cadeia de fornecimento entre a planta da Thiokol (oeste dos Estados Unidos) e Cape Kennedy (Flórida). Economias de logística ficam na ordem de mais de um milhão de dólares.

Delta utilizou ProModel para avaliar novos equipamentos para transportar aviões. Uma solução ótima permitiu a Delta economizar milhões de dólares.

O fato de existirem programas computacionais como o Wolfram Mathematica (utilizado nesta pesquisa para resolver as equações relacionadas a convecção térmica), que possuem interfaces gráficas amigáveis, faz com que, embora se trate de uma ferramenta quantitativa, não seja necessário um matemático para utilizá-la, outros profissionais com formação básica nos assuntos a serem explorados podem perfeitamente empregar tais recursos para estudar determinados processos.

Com relação à simulação computacional utilizando o software Wolfram Mathematica, Monteiro (2021, p. 67) afirma que:





Este software implementa um sistema de álgebra computacional que contém diversas bibliotecas e recursos prontos a serem usados para diversas finalidades, o que o torna versátil e aplicável em diversas áreas do conhecimento. Além disso, é um software de linguagem simples e de desempenho relativamente rápido, o que o torna bastante útil em simulações numéricas.

Para Monteiro (2021, p. 85), “A simulação é uma boa alternativa e complementar à experimentação tendo em vista que, mesmo quando possível, tem custo elevado, especialmente, quando o material estudado é raro e de alto valor”.

Nascimento (2002), em sua tese de doutorado, realizou experimentos de secagem de tijolos maciços onde considerou as temperaturas de 60°C, 80°C e 110°C. Além disso, o autor desenvolveu um modelamento matemático empregando as Leis de Fick através do qual foi possível determinar os coeficientes de transporte de massa por meio de ajustes nos parâmetros do modelo (Tabela 1).





Silva (2009) utilizou o software Mathematica para resolver equações lineares e prever o comportamento de variáveis como teor de umidade, temperatura e tensões no interior de tijolos cerâmicos vazados. Neste estudo, o autor estimou os coeficientes de transporte para o tijolo cerâmico de oito furos produzidos em escala industrial (Tabela 1).

**Tabela 1** – Coeficiente de difusão de massa de tijolos cerâmicos em diferentes condições de secagem conforme reportado na literatura.

Material	$D_s \times 10^{-10} \text{ (m}^2/\text{s)}$							Source
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	
Tijolo maciço 	----	23.3	----	129.6	----	----	152.0	Nascimento (2002)
Tijolo maciço 	----	22.0	----	141.0	----	----	210.0	Brito (2016)
Tijolo furado 	4.0	0.3	0.9	8.0	10.0	16.0	----	Silva (2009)
Tijolo furado 	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0		Santos et al. (2022)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados extraídos dos trabalhos citados.

**Tabela 2** – Coeficiente de transferência de massa convectiva de tijolos cerâmicos em diferentes condições de secagem conforme reportado na literatura.

Material	$h_m$ (m/s)							Source
	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C	110 °C	
Tijolo maciço 	----	$1.65 \times 10^{-6}$	----	$1.35 \times 10^{-6}$	----	----	$1.82 \times 10^{-6}$	Nascimento (2002)
Tijolo maciço 	----	$1.65 \times 10^{-6}$	----	$1.35 \times 10^{-6}$	----	----	$1.82 \times 10^{-6}$	Brito (2016)
Tijolo furado 	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	----	Silva (2009)
Tijolo furado 	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	$1 \times 10^{+30}$	----	Santos et al. (2022)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados extraídos dos trabalhos citados.

As Tabelas 1 e 2 resumem alguns valores dos coeficientes de transporte obtidos por Silva (2009) e Santos *et al.* (2022), em pesquisa experimental com tijolos cerâmicos vazados industriais secos em diferentes temperaturas, e os valores experimentais obtidos por Brito (2016) e Nascimento (2002), para tijolo maciço de argila (formato de paralelepípedo), também obtidos em diferentes temperaturas. Porém, deve-se mencionar que a segunda lei da difusão de Fick foi utilizada em todos os trabalhos citados.

Conforme Brito (2016, p. 94), “o coeficiente de difusão de massa tende a aumentar com a temperatura, teor de umidade inicial e tipo de material usado. Quanto maior a temperatura maior o coeficiente de difusão de massa”. Já a determinação do coeficiente de difusão de massa, segundo a autora, é um tanto complexa, uma vez que depende de parâmetros como: condições do ar de secagem, forma geométrica, natureza do material utilizado para confecção do tijolo, tipo de modelamento matemático do fenômeno físico e as condições de contorno adotadas.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata dos laboratórios, materiais utilizados na pesquisa, suas aquisições, equipamentos, métodos experimentais e modelo matemático empregados, descrevendo os processos de preparação e caracterização dos materiais, bem como os equipamentos, procedimentos e métodos utilizados em cada etapa.

#### 3.1 Etapas da pesquisa

A presente pesquisa foi dividida em quatro etapas: estudo teórico ou revisão bibliográfica, estudos experimentais, modelamento matemático e simulação computacional e, análise e discussão dos resultados.

##### 3.1.1 Estudo teórico e revisão bibliográfica

Nesta etapa realizou-se um aprofundamento dos estudos nos referenciais teóricos e no problema de pesquisa, através de uma revisão bibliográfica. Também foi feito um desenho metodológico do estudo, principalmente no que tange ao planejamento experimental, coleta e análise de dados.

Durante a pesquisa bibliográfica, foram consultados:

- 1) Bancos de dissertações e teses da UFCG e do IFPI;
- 2) Portal de periódicos da CAPES;
- 3) Google Acadêmico;
- 4) Livros técnicos sobre os fundamentos científicos relacionados à cerâmica e à física presente nos modelos matemáticos de secagem (transferência de calor e massa);
- 5) Normas técnicas referentes à preparação das massas, aos equipamentos e às condições para realização dos ensaios experimentais.

Em seguida, verificou-se a disponibilidade dos materiais (loais para aquisição) e dos equipamentos necessários para a realização de ensaios e para a extrusão dos corpos de prova.

##### 3.1.2 Estudos experimentais

Os estudos experimentais objetivaram inicialmente a caracterização dos materiais (argila e resíduo de diatomita), assim como a obtenção de dados numéricos para caracterização e avaliação dos corpos de prova de tijolos vazados, com base nas normas técnicas vigentes. Para tanto, fez-se uso das seguintes técnicas: caracterização da matéria-prima por granulometria;

análises químicas através da difração de raios X (DRX) e da fluorescência de raios X (FRX); análises térmicas através da análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG).

Posteriormente à caracterização da matéria-prima, foram confeccionados os corpos de prova e estudado os processos de secagem e queima. Para os estudos experimentais, fez-se uso de equipamentos do acervo de materiais laboratoriais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e do Instituto Federal do Piauí, campus Teresina (IFPI Teresina). Durante a caracterização dos materiais e os estudos experimentais, foram utilizados equipamentos e/ou ambientes dos seguintes laboratórios:

- a) Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP/UFCG);
- b) Laboratório do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA/UFCG);
- c) Laboratório de Ciências e Tecnologia de Materiais (LTM/UFCG);
- d) Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia (UFCG);
- e) Laboratório de Agregados, Concretos e Argamassas (LSCA/UFCG);
- f) Laboratório de Caracterização de Materiais/CV1, da Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UFCG;
- g) Laboratório de Engenharia de Materiais ligado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI Teresina).

### 3.1.3 Simulação Computacional

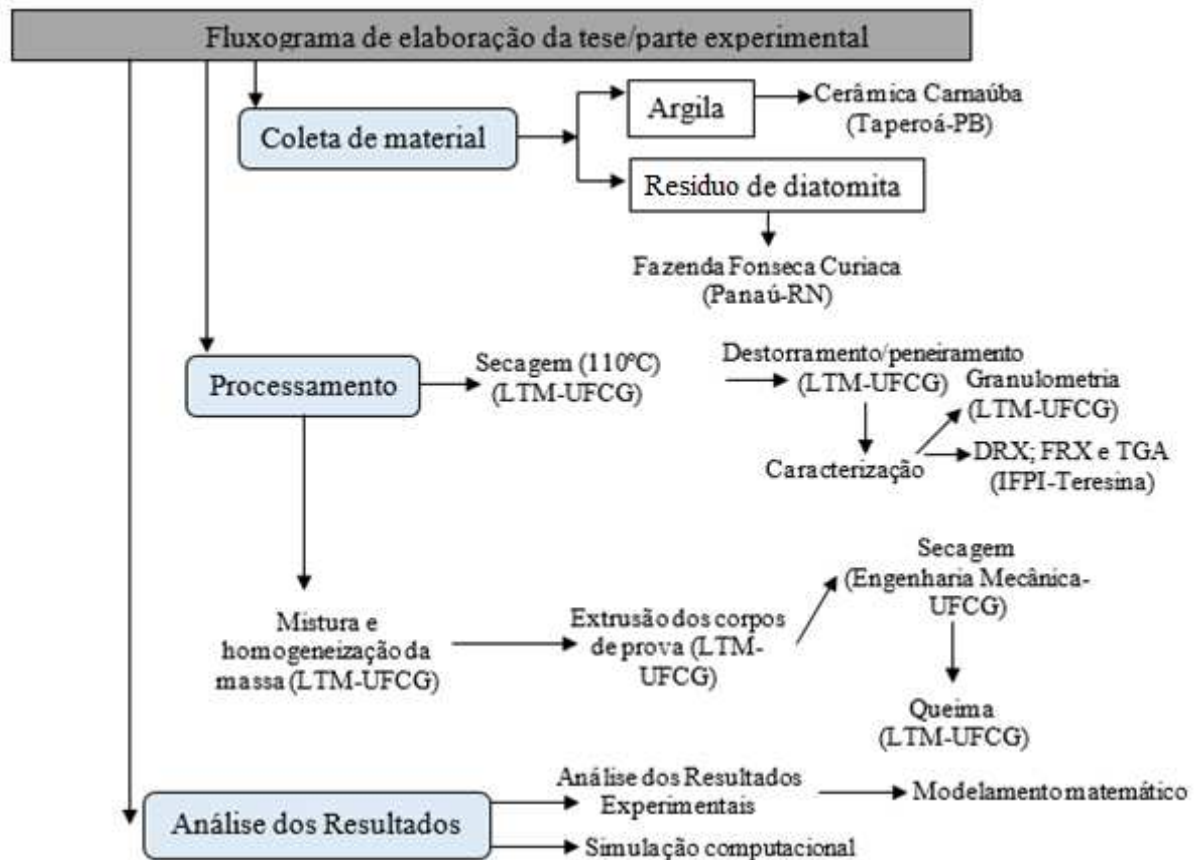
A Simulação Computacional foi realizada através do Wolfram Mathematica e teve como objetivo modelar e simular o processo de secagem possibilitando verificar a concordância em relação aos dados experimentais e obtenção dos coeficientes de transporte.

### 3.1.4 Análise e discussão dos resultados

A última esta etapa da pesquisa consistiu em sistematizar e discutir os dados coletados na etapa 2 a fim de consolidar a tese. A Figura 14 mostra um fluxograma ilustrativo do desenvolvimento da pesquisa.



**Figura 14** – Fluxograma.



Fonte: O autor (2023).

Ensaio de caracterização: para análises dos dados referentes ao ensaio granulométrico realizados por peneiramento, fez-se uso do Excel, pertencente ao pacote do Office 365, e, para a análise da granulometria a laser, utilizou-se o Origin.

Secagem: para análise dos dados referentes à secagem dos corpos de prova fez-se uso do Software Grapher.

A Simulação Computacional foi feita através do Wolfram Mathemática.

## 3.2 Metodologia Experimental

### 3.2.1 Materiais e equipamentos

#### Argila

A argila foi obtida por intermédio da empresa Cerâmica Camaúba, localizada na zona rural da cidade de Taperoá-PB, a 106 km de Campina Grande. Ela foi caracterizada pelo ensaio

de análise granulométrica, análises térmicas, análises químicas por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios-X (DRX).

### **Resíduo de diatomita**

O resíduo de diatomita foi doado pela empresa de mineração Mirasa Ltda., situada na Fazenda Fonseca e Curicaca, no Povoado Punau em Rio do Fogo, no estado do Rio Grande do Norte, a uma distância de aproximadamente 358 km de Campina Grande. A empresa trabalha com a extração da diatomita e o seu processamento, o que resulta na consequente produção de resíduos não utilizáveis no setor. A Figura 15 mostra um depósito de diatomita bruta passando pelo processo de secagem natural antes de seguir para o processamento.

**Figura 15** – Estoque de diatomita bruta, em Rio do Fogo-RN.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Obtidos os materiais para a pesquisa, estes foram submetidos aos ensaios de caracterização para determinação da granulometria, da plasticidade, das características térmicas e da composição química e mineralógica.

A umidade higroscópica do resíduo de diatomita foi determinada por meio do ensaio laboratorial no Laboratório de Solos, Agregados, Concretos e Argamassas (LSCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), nos dias 15 e 16 de março de 2022. A etapa de análise granulométrica por meio do peneiramento ocorreu no dia 16 de março de 2022, também no LSCA/UFCG, e seguiu as instruções da NBR 7181 (ABNT, 2016).

Na etapa de peneiramento grosso foram inseridos 1000 g de resíduo de diatomita no conjunto de peneiras indicadas na norma NBR 7181 (ABNT, 2016), sendo que 2,24 g ficaram retidos na peneira de 4,8 mm e 9,86 g ficaram retidos na peneira de 2,0 mm. O material retido na peneira de 0,075 mm foi levado à estufa conforme recomenda a norma e, a seguir, passou pelo peneiramento fino. Tendo em vista a finura do resíduo, foi preferível, em vez de realizar um ensaio de sedimentação, efetuar a análise granulométrica empregando a técnica de difração de laser, o que também foi feito com a argila.

Para as análises térmicas, foram empregados 4,582 mg do resíduo de diatomita. Antes do envio do material para análise ele passou por quarteamento manual e em seguida pela peneira de malha #200 (abertura de 0,075 mm). O ensaio foi realizado em um aparelho com tipo de detector TGA-51H, no Laboratório de Ciências de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, na cidade de Teresina (IFPI Teresina), sendo empregadas uma atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 10°C/min, variação de temperatura de 1000°C e cadinho de platina.

### **Equipamentos utilizados na pesquisa**

Antes de passar pela peneira, tanto o resíduo de diatomita quanto a argila precisaram passar pelo processo de secagem para retirada de água (umidade), o que foi feito em uma estufa com circulação de ar fabricada pela Tecnal, modelo RE-394/3, pertencente ao LTM/UFCEG. Após a secagem, o resíduo foi submetido ao peneiramento mecânico, em um peneirador fabricado pela Contenco, modelo I-3007 e uma peneira de malha 80 (#80). A argila precisou passar primeiramente por moinho martelo da Servitech, equipamento também pertencente ao LTM/UFCEG.

Na Figura 16(a) podemos observar a balança utilizada nas medições de massa das amostras durante o estudo da secagem. Ela possui um aparato que a isola do meio exterior, necessidade que surge devido a sua precisão de medição (erro = 0,001 g). A balança em questão, assim como o termômetro Figura 16(b), o paquímetro Figura 16(c) e o termohigrômetro Figura 16(d), são instrumentos pertencentes ao Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos (Engenharia Mecânica/UFCEG).

**Figura 16** – Balança, termômetro, paquímetro e termo-higrômetro.



Fonte: Acervo do autor (2023).

A Figura 17 mostra a extrusora utilizada nas extrusões dos corpos de prova, equipamento pertencente ao LTM/UFMG.

**Figura 17** – Extrusora.



Fonte: Acervo do autor (2023).

### 3.2.2 Preparação da massa e confecção dos corpos de prova

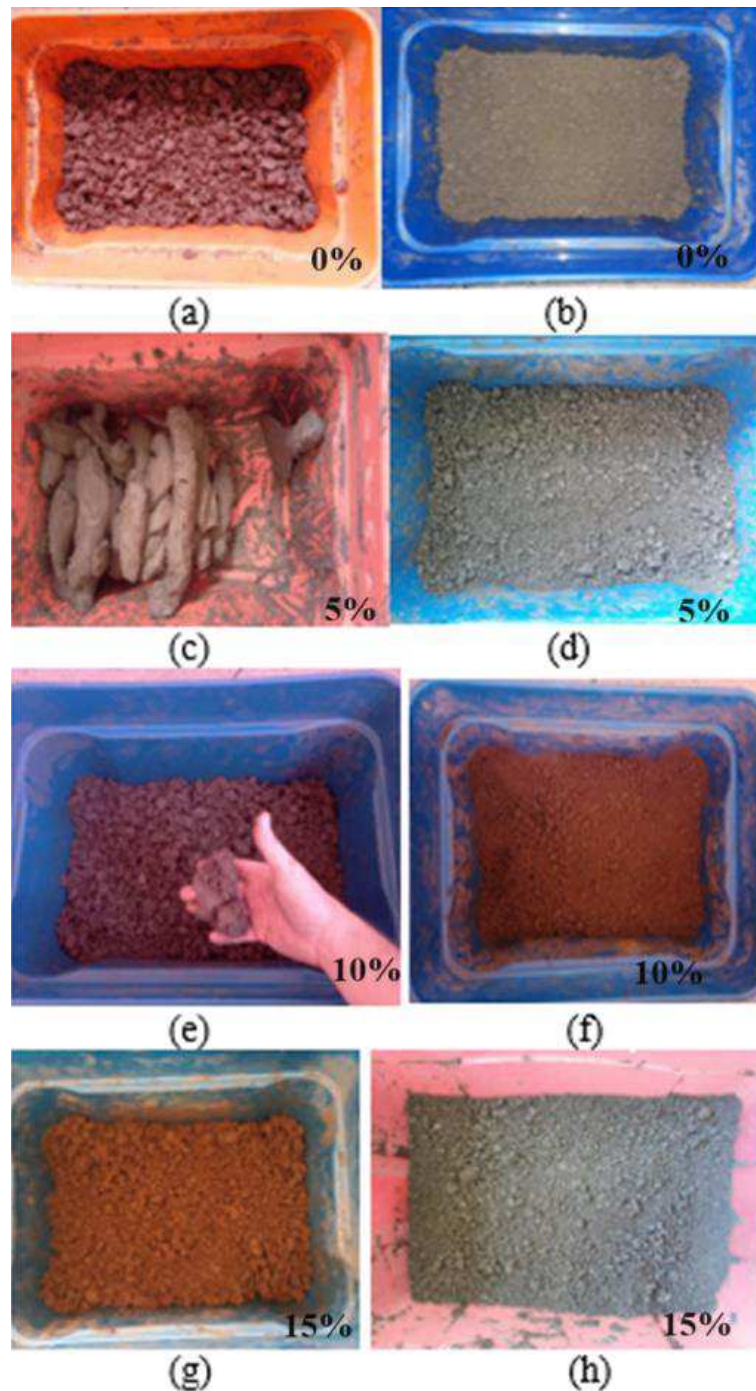
A preparação da massa para a confecção dos corpos de prova em escala reduzida foi realizada no LTM/UFMG.



Após pesagem utilizando-se uma balança do tipo AC10K (erro = 1 g), a argila e o resíduo foram misturados a seco manualmente durante 10 min. Em sequência à mistura dos materiais, mediu-se a massa de água adicionada, fazendo-se então nova mistura manual.

O processo de mistura dos materiais que compõem a massa cerâmica foi feito em caixas plásticas, como as mostradas na Figura 18.

**Figura 18** – Misturas argila-resíduo.



Fonte: Acervo do autor (2023).

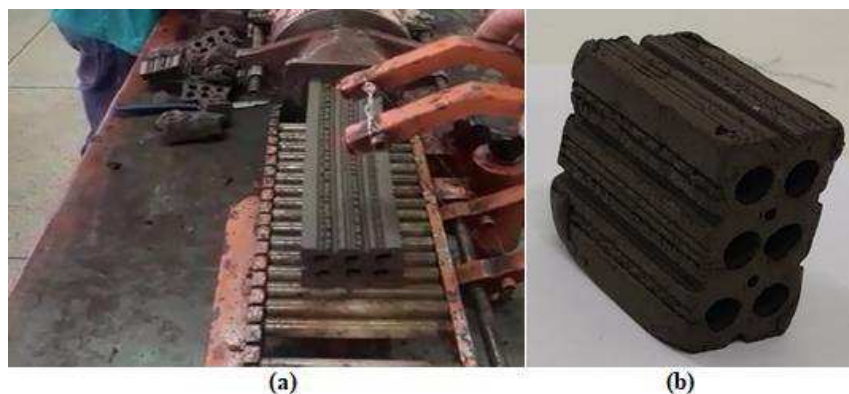
Uma vez preparada, a massa foi deixada em repouso na caixa por pelo menos três dias antes da extrusão dos corpos de prova. Foram realizadas duas extrusões para cada composição, sendo que na primeira foram utilizados 10 kg de argila com a porcentagem adequada de resíduo de diatomita (aproximadamente 8 kg da massa cerâmica ficou retido na boquilha - massa necessária para a extrusora iniciar o trabalho). Na Figura 18, as imagens (a), (c), (e) e (g) correspondem às massas preparadas para a primeira extrusão de cada composição, 0%, 5%, 10% e 15%, respectivamente, e as imagens (b), (d), (f) e (h) correspondem às massas da segunda extrusão, com a mesma ordem anterior das composições, respectivamente.

A primeira extrusão objetivou a confecção de amostras para o estudo da secagem e testes iniciais da temperatura de queima e da taxa de aquecimento. Após o estudo da secagem, foi realizada a segunda extrusão para cada composição, mas desta vez foram utilizados 15 kg de argila (necessitava-se de um número maior de amostras) e as respectivas porcentagens de resíduo. As amostras confeccionadas foram empregadas no estudo da queima e em ensaios físicos. Para as oito extrusões, foram necessários 100 kg de argila e 7,5 kg de resíduo de diatomita.

Os corpos de prova foram confeccionados/extrudados na extrusora Verdés, fabricada em 1999 com número de série 0023, equipamento pertencente ao LTM/UFMG. Para a confecção dos corpos de prova foi necessária a presença de pelo menos duas pessoas, sendo uma delas responsável pela manipulação do equipamento (extrusora), e a outra responsável por realizar os cortes, separando as amostras, retirando-as da esteira e embalando-as em dois sacos plásticos para evitar perda de umidade.

A Figura 19(a) corresponde a um registro da extrusão de corpos de prova e a Figura 19(b) mostra um dos corpos de prova usados no estudo da secagem.

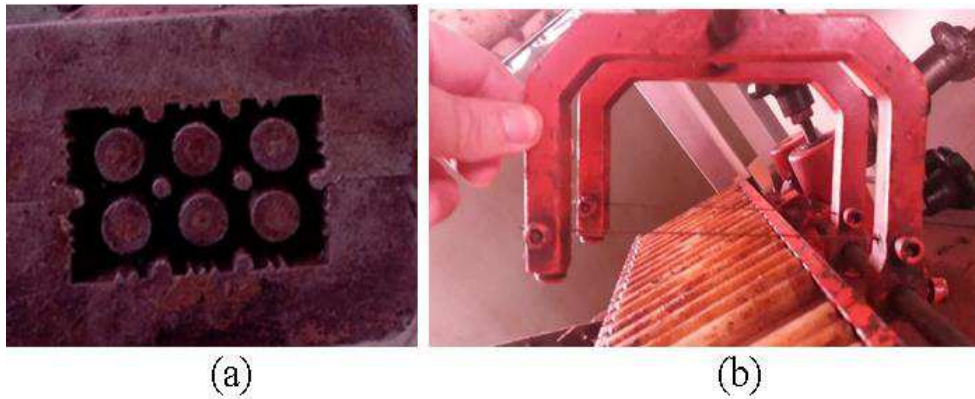
**Figura 19** – Extrusão de corpos de prova.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Para realizar o corte das peças sem danificá-las, foi utilizada uma corda de aço muito fina (corda mi de menor diâmetro, de violão). A Figura 20(a) mostra a boquilha utilizada para extrusão dos corpos de prova e a Figura 20(b) apresenta a peça utilizada no corte das amostras.

**Figura 20** – Boquilha de 6 furos e peça usada no corte das amostras.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Após embalados, os corpos de prova foram levados do LTM/UFCG para o Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (LETF/UFCG), onde foram feitas as aferições de sua massa e dimensões e, em seguida, eles foram levados a estufa para secagem.

Em intervalos de tempo pré-estabelecidos, inicialmente de 5 minutos, passando a intervalos de 10 minutos e, posteriormente, a intervalos de 30 minutos, as amostras foram retiradas da estufa, sendo então aferida a sua temperatura juntamente com suas dimensões e massa e os valores registrados em uma planilha juntamente com a umidade do ar externo a estufa. Esses procedimentos tiveram duração média de 1,5 min e foram repetidos até que a massa de equilíbrio fosse obtida.

Finalizada a secagem, cada amostra permaneceu intacta na estufa por mais 24 horas, com o nível de temperatura de ensaio, para que a massa de equilíbrio ( $m_e$ ) fosse medida e, em seguida, a estufa era reprogramada para a temperatura de 105°C para que as amostras permanecessem por mais 24 horas para medida de sua massa seca.

Os procedimentos para obtenção da massa de equilíbrio e massa de seco foram adotados tomando-se como referência Nascimento (2002), que justifica as escolhas com base na não-existência de norma específica e na obtenção de melhores resultados experimentais.

### 3.2.3 Cálculos auxiliares com os dados de secagem

Uma vez concluída a secagem de cada amostra, a partir das dimensões e massa de cada uma, foram realizados cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros importantes na obtenção de resultados gráficos para a discussão dos resultados.

#### **Teor de umidade adimensional**

O teor de umidade adimensional foi obtido para cada amostra e em todos os intervalos de tempo de medição:

$$M_{ad} = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e}, \quad (3.1)$$

em que:

- $M_{ad}$  é o teor de umidade adimensional;
- $M(t)$  é o teor de umidade no tempo  $t$ ;
- $M_0$  é o teor de de umidade inicial em base seca;
- $M_e$  é o teor de de umidade de equilíbrio em base seca;

#### **Temperatura adimensional ( $\theta_{adm}$ )**

A temperatura adimensional de cada amostra e em cada tempo de secagem foi obtida com base na temperatura de um dos seus vértices, conforme a expressão:

$$\theta_{adm} = \frac{\theta - \theta_e}{\theta_0 - \theta_e}, \quad (3.2)$$

em que:

- $\theta_{adm}$  é a temperatura adimensional;
- $\theta$  é a temperatura no instante  $t$ ;
- $\theta_0$  é a temperatura inicial da amostra;
- $\theta_e$  é a temperatura de equilíbrio.

#### **Retração volumétrica de secagem**

Com as dimensões geométricas de comprimento, largura e altura das amostras, foram determinadas as respectivas retrações volumétricas de secagem, conforme a equação:

$$R_s = \frac{V}{V_0} \quad (3.3)$$

em que:



- $R_s$  é a retração volumétrica em porcentagem após a secagem;
- $V$  é o volume da amostra após a secagem;
- $V_0$  é o volume inicial da amostra anterior a secagem.

### Volume sólido da amostra ( $V_s$ )

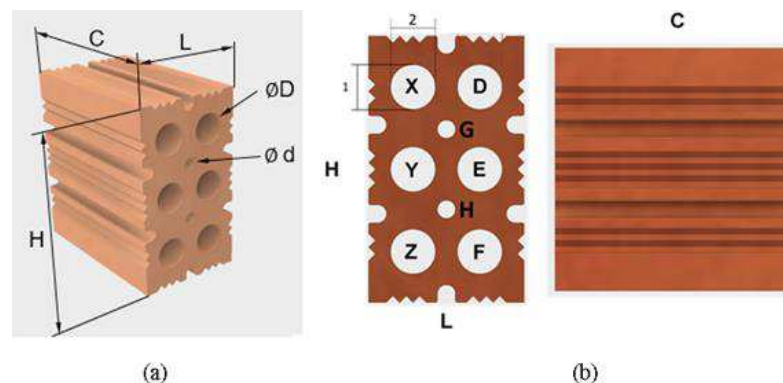
O cálculo do volume de cada amostra tomada para o estudo das curvas de secagem, em cada intervalo de tempo de medição, foi realizado com base na seguinte expressão:

$$V_s = C * L * H - 6 * \pi \left( \frac{\bar{D}}{2} \right)^2 * C - 2 * \pi \left( \frac{\bar{d}}{2} \right)^2 * C, \quad (3.4)$$

em que  $\bar{D}$  e  $\bar{d}$  são os diâmetros médios de um dos furos maiores e de um dos menores, respectivamente.

A Figura 21 mostra uma representação do tijolo com destaque para suas dimensões e furos.

**Figura 21** – Dimensões do tijolo.



Fonte: O autor (2023).

Durante o estudo experimental da secagem, as medidas precisavam ser aferidas rapidamente. Para otimizar o tempo de medição, na parte experimental da secagem, foram tomadas apenas duas medidas de diâmetro de um mesmo círculo de maior raio. O diâmetro menor foi tomado como sendo 4 mm, valor real do diâmetro destes furos na boquilha (desprezou-se a contração deles).

Durante a secagem das amostras para o estudo da queima, não havia a preocupação com o tempo de medição. Assim sendo, efetuaram-se duas medições para o diâmetro de cada um dos círculos X, Y, Z, D, E, F, G e H. Neste caso, o volume total de cada amostra foi dado pela expressão:

$$V_s = C * L * H - 6 * \pi \left[ \left( \frac{D_X}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_Y}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_Z}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_D}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_E}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_F}{2} \right)^2 \right] * C - 2 * \pi \left[ \left( \frac{d_G}{2} \right)^2 + \left( \frac{d_H}{2} \right)^2 \right] * C, \quad (3.5)$$

em que os sub-índices identificam os diâmetros considerados em cada termo com os mostrados na figura.

### Índice de absorção de d'água (AA)

De acordo com a NBR 1570.2 (ABNT, 2017), o índice de absorção d'água (AA) de cada corpo de prova é determinado pela equação:

$$AA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} * 100 \quad (3.6)$$

onde  $m_u$  e  $m_s$  representam a massa úmida e a massa seca de cada amostra, respectivamente, expressas em gramas (g).

### Porosidade Aparente (PA)

De acordo com Akiyoshi *et al.* (2001), a porosidade aparente (PA) de cada corpo de prova pode ser obtida através da seguinte equação:

$$PA(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} * 100 \quad (3.7)$$

onde  $m_i$  é a massa imersa,  $m_u$  é a massa úmida e  $m_s$  é a massa seca, medidas em gramas (g).

### 3.2.4 Secagem em estufa

Para a caracterização das curvas de secagem, considerando-se cada percentual de resíduo adicionado e as temperaturas empregadas, usou-se como base o planejamento experimental descrito na Tabela 3.

**Tabela 3** – Planejamento experimental de secagem.

PERCENTUAL DE RESÍDUO	TEMPERATURA DE SECAGEM		
	0%	50°C	70°C
5%	50°C	70°C	90°C
10%	50°C	70°C	90°C
15%	50°C	70°C	90°C

Fonte: O autor (2023).

Para estudo das curvas de secagem, foram realizadas secagens de 12 amostras nas condições estabelecidas, considerando quatro percentuais de resíduo e três temperaturas de secagem. Uma vez decididas as temperaturas de queima e a taxa de aquecimento, foram realizadas novas secagens seguindo o planejamento mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4** – Planejamento experimental de secagem para queima, amostras com resíduo.

PERCENTUAL DE RESÍDUO (%)	TEMPERATURA DE SECAGEM (°C)	TEMPERATURA DE QUEIMA (°C)
0	50	800
0	50	1000
0	70	900
0	90	800
0	90	1000
5	50	800
5	50	1000
5	70	900
5	90	800
5	90	1000
10	70	900
15	50	800
15	50	1000
15	70	900
15	90	800
15	90	1000

Fonte: O autor (2023).

As amostras com 0% de resíduo foram tomadas como grupo de controle, permitindo comparar os efeitos nas variáveis de saída ocasionados pela adição do resíduo à argila e pela alteração da temperatura de secagem.

O planejamento mostrado na Tabela 4 toma como variáveis de entrada o percentual de resíduo empregado e as temperaturas de secagem e de queima, e adota como variáveis de resposta a resistência à compressão, o índice de absorção de água e a porosidade aparente.

A Tabela 5 mostra as variáveis estudadas e seus valores de referência citados pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

**Tabela 5** – Variáveis de saída estudadas e valores de referência.

VÁRIÁVEL	VALORES DE REFERÊNCIA
Resistência à compressão individual ( $f_b$ )	Maior ou igual a 1,5 MPa
Índice de absorção de água (AA)	$8\% \leq AA \leq 25\%$
Porosidade aparente (PA)	-

Fonte: O autor (2023).

As amostras foram nomeadas com base no seguinte modelo de designação:

$$Ax\%Ry^{\circ}Sz^{\circ}Q, \quad (*)$$

em que:

A → designa a amostra;

x → designa o percentual de resíduo na amostra (percentual de argila =  $100\% - x$ );

y → designa a temperatura de secagem, em graus Celsius;

z → designa a temperatura de queima, em graus Celsius.

### 3.2.5 A queima

A queima foi realizada em dois fornos do LTM/UFCG. Para realização da queima eram inseridas no forno entre 8 e 10 corpos de prova por vez. A taxa de aquecimento usada foi de  $2^{\circ}C/min$ . Após atingido o patamar, o forno iniciava o processo de resfriamento até cerca de  $300^{\circ}C$ , quando então ele era desligado e as amostras eram retiradas no dia seguinte.

A Figura 22 mostra um dos fornos com algumas amostras submetidas à queima.

**Figura 22** – Forno usado na queima.

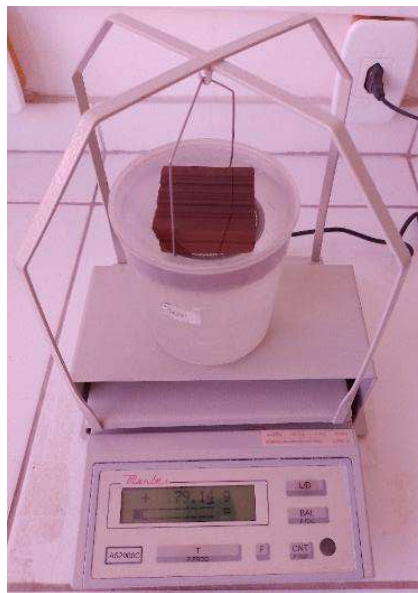
Fonte: Acervo do autor (2023).

O forno mostrado na Figura 22 é do modelo Quimis e possui temperatura e taxa de aquecimento ajustáveis. Após programar a temperatura e a taxa de aquecimento, o forno era ligado e iniciava-se a queima dos corpos de prova.

### 3.2.6 Ensaio de absorção de água (AA)

Após a queima, os corpos de prova destinados ao ensaio de absorção de água tiveram suas massas aferidas e foram imersos por 24h em água destilada, conforme indica a NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Passado este período, eles foram removidos do recipiente onde estavam imersos, a água em excesso retirada por meio de um pano úmido, pesados para aferição da massa úmida e levados a uma balança na qual estava instalado o aparato de Arquimedes, para obtenção da massa imersa (Figura 23).

**Figura 23** – Aparato de Arquimedes.



Fonte: Acervo do autor (2023).

Com os dados obtidos foi possível determinar tanto a absorção de água (AA) quanto a porosidade aparente (PA) dos corpos de prova.

### 3.2.7 Ensaio de Resistência a Compressão (RC)

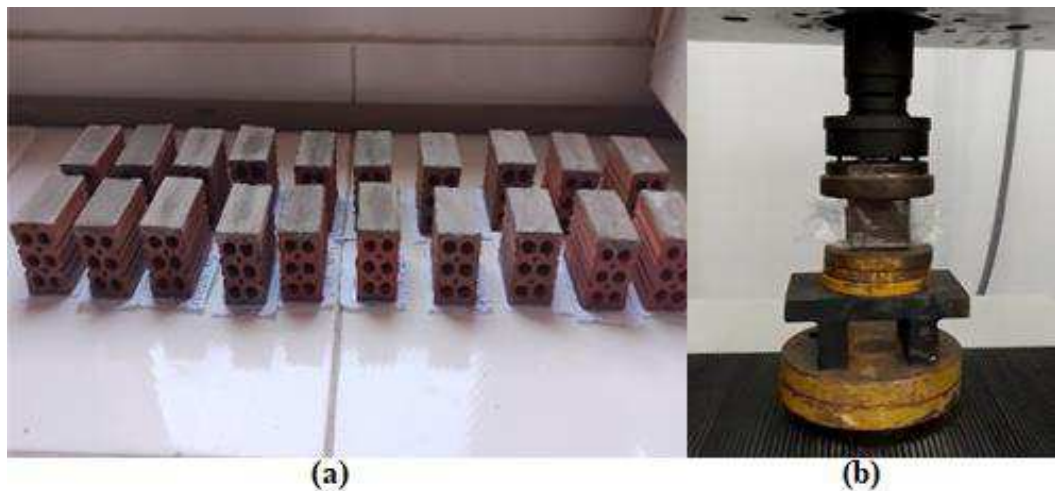
Os ensaios foram realizados seguindo as orientações contidas na NBR 15270-2 (ABNT, 2017). Primeiramente foram retiradas as rebarbas e efetuado o capeamento dos corpos de prova. Após isso, as amostras foram expostas ao ambiente e submetidas a secagem por um período de

24 h. Seguidamente, elas foram imersas em um recipiente com água destilada, permanecendo por 6h até serem retiradas e levadas para a máquina de ensaio.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais/CV1, sala de ensaios mecânicos, do departamento de Engenharia de Materiais da UFCG, campus Campina Grande, com o auxílio de uma máquina de ensaios mecânicos da AUTOGRAPH, modelo AB-IS 100 kN.

Na Figura 24(a) pode-se observar amostras já capeadas passando pelo processo de secagem natural. A Figura 24(b) mostra a parte da máquina de resistência à compressão onde está inserido um dos corpos de prova em ensaio.

**Figura 24** – Capeamento e teste de resistência a compressão.



Fonte: Acervo do autor (2023).

O corpo de prova foi colocado dentro de um saco plástico (Figura 24(b)) para evitar, que parte da amostra se despedaçasse e espalhasse pelo ambiente.

### 3.3 Metodologia Teórica

#### 3.3.1 O problema físico e a geometria

Para descrever a perda de umidade em materiais úmidos porosos, o modelo de Fick tem sido comumente utilizado em muitos estudos, por décadas. Neste modelo é assumido que a perda de umidade ocorre apenas por difusão. De acordo com a primeira lei de Fick, o fluxo da difusão ( $J$ ) é diretamente proporcional ao gradiente de concentração medido normalmente a esta seção. Isto é:

$$J = -D \frac{\partial M}{\partial y} \quad (3.8)$$

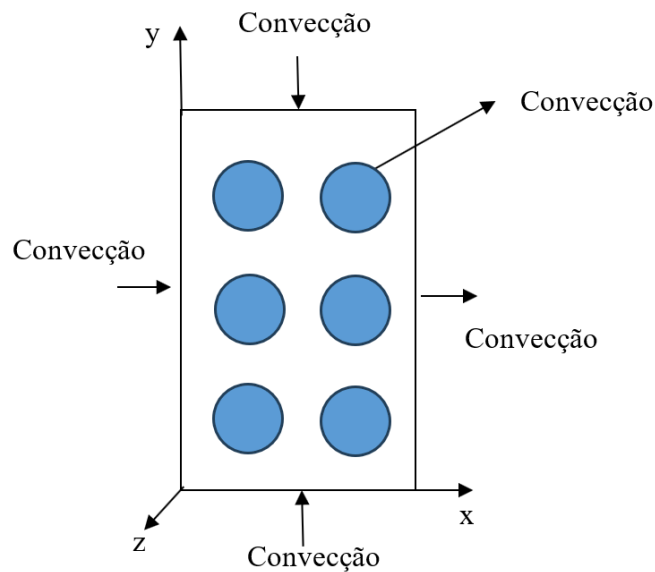
onde  $D$  (medido em  $m^2/s$ ) é o coeficiente de difusão e  $\partial M$  é o diferencial de concentração, onde  $M$  representa o teor de umidade e,  $\partial y$  é o diferencial de distância. O sinal de menos deve-se ao fato do fluxo mássico ser contrário ao gradiente de concentração.

Em complemento, a segunda Lei de Fick tem sido muito utilizada. Essa lei estabelece que a difusão de umidade se dá em termos de gradiente de concentração no sólido.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.2)$$

Contudo, em muitas situações, uma análise mais simples pode ser usada, como por exemplo, a análise concentrada. Neste tipo de análise supõe-se que a umidade no interior do material se distribui uniformemente, contudo varia com o tempo ao longo do processo de secagem. A Figura 25 ilustra uma esquemática da geometria do tijolo cerâmico avaliado nesta pesquisa, indicando suas condições de contorno.

**Figura 25** – Condições de contorno do problema físico.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 25, a convecção térmica e mássica predomina nas superfícies externas e nas superfícies em contato com o fluido circundante que atravessa os furos (os seis orifícios mostrados) do corpo cerâmico. Os dois furos menores mostrados na Figura 21 não estão representados na Figura 25, pois possuem diâmetro muito pequeno e por isso foram desconsiderados na análise.

### 3.3.2 O modelo matemático concentrado

Para modelar o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados com seis furos, baseando-se numa análise concentrada, as seguintes considerações foram feitas:

- a) O sólido cerâmico é homogêneo e isotrópico;
- b) Propriedades termofísicas constantes durante todo o processo;
- c) O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- d) O fenómeno de secagem ocorre por condução térmica e mássica no interior do sólido e por convecção térmica, mássica e evaporação, na superfície dele;
- e) Geração interna de massa desprezível;
- f) O sólido tem suas dimensões constantes ao longo do processo;
- g) A distribuição de umidade e temperatura no interior do sólido são uniformes;
- h) Os coeficientes de transporte convectivo e difusivo foram considerados constantes.

As considerações feitas anteriormente proporcionam uma abordagem eficaz para compreender e otimizar muitos processos térmicos, como é o caso em questão, que envolve a secagem de tijolos cerâmicos vazados. É importante frisar que as simplificações/extrapolações feitas, embora não reproduzam perfeitamente os resultados experimentais, não devem levar a divergências significativas entre o modelo proposto e o experimental. Uma dessas simplificações, as variações dimensionais do corpo cerâmico, foram estudadas nos experimentos, embora não tenham sido levados em conta no modelamento teórico.

#### **Análise da transferência de massa**

Para modelar a transferência de massa no tijolo cerâmico, a seguinte equação para o balanço de massa foi usada (LIMA *et al.*, 2021):

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_{m_1} S_1 (\bar{M} - \bar{M}_e) - h_{m_2} S_2 (\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (3.9)$$

em que  $\bar{M}_e$  é o teor de umidade de equilíbrio em base seca (kg/kg),  $V$  é o volume do tijolo e  $h_{m_1}$  e  $h_{m_2}$  são os coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies externas (placas verticais e horizontais) e internas (referentes aos furos) do tijolo.

Usando a condição inicial  $M(t = 0) = M_0$ , separando-se as variáveis da Equação (3.9) e integrando-a desde a condição inicial, tem-se como resultado:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e)}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e)} = \text{Exp} \left[ \left( \frac{-h_{m_1} S_1 - h_{m_2} S_2}{V} \right) t \right] \quad (3.10)$$



em que  $S_1$  e  $S_2$  são as áreas superficiais externa e interna do tijolo, respectivamente.

### Propriedades do ar e da água

O calor específico, viscosidade e condutividade térmica do ar (PAKOWSKI *et al.*, 1991, JUMAH e MUJUMDAR, 1996), densidade do ar, temperatura absoluta, constante universal do ar, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e pressão atmosférica local (ROSSI, 1987), são determinadas por:

$$c_{p_a} = 1,00926 \times 10^3 - 4,04033 \times 10^{-2}T + 6,17596 \times T^2 - 4,0972 \times 10^{-7}T^3 \text{ (J/kg. K)} \quad (3.11),$$

$$k_a = 2,425 \times 10^{-2} + 7,889 \times 10^{-5}T - 1,790 \times 10^{-8}T^2 - 8,570 \times 10^{-12}T^3 \text{ (W/m. K)} \quad (3.12),$$

$$\mu_a = 1,691 \times 10^{-5} + 4,984 \times 10^{-8}T - 3,187 \times 10^{-11}T^2 + 1,3196 \times 10^{-14}T^3 \text{ (Pa. s)} \quad (3.13),$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm} \overline{MM}_a}{R_a T_{abs}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.14),$$

$$T_{abs} = T_a + 273,15 \text{ (K)} \quad (3.15),$$

$$R_a = 8314,34 \left( \frac{\text{J}}{\text{kmol. K}} \right) \quad (3.16),$$

$$UR = \frac{P_{atm} x_a}{(x_a + 0,622) P_{vs}} \quad (3.17),$$

$$P_{vs} = 22105649,25 \text{ Exp } \{ [-27405,53 + 97,5413T_{abs} - 0,146244T_{abs}^2 + 0,12558 \times 10^{-3}T_{abs}^3 - 0,48502 \times 10^{-7}T_{abs}^4] / [4,34903T_{abs} - 0,39381 \times 10^{-2}T_{abs}^2] \} \text{ (Pa)} \quad (3.18),$$

$$P_{atm} = 101325 \text{ (Pa)} \quad (3.19)$$

Nestas equações,  $x_a$  é a umidade absoluta do ar, UR é a umidade relativa do ar,  $\overline{MM}_a = 28,966 \text{ kg/kmol}$  é o peso molecular do gás,  $R_a$  é a constante universal dos gases,  $T_{abs}$  é a temperatura absoluta em Kelvin,  $P_{vs}$  é a pressão de saturação de vapor e  $P_{atm}$  a pressão atmosférica, ambas as pressões medidas em Pascal.

### 3.3.3 Estimativa dos coeficientes de transferência de calor e massa convectivos

Como a velocidade do ar de secagem no interior da estufa é muito baixa, o processo de secagem ocorre por convecção forçada em todas as faces externas do tijolo e por convecção natural nas paredes internas dos furos.

Na convecção forçada, a tendência de um sistema particular baseia-se matematicamente no número de Reynolds (Re), o qual é a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. Este parâmetro adimensional é definido como segue:

$$\text{Re}_{L_c} = \frac{\rho_a v_a L_c}{\mu_a}, \quad (3.20)$$

em que  $\rho_a$  é a massa específica do ar de secagem,  $v_a$  é a velocidade do ar de secagem,  $L_c$  é um comprimento característico (dependente da posição adotada no corpo de prova) e  $\mu_a$  é a viscosidade dinâmica do ar de secagem.

Na convecção natural, a tendência de um sistema particular baseia-se matematicamente, no número de Grashof (Gr), o qual consiste na razão entre o empuxo e as forças viscosas. Este parâmetro adimensional é dado como segue:

$$\text{Gr}_{L_c} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^2}{\nu^2} \quad (3.21)$$

em que  $g$  é a aceleração gravitacional ( $\text{m/s}^2$ ),  $\beta = \frac{1}{T_f}$  é o coeficiente de expansão térmica,  $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$  é a temperatura de película (K),  $L_c$  é o comprimento característico (m),  $T_s$  temperatura da placa (K),  $T_\infty$  é a temperatura do fluido (K),  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  é a viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

O produto do número de Grashof pelo número de Prandtl (Pr) é denominado número de Rayleigh (Ra). Assim, o número de Rayleigh é dado por:

$$\text{Ra}_{L_c} = \text{Gr}_{L_c} \text{Pr} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \text{Pr} \quad (3.22)$$

em que  $\text{Pr} = \frac{c_a \mu_a}{k_a}$ , ou ainda,  $\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}$ , em que  $\alpha = k/\rho c_p$  é a difusividade térmica.

As magnitudes relativas dos números de Grashof e Reynolds determina qual forma de convecção domina. Se  $\frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \gg 1$  convecção forçada pode ser desprezada, enquanto se  $\frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \ll 1$  convecção natural pode ser desprezada. Para outras situações, tanto a convecção forçada quanto a convecção natural, devem ser consideradas de forma combinada.

Quando se trabalha com convecção, o que vai informar a magnitude da transferência de calor por convecção é um número adimensional chamado Número de Nusselt. O número de Nusselt médio é da forma:

$$\overline{\text{Nu}} = \frac{\bar{h}_c L_c}{k_a} \quad (3.23)$$

Veja que uma vez que tenhamos o número de Nusselt médio, é possível determinar o coeficiente de transferência de calor convectivo ( $\bar{h}_c$ ). Por outro lado, dado o dado  $\bar{h}_c$ , pela

analogia Chilton-Colburn, é possível determinar o coeficiente de transferência de massa convectivo ( $\bar{h}_m$ ).

Observando a Figura 25, pode-se verificar que o tijolo é composto por placas verticais e horizontais superior e inferior, todas em temperatura inferior à do ar de secagem (ar quente). Assim, baseando-se nessa geometria, pode-se determinar os números de Nusselt para transferência de calor e, assim, determinar os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos para cada situação física, de regime de escoamento.

### Convecção natural

Para convecção natural sobre as superfícies planas, as seguintes correlações empíricas para o número de Nusselt médio são dadas:

#### a) Placa vertical

Para as placas verticais laterais (frontal e traseira), o número de Nusselt médio é dado por,

$$\bar{Nu}_{pvt} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.24)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = R_y$  ( $R_y$  é a dimensão do corpo de prova na direção y), para as placas frontal e traseira e o subíndice pvt indica a placa vertical traseira.

Já para as placas verticais laterais, teremos,

$$\bar{Nu}_{pvl} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.25)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ) para as placas verticais laterais, o comprimento característico foi definido como,  $L_c = R_y - 3d$ . O parâmetro geométrico d representa o diâmetro dos furos e o subíndice pvl indica a placa vertical lateral.

#### b) Placa horizontal (Superfície superior)

Para a placa horizontal superior, o número de Nusselt médio é dado por,

$$\bar{Nu}_{phs} = 0,27(Gr_L Pr)^{1/4}, \quad 10^5 < Gr_L Pr < 10^{11} \quad (3.26)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = R_x R_z / (2R_x + 2R_z)$ , com  $R_x$  e  $R_z$  representado as dimensões do corpo de prova nas direções x e z, respectivamente e, o subíndice phs indicando a placa horizontal superior.

#### c) Placa horizontal (Superfície inferior)

No caso da placa horizontal inferior, há de se considerar as seguintes expressões para o número de Nusselt médio:

$$\overline{Nu}_{\text{phi}} = 0,54 (Gr_L Pr)^{1/4}, \quad 10^4 < Gr_L Pr < 10^7 \quad (3.27)$$

$$\overline{Nu}_{\text{phi}} = 0,15 (Gr_L Pr)^{1/3}, \quad 10^7 < Gr_L Pr < 10^{11} \quad (3.28)$$

onde, no cálculo do número de Rayleigh ( $Ra_L$ ),  $L_c = R_x R_z / (2R_x + 2R_z)$  e o subíndice phi indica a placa horizontal inferior.

d) Placa vertical (Furo)

Os furos foram modelados como tendo face quadrangular de lado igual ao diâmetro. Neste caso, para a placa horizontal com furo, o número de Nusselt médio pode ser determinado através da seguinte expressão,

$$\overline{Nu}_{\text{pvf}} = \left\{ \frac{576}{[Ra_L (L_c/R_z)]^2} + \frac{2,873}{[Ra_L (L_c/R_z)]^{0,5}} \right\}^{-0,5} \quad (3.29)$$

onde  $L_c = d$  e o subíndice pvf indica a placa vertical com furo.

e) Placa horizontal (Furo)

Semelhantemente ao caso anterior, para a placa horizontal com furo, o número de Nusselt médio pode ser obtido através da expressão,

$$\overline{Nu}_{\text{phf}} = \left\{ \frac{576}{[Ra_L (L_c/R_z)]^2} + \frac{2,873}{[Ra_L (L_c/R_z)]^{0,5}} \right\}^{-0,5} \quad (3.30)$$

onde  $L_c = d$  e o subíndice phf indica a placa horizontal com furo.

A partir das Equações (3.24) - (3.30), foram calculados os coeficientes de transferência de calor convectivo nas superfícies planas externa e do furo do tijolo, usando a seguinte equação:

$$\bar{h}_c = \frac{\overline{Nu} k_a}{L_c} \quad (3.31)$$

A partir da aplicação da Equação (3.31) a cada uma das superfícies plana externa e do furo do tijolo, foram obtidos os coeficientes de transferência de calor convectivo médios externo e interno, como segue:

$$h_{c1} = \bar{h}_{c \text{ ext}}|_{\text{cn}} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{c(\text{pvt})} + 2\bar{h}_{c(\text{pvl})} + \bar{h}_{c(\text{phs})} + \bar{h}_{c(\text{phi})})}{6} \right]_{\text{cn}} \quad (3.32)$$

$$h_{c2} = \bar{h}_{c \text{ int}}|_{\text{cn}} = \left[ \frac{(\bar{h}_{c(\text{pvf})} + \bar{h}_{c(\text{phf})})}{2} \right]_{\text{cn}} \quad (3.33)$$

onde o subscrito cn indica convecção natural.

Uma vez determinados os coeficientes de transferência de calor convectivos externo e interno, foram determinados os coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies planas externa e do furo do tijolo, usando a analogia de Chilton-Colburn entre transferência de calor e massa, como segue:

$$\bar{h}_m = \frac{\bar{h}_c D_{va} L_e^{1/3}}{k_a} \quad (3.34)$$

onde  $L_e = \frac{\alpha}{D_{va}} = \frac{k_a}{D_{va} \rho_a c_{p_a}}$  é o número de Lewis,  $\alpha = \frac{k_a}{\rho_a c_{p_a}}$  é a difusividade térmica do ar, e  $D_{va}$  é o coeficiente de difusão do vapor de água no ar, dado por:

$$D_{va} = 1,87 * 10^{-10} \frac{T(K)^{2,072}}{P(atm)} \quad (3.35)$$

Aplicada a Equação (3.34) a cada uma das superfícies planas externa e do furo do tijolo, obteve-se os coeficientes de transferência de massa convectivo médios externo e interno, como segue:

$$\bar{h}_{m \text{ ext}}|_{cn} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{m(pvt)} + 2\bar{h}_{m(pvl)} + \bar{h}_{m(php)} + \bar{h}_{m(phi)})}{6} \right]_{cn} \quad (3.36)$$

$$\bar{h}_{m \text{ int}}|_{cn} = \left[ \frac{(\bar{h}_{m(pvf)} + \bar{h}_{m(phf)})}{2} \right]_{cn} \quad (3.37)$$

Os coeficientes de transferência de calor e massa convectivos, determinados pelas Equações (3.32), (3.33), (3.36) e (3.37), são calculados com base nos parâmetros do ar de secagem. Esses parâmetros, presentes na Equação (3.9), dependem dos parâmetros do tijolo. Portanto, é necessário recalculá-los considerando as condições específicas do tijolo. Essa recalculação pode ser realizada ao considerar que a quantidade de umidade que saiu do tijolo é igual à quantidade de umidade que foi absorvida pelo ar de secagem. Matematicamente, isso pode ser expresso da seguinte forma:

$$h_{m1} \rho_s (M_0 - M_e) = \bar{h}_{m \text{ ext}}|_{cn} \rho_a (x_{bu} - x_0),$$

portanto,

$$h_{m1} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m \text{ ext}}|_{cn} \quad (3.38)$$

$$h_{m2} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m \text{ int}}|_{cn}, \quad (3.39)$$

em que  $\rho_a$  é a densidade do ar de secagem,  $\rho_s$  é a densidade do tijolo,  $x_0$  é a umidade absoluta do ar na temperatura do ar de secagem e  $x_{bu}$  é umidade absoluta do ar na temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, dada por:

$$x_{bu} = \left( \frac{P_{v(bu)}}{P_{atm} - P_{v(bu)}} \right) \left( \frac{\overline{MM}_v}{\overline{MM}_a} \right) \quad (3.40)$$

em que  $P_{v(bu)}$  é a pressão de vapor no ar na temperatura de bulbo úmido do ar (que é igual a pressão de vapor saturado da água na temperatura do bulbo úmido) e  $\overline{MM}_v$  é o peso molecular do vapor de água.

### Convecção forçada

Para convecção forçada sobre as paredes externas do tijolo, dependendo do regime de escoamento do ar, pode-se determinar o número de Nusselt como segue:

a) Escoamento laminar ( $Re < 5 * 10^5$ )

$$\overline{Nu}_i = 0,664 Re_{Lc}^{0,5} Pr^{1/3}, Pr > 0,6 \quad (3.41)$$

b) Escoamento turbulento ( $5 * 10^5 < Re < 1 * 10^7$ )

$$\overline{Nu}_i = 0,037 Re_{Lc}^{0,8} Pr^{1/3}, Pr > 0,6 \quad (3.42)$$

em que o subscrito i refere-se a pvt, pvl, phs e phi. No cálculo do número de Reynolds,  $L_c = R_y$  para as placas frontal e traseira;  $L_c = R_x R_z / (2R_x + 2R_z)$  para as placas superior e inferior, e  $L_c = R_y - 3d$ , para as placas laterais.

Já no furo, a condição continua sendo de convecção natural, sendo o número de Nusselt calculado como definido nas Equações (3.29) e (3.30). A partir das Equações (3.29), (3.30), (3.41) e (3.42), foram calculados os coeficientes de transferência de calor convectivo nas superfícies planas externas e do furo do tijolo, usando a Equação (3.31). A partir destes coeficientes, foram obtidos os coeficientes de transferência de calor convectivo médios externo e interno, como segue:

$$h_{c1} = \overline{h}_c \text{ ext} |_{cf} = \left[ \frac{(2\overline{h}_c(pvt) + 2\overline{h}_c(pvl) + \overline{h}_c(php) + \overline{h}_c(phi))}{6} \right]_{cf} \quad (3.43)$$

$$h_{c2} = \overline{h}_c \text{ int} |_{cf} = \left[ \frac{(\overline{h}_c(pvf) + \overline{h}_c(phf))}{2} \right]_{cf} \quad (3.44)$$

em que o subscrito cf indica convecção forçada.

Uma vez determinados os coeficientes de transferência de calor convectivos externo e interno, foram determinados os coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies planas externa e do furo do tijolo, usando a analogia de Chilton-Colburn entre transferência de calor e massa, como definido pela Equação (3.34). A partir destes coeficientes, foram obtidos os coeficientes de transferência de massa convectivo médios externo e interno, como segue:

$$\bar{h}_{m \text{ ext}}|_{cf} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{m(pvt)} + 2\bar{h}_{m(pvl)} + \bar{h}_{m(phs)} + \bar{h}_{m(phi)})}{6} \right]_{cf} \quad (3.45)$$

$$\bar{h}_{m \text{ int}}|_{cf} = \left[ \frac{(\bar{h}_{m(pvf)} + \bar{h}_{m(phf)})}{2} \right]_{cf} \quad (3.46)$$

Desde que os coeficientes de transferência de massa convectivos, determinados pelas Equações (3.45) e (3.46), são calculados com os parâmetros do ar de secagem, e que estes mesmos parâmetros que estão presentes na Equação (3.9) são dependentes dos parâmetros do tijolo, faz-se necessário recalculá-los para esta nova situação, semelhantemente ao que foi feito para convecção natural. Isto é realizado usando-se as seguintes equações:

$$h_{m1} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m \text{ ext}}|_{cf} \quad (3.47)$$

$$h_{m2} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_{m \text{ int}}|_{cf} \quad (3.48)$$

### Convecção combinada natural e forçada

No caso de ambas, convecção natural e forçada, serem importantes, o número de Nusselt é dado por uma combinação de efeitos como segue:

$$\overline{Nu}_i = \left[ \overline{Nu}_{i,cn}^3 + \overline{Nu}_{i,cf}^3 \right]^{1/3}, \quad (3.49)$$

em que o subscrito *i* refere-se a *pvt*, *pvl*, *phs* e *phi*, para as placas superficiais externas e *pvf* e *phf*, para as placas do furo.

A partir dos números de Nusselt calculados pela Equação (3.49), foram calculados os coeficientes de transferência de calor convectivo nas superfícies planas externas e do furo do tijolo, usando a Equação (3.31). Por sua vez, destes coeficientes, foram obtidos os coeficientes de transferência de calor convectivo médios externo e interno, como segue:

$$h_{c1} = \bar{h}_{c \text{ ext}}|_{cc} = \left[ \frac{(2\bar{h}_{c(pvt)} + 2\bar{h}_{c(pvl)} + \bar{h}_{c(phs)} + \bar{h}_{c(phi)})}{6} \right]_{cc} \quad (3.50)$$

$$h_{c2} = \bar{h}_{c \text{ int}}|_{cc} = \left[ \frac{(\bar{h}_{c(pvf)} + \bar{h}_{c(phf)})}{2} \right]_{cc} \quad (3.51)$$

em que o subscrito *cc* indica convecção combinada.

Uma vez determinados os coeficientes de transferência de calor convectivos externo e interno, foram determinados os coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies planas externa e do furo do tijolo, usando a analogia de Chilton-Colburn entre transferência de calor e massa, como definido pela Equação (3.34). A partir destes coeficientes,

foram obtidos os coeficientes de transferência de massa convectivo médios externo e interno, como segue:

$$\bar{h}_m \text{ ext} \Big|_{cc} = \left[ \frac{(2\bar{h}_m(\text{pvt}) + 2\bar{h}_m(\text{pvl}) + \bar{h}_m(\text{phs}) + \bar{h}_m(\text{phi}))}{6} \right]_{cc} \quad (3.52)$$

$$\bar{h}_m \text{ int} \Big|_{cn} = \left[ \frac{(\bar{h}_m(\text{pvf}) + \bar{h}_m(\text{phf}))}{2} \right]_{cc} \quad (3.53)$$

Desde que os coeficientes de transferência de calor e massa convectivos, determinados pelas Equações (3.52) e (3.53), são calculados com os parâmetros do ar de secagem, e que estes mesmos parâmetros que estão presentes na Equação (3.9) são dependentes dos parâmetros do tijolo, faz-se necessário recalcular estes parâmetros para esta nova situação física. Isto é feito usando-se as seguintes equações:

$$h_{m1} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_m \text{ ext} \Big|_{cc} \quad (3.54)$$

$$h_{m2} = \frac{\rho_a (x_{bu} - x_0)}{\rho_s (M_0 - M_e)} \bar{h}_m \text{ int} \Big|_{cc} \quad (3.55)$$

### Estimação da difusividade de massa

Para a estimativa do coeficiente de difusão na faixa de condições experimentais usadas na pesquisa, considerou-se  $B_i = \frac{h_m R}{D} = 4,0$ , onde  $R = \sqrt{\left(\frac{R_x}{2}\right)^2 + \left(\frac{R_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{R_z}{2}\right)^2}$  é um comprimento característico (Nascimento, 2002) e  $h_m$  é coeficiente de transferência de massa convectivo médio, obtido pela média aritmética dos valores de  $h_{m1}$  e  $h_{m2}$ , como segue:

$$h_m = \frac{h_{m1} + h_{m2}}{2} \quad (3.56)$$

Assim, de posse dos valores de  $h_m$  determinados como descritos previamente, se obteve o coeficiente de difusão, para cada condição experimental, como segue:

$$D = \frac{h_m R}{B_i} \quad (3.57)$$

### 3.3.4 Determinação da cinética de secagem

Para a obtenção da cinética de secagem predita pelo modelo matemático proposto, foi desenvolvido um código computacional no software Mathematica<sup>®</sup>. A partir dos dados experimentais referentes às condições do ar de secagem (T e UR fora da estufa), obteve-se a umidade absoluta do ar fora da estufa. Com este parâmetro e valor da temperatura do ar dentro



da estufa obteve-se a UR, umidade absoluta e temperatura de bulbo úmido do ar dentro da estufa. Este procedimento foi feito utilizando-se do software CATT (Computer-Aided Thermodynamic Tables).

Sendo assim, inseriu-se estes dados, assim como a velocidade do ar, e os dados dimensionais do tijolo, no código computacional desenvolvido, de onde obteve-se o teor de umidade médio da amostra ao longo do processo e os valores dos coeficientes de transferência de massa convectivos nas superfícies interna e externa do tijolo.

Além disso, desde que são conhecidas as dimensões e a massa da placa, pode-se determinar seu volume e sua densidade no início e fim do processo de secagem, para cada condição experimental.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresentaremos os resultados dos ensaios experimentais envolvendo granulometria, análises térmicas, análises químicas por difração de raios X e fluorescência de raios X. Seguidamente são apresentadas as análises gráficas da secagem (e discussão), modelamento matemático e simulação computacional.

### 4.1 Resultados experimentais

#### 4.1.1 Umidade higroscópica

A Tabela 6 mostra os dados coletados durante o experimento, com destaque para a umidade higroscópica média do resíduo de diatomita.

**Tabela 6** – Umidade higroscópica do resíduo de diatomita.

<b>UMIDADE HIGROSCÓPICA</b>			
<b>CÁPSULA</b>	<b>01-C</b>	<b>B09</b>	<b>B07</b>
<b>Massa bruta úmida (MBU em g)</b>	73,25	89,67	95,71
<b>Massa bruta seca (MBS em g)</b>	73,05	89,59	95,59
<b>Tara da Cápsula (TC em g)</b>	20,12	18,05	17,27
<b>Massa da água (MA em g)</b>	0,2	0,08	0,12
<b>Massa do solo seco (MSS em g)</b>	52,93	71,54	78,32
<b>Umidade (U%)</b>	0,0038	0,0011	0,0015
<b>Umidade média (U<sub>m</sub>)</b>		0,0021	

Fonte: O autor (2023).

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 6, é possível concluir que a umidade higroscópica média do resíduo de diatomita é baixa comparada à umidade dos materiais cerâmicos (entre 0,5 e 1,0%), resultado que evidencia a alta porosidade do material e sua consequente facilidade em perder umidade. Esse resultado também aponta o potencial do resíduo de diatomita para uma possível redução das temperaturas de secagem e queima, uma vez que a massa do tijolo cerâmico confeccionado com a massa cerâmica vermelha adicionada do resíduo de diatomita possivelmente irá perder umidade mais rapidamente.

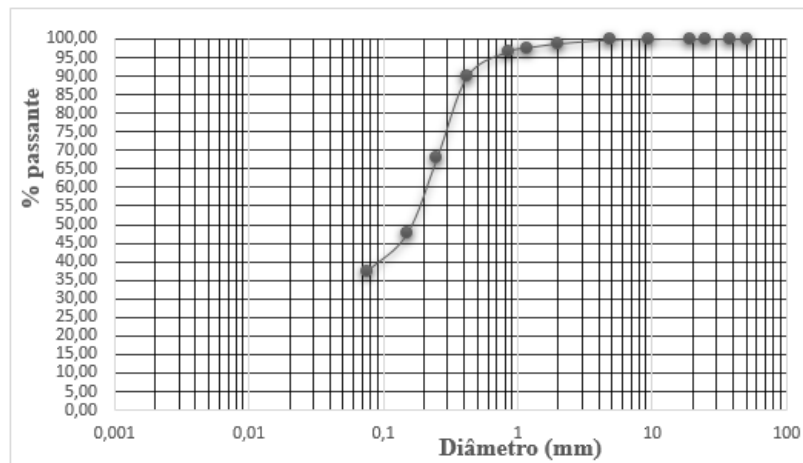
Cabe destacar que a porosidade do resíduo de diatomita deve contribuir significativamente para a absorção de água, o que indica que, para grandes proporções de incorporação do resíduo, a absorção de água pode sair do limite máximo (25%) estabelecido pela NBR 15270-1 (ABNT, 2017).

#### 4.1.2 Peneiramento grosso e fino

A etapa de análise granulométrica por meio do peneiramento (grosso e fino) ocorreu no Laboratório de Solos, Agregados, Concretos e Argamassas (LSCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Na etapa de peneiramento grosso foram inseridos 1000 g do resíduo de diatomita no conjunto de peneiras indicadas na norma NBR 7181 (ABNT, 2016), dos quais apenas 2,24 g ficaram retidos na peneira de 4,8 mm e 9,86 g ficaram retidos na peneira de 2,0 mm. O material retido na peneira de 0,075 mm foi levado à estufa conforme recomenda a norma e, a seguir, passou pelo peneiramento fino, sendo os resultados dos peneiramentos grosso e fino expressos na Figura 26.

**Figura 26** – Curva granulométrica do resíduo de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

A partir do gráfico apresentado na Figura 26, observa-se que:

- Aproximadamente 1% do resíduo de diatomita, aproximadamente, possui diâmetro maior ou igual a 2 mm sendo classificado como pedregulho;
- Aproximadamente 61% do resíduo de diatomita se enquadra como areia;

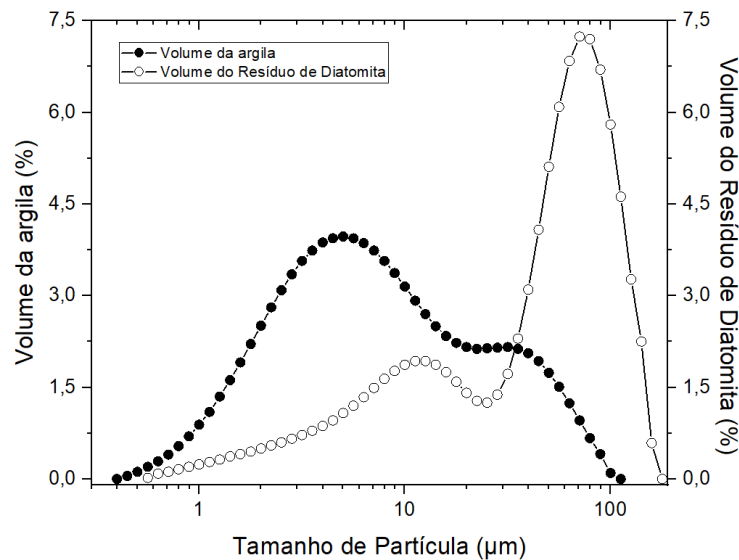
• Cerca de 37,5% do resíduo de diatomita possui diâmetro inferior a 0,06 mm, podendo ser classificado como silte ou argila.

Os resultados obtidos a partir do peneiramento indicam a necessidade de ensaios capazes de classificar melhor a fração do resíduo de diatomita com diâmetro inferior a 0,06 mm, o que foi realizado por meio do ensaio de granulometria a laser.

#### 4.1.3 Granulometria a laser

A Figura 27 mostra as curvas granulométricas para o resíduo de diatomita e para a argila construídas a partir dos dados obtidos na análise granulométrica a laser.

**Figura 27** – Curva granulométrica para o resíduo de diatomita e para a argila.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 27, analisando-se a curva referente à granulometria do resíduo de diatomita, verifica-se que a maior distribuição de partículas se encontra na faixa de tamanho entre 30 µm e 200 µm. Todavia, ao considerarmos a curva granulométrica que caracteriza a argila, nota-se que a maior distribuição de partículas está na faixa de tamanho compreendido entre 1,0 µm e 10 µm. Percebe-se ainda que ambas as curvas são largas, evidenciando que as partículas estão distribuídas numa faixa de tamanho relativamente grande quando comparada à dimensão característica da argila e que não possuem distribuição muito homogênea.

A Tabela 7 fornece um comparativo entre as frequências acumuladas do resíduo de diatomita e da massa de cerâmica vermelha.

**Tabela 7** – Resíduo de diatomita e argila – distribuição por tamanho das partículas.

Matérias-Primas	Finos ( $x < 2 \mu\text{m}$ )	Médios ( $2 \mu\text{m} < x < 20 \mu\text{m}$ )	Grossos ( $x > 20 \mu\text{m}$ )
Resíduo de diatomita	3,2%	26,0%	70,8%
Argila	14,1%	64,6%	21,3%

Fonte: O autor (2023).

Observando os dados fornecidos na Tabela 7, constatamos que 3,2% das partículas do resíduo de diatomita estão na faixa de tamanho inferior a  $2,0 \mu\text{m}$ . Já a matéria-prima da cerâmica vermelha tem um percentual de 14,1% de partículas na faixa de tamanho inferior a  $2,0 \mu\text{m}$ . Verifica-se também que a matéria-prima estudada apresenta em sua composição, elevados teores de silte e areia (96,8% para o resíduo de diatomita e 85% para a massa de cerâmica vermelha). Pelas características dos materiais, ao se adicionar o resíduo a argila, este contribuirá com o aumento da porosidade dos corpos de prova e para que a secagem se processe mais rapidamente. Além disso, os corpos de prova com resíduo, quando secos e queimados em condições idênticas aos corpos de prova sem resíduo deverão apresentar maiores teores de absorção de água.

#### 4.1.4 Análises químicas

##### 4.1.4.1 Fluorescência de raios X

Na Tabela 8 estão representados os resultados das análises químicas por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) do resíduo de diatomita e da argila.

**Tabela 8** – Resultado da FRX para o resíduo de diatomita.

COMPOSIÇÃO	RESÍDUO	ARGILA
SiO <sub>2</sub>	88,136%	49,03%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,869%	22,457%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,958%	17,736%
TiO <sub>2</sub>	0,819%	1,934%
CaO	0,708%	1,743%
K <sub>2</sub> O	0,261%	4,5%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,152%	0,296%
ZrO <sub>2</sub>	0,097%	-
MgO	-	1,706%
Cl	-	0,187%
MnO	-	0,172%

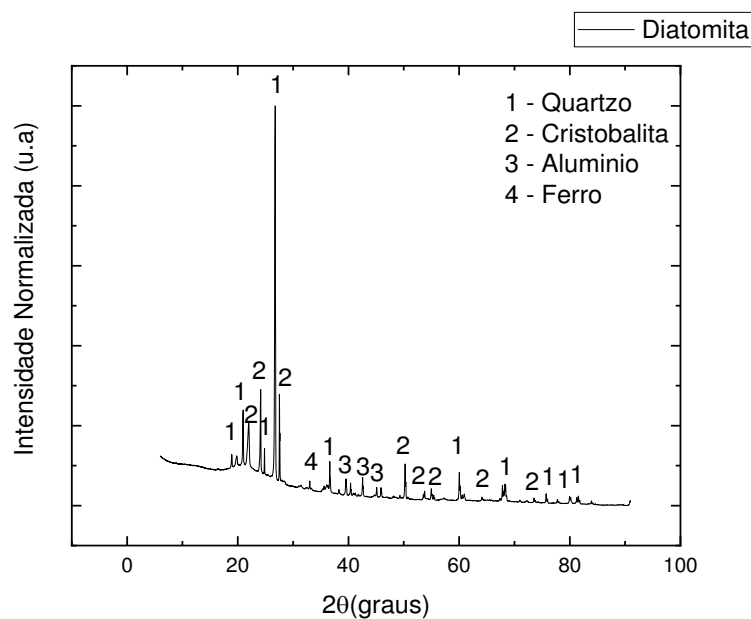
Fonte: O autor (2023).

Na Tabela 8, constataram-se grandes percentuais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) tanto no resíduo de diatomita (88,136%) quanto na argila (49,03%). A sílica é o composto químico mais abundante na crosta terrestre e, conforme (GOMES; FURTADO e SOUZA, 2018, p. 1021), “existem três formas principais de sílica cristalina: quartzo, cristobalita e tridimita”. O grande percentual de  $\text{SiO}_2$  está confirmado pelo pico de grande intensidade de quartzo apresentado no difratograma apresentado nas Figuras 28 e 29.

#### 4.1.4.2 Difração de raios X

Na Figura 28, podemos observar o gráfico contendo o resultado da análise química por difração de raios X (DRX) no resíduo de diatomita.

**Figura 28** – DRX do resíduo de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

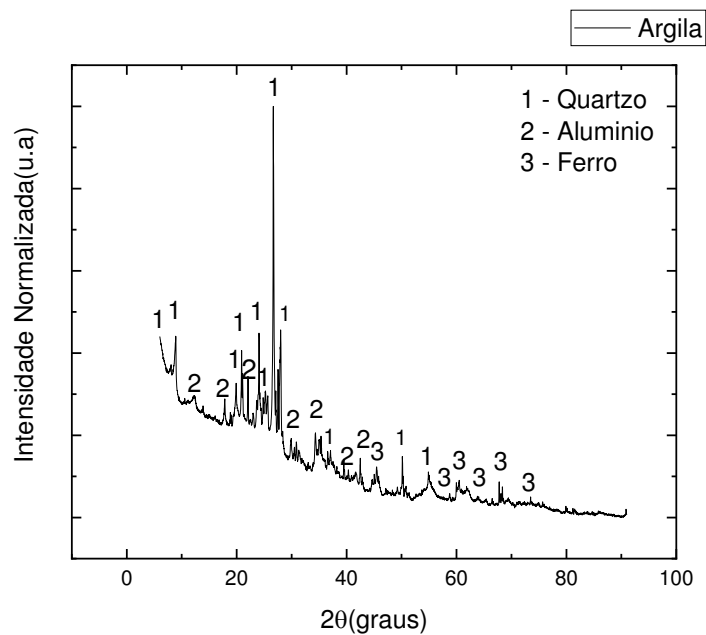
Observando a Figura 28 percebemos que o resíduo de diatomita é bastante cristalino, pois possui picos intensos e estreitos de quartzo e cristobalita. Percebe-se também uma banda amorfa, mas muito pequena, o que nos permite afirmar que se trata de um material de característica cristalina. Os picos de quartzo e de cristobalita estão relacionados ao alto teor de sílica encontrado no FRX, 88,136%.

O alto grau de quartzo e cristobalita contribuirá para a redução da plasticidade da mistura resíduo de diatomita e argila. Como o primeiro material não se caracterizou como plástico, é

necessário cuidado com o percentual adicionado à argila, sob risco de reduzir significativamente a plasticidade da mistura e impossibilitar o processo de moldagem por extrusão.

A Figura 29 apresenta graficamente o resultado da análise química por Difração de raios X (DRX) na argila.

**Figura 29** – DRX da argila.



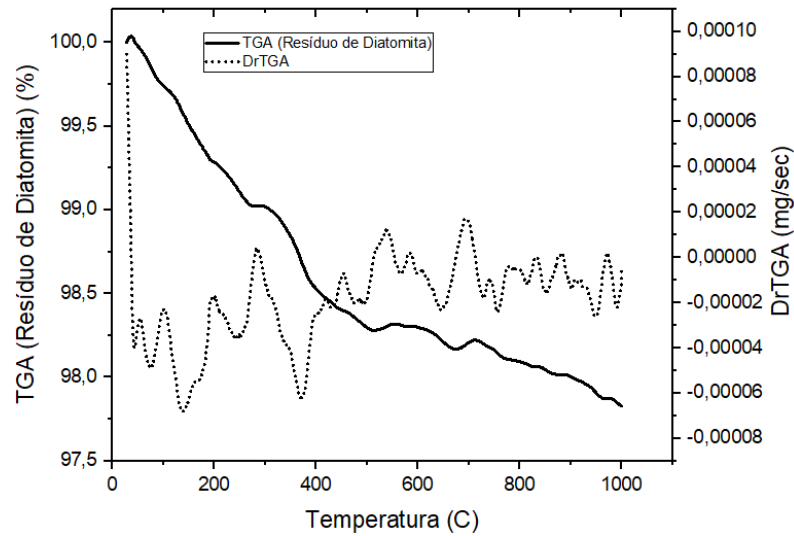
Fonte: O autor (2023).

A análise da Figura 29, difratograma de raios X da argila, mostra uma alta intensidade de quartzo presente na amostra analisada. O quartzo é uma impureza que está presente tanto no resíduo de diatomita quanto na argila, e deve contribuir com a redução de sua plasticidade, retração volumétrica e aumento da porosidade.

#### 4.1.5 Análises térmicas

A Figura 30 mostra graficamente a perda de massa (%) em função da temperatura para a análise termogravimétrica do resíduo de diatomita.

**Figura 30** – Gráfico das análises térmicas TGA e DrTGA para o resíduo de diatomita.

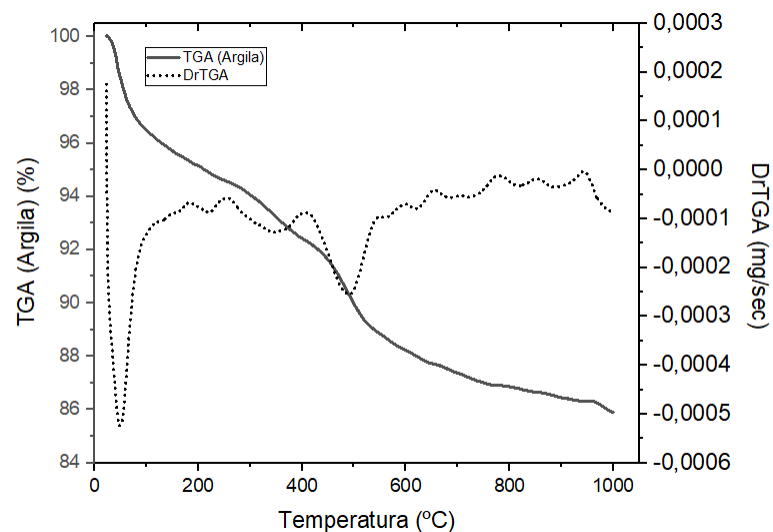


Fonte: Os autores (2023).

Observando a Figura 30, percebemos que o resíduo de diatomita sofreu uma pequena perda de massa, sendo esta mais intensa no intervalo de 0 a 500°C. Em geral, esse resultado corrobora os anteriores do FRX e DRX. Percebe-se que até 1000°C o material mostrou-se bem resistente, apresentando perda de massa inferior a 3%, o que pode ser relacionado à estrutura do quartzo e da cristobalita, que são muito bem ligadas entre si.

A Figura 31 mostra como a massa (%) variou em função da temperatura para a análise termogravimétrica da argila.

**Figura 31** – Gráfico das análises térmicas TGA e DrTGA para a argila.



Fonte: Os autores (2023).



A argila apresentou uma redução de cerca de 11% em sua massa quando a temperatura variou até 500°C. Esse aumento percentual na perda de massa, em comparação com o resíduo de diatomita, deve estar relacionado à quantidade de matéria orgânica presente na argila.

#### 4.1.6 Estudo da secagem

A seguir são apresentados e analisados dados referentes à secagem. O estudo da secagem foi feito para quatro percentuais de resíduo adicionados à argila e três temperaturas de secagem, cuja combinação resultou em 12 experimentos.

Nas Tabelas 16-27 do Apêndice, encontram-se todos os dados obtidos experimentalmente durante a secagem; e nas Tabelas 28-47, os dados referentes aos ensaios de absorção de água e porosidade aparente. No tocante à secagem, Silva (2009) destaca que a diferença notada entre a temperatura para a qual a estufa foi ajustada e a temperatura final da amostra é consequência da posição da mostra no interior da estufa.

##### 4.1.6.1 Avaliação da secagem

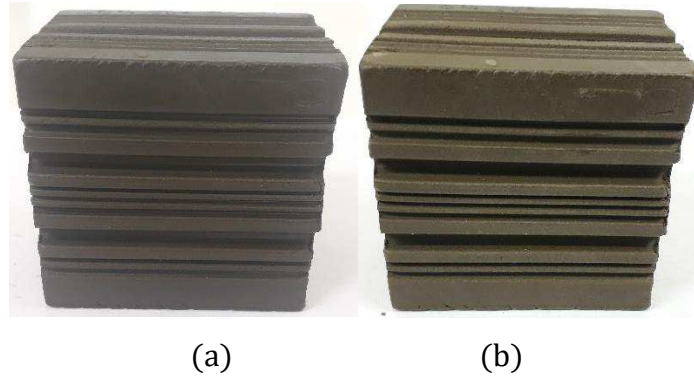
###### **A0%R50°S**

A temperatura de 50°C corresponde à menor temperatura de secagem utilizada neste estudo. Desta forma, nesta temperatura ocorreram os menores gradientes térmicos, o que ocasionou a retirada de água da forma mais lenta possível. Assim, nesta temperatura, restará mais água no interior das amostras ao final da secagem, isto porque a eficiência do processo de secagem é um fator que depende, entre outras coisas, da temperatura de secagem.

Uma questão investigada posteriormente, durante o processo de queima, é se a quantidade de água que restou nos tijolos, quando secos a 50°C, acarretam ou não prejuízos capazes de inviabilizar o processo.

Durante o estudo para caracterização das curvas de secagem, as medições ocorreram inicialmente em intervalos de 5 min, passando posteriormente a intervalos de 10 min, 20 min, e 30 min. A Figura 32 (a) mostra uma imagem registrada em  $t = 0$  min (antes de a amostra ser levada à estufa), e a Figura 32 (b) exhibe uma imagem da amostra em  $t = 480$  min (no final da secagem). Comparando-as, nota-se a mudança de cor ocorrida durante o processo de secagem.

**Figura 32** – A0%R50°S fotografada nos instantes 0 min e 480 min de secagem.

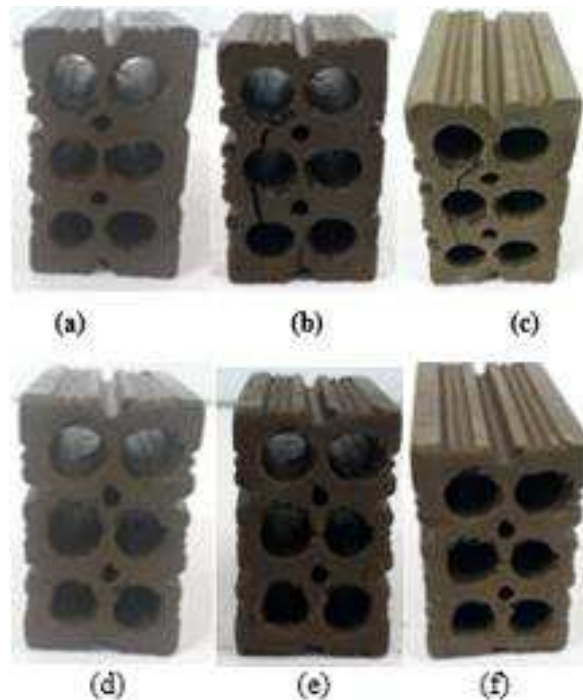


Fonte: Acervo do autor (2023).

Durante todo o processo de secagem, não houve aparecimento de trincas nas laterais da amostra.

Na Figura 33, pode-se observar seis imagens das faces frontais da A0%R50°S nos instantes 0 min, 30 min e 480 min de secagem, da esquerda para a direita, respectivamente.

**Figura 33** – A0%R50°S, (a), (b) e (c): Imagens da parte frontal da amostra posicionada para o lado direito do leitor, quando observada na estufa. (d), (e) e (f): Imagens da parte frontal da amostra posicionada para o lado esquerdo do leitor, quando observada na estufa.



Fonte: Acervo do autor (2023).

As primeiras trincas foram notadas após 15 min de secagem, e, após 30 min, as trincas ficaram bem abertas, começando a se fechar após 50 min do início da secagem. Veja que em 480 min (final da secagem), quando comparamos as imagens (b) e (c), notamos que as trincas reduziram bastante, sendo que aquela localizada na parte inferior se tornou imperceptível. Após 30 min de secagem, a diferença de cor já se tornou bem notável. Embora as trincas se mostrem muito abertas no instante 30 min, elas não apareceram por todo corpo cerâmico, sendo localizadas apenas no início das faces frontais da peça. É possível perceber ainda, na face representada nas imagens (d), (e) e (f), o surgimento de algumas trincas; no entanto, estas são menos intensas. A análise visual da amostra nos permitiu constatar que a posição dela na estufa é um fator que influencia no aparecimento de trincas. Estas aparecem em razão da contração gerada por gradientes térmicos e do aquecimento não-uniforme da amostra.

A Figura 34 mostra uma visão superior da A0%R50°S; a diferença de cor evidencia o fato de que a amostra não secou de forma homogênea.

**Figura 34** – Vista superior da A0%R50°S.



Fonte: Acervo do autor (2023).

A secagem ocorreu de forma heterogênea, fator responsável pelo surgimento de tensões e, conseqüentemente, das rupturas estruturais que ocasionaram as trincas observadas. As amostras possuíam um teor de umidade inicial de 19,8%.

A Tabela 9 mostra o comportamento da massa e da temperatura considerando intervalos de 1h de secagem, até a obtenção da massa de equilíbrio.

**Tabela 9** – A0%R50°S - perda de massa por hora de secagem.

<b>PERÍODO (h)</b>	<b>VARIAÇÃO DE MASSA (% da massa inicial)</b>	<b>VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)</b>
1ª hora	8,17	8,2
2ª hora	3,71	7,5
3ª hora	1,41	3,5
4ª hora	0,64	1,5
5ª hora	0,37	0,5
6ª hora	0,22	0,6
7ª hora	0,14	-0,4
8ª hora	0,10	-0,2
Equilíbrio	0,28	0,0

Fonte: O autor (2023).

Observando a Tabela 9, verifica-se que durante as duas primeiras horas de secagem a perda de massa foi bem mais intensa do que nas demais. Isto explica o fato de que as trincas aparecem nesse intervalo. Perceba ainda que a primeira hora corresponde ao intervalo com maior gradiente térmico. Outro fator a ser notado é a redução na temperatura do corpo cerâmico durante a sétima e a oitava horas de secagem; nesse período a amostra já perdeu praticamente toda sua água livre e tende a resfriar um pouco.

Durante a secagem, a amostra perdeu aproximadamente 14,8% de sua massa inicial, sendo assim, a massa seca representa 85,2%. O critério de parada utilizado para a obtenção da massa seca foi que a variação entre duas medidas sucessivas de massa num intervalo de 30 min estivesse na segunda casa decimal. A massa de equilíbrio foi obtida usando como parada o intervalo de secagem de 24 h após a obtenção da massa seca. Para a A0%R50°S, entre a massa seca e a massa de equilíbrio houve perda de massa de 0,2%, desta forma, a massa de equilíbrio representa 85% da massa inicial.

### **A5%R50°S**

A primeira trinca, localizada no septo central, foi notada durante a sexta medida (em  $t = 30$  min). O referido septo apresentava uma espessura bem mais estreita do que os demais, algo que fica em evidência na Figura 35, sendo consequência de um defeito ocasionado pela boquilha usada para extrusão dos corpos de prova.

**Figura 35** – Amostra com trinca no septo central.



Fonte: Acervo do autor (2023).

De acordo com a Figura 35, a trinca mostrada ocorre nas duas faces centrais da amostra. Nenhuma outra trinca foi notada.

A Tabela 10 mostra a taxa de variação de massa e de temperatura por hora de secagem.

**Tabela 10** – A5%R50°S – perda de massa e aquecimento por hora de secagem.

PERÍODO (h)	VARIAÇÃO DE MASSA (% da massa inicial)	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
1ª hora	9,74	4,9
2ª hora	6,97	3,2
3ª hora	3,86	7,7
4ª hora	1,30	3,7
5ª hora	0,48	1,5
6ª hora	0,23	1,5
7ª hora	0,14	0,1
Equilíbrio	0,20	-0,7

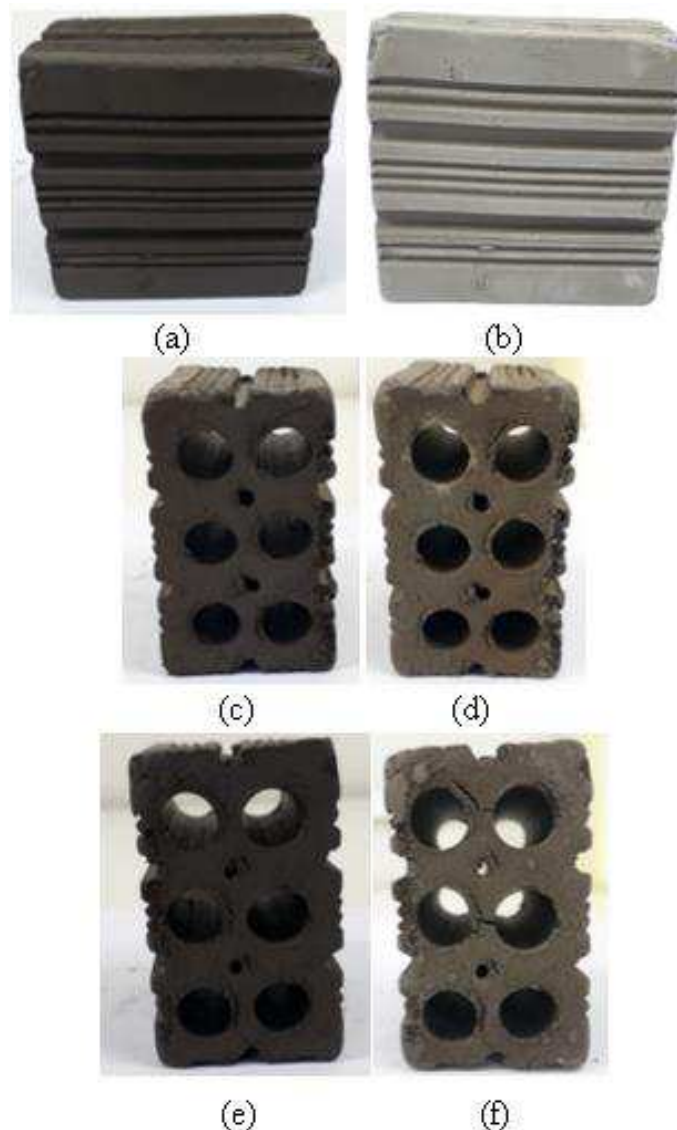
Fonte: O autor (2023).

A partir da Tabela 10, observa-se que a maior taxa de perda de massa ocorreu durante a primeira hora de secagem, no entanto, o maior gradiente térmico ocorreu somente na terceira hora. Uma diferença significativa entre as amostras A0%R50°S e A5%R50°S consiste no teor inicial de umidade: a primeira amostra apresentava um teor de umidade de 19,8% ao passo que a segunda apresentava 32,2%. O grande teor de umidade foi o responsável pelo retardamento da taxa máxima de aquecimento; no entanto, as trincas que apareceram nas duas amostras são semelhantes, ambas localizadas no septo central.

**A10%R50°S**

As imagens (a), (c) e (e) da Figura 36 exibem a amostra antes do início da secagem, enquanto as imagens (b), (d) e (f) mostram as respectivas faces após a secagem (quando foi determinada a massa de equilíbrio). Ao final da secagem, o septo central apresentava-se trincado; isso ocorreu apenas no lado do tijolo que estava virado para o lado esquerdo da estufa. Nenhuma outra trinca foi percebida.

**Figura 36** – Imagens da A10%R50°S, nos tempos 0 e 360 min.

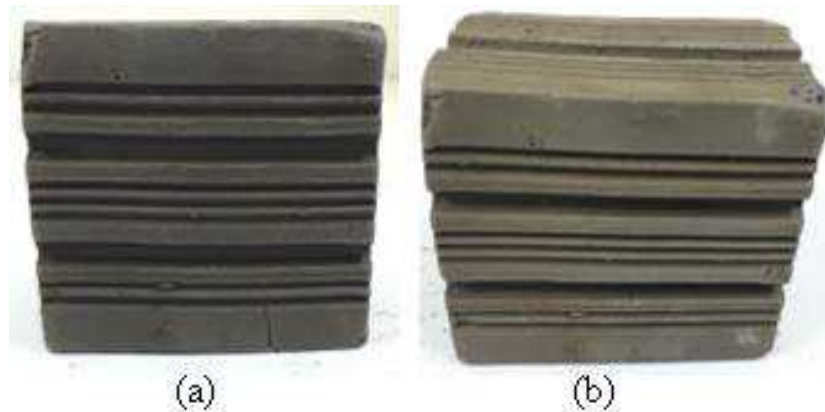


Fonte: Acervo do autor (2023).

A Figura 37(a) mostra uma imagem da A10%R50°S registrada 30 min após o início da secagem. Nela é possível notar uma trinca na parte inferior entre o centro e o canto direito da

amostra (vista do leitor). Entretanto, a mesma trinca já não é perceptível após 120 min de secagem (Figura 37(b)).

**Figura 37** – Trinca na lateral no instante 30 min (Figura 37a) e “ausência” de trinca em 120 min (Figura 37b).



Fonte: Acervo do autor (2023).

É comum o aparecimento e posteriormente o desaparecimento de trincas durante o processo de secagem, isso ocorre devido às contrações não uniformes da peça cerâmica. As trincas que em algum momento da secagem ficam imperceptíveis, continuam existindo e contribuem, entre outras coisas, com a redução da resistência mecânica do objeto. Elas podem voltar a aparecer durante a etapa de queima.

A Tabela 11 mostra a taxa de variação de massa e de temperatura por hora de secagem para a A10%R50°S.

**Tabela 11** – A10%R50°S – perda de massa e aquecimento por hora de secagem.

PERÍODO (h)	VARIAÇÃO DE MASSA (% da massa inicial)	VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)
1ª hora	8,10	5,7
2ª hora	5,56	6,3
3ª hora	2,42	3,9
4ª hora	0,93	3,1
5ª hora	0,36	0,8
6ª hora	0,19	0,3
7ª hora	0,18	0,4
	0,12	-0,5
Equilíbrio	0,07	0,2

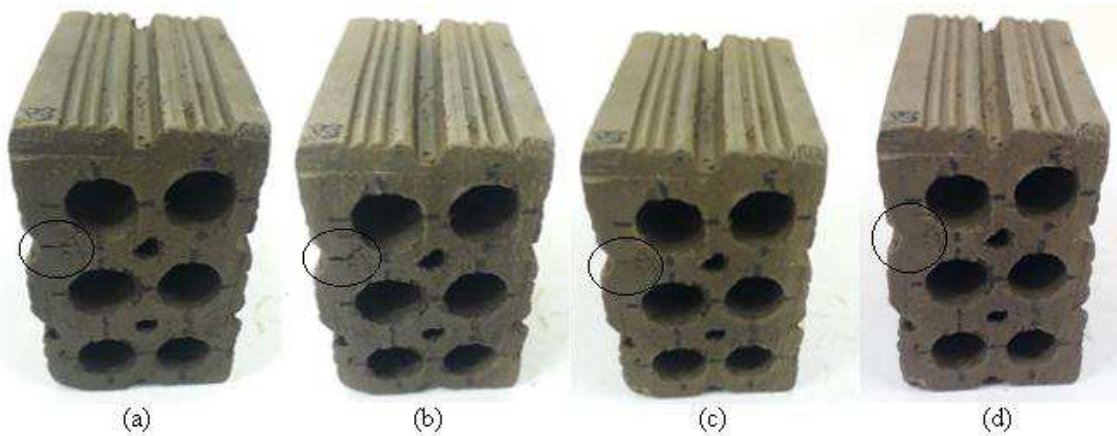
Fonte: O autor (2023).

O teor de umidade da A10%R50°S é de 23,8%, valor situado entre os teores de umidade da A0%R50°S (19,8%) e da A5%R50°S (32,2%). Comparando as Tabelas 7, 8 e 9, percebemos que quanto maior o teor de umidade inicial, mais demorado tende a ser o intervalo em que aparece a variação máxima de temperatura na amostra.

### **A15%R50°S**

Para a A15%R50°S as trincas também começaram a surgir após 15 min de secagem e as mudanças de cor após 30 min. A Figura 38 mostra imagens da amostra nos tempos 30 min (a), 60min (b), 90 min (d) e 120 min (e). Percebe-se que a trinca situada na parte inferior esquerda do septo superior esquerdo vai sumindo à medida que você analisa as imagens da esquerda para a direita.

**Figura 38** – Surgimento e desaparecimento de trincas na A15%R50°S.



Fonte: Acervo do autor (2023).

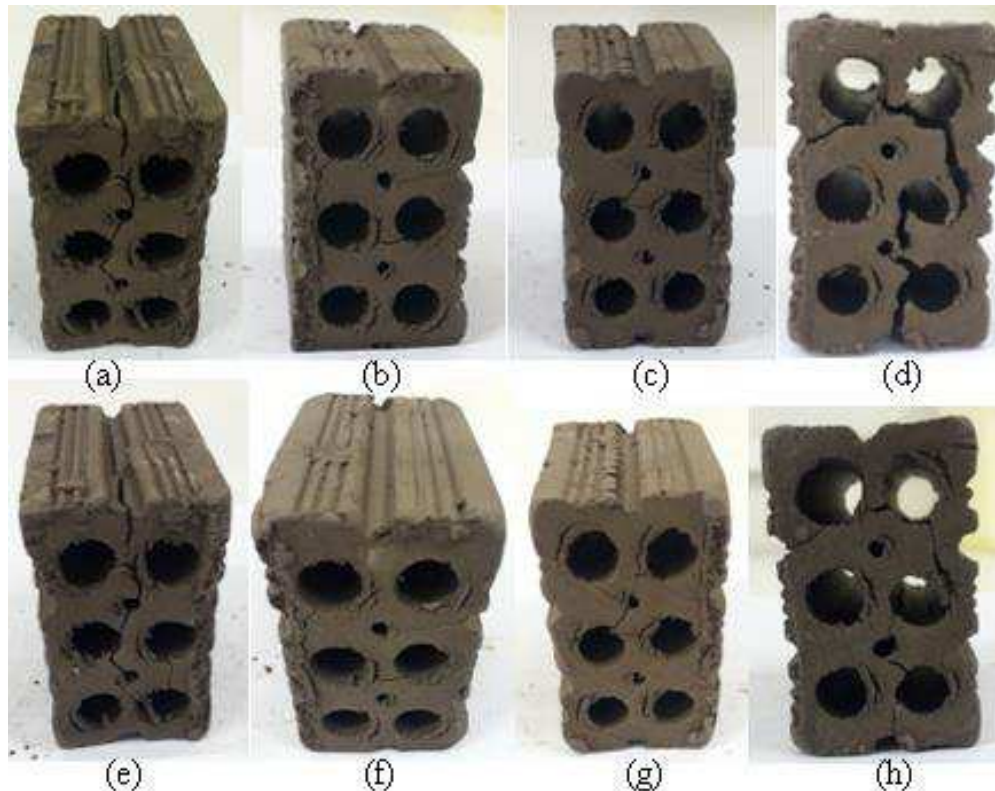
### **A10%R70°S**

Durante a secagem da A10%R70°S, duas amostras iniciais tiveram de ser descartadas 30 min após o início da secagem devido ao surgimento de trincas que comprometeram sua estrutura. Nova tentativa foi feita inserindo-se ao mesmo tempo na estufa, 4 (quatro) amostras cujas medições iniciais haviam sido efetuadas. Caso a amostra em ensaio fosse comprometida, seguia-se o ensaio com uma das outras que estivesse em condições, no entanto, foi possível seguir com o ensaio na amostra 1 até o final da secagem.

A Figura 39 mostra as amostras em dois momentos da secagem.



**Figura 39** – Amostras durante o estudo experimental da secagem a 70° C.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 39, as imagens (a), (b), (c) e (d) são registros feitos após 60 min de secagem, a amostra (d) foi a escolhida para o ensaio e neste instante do registro ela parecia que não iria suportar as trocas térmicas, no entanto, a partir de 90 min as trincas reduziram e a amostra estabilizou, as imagens (e), (f), (g) e (h) são registros das amostras após 240 min de secagem. As amostras com 0%, 5% e 15% de resíduo não apresentaram trincas semelhantes as da A10%R70°S, o que indica que tais trincas resultaram de algum problema ocorrido durante a extrusão das amostras. Para as amostras com 10% de resíduo, as primeiras trincas surgiram até o décimo minuto de secagem e, após esse tempo também foi possível notar mudanças de cor na amostra.

Nos experimentos foram utilizadas diversas temperaturas e umidades relativas do ar de secagem e diferentes percentagem de resíduo de diatomita misturados na argila cerâmica, conforme indicado na Tabela 12. O objetivo foi analisar os efeitos destes parâmetros na remoção de umidade, elevação da temperatura e alterações nas dimensões do tijolo cerâmico vazado.

**Tabela 12** – Parâmetros experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.

Teste	Ar			Tijolo					t (h)
	T (°C)	UR (%)	RD* (%)	M <sub>o</sub> (b.s)	M <sub>r</sub> (b.s)	M <sub>e</sub> (b.s)	θ <sub>o</sub> (°C)	θ <sub>f</sub> (°C)	
1	50	16,00	0	0,1980	0,0212	0,0178	26,8	48,0	8,0
2	50	19,03	5	0,3219	0,0213	0,0191	27,3	49,7	7,5
3	50	15,23	10	0,2377	0,0166	0,0157	27,3	48,4	8,0
4	50	16,38	15	0,2437	0,0190	0,0154	26,1	48,8	7,0
5	70	6,46	0	0,1966	0,0108	0,0076	29,9	66,2	7,0
6	70	7,07	5	0,3175	0,0100	0,0079	27,3	66,5	7,5
7	70	6,15	10	0,2388	0,0088	0,0065	24,9	66,5	6,5
8	70	6,86	15	0,2429	0,0097	0,0072	27,0	66,2	6,0
9	90	2,89	0	0,1946	0,0051	0,0028	26,3	85,1	6,0
10	90	2,82	5	0,3183	0,0039	0,0024	26,7	87,1	6,0
11	90	2,93	10	0,2361	0,0034	0,0020	26,7	86,4	5,0
12	90	2,57	15	0,2381	0,0031	0,0015	27,0	85,9	5,0

\*RD=Resíduo de diatomita

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Ao se analisar os resultados apresentados na Tabela 12 verifica-se que os teores de umidade final e de equilíbrio dependem, ambos, da temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Assim, mantendo-se constante a temperatura do ar de secagem, pode-se dizer que, quanto maior a umidade relativa do ar de secagem, maiores serão os teores de umidade final e de equilíbrio higroscópico. Por outro lado, mantendo-se a umidade relativa aproximadamente constante, pode-se dizer que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menores serão os teores de umidade final e de equilíbrio higroscópico. O tempo médio de secagem também sofreu interferência das condições do ar de secagem, variando de 7,62 horas, para temperatura de secagem de 50°C até 5,0 horas, para a temperatura de 90°C.

Em geral, a peça cerâmica que apresenta menor teor de umidade inicial, e maiores relações área/volume, tem uma secagem mais rápida. O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumentam as taxas de secagem e aquecimento do tijolo, fazendo com que este material atinja num menor tempo suas condições de equilíbrio higroscópico e térmico. Contudo, vale salientar que, sendo esta a melhor condição para se concluir o processo de secagem, também é uma condição que, dependendo da intensidade dos efeitos hídricos e térmicos, pode causar danos ao tijolo, interferindo na sua qualidade. Diante disto, não são recomendados altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do tijolo, uma vez que isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no

tijolo, o que pode originar rachaduras, fissuras, e deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem. Uma secagem prévia, controlada, é de grande importância. Se a secagem for rápida e não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, mas, se for muito lenta, a produção tornar-se-á antieconômica.

Durante a secagem geram-se tensões de sentidos contrário entre as camadas externa e interna da peça cerâmica e, quanto maior a perda de água, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com possibilidade de fissurar. Por outro lado, durante o processo de secagem originam-se variações dimensionais na peça cerâmica que, via de regra, depende da composição química da argila, da porosidade, da densidade, entre outros.

Sendo assim, para se ter uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem pelo controle da velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem, forma do corpo, particularmente a relação área/volume e a porosidade do material. Isto conduz a um produto industrial de qualidade aceitável comercialmente.

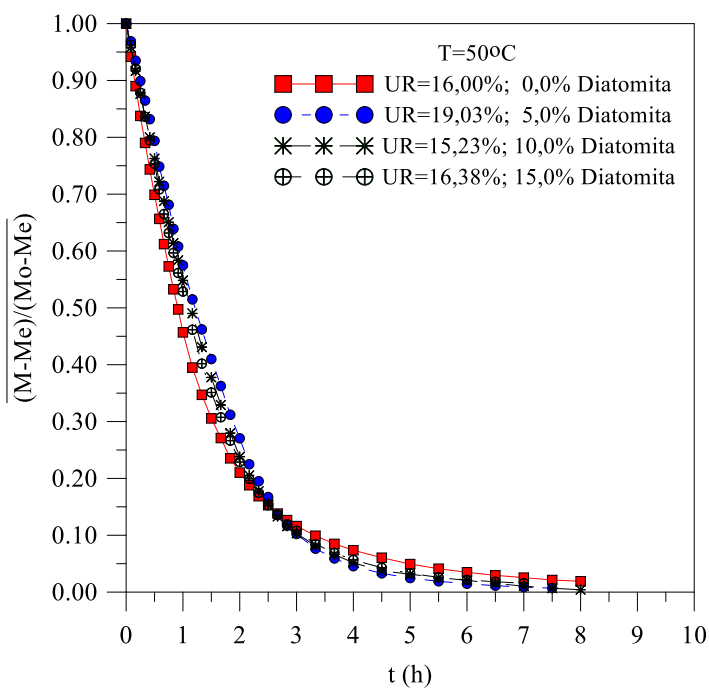
A seguir faz-se-á uma avaliação dos efeitos das condições do ar de secagem e composição química da massa cerâmica, na perda de umidade, elevação de temperatura e retração volumétrica.

#### 4.1.7 Efeito da percentagem de resíduo de diatomita nas cinéticas de secagem, aquecimento e variação volumétrica

##### 4.1.7.1 *Cinéticas de secagem*

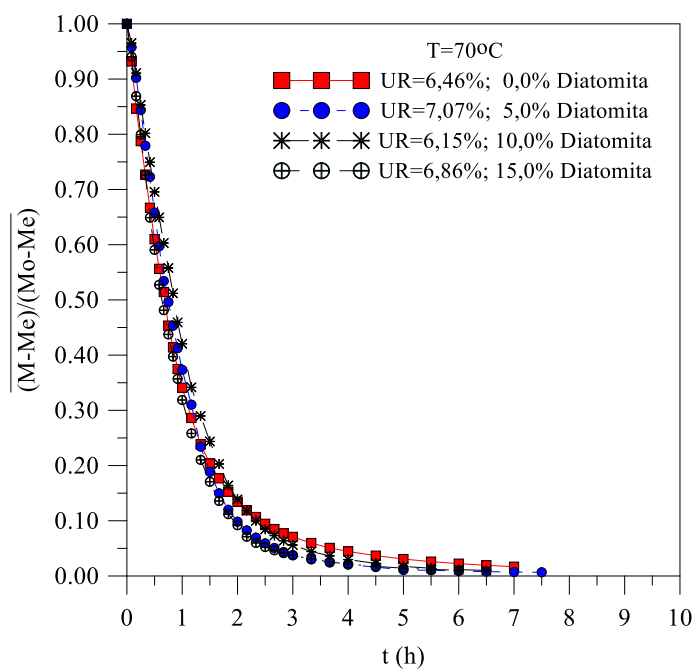
As Figuras 40, 41 e 42 ilustram o comportamento do teor de umidade do tijolo cerâmico na forma adimensional ao longo do processo de secagem, para diferentes percentagens de resíduo de diatomita misturada na argila, para as temperaturas de secagem de 50, 70 e 90°C, respectivamente.

**Figura 40** – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 50°C.



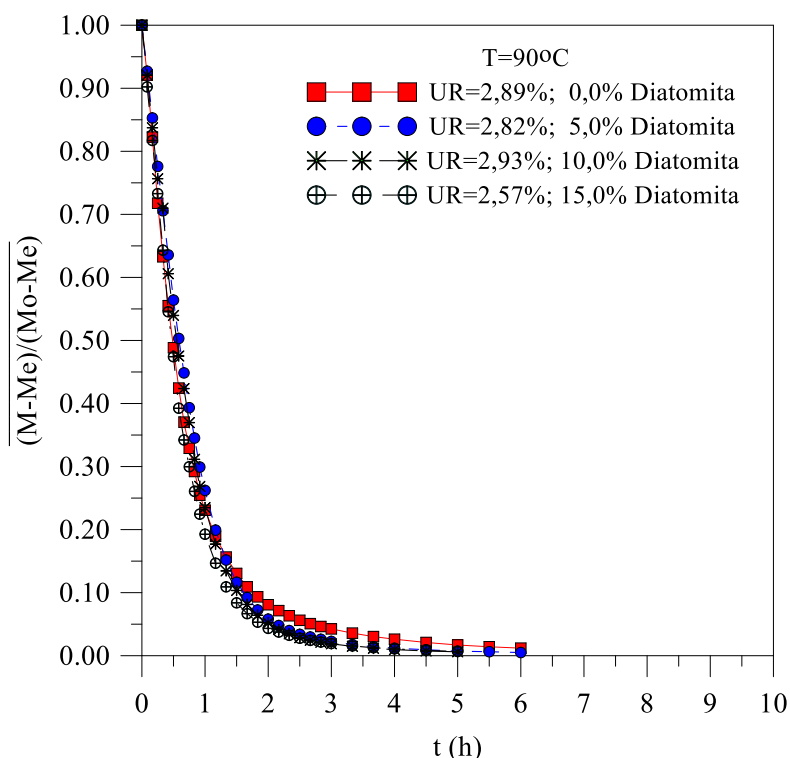
Fonte: O autor (2023).

**Figura 41** – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 42** – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C.



Fonte: O autor (2023).

Ao analisar os resultados, verifica-se que a perda de umidade é afetada pela sua composição química. Em geral, quanto maior a percentagem de diatomita na massa cerâmica, mais lenta é a secagem. Este efeito ocorre até que um teor de umidade de aproximadamente 0.2 seja atingido, de onde ocorre uma inversão de comportamento, isto é, tijolo com maior percentagem de diatomita tende a secar mais rápido. Este efeito é mais pronunciado para baixas temperaturas e elevadas umidades relativas do ar de secagem.

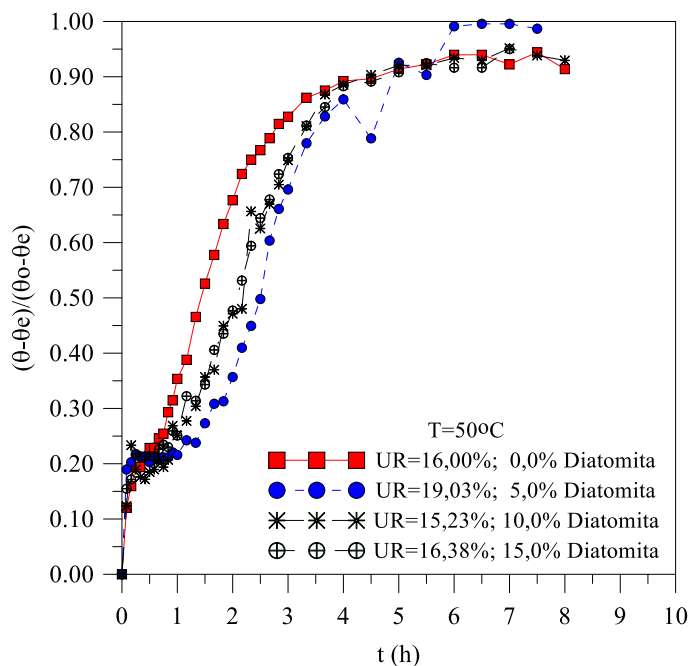
A taxa de variação de umidade, que é diretamente influenciada pela temperatura e umidade relativa do ar de secagem, mantém uma relação de proporcionalidade entre a temperatura e o tempo de processo; quanto maior for a temperatura, maior será a perda de umidade e menor será o tempo total da secagem até as amostras atingirem a condição de equilíbrio higroscópico.

#### 4.1.7.2 Cinéticas de aquecimento

As Figuras 43, 44 e 45 ilustram o comportamento da temperatura superficial (na forma adimensional) no vértice do tijolo cerâmico ao longo do processo de secagem, para diferentes

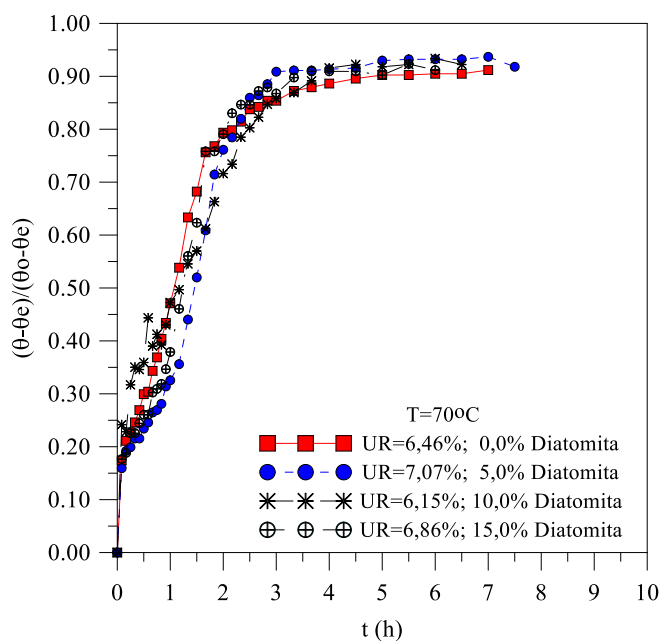
percentagens de resíduo de diatomita misturada na argila, para as temperaturas de secagem de 50, 70 e 90°C, respectivamente.

**Figura 43** – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 50°C.



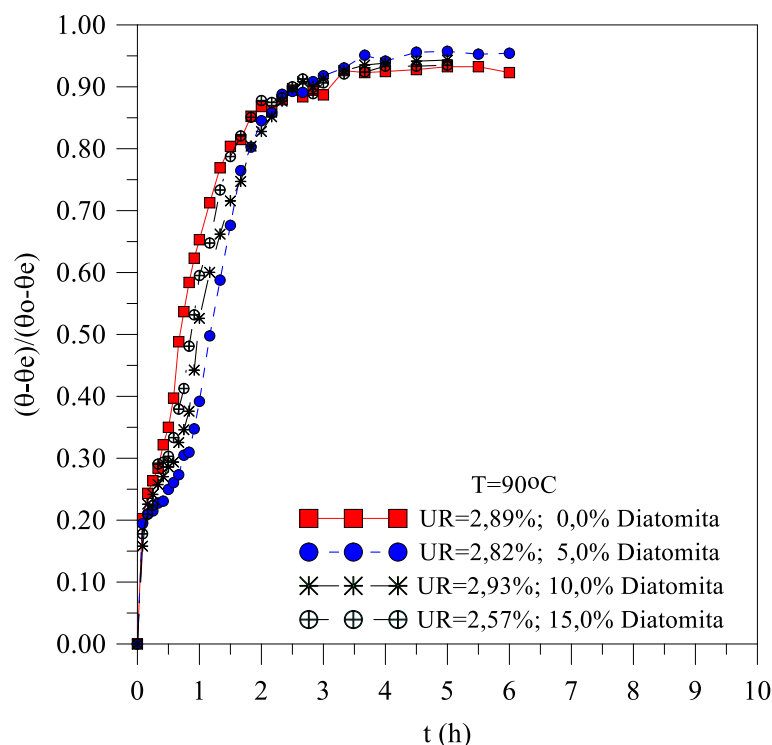
Fonte: O autor (2023).

**Figura 44** – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 45** – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C.



Ao analisar os resultados, verifica-se que a elevação de temperatura é afetada pela sua composição química. Em geral, quanto maior a percentagem de diatomita na massa cerâmica, mais lento é o aquecimento do produto. Este efeito ocorre até que uma temperatura adimensional de aproximadamente 0,85 seja atingida, de onde ocorre uma inversão de comportamento, isto é, tijolo com maior percentagem de diatomita tende a aquecer mais rápido. Este efeito é mais pronunciado para baixas temperaturas e elevadas umidades relativas do ar de secagem.

A taxa de variação de temperatura que é diretamente influenciada pela temperatura e umidade relativa do ar de secagem, mantém uma relação de proporcionalidade entre a temperatura e o tempo de processo; quanto maior for a temperatura, maior será a elevação de temperatura e menor será o tempo total da secagem até as amostras atingirem a condição de equilíbrio térmico.

No entanto, temperaturas muito elevadas podem ter efeitos negativos na secagem. Como a temperatura na parede da amostra é maior do que a temperatura no interior podem-se gerar elevadas tensões hídricas e térmicas no interior da amostra, dando espaço ao surgimento de trincas, rachaduras e deformações. Esses defeitos, gerados pelos gradientes de umidade e

temperatura podem provocar tensões trativas e compressivas, não aceitáveis, que reduzem drasticamente a qualidade do produto no final do processo, se a secagem não for uniforme.

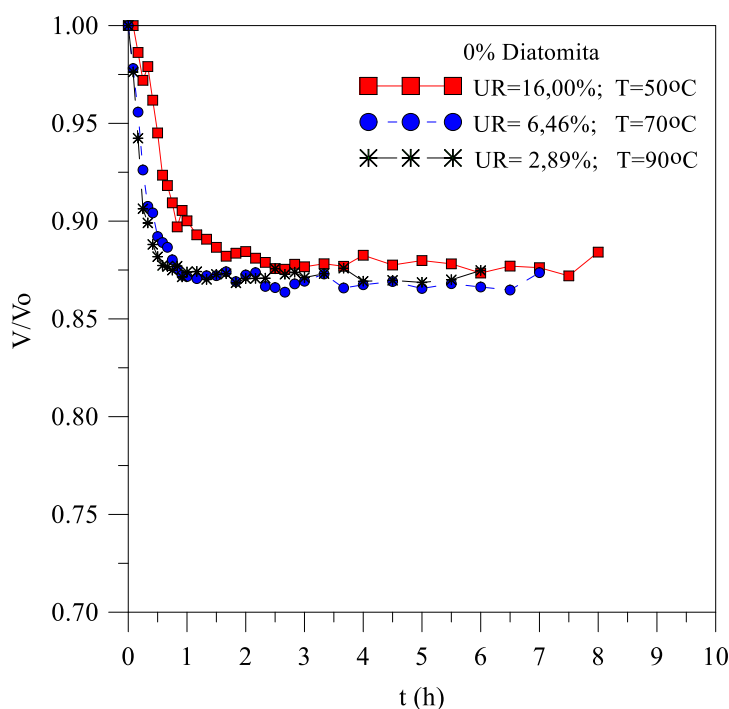
A forma geométrica do material também influencia nas cinéticas de secagem e aquecimento. Quando o material é vazado, o ar de secagem tem uma melhor circulação em seu interior, a água contida no interior do material migra para a superfície mais rapidamente e o calor flui da superfície para o interior do tijolo. Com isso, tem-se uma secagem e aquecimento mais intensos.

Analisando o comportamento dos resultados do decréscimo do teor de umidade apresentados na Figura 40, Figura 41 e Figura 42 e de elevação da temperatura na Figura 43, Figura 44 e Figura 45, conjuntamente, verifica-se que a secagem do tijolo cerâmico ocorreu numa taxa de secagem decrescente.

#### 4.1.7.3 Cinéticas de variação volumétrica

As Figuras 46, 47 e 48 ilustram a variação volumétrica transiente sofrida pelas amostras em relação ao seu volume inicial, devido à perda de umidade (encolhimento) e aquecimento (dilatação térmica) observadas no processo de secagem.

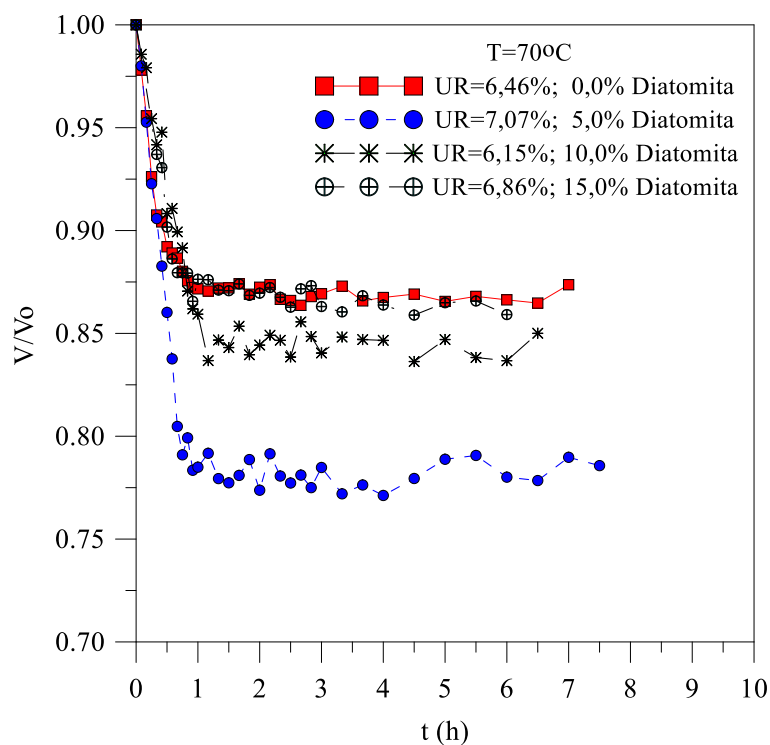
**Figura 46** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para o corpo de prova com 0% de resíduo.



Fonte: O autor (2023).

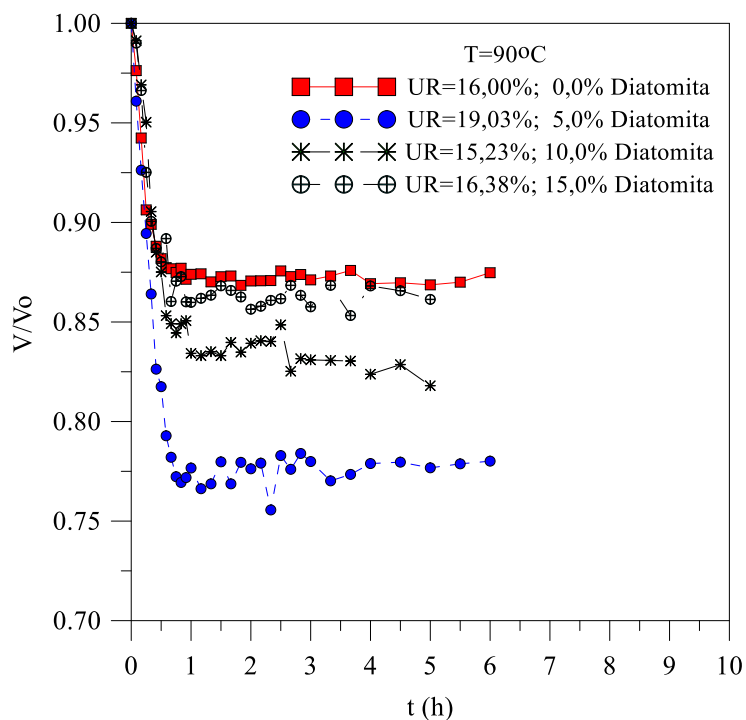


**Figura 47** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 70°C.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 48** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem para a temperatura de 90°C.



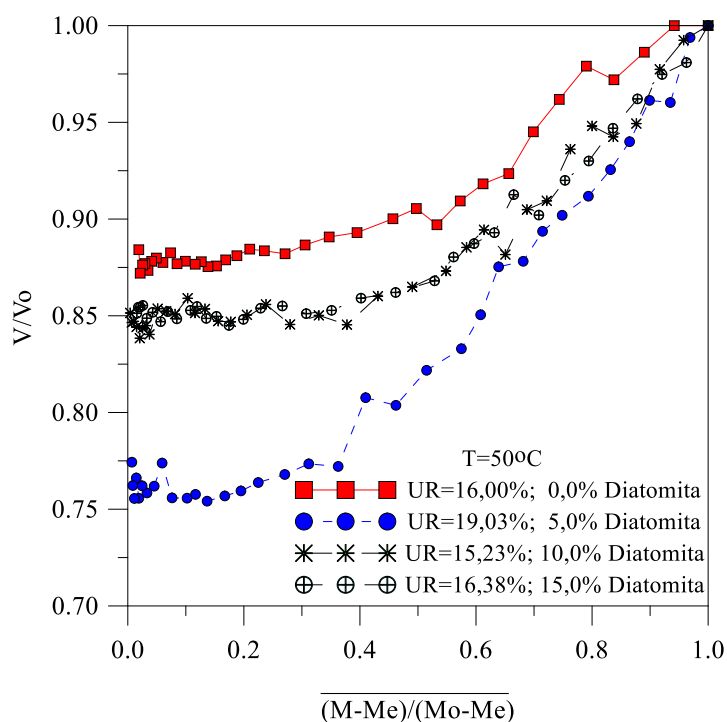
Fonte: O autor (2023).

Ao se analisar estas figuras, verifica-se uma forte variação nas dimensões do sólido na primeira hora de secagem, tendendo a um valor constante para tempos longos. Além disso, pode-se observar a não uniformidade na retração volumétrica, por conta do processo de dilatação (devido ao fenômeno de aquecimento) e contração (devido ao fenômeno de perda de umidade) nas peças, principalmente nos estágios finais de secagem. Além disso, pode-se verificar facilmente o efeito da temperatura do ar de secagem: quanto maior a temperatura do ar mais rápida é a taxa de variação volumétrica do produto, sendo menos pronunciada para menores percentagens de diatomita na amostra cerâmica.

Observa-se que, em temperaturas de secagem mais baixas, como 50°C, a variação no volume do tijolo ocorre de maneira mais uniforme. Isso se deve ao fato de que a retirada de água é mais lenta, resultando em um processo de secagem e aquecimento mais gradual. No entanto, vale ressaltar que esse procedimento não causa danos ao produto.

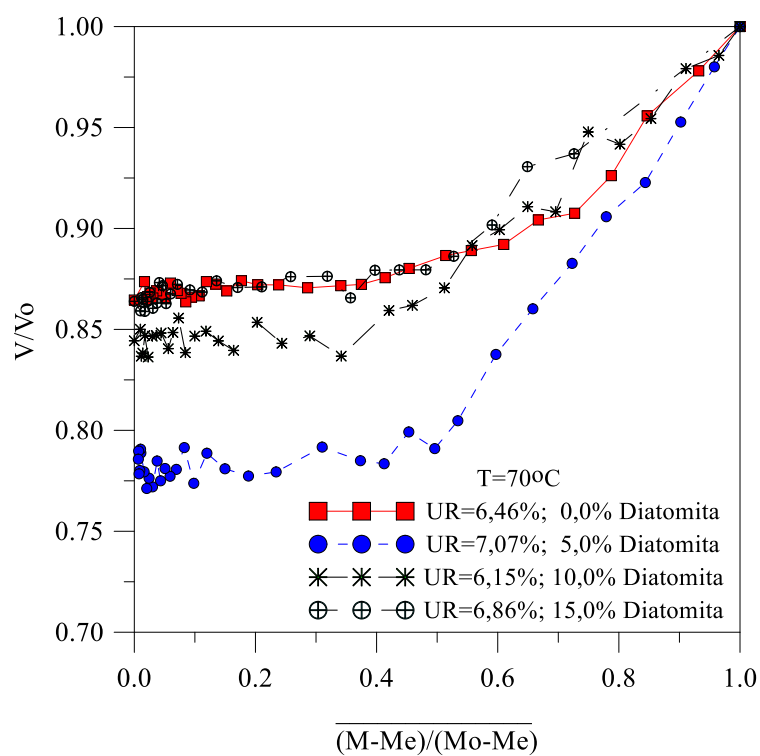
A Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 ilustram a variação volumétrica adimensional em função do teor de umidade adimensional sofrida pelas amostras, devido a perda de umidade (encolhimento) e aquecimento (dilatação térmica) observadas no processo de secagem.

**Figura 49** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 50°C.



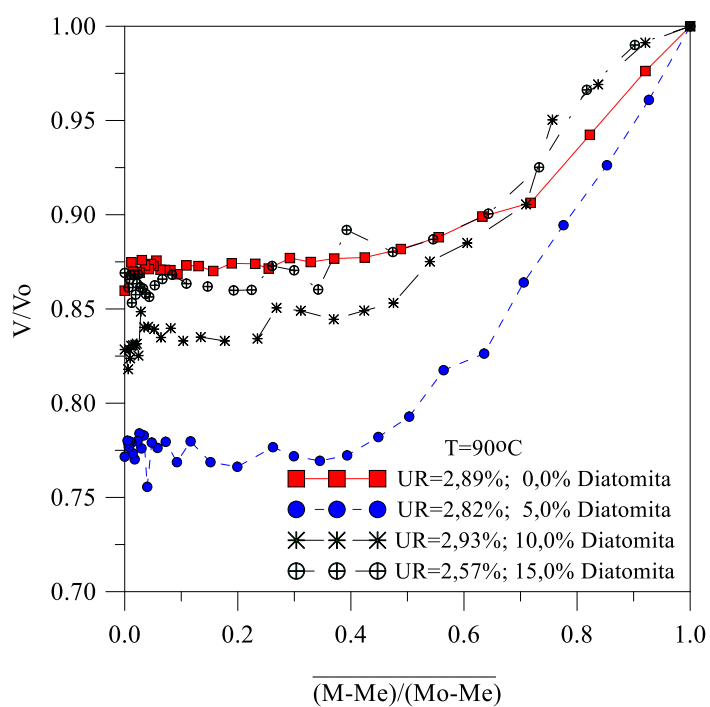
Fonte: O autor (2023).

**Figura 50** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 70°C.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 51** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade para a temperatura de 90°C.



Fonte: O autor (2023).

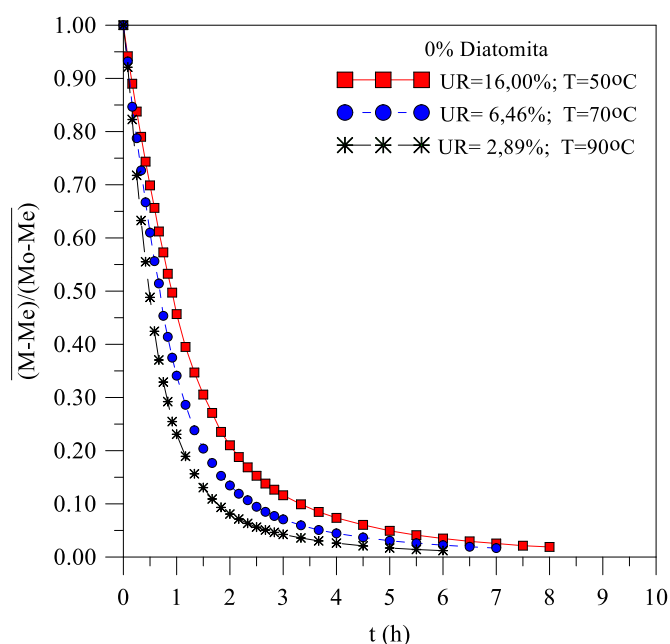
Ao analisar estas figuras, verifica-se uma forte variação, aproximadamente linear, nas dimensões do sólido na primeira hora de secagem, até um teor de umidade em torno de 0,4, tendendo a um valor constante para tempos longos. Além disso, pode-se verificar facilmente o efeito da percentagem de diatomita na amostra cerâmica, principalmente para baixas temperaturas e percentagem de resíduo de diatomita de 5%. Neste percentual de 5% de resíduo, a amostra cerâmica teve o maior teor de umidade inicial, aproximadamente 0,32 kg/kg (b.s.), um valor bem superior ao teor de umidade inicial das demais amostras, o que justifica perfeitamente o elevado encolhimento.

#### 4.1.8 Efeito das condições do ar nas cinéticas de secagem, aquecimento e variações dimensionais

##### 4.1.8.1 Cinéticas de secagem

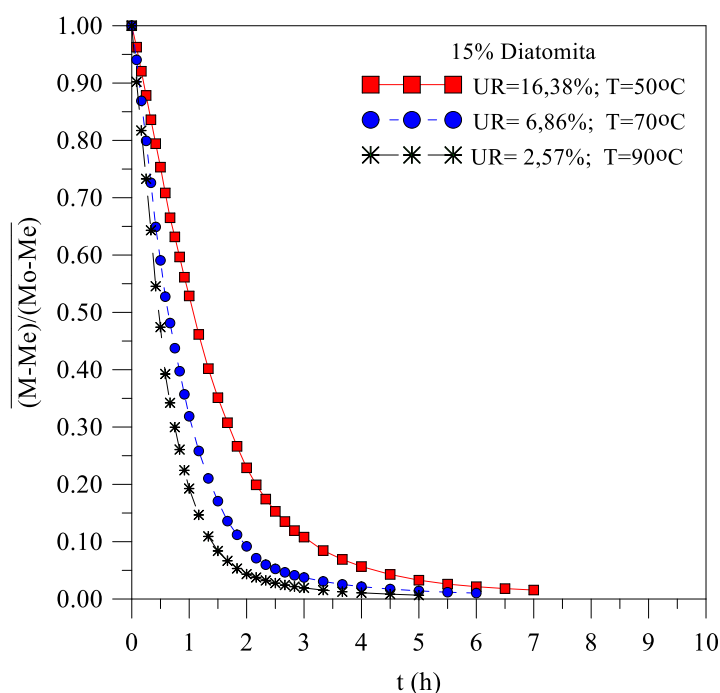
As Figuras 52 e 53 ilustram o comportamento do teor de umidade do tijolo cerâmico na forma adimensional ao longo do processo de secagem, para as temperaturas de secagem de 50, 70 e 90°C, e percentagens de resíduo de diatomita misturada na argila de 0 e 15%. Considerou-se apenas os extremos uma vez que para os demais valores o comportamento é intermediário.

**Figura 52** – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 53** – Variação do teor de umidade do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.



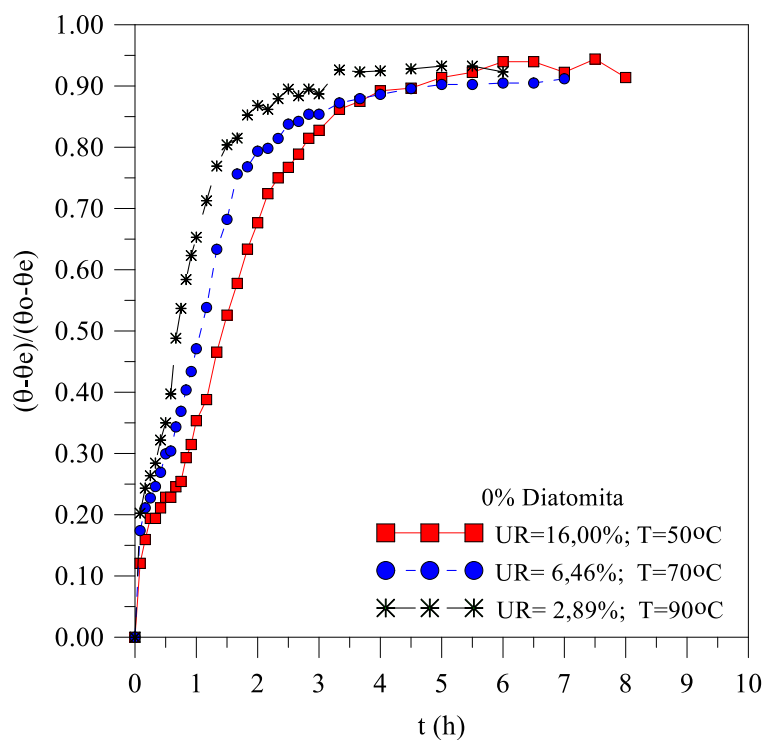
Fonte: O autor (2023).

Ao analisar os resultados, verifica-se claramente que a perda de umidade é fortemente afetada pela temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Em geral, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, mais rápida é a secagem, e em menor tempo o produto atinge seu teor de umidade de equilíbrio. Este efeito ocorre durante todo o processo de secagem, sendo mais pronunciado para tijolo com maior percentagem de diatomita.

#### 4.1.8.2 Cinéticas de aquecimento

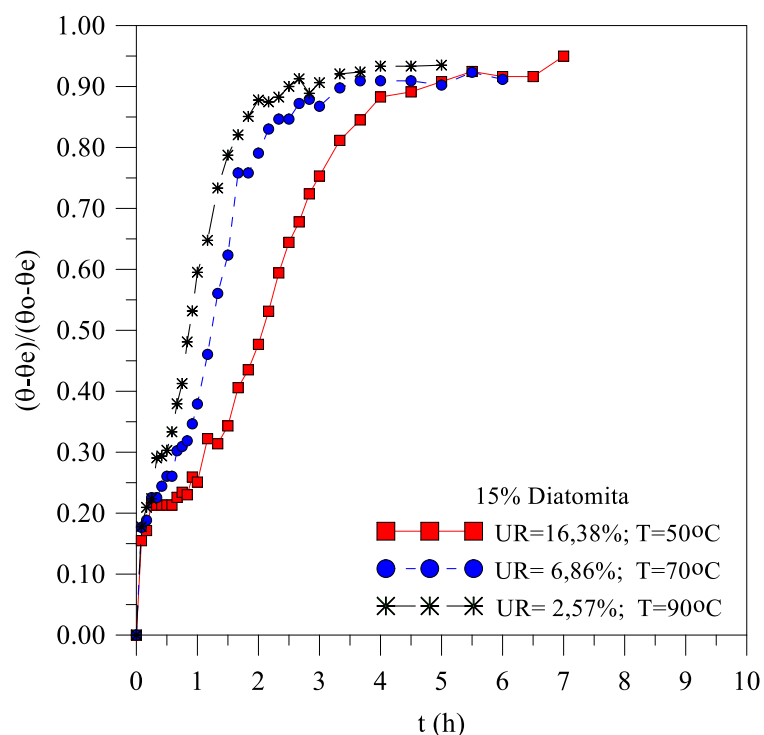
As Figuras 54 e 55, ilustram o comportamento da temperatura superficial do tijolo cerâmico na forma adimensional ao longo do processo de secagem, para as temperaturas de secagem de 50, 70 e 90°C, e percentagens de resíduo de diatomita misturada na argila de 0 e 15% (valores extremos - os demais valores possuem comportamento intermediário).

**Figura 54** – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

**Figura 55** – Variação da temperatura superficial do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.



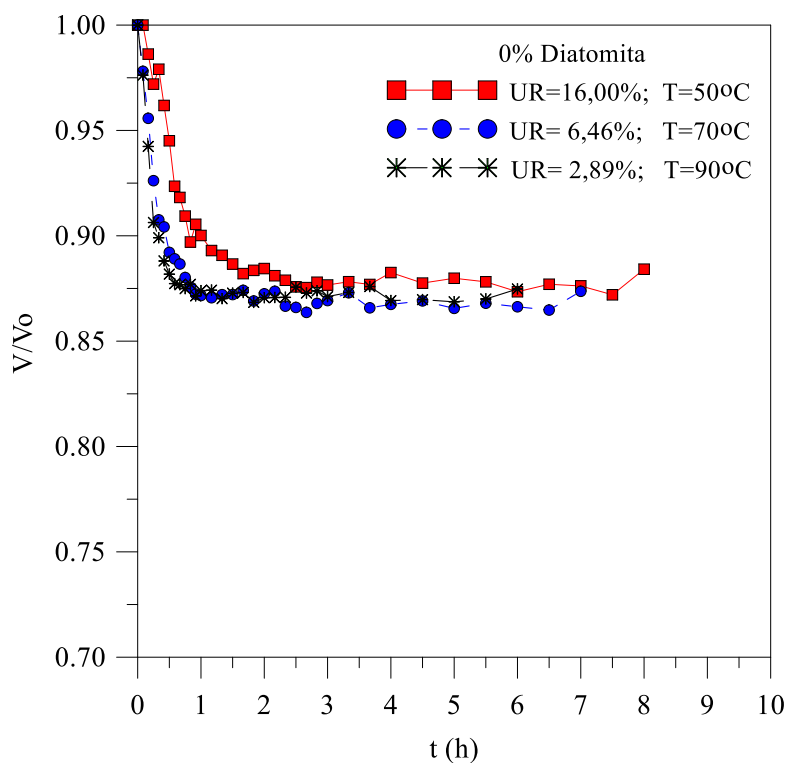
Fonte: O autor (2023).

Ao analisar os resultados das Figuras 54 e 55, verifica-se claramente que a elevação de temperatura é fortemente afetada pela temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Em geral, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, mais rápida é o aquecimento, e em menor tempo o produto atinge sua temperatura de equilíbrio térmico. Este efeito ocorre durante todo o processo de secagem, sendo mais pronunciado para tijolo com menor percentagem de diatomita. Isto ocorre devido à alteração na difusividade térmica do material, devido à presença da diatomita misturada à argila, sendo mais pronunciado para condição de menor temperatura de secagem.

#### 4.1.8.3 Cinéticas de variações dimensionais

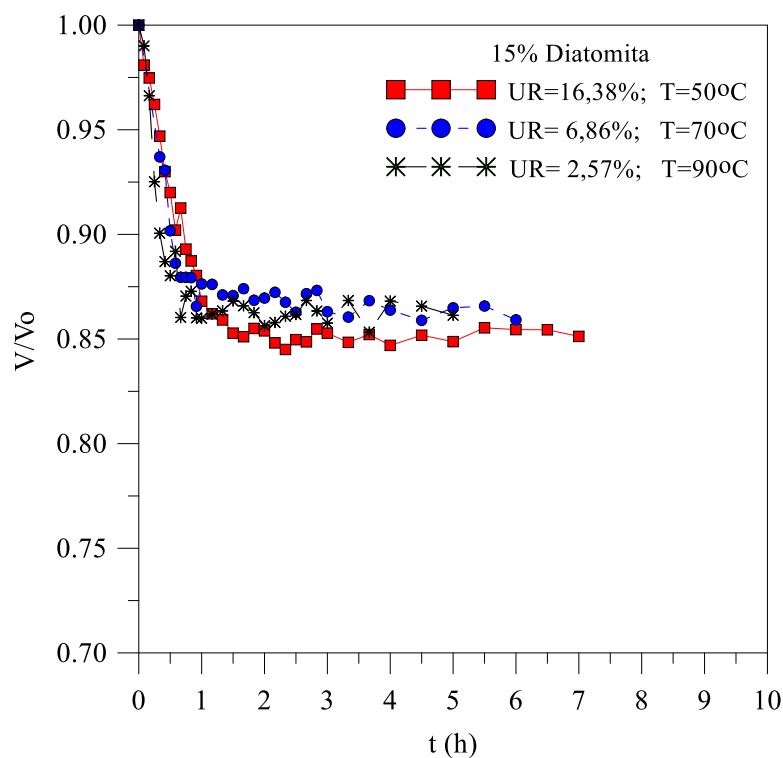
Nas Figuras 56 e 57, são evidenciadas as variações do volume do tijolo cerâmico em função do tempo na secagem para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar e percentagem de resíduo de diatomita.

**Figura 56** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 0% de diatomita.



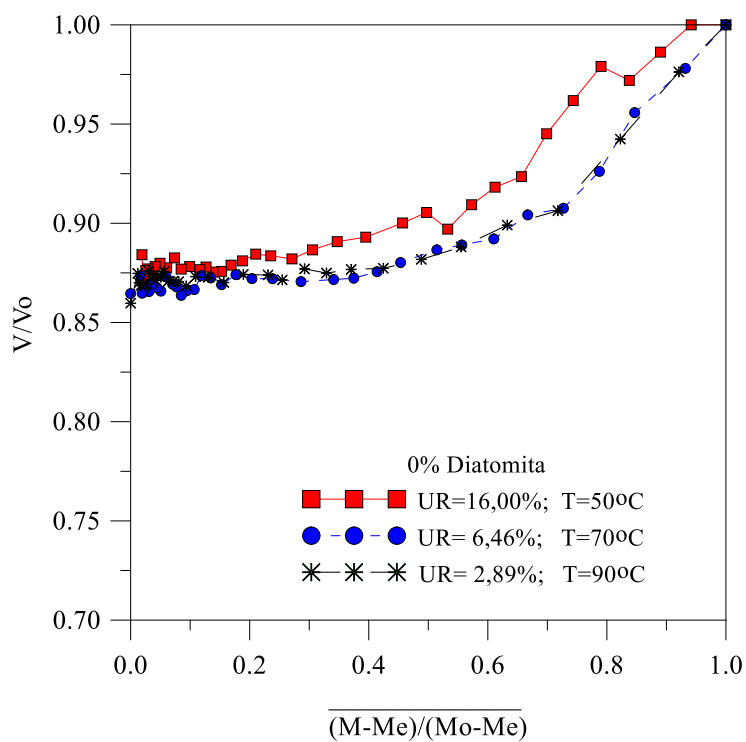
Fonte: O autor (2023).

**Figura 57** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do tempo de secagem utilizando 15% de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

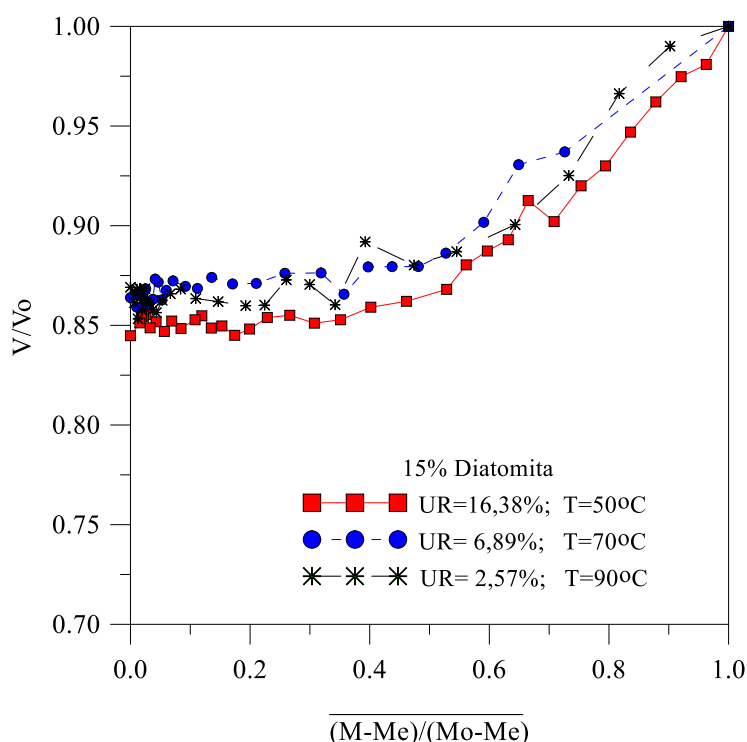
**Figura 58** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade utilizando 0% de diatomita.



Fonte: O autor (2023).



**Figura 59** – Variação volumétrica do tijolo cerâmico em função do teor de umidade utilizando 15% de diatomita.



Fonte: O autor (2023).

Após uma análise das Figuras 56 e 57, verifica-se claramente o efeito da temperatura do ar no encolhimento do material, sendo mais pronunciado para a condição de argila sem resíduo de diatomita.

Já as Figuras 58 e 59 ilustram as variações dimensionais sofridas pelo tijolo em função do teor de umidade médio adimensional, para as mesmas condições operacionais já citadas.

Nota-se que, para todas as temperaturas de secagem avaliadas, no início do processo há uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões do sólido mudam desde uma velocidade de encolhimento alta até tender a zero. Porém comparando-se os gráficos, observa-se que, para temperaturas de secagem baixas como, por exemplo, 50°C, a variação no volume do tijolo ocorre de forma mais uniforme, devido ao fato da retirada de água ser mais lenta, promovendo a secagem e aquecimento mais demorados. A presença do resíduo de diatomita na amostra altera sensivelmente o comportamento da variação das dimensões do material, isto é, altera fortemente a velocidade de encolhimento e o encolhimento total.

Observam-se ainda, nas Figuras 58 e 59, diversas oscilações no volume do material provocadas pela dilatação sofrida devido ao aumento da temperatura e em seguida contração devido à remoção de líquido. Estes efeitos são mais pronunciados nos tempos finais de secagem,

nos quais o teor de umidade do material é bem baixo e, principalmente, para secagem em altas temperaturas e com 15% de resíduo de diatomita na massa cerâmica.

A Tabela 13 resume, os volumes do tijolo cerâmico, no início e no final da secagem, bem como suas variações de volume, para cada condição de secagem previamente estabelecidas.

**Tabela 13** – Condições experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.

Teste	Ar			Tijolo					t (h)
	T (°C)	UR (%)	RD* (%)	V <sub>o</sub> (mm <sup>3</sup> )	V <sub>f</sub> (mm <sup>3</sup> )	ΔV (mm <sup>3</sup> )	ΔV (%)	ΔM (M <sub>o</sub> -M <sub>f</sub> ) kg/kg	
1	50	16,00	0	87743,92	77576,86	10167,10	11,59	0,1768	8,0
2	50	19,03	5	96823,37	74969,56	21853,80	22,57	0,3006	7,5
3	50	15,23	10	105215,62	89584,67	15630,90	14,86	0,2211	8,0
4	50	16,38	15	92818,57	79012,57	13806,00	14,87	0,2247	7,0
5	70	6,46	0	95862,37	83749,94	12112,40	12,63	0,1858	7,0
6	70	7,07	5	98648,05	77508,03	21140,00	21,43	0,3075	7,5
7	70	6,15	10	103510,36	87991,31	15519,10	14,99	0,2300	6,5
8	70	6,86	15	92104,57	79131,86	12972,70	14,08	0,2330	6,0
9	90	2,89	0	94648,39	82792,03	11856,40	12,53	0,1895	6,0
10	90	2,82	5	97277,82	75888,51	21389,30	21,99	0,3144	6,0
11	90	2,93	10	99573,52	81451,95	18121,60	18,20	0,2327	5,0
12	90	2,57	15	87563,99	75422,51	12141,50	13,87	0,2350	5,0

Fonte: Dados da pesquisa (2023).

Ao analisar-se os resultados reportados na Tabela 13 verifica-se que:

a) Quanto maior o teor de umidade inicial, maiores foram a variação volumétrica e a variação do teor de umidade do tijolo ao final do processo de secagem.

b) O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar durante o processo de secagem não afetaram significativamente o encolhimento e a perda total de umidade. A influência ocorre apenas na velocidade com que os fenômenos de encolhimento, aquecimento e perda de umidade do produto acontecem.

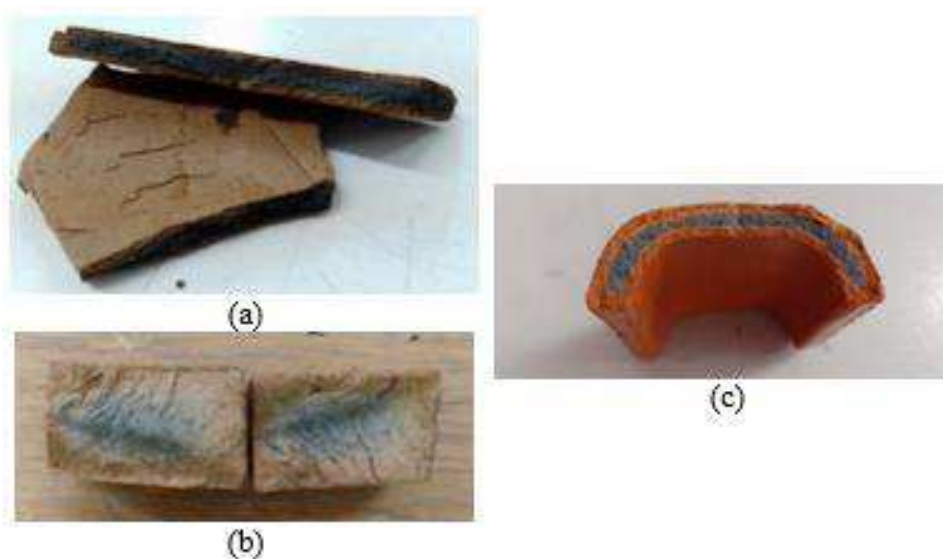
c) Quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar de secagem, maiores serão as taxas de variação dimensional, aquecimento e de secagem do tijolo cerâmico, portanto, menores serão os tempos finais de secagem.

d) As variações de umidade do produto foram sempre superiores às variações de volume, em todas as condições de secagem previamente estabelecidas. Isto é um forte indicativo de que o produto, em algum momento durante o processo de secagem, tem sua velocidade de variação dimensional bastante reduzida e tendendo para zero, enquanto o produto continua a perder umidade ao longo do processo até atingir sua condição final de secagem.

#### 4.1.9 Queima

Conforme descrito anteriormente, o estudo experimental da queima foi feito considerando-se três temperaturas: 800°C, 900°C e 1000°C. Inicialmente testou-se uma taxa de aquecimento de 5°C/min. Para essa taxa de aquecimento percebeu-se a presença do efeito descrito na literatura como coração negro (Figura 60).

**Figura 60** – Presença de coração negro em corpos queimados até 800°C.



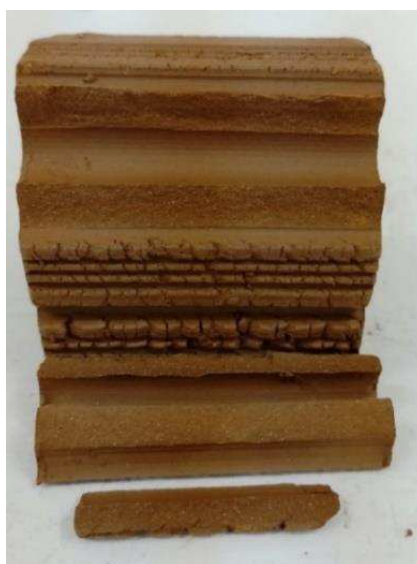
Fonte: O autor (2023).

O coração negro corresponde ao aparecimento de um núcleo escuro nas peças cerâmicas devido a problemas de queima associados à presença de matéria orgânica e compostos de ferro na composição da matéria-prima, em razão do tempo de queima não ter sido suficiente para trocas térmicas satisfatórias. Macedo *et al.* (2013) destacam como as principais consequências danosas da presença do coração negro em corpos cerâmicos o inchamento das peças, as deformações pirolásticas, a deterioração das características técnicas e das características estéticas.

Conforme indicado na literatura, uma das soluções para o problema é reduzir a taxa de aquecimento buscando ciclos de queima mais longos, capazes de possibilitar a oxidação de toda a matéria orgânica antes mesmo que a absorção de água reduza o suficiente dificultando a entrada de oxigênio e a saída de CO e CO<sub>2</sub> do corpo cerâmico.

Para aumentar o ciclo de queima, reduziu-se a taxa de aquecimento de 5°C/min para 2°C/min, tornando o processo de queima mais lento e aumentando-se o tempo para ocorrência das trocas térmicas. Os experimentos mostraram-se satisfatórios, uma vez que não foi notado o aparecimento do coração negro para queimas com taxa de aquecimento de 2°C/min (Figura 61). Em cada queima era selecionado um corpo de prova para verificação do efeito coração negro. A Figura 61 exibe uma destas amostras quebradas, onde se constata a ausência do efeito citado.

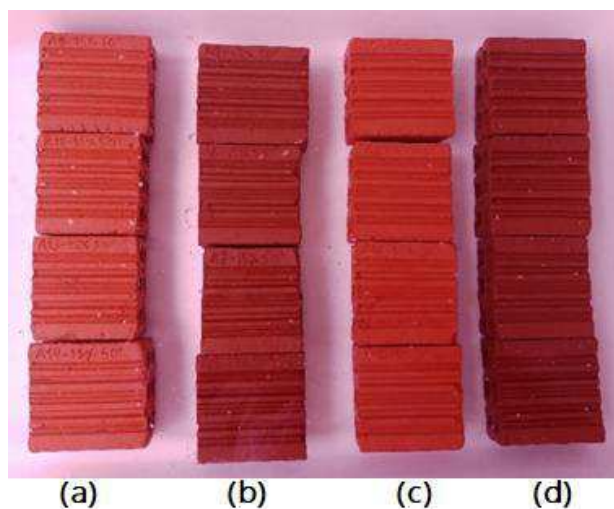
**Figura 61** – Ausência de coração negro.



Fonte: O autor (2023).

Na Figura 62 são exibidas amostras sujeitas à queima até as temperaturas de 800°C e 1000°C. A amostra da esquerda, fileira (a) corresponde aos tijolos com 15% de resíduo de diatomita secos na temperatura de 50°C e sujeitos à queima na temperatura de 1000°C; na fileira (b) estão as amostras com 15% de resíduo secas na temperatura de 50°C e sujeitas à queima na temperatura de 800°C; na fileira (c) estão os tijolos com 15% de resíduo secos na temperatura de 90°C e sujeitos à queima na temperatura de 1000°C; e na fileira (d) estão as amostras com 15% de resíduo secas na temperatura de 90°C e sujeitas à queima na temperatura de 800°C.

**Figura 62** – Cor dos tijolos queimados a 800°C e 1000°C.

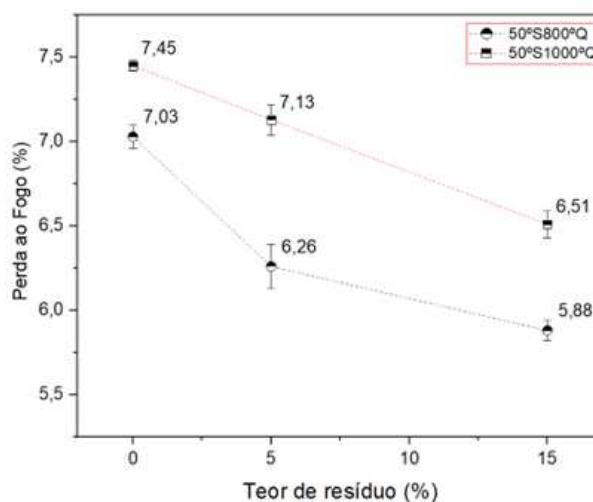


Fonte: O autor (2023).

Os tijolos mais claros, fileiras (a) e (c) são os que passaram por queimas em temperaturas mais altas; estas foram mais satisfatórias e, conseqüentemente, resultaram em corpos cerâmicos com menores taxas de absorção de água e mais resistentes.

Na Figura 63 podemos observar o comportamento de perda de massa ao fogo (ou perda ao fogo) para as amostras secas na temperatura de 50°C e sujeitas à queima nos patamares de 800°C e 1000°C.

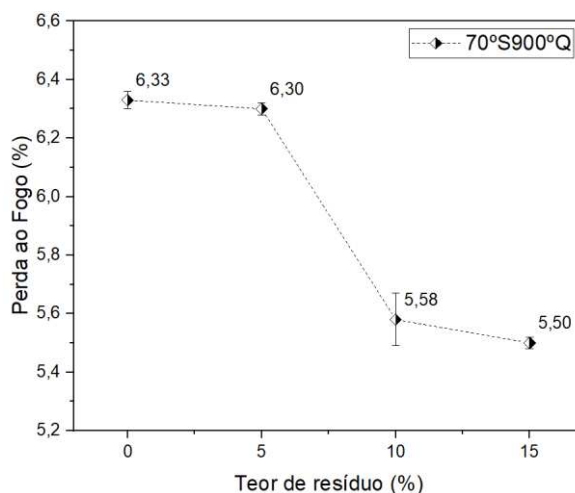
**Figura 63** – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 50°C.



Fonte: O autor (2023).

A Figura 64 mostra a perda ao fogo para as amostras com diferentes teores de resíduo secas na temperatura de 70°C e sujeitas à queima no patamar de 900°C.

**Figura 64** – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 70°C.

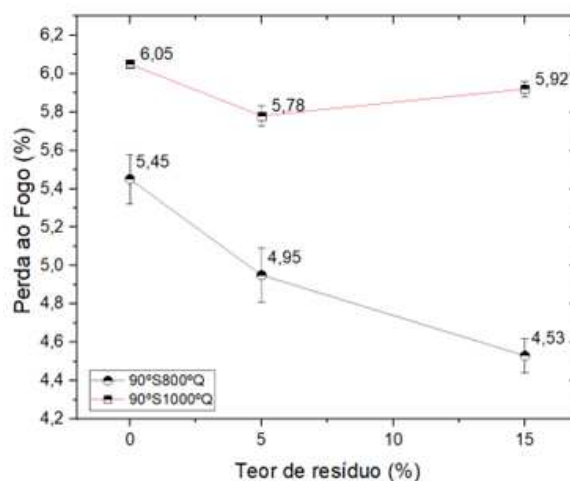


Fonte: O autor (2023).

Para massas com teores de resíduo de 0% e 5% os resultados são semelhantes, no entanto, nota-se que quando o percentual de resíduo adicionado é de 10% ou 15%, a perda de fogo reduziu bastante. Isso se deve ao fato que a adição de resíduo contribui para maiores perdas de massa durante a secagem, restando menos umidade a ser liberada durante a queima.

A Figura 65 mostra a perda ao fogo para as amostras com diferentes teores de resíduo secas na temperatura de 90°C e sujeitas à queima nos patamares de 800°C e 1000°C.

**Figura 65** – Perda ao fogo para as amostras secas na temperatura de 90°C.



Fonte: O autor (2023).

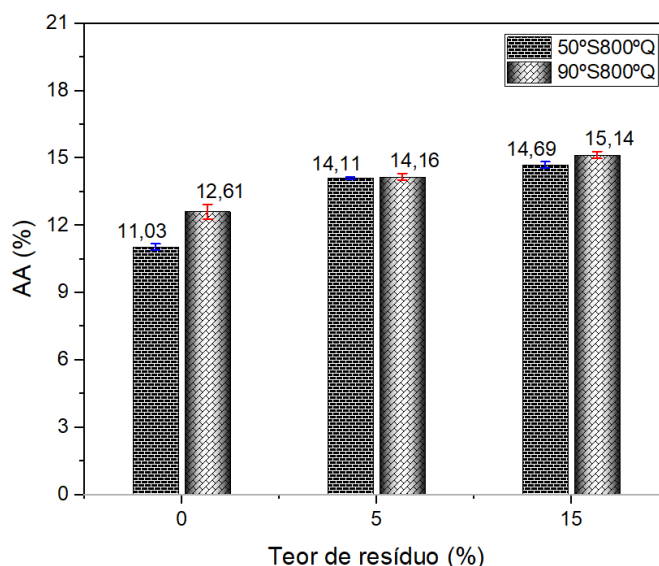
Na Figura 65 nota-se uma tendência de redução da perda ao fogo com o aumento do teor de resíduo, com exceção do comportamento apresentado pelas amostras com 15% de resíduo que passaram pela secagem a 90°C e queima a 1000°C.

#### 4.1.10 Testes de absorção de água e porosidade aparente

A seguir, são apresentados, na Figura 66, os resultados referentes aos ensaios de absorção de água e porosidade aparente. Para cada ensaio, foram considerados quatro corpos de prova. A média dos valores obtidos e os desvios padrão foram considerados. Com exceção do ponto médio de temperatura de secagem e queima, para as demais temperaturas foram realizados ensaios apenas com as amostras com 0%, 5% e 15% de resíduo.

Na Figura 66, observamos que para corpos de prova com percentual de 0% de resíduo, isto é, amostras fabricadas apenas de argila, a absorção de água cresceu de 1,58% ao mudarmos a temperatura de secagem de 50°C para 90°C. Quando considerada a adição de 5% de resíduo, as amostras apresentam absorção de água levemente maior para temperatura de secagem de 90°C, uma diferença de 0,05%. Resultado semelhante ocorre para corpos de prova produzidos com um percentual de 15% de resíduo; neste caso, as amostras secas a 90°C também possuem absorção um pouco superior, 0,45%.

**Figura 66** – Absorção de água para queimas até 800°C.

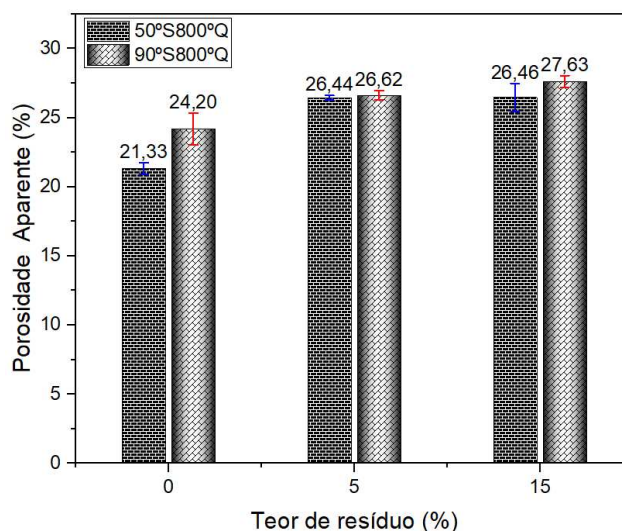


Fonte: O autor (2023).

No geral, a Figura 66 nos permite concluir que o aumento do percentual de resíduo e da temperatura de secagem acarretam o aumento da absorção de água. A Figura 67 fornece a

porosidade aparente para amostras com 0%, 5% e 15% de resíduo, sujeitas à secagem nas temperaturas de 50°C e 90°C e queimadas até o patamar de 800°C numa taxa de aquecimento de 2°C/min.

**Figura 67** – Porosidade aberta da amostra para queimas até 800°C.



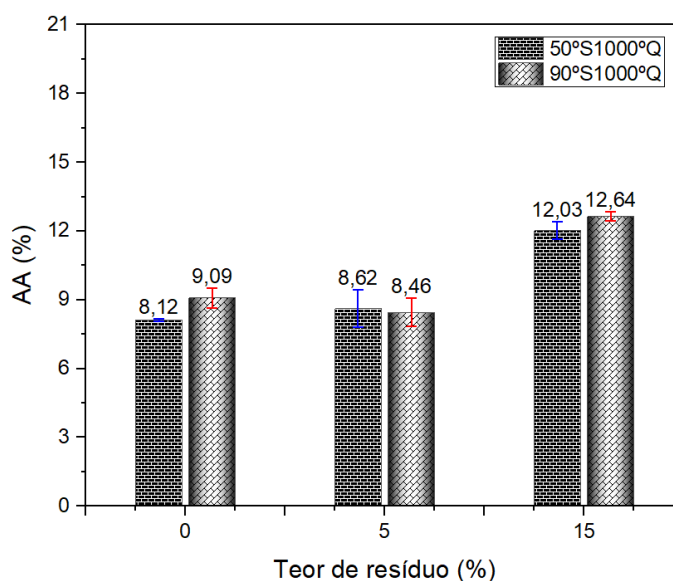
Fonte: O autor (2023).

O aumento da temperatura de secagem altera a taxa de saída de umidade do material, e quanto mais rápida for a saída de água, maior será a porosidade aparente do material cerâmico, como pode ser percebido por meio da análise da Figura 67. Os resultados comparativos entre as Figuras 66 e 67, mostram que a absorção de água cresce com a porosidade e, assim como a absorção, a porosidade se reduz com a redução da temperatura de secagem, sendo que a maior redução ocorreu para as amostras sem adição de resíduo.

O aumento da porosidade com a incorporação do resíduo, corrobora com a uniformidade da secagem, onde os gradientes de temperatura e de umidade são reduzidos. Uma alternativa para controlar a intensidade da secagem é controlar a velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem, além da forma do corpo (área/volume). A Figura 68 mostra a absorção de água em função da temperatura de queima e do teor de resíduo.



**Figura 68** – Absorção de água para queimas com patamar 1000°C.



Fonte: O autor (2023).

Analisando os dados representados na Figura 68, pode-se afirmar que:

- Fixado o teor de resíduo, os corpos de prova secos na menor temperatura têm menor absorção de água, a exceção daqueles corpos de prova com 5% de resíduo;
- A absorção de água cresce com o teor de resíduo, a exceção daqueles corpos de prova com 5% de resíduo;
- Em todas as condições analisadas para a queima a 1000°C, a absorção de água está em conformidade com a NBR 15270-1 (ABNT, 2017), que normatiza os valores para a variável (AA).

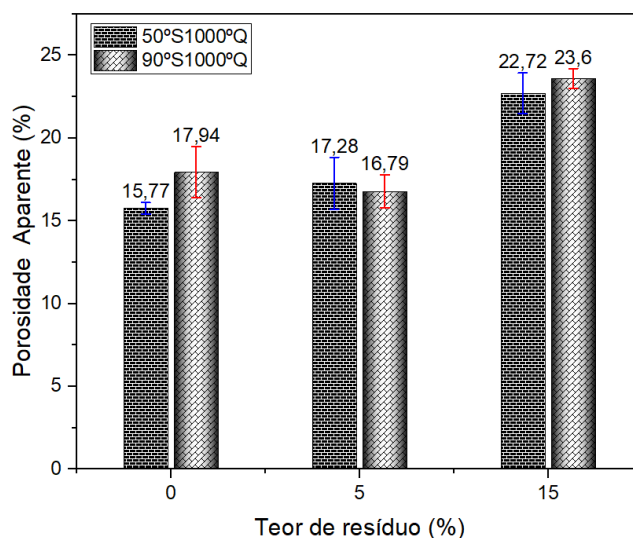
Os desvios-padrão foram todos menores do que 1%, e as medianas dos dados estão próximas às médias, o que indica que os dados obtidos são boa qualidade. Considerando a margem de erro, o aumento da absorção de água com o aumento da temperatura de secagem, para o teor de resíduo de 5% pode ser verificado, mas também não é possível descartar eventual erro experimental.

Comparando-se as Figuras 68 e 69, notamos que o aumento da temperatura de queima reduziu a absorção de água. A queima em temperatura mais elevada possibilita a confecção de um corpo mais compacto, com menor quantidade de poros e, conseqüentemente, que absorve menos água. Para maiores percentuais de resíduo, o corpo cerâmico tornou-se mais poroso, o

que corroborou com a secagem mais uniforme, entretanto, resultou em corpos de prova com maiores absorção de água.

A Figura 69 mostra o comportamento da porosidade aparente do material como função da temperatura de queima e do teor de resíduo.

**Figura 69** – Porosidade aberta da amostra para queimas até 1000°C.

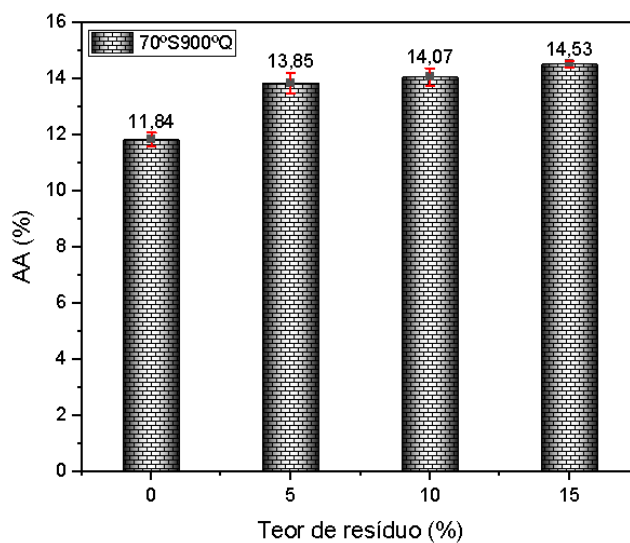


Fonte: O autor (2023).

Comparando-se as Figuras 66 e 67 ou ad Figuras 68 e 69, notamos comportamentos bastantes similares. Percebe-se ainda que as amostras queimadas a 1000°C são menos porosas e absorvem menos água do que aquelas que foram queimadas a 800°C, o que evidencia a dependência entre estas grandezas e o patamar de queima. A partir dos 900°C, ocorre a vitrificação e, conseqüentemente, a densificação do material cerâmico, fato que favorece a redução da porosidade e, conseqüentemente, a absorção de água.

Para o estudo da queima a 900°C, foram tomadas apenas amostras secas na temperatura de 70°C; essas temperaturas correspondem aos respectivos pontos médios de queima e secagem.

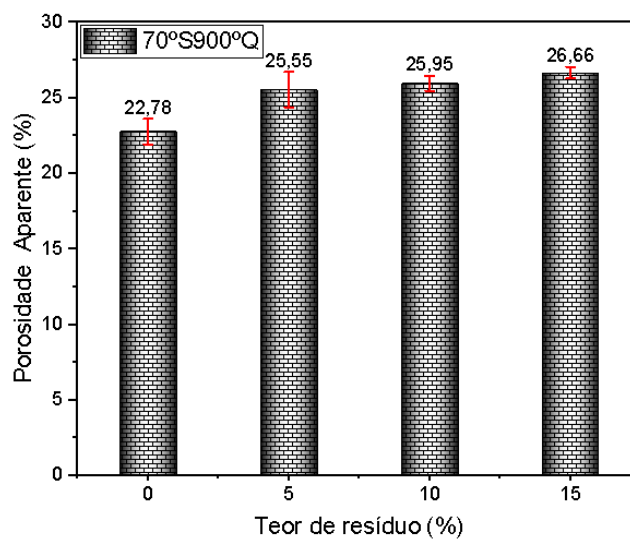
A Figura 70 deixa evidente o fato de a absorção de água aumentar com o aumento da quantidade de resíduo adicionado à argila, mostrando um comparativo entre a absorção de água apresentada pelas amostras queimadas até o patamar de 900°C numa taxa de aquecimento de 2°C/min.

**Figura 70** – Absorção de água para queimas até 900°C.

Fonte: O autor (2023).

O aumento na quantidade de resíduo altera a porosidade do material e, conseqüentemente, afeta a absorção de água.

A Figura 71 ilustra a variação da porosidade aparente em relação à alteração na quantidade de resíduo de diatomita presente nas amostras, considerando uma temperatura de queima de 900°C.

**Figura 71** – Porosidade aparente para amostras queimadas até 900°C.

Fonte: O autor (2023).

A quantidade de resíduo influenciou na porosidade, sendo que para teores mais elevados de resíduo, observou-se um aumento correspondente na porosidade.

#### 4.1.11 Teste de resistência a compressão

Na avaliação da resistência a compressão apenas duas amostras com 0% de resíduo e uma com 5% de resíduo atenderam ao que exige a NBR 15270-1 (ABNT, 2017). Na Tabela 14 estão elencadas as amostras e suas respectivas resistências a compressão.

**Tabela 14** – Resistência a compressão.

AMOSTRA AX %RY°SZ°Q	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)
A0%R50°S800°Q	1,20
A0%R50°S1000°Q	1,90
A0%R70°S900°Q	1,92
A0%R90°S800°Q	0,97
A0%R90°S1000°Q	1,45
A5%R50°S800°Q	1,23
A5%R50°S1000°Q	1,17
A5%R90°S800°Q	0,89
A5%R70°S900°Q	1,44
A5%R90°S1000°Q	1,51
A15%R50°S800Q	0,83
A15%R50°S1000Q	1,35
A15%R70°S900Q	1,35
A15%R90°S800Q	0,93
A15%R90°S1000Q	1,27

Fonte: O autor (2023).

Para as amostras com 0% de resíduo secas a 50°C, é possível observar que o aumento na temperatura de queima levou a corpos mais resistentes. O mesmo comportamento é observado para os demais corpos de prova, com exceção daqueles com 5% de resíduo secos a 50°C. A fuga do padrão pode estar relacionada a defeitos em dois dos corpos de prova, pois dois deles tiveram resistências bem discrepantes dos demais.

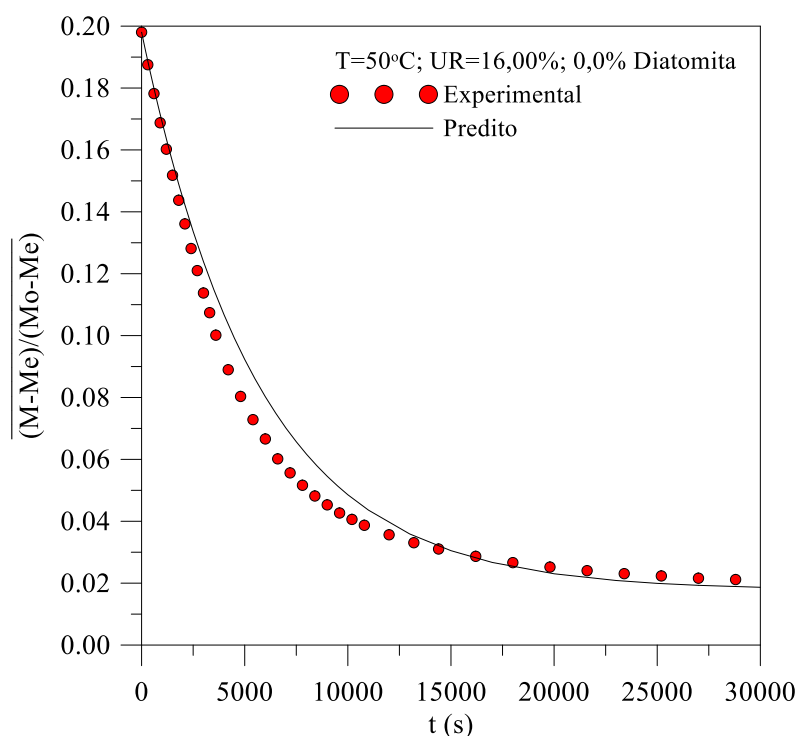
Nenhuma amostra com 15% de resíduo de diatomita apresentou valor de resistência a compressão que atendessem ao limite máximo especificado pela NBR 1570-1 (ABNT, 2017), que é de 1,5 MPa. Como a resistência a compressão mostrou-se crescer com o aumento da temperatura de queima, seria interessante, para investigações futuras, estudar composições com 10% e 15% de resíduo de diatomita, considerando temperaturas de queima superiores a 1000°C.

## 4.2 Resultados teóricos

### 4.2.1 Cinética de sorção de água

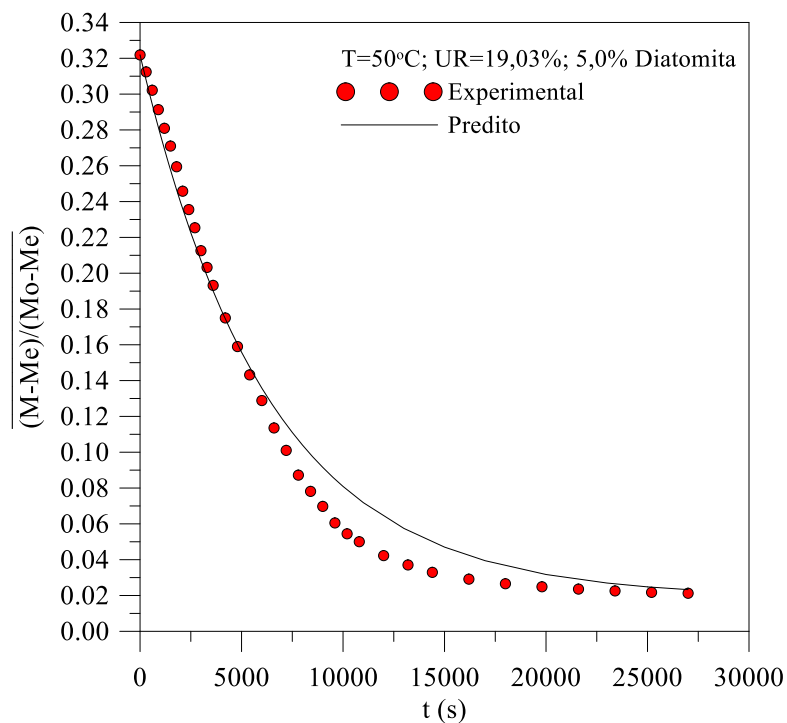
Os resultados obtidos com a modelagem matemática dependem de condições de contorno, das propriedades termofísicas e da geometria analisada. Discrepâncias observadas entre os resultados experimentais e teóricos, são normais e, muitas vezes, estão relacionadas com as considerações e simplificações adotadas em cada modelo utilizado. As Figuras 72 a 83 ilustram o comportamento transiente do teor de umidade médio adimensional ao longo do processo de secagem para cada condição experimental estudada. Analisando os gráficos apresentados, observa-se uma boa concordância entre os valores preditos e experimentais, para todos os casos analisados, o que possibilitou a estimativa dos coeficientes de transporte de massa difusivo e convectivo de forma consistente.

**Figura 72** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ,  $UR= 16,00\%$ ,  $0,0\%$  Diatomita).



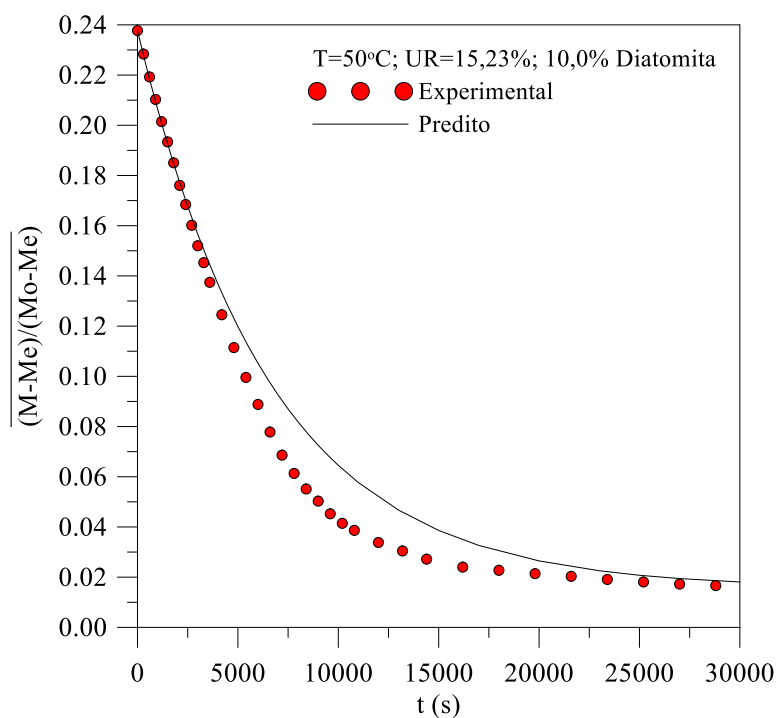
Fonte: O autor (2023).

**Figura 73** – Comparação entre os teores de umidade médios dimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=19,03\%$ ,  $5,0\%$  Diatomita).



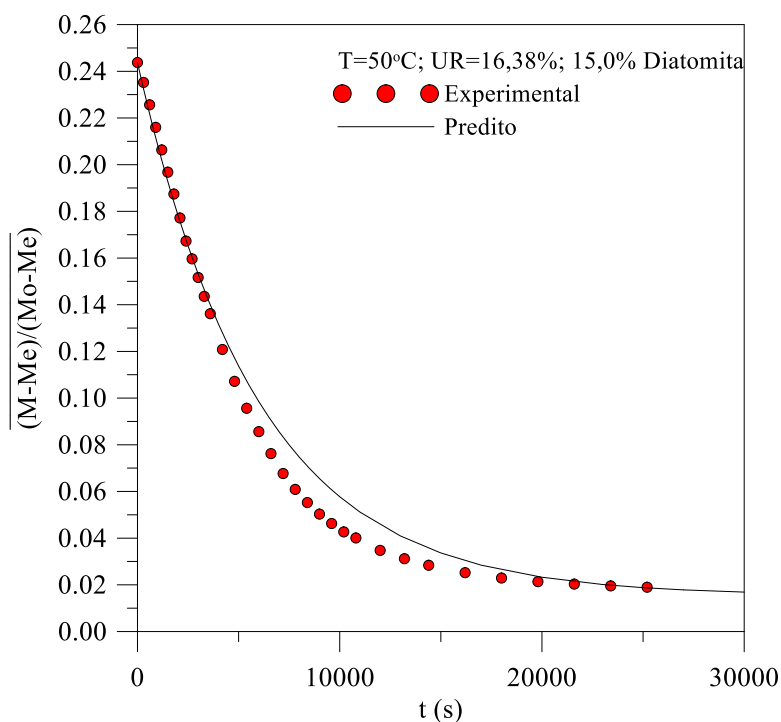
Fonte: O autor (2023).

**Figura 74** – Comparação entre os teores de umidade médios dimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=15,23\%$ ,  $10,0\%$  Diatomita).



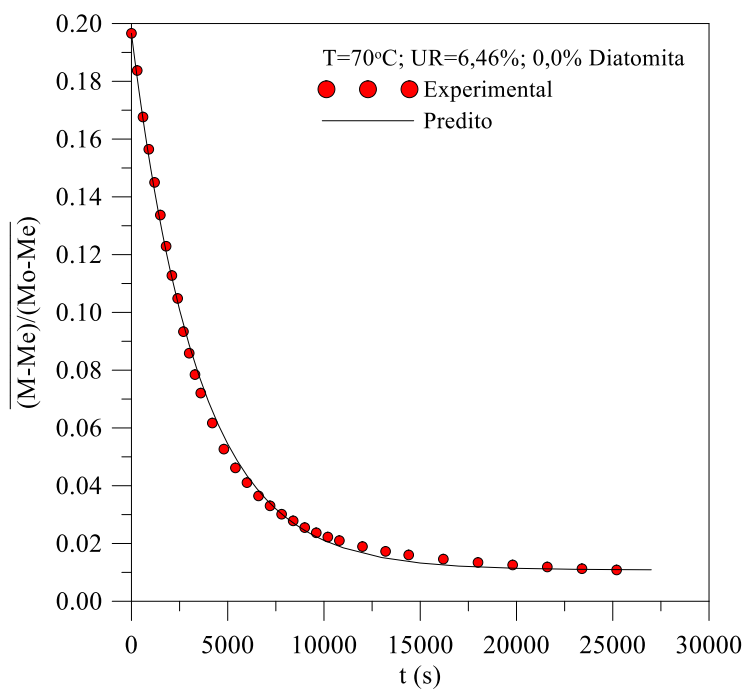
Fonte: O autor (2023).

**Figura 75** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=50^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=16,38\%$ ,  $15,0\%$  Diatomita).



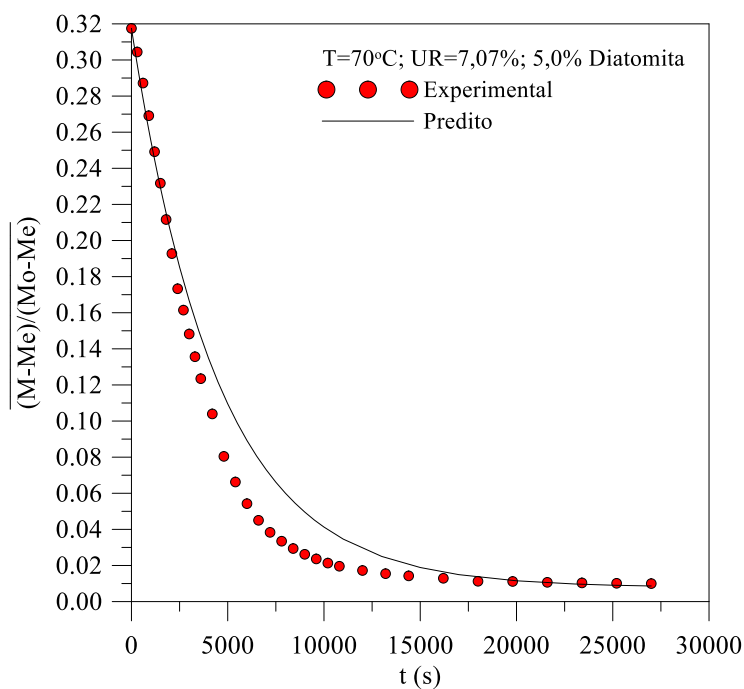
Fonte: O autor (2023).

**Figura 76** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=70^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=6,46\%$ ,  $0,0\%$  Diatomita).



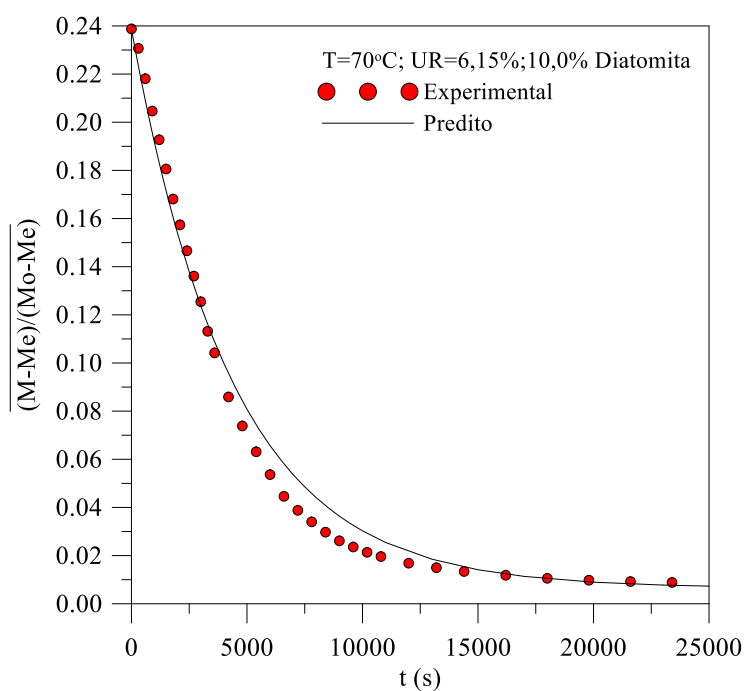
Fonte: O autor (2023).

**Figura 77** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=70^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=7,07\%$ ,  $5,0\%$  Diatomita).



Fonte: O autor (2023).

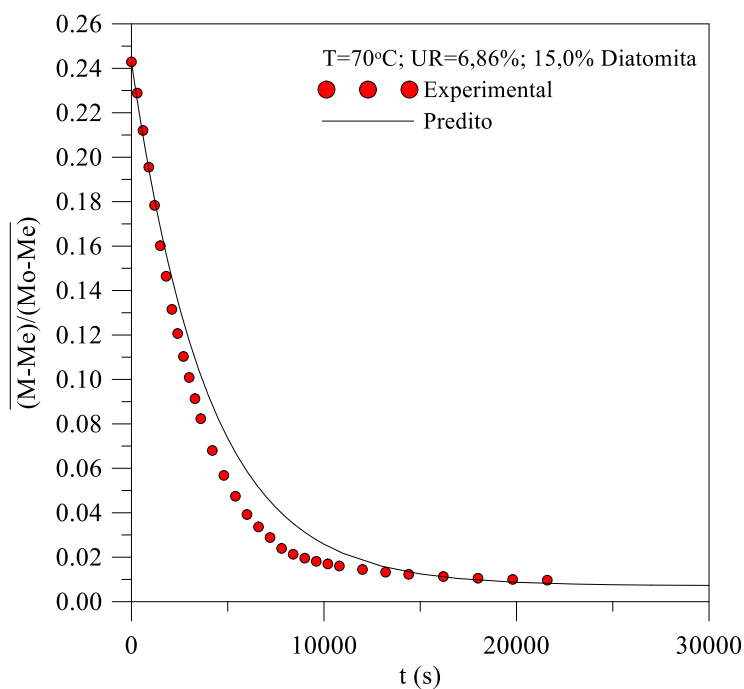
**Figura 78** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=70^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=6,15\%$ ,  $10,0\%$  Diatomita).



Fonte: O autor (2023).

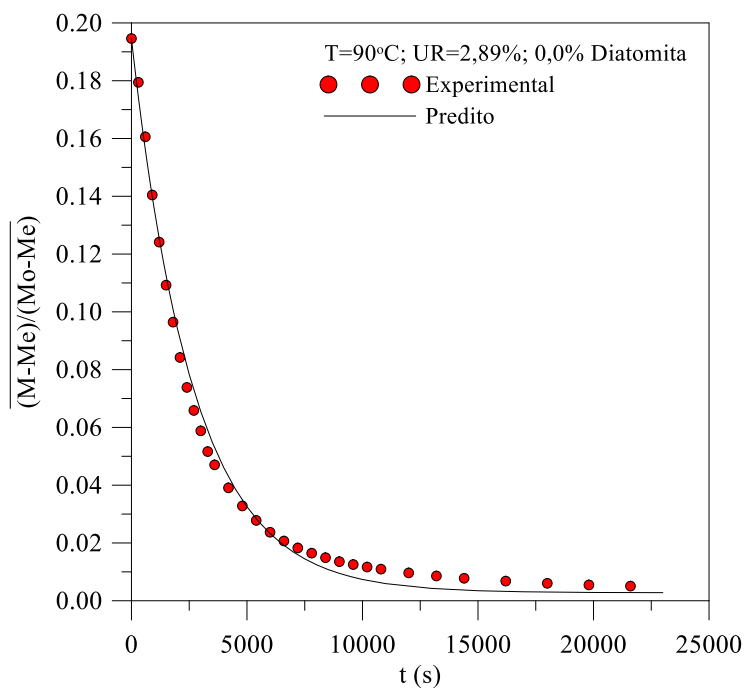


**Figura 79** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=70^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=6,86\%$ ,  $15,0\%$  Diatomita).



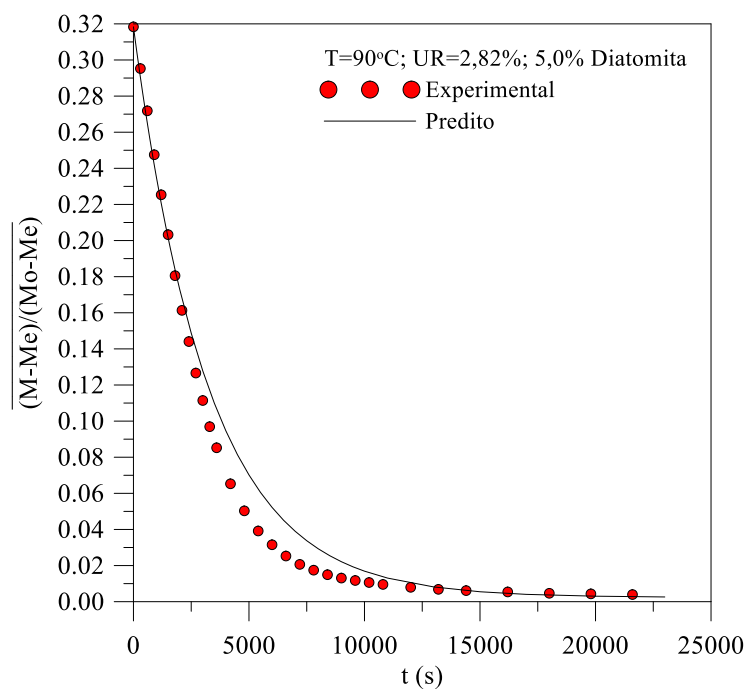
Fonte: O autor (2023).

**Figura 80** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=2,89\%$ ,  $0,0\%$  Diatomita).



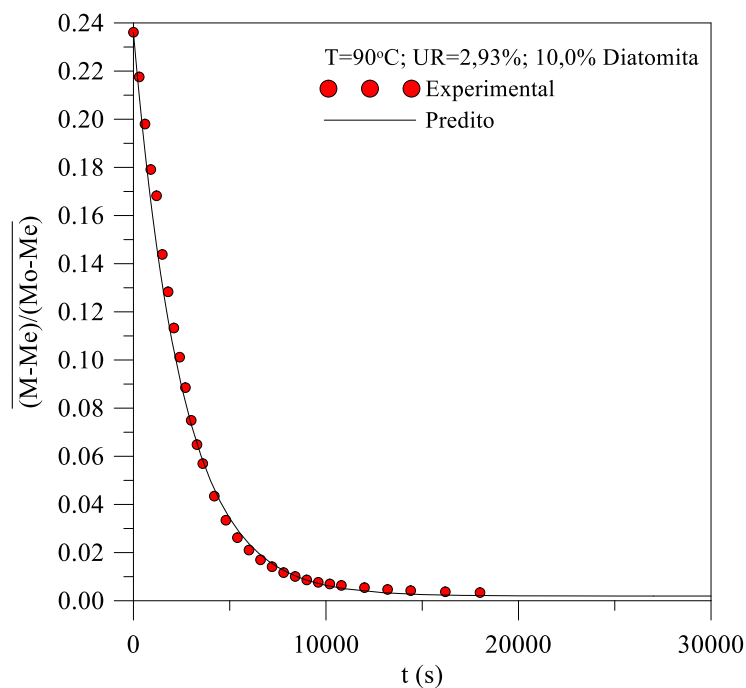
Fonte: O autor (2023).

**Figura 81** – Comparação Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=2,82\%$ ,  $5,0\%$  Diatomita).



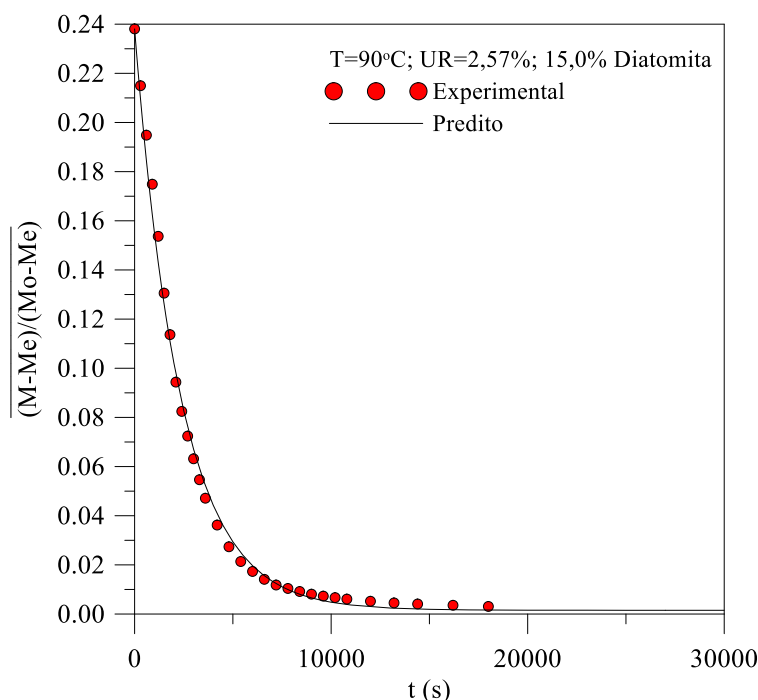
Fonte: O autor (2023).

**Figura 82** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ,  $UR=2,93\%$ ,  $10,0\%$  Diatomita).



Fonte: O autor (2023).

**Figura 83** – Comparação entre os teores de umidade médios adimensionais do tijolo ao longo do tempo de processo, ( $T=90^{\circ}\text{C}$ ,  $UR= 2,57\%$ ,  $15,0\%$  Diatomita).



Fonte: O autor (2023).

Perceba que em alguns casos, o modelo teórico deferiu um pouco do modelo experimental, em outros, a diferença foi praticamente inexistente. As divergências podem ocorrer devido a simplificações adotadas no modelo teórico, como por exemplo, a desconsideração de variações geométricas. Nas situações em que o encolhimento é mais intenso ocorrem divergências entre os modelos.

A diferença entre os modelos teórico e experimental tende a reduzir com o aumento da temperatura de secagem, mas dependem também do percentual de diatomita incorporado, da umidade inicial do produto e da umidade relativa do ar de secagem. Nota-se que o efeito da temperatura prevalece sobre o efeito da presença do resíduo de diatomita.

Observa-se claramente a adequação do modelo matemático à curva experimental obtida a partir da perda de umidade do corpo cerâmico. Verifica-se que a perda de umidade ocorre de maneira bastante rápida nas primeiras 3 horas de processo. Esse fenômeno pode ser explicado pela facilidade com que as moléculas de água têm de se movimentar entre os micros vazios (poros) do tijolo de argila. Para tempos mais longos, a curva vai mudando sua inclinação até atingir um patamar constante que representa o nível de equilíbrio higroscópico do material.

Comportamento similar tem sido reportado por outros pesquisadores, como já mencionado ao longo do texto.

#### 4.2.2 Estimativa do coeficiente de transporte de massa difusivo e convectivo

A Tabela 15 resume os resultados obtidos para os coeficientes de transporte de massa convectivo e difusivo, e densidade do material (no início e no fim da secagem). Analisando-se os resultados para os coeficientes de transferência de massa convectivos e difusivos, verifica-se que estes parâmetros aumentam com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar de secagem. Contudo, o aumento da fração de diatomita não afetou significativamente estes parâmetros. Observa-se, ainda, que o coeficiente de transferência de massa convectivo na superfície externa do tijolo foi superior àquele encontrado na superfície interna do tijolo; forte indício que a superfície externa do tijolo é responsável pela maior perda de massa do produto ao longo do processo de secagem. Quanto à densidade do tijolo, verifica-se que esta decresce ao longo do processo de secagem devido às variações dimensionais do tijolo e sua perda de massa, contudo a variação deste parâmetro foi pequena. No que diz respeito à composição química do tijolo, a presença da diatomita não alterou significativamente a densidade do material.

**Tabela 15** – Coeficientes de transporte de massa convectivo e difusivo.

Ar			Tijolo					
T (°C)	UR (%)	Fração de diatomita (%)	$hm_1$ (m/s)	$hm_2$ (m/s)	$hm$ (m/s)	$D$ (m <sup>2</sup> /s)	$\rho_u$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
50	16,00	0	$8,76 \times 10^{-7}$	$2,82 \times 10^{-7}$	$5,79 \times 10^{-7}$	$6,52 \times 10^{-9}$	1868,53	1781,52
50	19,03	5	$9,10 \times 10^{-7}$	$1,83 \times 10^{-7}$	$5,47 \times 10^{-7}$	$6,28 \times 10^{-9}$	1520,67	1496,36
50	15,23	10	$8,80 \times 10^{-7}$	$2,36 \times 10^{-7}$	$5,58 \times 10^{-7}$	$6,50 \times 10^{-9}$	1660,76	1718,94
50	16,38	15	$9,14 \times 10^{-7}$	$2,44 \times 10^{-7}$	$5,79 \times 10^{-7}$	$6,53 \times 10^{-9}$	1683,24	1612,78
70	6,46	0	$14,67 \times 10^{-7}$	$5,31 \times 10^{-7}$	$9,99 \times 10^{-7}$	$11,53 \times 10^{-9}$	1769,62	1712,80
70	7,07	5	$12,32 \times 10^{-7}$	$3,67 \times 10^{-7}$	$8,00 \times 10^{-7}$	$9,17 \times 10^{-9}$	1512,47	1459,78
70	6,15	10	$12,64 \times 10^{-7}$	$4,64 \times 10^{-7}$	$8,64 \times 10^{-7}$	$9,96 \times 10^{-9}$	1627,33	1567,88
70	6,86	15	$12,63 \times 10^{-7}$	$4,57 \times 10^{-7}$	$8,60 \times 10^{-7}$	$9,79 \times 10^{-9}$	1669,61	1566,08
90	2,89	0	$18,06 \times 10^{-7}$	$7,88 \times 10^{-7}$	$12,97 \times 10^{-7}$	$14,85 \times 10^{-9}$	1785,85	1738,93
90	2,82	5	$16,96 \times 10^{-7}$	$5,50 \times 10^{-7}$	$11,23 \times 10^{-7}$	$12,88 \times 10^{-9}$	1533,72	1505,24
90	2,93	10	$21,22 \times 10^{-7}$	$6,90 \times 10^{-7}$	$14,06 \times 10^{-7}$	$16,29 \times 10^{-9}$	1667,67	1621,85
90	2,57	15	$21,44 \times 10^{-7}$	$6,91 \times 10^{-7}$	$14,17 \times 10^{-7}$	$15,85 \times 10^{-9}$	1770,68	1646,92

Fonte: O autor (2023).

O coeficiente de difusão mede a tendência que as moléculas de água apresentam de migrar de uma região de concentração elevada para outra de concentração mais baixa, demonstrando assim, a capacidade das moléculas de água de migrar do interior do tijolo para a sua superfície, num processo de dessecção de água. Dessa forma, quanto maior o coeficiente de difusão, mais rápida é a difusividade de uma espécie em relação à outra. O coeficiente de difusão está diretamente relacionado, principalmente com a temperatura do meio e o teor de umidade no interior do material, no entanto, também é dependente da composição química da amostra analisada.

A comparação entre as difusividades de massa (coeficiente de difusão) reportadas na literatura é difícil em virtude do uso de diferentes métodos de estimação do coeficiente, bem como, variação da composição do sólido e sua estrutura física e química. De uma forma geral, as diferenças no coeficiente de difusão de massa podem ser atribuídas aos seguintes fatores:

- Considerações geométricas diferentes;
- Método de cálculo;
- Condições de contorno.
- Teores de umidade inicial e de equilíbrio diferentes;
- Variação na estrutura física do material utilizado;
- Variação na porosidade do material;
- Diferenças na composição química do material;

A importância prática de estudar a secagem de uma partícula tem severas restrições, pois os materiais geralmente são secos em camadas espessas, estacionárias ou em movimento e relacionadas a diversas partículas. No estudo do secador, os modelos mais utilizados levam em consideração o balanço de massa e energia entre o produto e o ar do secador e, portanto, são formulações matemáticas mais completas. Apesar da presente pesquisa ser relacionada a um tijolo e utilizar modelos de nível de partícula na análise, eles podem ser usados para completar modelos de camada espessa (modelos ao nível de secador) como equações para balanço de calor e massa no produto conforme relatado na literatura (Almeida *et al.*, 2013; Lima *et al.*, 2018).

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 5.1 Conclusões

A crescente demanda por produtos cerâmicos e a possibilidade de reaproveitamento de resíduos industriais no setor, tem impulsionado as pesquisas científicas nessa área, que por sua vez tem constatado a viabilidade de reaproveitamento de diversos tipos de resíduos industriais, como por exemplo, o resíduo de diatomita, objeto de estudo nesta pesquisa.

O resíduo de diatomita, por ser um material bastante poroso teve pouca perda de massa durante o aquecimento, cerca de 3% de massa quando aquecido até 1000°C, ao passo que a argila, para o mesmo aquecimento sofreu uma perda de massa de aproximadamente 14%.

O resíduo de diatomita apresenta fração fina de 3,2%, ao passo que a argila de cerâmica vermelha apresenta 14,1% de finos em sua composição. Ambas as matérias-primas apresentam elevados teores de silte e areia (96,8% para o resíduo de diatomita e 85,9% para a massa de cerâmica vermelha).

O resíduo de diatomita é constituído em maior parte por quartzo, cristobalita, alumínio e ferro, ao passo que na argila predomina quartzo, alumínio e ferro.

O resíduo de diatomita estudado apresentou alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) 88,136%, seguido pelo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 8,868%. Já na massa cerâmica vermelha prevaleceram substâncias como a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) 49%, óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 22,457% e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 17,736%.

Os principais danos estruturais nas amostras estudadas ocorreram durante o processo de secagem e as temperaturas de secagem influenciaram diretamente em propriedades físicas como porosidade, densidade aparente e absorção de água.

Para as temperaturas de secagem estudadas (50°C, 70°C e 90°C), o início da secagem foi decisivo na qualidade do produto, pois é durante as primeiras horas de secagem que ocorrem a maior variação de umidade do produto e as variações mais significativas na temperatura e nas dimensões das amostras. A variação de volume é tanto mais intensa quando maior a temperatura de secagem.

A perda ao fogo nos corpos cerâmicos reduziu com o aumento do teor de resíduo, sendo que os maiores valores ocorreram para secagem na temperatura de 50°C e queima até a temperatura de 1000°C.

A queima com taxa de aquecimento 5°C/min e um patamar de 800°C resultou na presença de um defeito comum em peças cerâmicas conhecido como coração negro. Tal efeito foi eliminado alterando-se para 2°C/min a taxa de aquecimento.

O resíduo de diatomita, quando incorporado à massa cerâmica para produção de tijolos furados influenciam nas propriedades dos corpos cerâmicos, aumentando a porosidade e a absorção de água. Entretanto, em todos os cenários avaliados, com a incorporação dos percentuais de 5%, 10% e 15% de resíduo, as amostras atendiam as especificações da norma.

Quanto à resistência à compressão, nenhum corpo de prova submetido a uma temperatura de 800°C atendeu às especificações da norma, até mesmo os corpos de prova sem resíduos. Os resultados mais satisfatórios de resistência à compressão foram observados nas amostras A0%R50°S1000°Q (1,90 MPa) e A0%R70°S900°Q (1,92 MPa).

Constatou-se que as amostras compostas por 5% de resíduo de diatomita e 95% de argila, quando sujeitas à secagem na temperatura de 90°C e submetidas a queima com uma taxa de aquecimento de 2°C/min, até a temperatura de 1000°C, atendem as exigências da NBR 15270-1 (ABNT, 2017), tanto na absorção de água (AA) quanto na resistência a compressão (RC).

A viabilidade de reaproveitamento do resíduo de diatomita pelo setor cerâmico favorece a preservação ambiental, dando a característica de material nobre ao resíduo de diatomita ao mesmo tempo que reduz a demanda por argila na produção de tijolos cerâmicos. Pelos dados trazidos, é possível economizar anualmente 600.000 kg de argila, tal matéria-prima seria o equivalente em argila para a produção de 250 milheiros de tijolos furados de 6 furos, ou, 162 milheiros de tijolos furados de 8 furos, aproximadamente.

Notou-se uma pequena divergência entre o modelo teórico e o modelo experimental para as composições com o resíduo de diatomita, em umidade e temperatura mais baixas, o que indica a ocorrência de algum fenômeno específico, naquela região, não previsto pelo modelo. Contudo, para grandes gradientes térmicos (90°C), o efeito da temperatura superou o aquele associado a baixa umidade e a presença do resíduo.

O emprego do modelo concentrado resultou numa excelente descrição física do fenômeno estudado, uma vez que as curvas teóricas demonstraram correspondências notáveis com as curvas experimentais, permitindo a determinação dos coeficientes de transferência de massa convectivos e difusivos.

Os coeficientes de transferência de massa convectivos e difusivos aumentaram com o aumento da temperatura e com a redução da umidade relativa do ar de secagem, entretanto, a

variação na quantidade de resíduo incorporado não afetou de forma significativa estes parâmetros.

O coeficiente de transferência de massa convectivo na superfície externa do tijolo mostrou-se sempre maior do que aquele determinado para a superfície interna, fato que evidencia que a superfície externa é a responsável pela maior perda de massa do produto durante o processo de secagem.

## **5.2 Sugestões**

Como sugestões para trabalhos futuros sugerimos:

Estudar a queima em temperaturas maiores;

Reproduzir os estudos realizados em escala industrial;

Verificar a viabilidade de incorporação do resíduo de diatomita à massa cerâmica com vista à produção de telhas e lajotas;

Analisar o comportamento do modelo matemático empregado frente aos dados experimentais, para temperaturas de secagem e umidades baixas;

Investigar possibilidades de reaproveitamento de outros tipos de resíduos, considerando a produção industrial regional.



## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. V. **Simulação numérica via CFD da secagem de tijolos cerâmicos industriais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/12639>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- AKIYOSHI, M. M.; DA SILVA, A. P.; DA SILVA, M.G.; PANDOLFELLI, V.C. Condutividade térmica e sua correlação com a temperatura e a massa específica volumétrica de materiais refratários sílico-aluminosos e aluminosos. **CERÂMICA** 47 (301), 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/3hQBC38NTmrYBjcMmmpchsG/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- ÁVILA, G. B. **Resina industrial de poliuretano modificada com terra diatomácea para ser empregada na modelagem odontológica**. 2009. Tese (Doutorado em Reabilitação Oral) – Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/58/58131/tde-26032010-124102/pt-br.php>. Acesso em: 26 maio 2022.
- BARROS, I. V. **Utilização do bloco de concreto em construção de empreendimento: um estudo de caso nas empresas A&B na cidade de Manaus**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017. Disponível em: <https://ppgep.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Dissertacao2017-PPGEP-MP-IrisVargasBarros.pdf>. Acesso em: 12 maio 2022.
- BATISTA, V. S.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem e queima de tijolos cerâmicos maciços e vazados incluindo variações dimensionais e danos estruturais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 3, n. 1, 2008. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/issue/view/8>. Acesso em 7 jul. 2019.
- BATISTA, V. S.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem e retração volumétrica de tijolos cerâmicos maciços e vazados: uma investigação teórica e experimental. **Revista Matéria**, v. 14, n. 4, pp. 1088-1100, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BKwWSR3ctyZB347rykBtCjq/?lang=pt>. Acesso em: 19 jun. 2023.
- BRAGA, R. M. **Uso de argilominerais e diatomita como adsorvente de fenóis em águas produzidas na indústria de petróleo**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12884/1/UsoArgilomineraisDiatomita\\_Braga\\_2008.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/12884/1/UsoArgilomineraisDiatomita_Braga_2008.pdf). Acesso em 28 out. 2023.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Coordenadores: Thiers Muniz Lima e Carlos Augusto Ramos Neves. Brasília: DNPM, 2014.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 2 dez. 2019.

Brito, M. K. T. **Estudo teórico da transferência de calor e massa na secagem de tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica**. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/1250/MIRENIA%20TEIXEIRA%20DE%20BRITO%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20PPGEM%202016.pdf?sequence=3>. Acesso em: 21 nov. 2022.

CARVALHO SOBRINHO, J. A.; LUZ, A. B. **Beneficiamento de diatomita do Ceará**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 1979. Série Tecnologia Mineral, 05. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/232>. Acesso em: 26 mai. 2022.

COSTA, R. F.; FERREIRA, Alysson Dantas.; JUNIOR, José Jorge da Silva.; BARBOSA.; Pedro Mateus Aguiar.; BANDEIRA, Diego José Araújo.; REZENDE, Maria Luiza de Souza.; NASCIMENTO, José Jefferson da Silva. Secagem de placas cerâmicas híbridas argila/rejeito de diatomita: Um estudo experimental. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, e13710817174, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17174>. Acesso em: 17 mai. 2022.

COSTA, R. F. **Secagem e queima de placas cerâmicas com adição de rejeito de diatomita: caracterização e simulação**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/27723>. Acesso em: 19 jun. 2023.

DONDI, M. Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, jun. 2006. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572a7f8c9d6e028b46fb/pdf/ci-11-3-5876572a7f8c9d6e028b46fb.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2022.

E. S. Lima, W. M. P. B. Lima, A. G. Barbosa de Lima, S. R. Farias Neto, E. G. Silva and V. A. B. Oliveira, “Advanced Study to Heat and Mass Transfer in Arbitrary Shape Porous Materials: Foundations, Phenomenological Lumped Modeling and Applications”, In: **Transport Phenomena in Multiphase Systems**, J. M. P. Q. Delgado and A. G. Barbosa de Lima (Eds.), Advanced Structured Materials, vol. 93, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2018.

FIGUEIRA, A. P. R. **Produção de pavimentos intertravados contendo resíduo de filtro de cervejaria**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo-PR, 2021. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/5575>. Acesso em: 26 de maio 2022.

FLORIANI, H. A. **Utilização dos resíduos gerados na filtração de cervejas para a**

**produção de tijolos ecológicos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário FACVEST, Lages-SC, 2017. Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/9a6d9-tcc-hemerson-alberto-floriani-eng.-producao-2017.pdf>. Acesso em: 26 de maio 2022.

GALVÃO, A. C. P.; FARIAS, A. C. M.; SOUZA, L. G. M. Viabilização de rejeitos de vidro para a produção de tijolos cerâmicos. **HOLOS**, Natal, v. 4, p. 59-65, ago. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2013.1555>. Acesso em: 6 jun. 2021.

G. S. Almeida, J. B. Silva, C. J. Silva, R. Swarnakar, G. A. Neves, and A. G. B. Lima, Heat and mass transport in an industrial tunnel dryer: Modeling and simulation applied to hollow bricks, **Applied Thermal Engineering**, vol. 55, 78-86, 2013.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M.C. A sílica e suas propriedades. **Revista Virtual de Química**, 2018, 10 (4), 1018-1038. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v10n4a19.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2023.

GIFFONI, P. O.; LANGE, L. C. A utilização de borra de fosfato como matéria-prima alternativa para a fabricação de tijolos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 128-136, jun. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200006>. Acesso em: 6 jun. 2021.

GOMES, V. L. L. **Efeito da adição de diatomita no comportamento reológico e mecânico de argamassas colantes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15604>. Acesso em: 26 maio 2022.

GOMES *et al.* Cerâmicas odontológicas: o estado atual. **Cerâmica** 54 (2008) 319-325. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/cbFLgQ6xLd4Jnk5nr83mcqx/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 28 jun. 2023.

GOULART, M. R. **Metodologias para reutilização do resíduo industrial, terra de diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages-SC, 2010. Disponível em: [http://www.cav.udesc.br/arquivos/id\\_submenu/829/marcos\\_roberto\\_goulart\\_cristian\\_berto\\_da\\_silveira\\_29\\_1.pdf](http://www.cav.udesc.br/arquivos/id_submenu/829/marcos_roberto_goulart_cristian_berto_da_silveira_29_1.pdf). Acesso em: 19 jun. 2023.

GOULART, M. R. *et al.* Metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja. **Química Nova**, v. 34, n. 4, p. 625-629, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/267697007\\_Metodologias\\_para\\_reutilizacao\\_do\\_residuo\\_de\\_terra\\_diatomacea\\_proveniente\\_da\\_filtracao\\_e\\_clarificacao\\_da\\_cerveja](https://www.researchgate.net/publication/267697007_Metodologias_para_reutilizacao_do_residuo_de_terra_diatomacea_proveniente_da_filtracao_e_clarificacao_da_cerveja). Acesso em: 26 mai. 2022.

HEREK, L. C. S.; SILVA JUNIOR, A.T.; PAVEZZI, C. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G. Incorporação de lodo de lavanderia industrial na fabricação de tijolos cerâmicos. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 335, p. 326-331, set. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000300013>. Acesso em: 6 jun. 2021.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v.14, n.3-4, p.765-802 (1996). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939608917124>. Accessed: 21 nov. 2021.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V. Utilisation of wood ash from biomass for the production of ceramic products. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 127, p. 264-273, nov. 2016. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.124>. Accessed: 6 Jun. 2021.

KIZINIEVIČ, O.; KIZINIEVIČ, V.; MALAIŠKIENĖ, J. Analysis of the effect of paper sludge on the properties, microstructure and frost resistance of clay bricks. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 169, p. 689-696, Apr. 2018. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.024>. Accessed: 6 jun. 2021.

LIMA, E. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; GUIMARÃES, A. S.; LIMA, W. M. P. B.; SANTOS, I. B.; GOMES, J. P.; SANTOS, R. S.; VILELA, A. F.; VIANA, A. D.; ALMEIDA, G. S.; LIMA, Antonio G. B.; FRANCO, J. E. F. Drying and Heating Processes in Arbitrarily Shaped Clay Materials Using Lumped Phenomenological Modeling. **Energies**. v.14, p.4294 -, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4294>. Accessed: 21 nov. 2021.

MACEDO, R. S.; MENEZES, R. R.; SILVA, T. D. A.; SILVA, A. S.; CESÁRIO, L. V. O. efeito do coração negro nas propriedades físico-mecânicas em corpos de prova de cerâmica vermelha. **57º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 5º Congresso Iberoamericano de Cerâmica**. Natal, 2013. Disponível em: [https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area\\_associado/57/PDF/03-019.pdf](https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/57/PDF/03-019.pdf). Acesso em 13 out 2022.

MARTINS, F. P.; NETO, J. C. B.; SILVA, A. J. O.; SIQUEIRA, A. M. O. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, 2020.

MOURA, E. M. *et al.* Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 69-80, mar. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>. Acesso em: 6 jun. 2021.

MONTEIRO, Vagner Jandre. **Análise do comportamento magnético dos compostos  $Tb_xPr_{(1-x)}Al_2$  via simulação numérica**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Nova Friburgo, 2021. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/16796>. Acesso em: 10 set. 2023.

MIRANDA, L. A.; ALVARENGA, Rita de Cássia Silva Sant'Anna.; JUNIOR, Paulo Cesar Moreira Pinto.; JUNIOR, Eduardo Dantas de Paula.; DE CARVALHO, Carlos Alexandre Braz.; FASSONI, Délio Porto.; COUTO, Lauro Gontijo. Avaliação do potencial do grits como material de construção na produção de tijolos de solo-cimento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n. 6, p. 1335-1340, dez. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000700020>. Acesso em: 6 jun. 2021.

MOURA, E. M.de; SALES, Joel Neto Bispo de.; NASCIMENTO, Natalia Cristina do.; SOUSA, Vitor Magalini Zago de.; E SILVA, Danilo Duarte Costa.; JUNIOR, Vilson Dalla Libera. Caracterização e uso da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em tijolos de solo-

cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 69-80, jan./mar. 2021. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.  
<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100494>.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos**. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2002.

NUNES, Francine Machado. **Identificação de fases cimentícias presentes em materiais cerâmicos a base de argila e resíduo de casca de ovo**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021. Disponível em:  
[http://repositorio.ufpel.edu.br:8080/bitstream/prefix/8061/1/Tese\\_Francine\\_Nunes\\_pdf.pdf](http://repositorio.ufpel.edu.br:8080/bitstream/prefix/8061/1/Tese_Francine_Nunes_pdf.pdf). Acesso em: 28. jun. 2023.

OLIVEIRA, J. C. S. **Adição de calcário em duas massas cerâmicas vermelhas empregadas na fabricação de tijolos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em:  
[https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5063/1/arquivo3335\\_1.pdf?msckid=06a56cf0d12211ecadc3e82ccaef4935](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5063/1/arquivo3335_1.pdf?msckid=06a56cf0d12211ecadc3e82ccaef4935). Acesso em: 11 maio 2022.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, n. 314, p. 75-80, jun. 2004a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000200002>. Acesso em: 6 jun. 2021.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Análise do impacto ambiental causado pela utilização de resíduo sólido do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, n. 314, p. 185-189, jun. 2004b. Disponível em:  
<https://www.scielo.br/j/ce/a/t8smWHVWZJWJN9pVgLsSWxC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 jun. 2023.

PAKOWSKI, Z.; BARTCZAK, Z.; STRUMILLO, C.; STENSTROM, S. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes. **Drying Technology**. v. 9, n. 3, p. 753-773 (1991). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373939108916708>. Acesso em: 21 nov. 2023.

Rossi, S. J. **Psicrometria**. João Pessoa: FUNAPE, 60f, (1987).

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas, vol. 1: fundamentos**. São Paulo: Edgard Blucher/EDUSP, 1975.

SANTOS, João Paulo da Silva. **Secagem de Materiais Cerâmicos com Forma Complexa: Um Estudo Teórico Via CFX**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018. Disponível em:  
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/7092>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SANTOS, R. S.; DELGADO, J. M. P. Q.; SILVA, F. A. N.; AZEVEDO, A. C.; FARIAS NETO, S. R.; FARIAS, F. P. M.; BARBOSA DE LIMA, A. G.; BARBOSA DE LIMA, W.

M. P.; LIMA, E. S. Behind the Manufacturing of Industrial Clay Bricks: Drying Stage Predictions Using CFD. **Advances in Materials Science and Engineering** (ONLINE). v.2022, p.1 - 15, 2022. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2022/5530362/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

SCHNEIDER, C. M.; MOREIRAS, S. T. F. Produção de tijolos cerâmicos vazados com redução da temperatura de queima. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 28848- 28853, mar. 2021. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/issue/view/122>. Acesso em: 6 nov. 2022.

SILVA, D. H. da.; SILVA, Jessica Ferreira Tiburcio.; ALMEIDA, Suelane.; LIMA, Sandovânio Ferreira de. Tijolos, normas técnicas e aplicação em alvenaria. **Cadernos de graduação - Ciências exatas e tecnológicas**, Alagoas, v. 4, n. 2, p. 207-216, nov. 2017. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/5214>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVA, L. C. S.; MAIA, F. O. Processos de fabricação: uma análise da produção da cerâmica vermelha em uma empresa da cidade de Catalão/GO. **VIII SIMPROD**, São Cristovão-SE, set. 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7629/2/ProcessosFabricacaoCeramica.pdf>. Acesso em: 11 maio 2022.

SILVA, J. B. **Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/1654>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVA, Lays Capingote Serafim da; MAIA, Francisco Oliveira. Processos de fabricação: uma análise da produção da cerâmica vermelha em uma empresa da cidade de Catalão/GO. **VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe - SIMPROD**, São Cristovão -SE, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7629/2/ProcessosFabricacaoCeramica.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SILVA, V. S da. **Transferência de calor e massa em materiais com forma complexa via método da análise concentrada**. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/930>. Acesso em: 28 out. 2023.

SIQUEIRA, E.; AMARAL, A. G.; SCHNEIDER, R. M.; ATOATTI, C. Características mecânicas de tijolos ecológicos com incorporação de resíduo. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 3, p. 170-174, jun. 2016. Pesquisas Agrárias e Ambientais. Disponível em: <https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n03a10>. Acesso em: 6 jun. 2021.

VIEIRA, Guilherme Ernani. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. **XIII SIMPEP** – Bauru, SP, Brasil, 06 a 08 de novembro de 2006. Disponível em: [https://simpep.feb.unesp.br/anais/anais\\_13/artigos/676.pdf](https://simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/676.pdf). Acesso em: 10 set. 2023.

VILELA, A. P. **Tijolo solo-cimento reforçado com partículas vegetais e resíduo de mineração**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/handle/1/39015>. Acesso em: 26 maio 2022.

ZOLIN, Ivan. **Materiais de construção: mecânica**. – 3. ed. – Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011. Disponível em: [https://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/461/materiais\\_de\\_construcao\\_mecanica.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/461/materiais_de_construcao_mecanica.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 28 jun. 2023.

## APÊNDICE A - RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS SECAGENS

**Tabela 16** – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R50°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A0%S70°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	62	24,4	26,8	163,952	58,71	35,69	58,44	10,96
5	62	24,4	29,6	162,513	58,40	35,64	58,15	10,50
10	62	24,5	30,5	161,237	58,12	35,37	57,96	10,67
15	62	24,5	31,3	159,946	57,72	35,15	57,73	10,57
20	62	24,6	31,3	158,776	57,48	35,00	57,55	10,25
25	62	24,6	31,7	157,623	57,23	34,85	57,34	10,29
30	62	24,6	32,1	156,520	56,99	34,72	57,13	10,34
35	62	24,6	32,1	155,477	56,81	34,51	56,90	10,43
40	62	24,6	32,5	154,383	56,69	34,32	56,68	10,29
45	62	24,8	32,7	153,411	56,52	34,26	56,46	10,28
50	62	24,8	33,6	152,420	56,45	34,12	56,24	10,30
55	62	24,9	34,1	151,547	56,38	34,12	56,07	10,08
60	63	24,9	35,0	150,552	56,42	34,07	55,88	10,08
70	62	24,9	35,8	149,026	56,24	33,98	55,65	10,02
80	62	24,9	37,6	147,843	56,18	34,00	55,49	9,99
90	62	24,9	39,0	146,816	56,21	33,97	55,45	10,04
100	62	25,1	40,2	145,965	56,16	33,90	55,35	10,02
110	62	25,1	41,5	145,085	56,16	33,96	55,31	10,02
120	62	25,1	42,5	144,464	56,13	33,93	55,28	9,97
130	62	25,1	43,6	143,918	56,23	33,85	55,28	10,00
140	62	25,1	44,2	143,442	56,13	33,88	55,26	10,02
150	62	25,3	44,6	143,049	56,07	33,90	55,25	10,07
160	62	25,3	45,1	142,689	56,19	33,88	55,25	10,09
170	63	25,3	45,7	142,404	56,20	33,86	55,24	10,04



180	62	25,3	46,0	142,145	56,09	33,86	55,23	10,03
200	62	25,4	46,8	141,727	56,13	33,94	55,24	10,06
220	62	25,4	47,1	141,375	56,09	33,91	55,23	10,05
240	61	25,4	47,5	141,097	56,11	33,88	55,22	9,94
270	62	25,5	47,6	140,772	56,10	33,92	55,25	10,06
300	62	25,5	48,0	140,496	56,08	33,91	55,22	10,00
330	62	25,5	48,2	140,297	56,09	33,95	55,21	10,05
360	62	25,6	48,6	140,138	56,10	33,84	55,22	10,07
390	62	25,6	48,6	140,006	56,10	33,88	55,22	10,03
420	61	25,6	48,2	139,908	56,12	33,92	55,23	10,08
450	61	25,6	48,7	139,806	56,12	33,84	55,28	10,12
480	60	25,6	48,0	139,747	56,17	34,00	55,22	10,00
1920	61	24,9	48,0	139,280	56,02	33,82	55,17	9,97
3360	66	24,9	100,7	136,850	56,02	33,82	55,18	9,99

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 17** – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R50°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A5%S50°					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	73	25,1	27,3	147,236	61,13	36,21	58,35	10,34
5	73	25,1	31,6	146,183	61,00	35,80	58,80	10,33
10	73	25,1	31,9	145,040	60,58	35,70	57,78	10,33
15	73	25,3	32,2	143,831	60,32	35,36	57,44	9,91
20	74	25,3	32,1	142,674	60,10	35,31	57,58	10,24
25	74	25,4	32,1	141,565	60,12	35,10	57,40	10,29
30	74	25,4	31,9	140,280	60,04	34,62	57,03	10,08
35	74	25,4	32,1	138,756	59,41	34,95	56,71	10,17
40	74	25,4	32,0	137,617	59,10	34,54	56,84	10,03
45	74	25,3	32,1	136,488	58,69	34,31	56,46	9,92
50	73	25,4	32,1	135,062	58,23	34,26	56,56	9,85
55	73	25,4	32,3	134,016	58,02	33,96	56,30	9,96
60	73	25,4	32,2	132,902	57,79	33,63	55,62	9,77
70	73	25,4	32,8	130,877	57,55	33,30	55,29	9,59
80	72	25,4	32,7	129,095	57,28	33,02	54,88	9,54
90	72	25,4	33,5	127,333	57,26	33,04	54,67	9,39
100	72	25,5	34,3	125,740	57,01	32,52	54,16	9,50
110	71	25,4	34,4	124,032	57,20	32,35	54,23	9,44
120	71	25,4	35,4	122,637	56,74	32,53	53,64	9,32
130	71	25,4	36,6	121,099	56,73	32,33	53,37	9,18
140	72	25,5	37,5	120,089	57,15	32,22	53,08	9,20
150	72	25,5	38,6	119,152	56,65	32,20	53,34	9,20
160	71	25,6	41,0	118,124	56,67	32,13	53,34	9,22
170	71	25,6	42,3	117,451	56,64	32,18	53,33	9,17
180	71	25,6	43,1	116,960	56,62	32,07	53,30	9,12
200	71	25,6	45,0	116,091	56,64	32,13	53,13	9,10
220	71	25,6	46,1	115,509	56,85	32,53	53,18	9,06

240	71	25,6	46,8	115,049	56,87	32,36	52,96	9,12
270	71	25,6	45,2	114,629	56,94	32,21	53,12	9,17
300	72	25,9	48,3	114,345	56,96	32,32	52,84	9,07
330	72	25,8	47,8	114,156	56,63	32,23	53,08	9,14
360	72	25,8	49,8	114,009	56,66	32,43	53,10	9,07
390	72	25,8	49,9	113,898	56,66	32,13	52,86	9,01
420	72	25,8	49,9	113,810	56,60	32,22	53,11	9,01
450	72	25,8	49,7	113,753	56,65	32,32	53,26	8,90
1890	75	24,9	49,2	113,516	56,73	32,20	53,22	8,90
3330	74	24,9	106,3	111,384	56,80	32,33	53,33	9,08

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 18** – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R50°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A10%S50°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	63	24,6	27,3	174,738	61,40	37,00	59,35	9,85
5	63	24,8	30,1	173,414	61,40	36,87	59,12	9,82
10	63	24,8	32,6	172,125	61,17	36,58	58,73	9,69
15	63	24,9	31,6	170,860	61,00	36,25	58,49	9,86
20	62	24,9	31,3	169,616	60,89	36,25	58,22	9,85
25	62	24,9	31,2	168,472	60,75	36,11	58,06	9,55
30	62	24,9	31,5	167,301	60,49	35,82	57,72	9,38
35	61	24,9	31,6	166,027	60,30	35,53	57,49	9,56
40	61	24,9	32,0	164,956	60,21	35,46	57,32	9,51
45	61	24,9	31,7	163,789	60,14	35,25	57,18	9,75
50	61	24,9	32,0	162,634	60,00	35,25	57,02	9,40
55	61	24,9	33,4	161,687	59,92	35,09	56,86	9,39
60	60	25,0	33,0	160,582	59,70	34,86	56,57	9,31
70	60	25,0	33,6	158,757	59,53	34,74	56,37	9,27
80	60	25,1	34,2	156,907	59,46	34,55	56,20	9,15
90	60	25,1	35,4	155,233	59,41	34,44	55,92	9,26
100	60	25,1	35,7	153,712	59,27	34,55	55,83	9,15
110	59	25,1	37,5	152,160	59,23	34,26	55,69	8,99
120	59	25,1	38,0	150,862	59,22	34,34	55,64	8,80
130	59	25,1	38,2	149,833	59,21	34,30	55,65	8,89
140	59	25,3	42,2	148,960	59,22	34,39	55,68	9,04
150	58	25,3	41,5	148,274	59,20	34,33	55,60	8,96
160	58	25,3	42,5	147,562	59,17	34,35	55,59	8,82
170	58	25,4	43,3	147,029	59,28	34,33	55,60	8,89
180	58	25,4	44,3	146,631	59,19	34,33	55,65	8,72
200	58	25,4	45,7	145,950	59,18	34,36	55,62	8,90
220	57	25,4	47,0	145,471	59,40	34,29	55,54	8,86

240	57	25,4	47,4	145,008	59,16	34,32	55,59	8,80
270	57	25,5	47,8	144,564	59,19	34,19	55,59	9,00
300	56	25,5	48,2	144,382	59,18	34,23	55,56	8,92
330	56	25,5	48,2	144,196	59,18	34,25	55,54	8,95
360	56	25,5	48,5	144,045	59,16	34,21	55,54	9,03
390	55	25,5	48,4	143,872	59,16	34,32	55,54	8,98
420	54	25,4	48,9	143,726	59,26	34,68	55,66	9,23
450	53	25,4	48,6	143,611	59,27	34,34	55,52	8,97
480	53	25,4	48,4	143,525	59,23	34,44	55,57	8,94
1920	67	24,8	48,20	143,396	59,13	34,15	55,46	8,83
3360	67	24,8	101,30	141,176	59,16	34,27	55,49	8,86

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 19** – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R50°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A15% S50°					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	66	24,4	26,1	156,236	57,70	36,64	59,00	10,59
5	66	24,4	29,8	155,165	57,70	36,44	58,66	10,65
10	65	24,4	30,2	153,959	57,64	36,30	58,52	10,60
15	65	24,5	31,3	152,745	57,48	36,12	58,27	10,57
20	65	24,5	31,2	151,533	57,34	35,91	58,20	10,63
25	65	24,5	31,2	150,335	57,21	35,78	57,96	10,56
30	65	24,6	31,2	149,159	56,94	35,53	57,85	10,67
35	65	24,6	31,2	147,869	56,88	35,29	57,87	10,76
40	65	24,6	31,5	146,626	56,66	35,28	57,66	10,45
45	65	24,6	31,7	145,670	56,55	35,00	57,41	10,49
50	65	24,8	31,6	144,670	56,38	34,83	57,21	10,37
55	65	24,8	32,3	143,653	56,31	34,71	57,06	10,35
60	65	24,8	32,1	142,719	56,23	34,63	56,85	10,41
70	65	24,9	33,8	140,792	56,18	34,44	56,25	10,18
80	65	24,9	33,6	139,081	56,09	34,33	56,05	10,07
90	65	24,9	34,3	137,628	55,99	34,28	56,04	10,12
100	65	24,9	35,8	136,375	55,93	34,22	55,89	10,04
110	65	24,9	36,5	135,194	55,91	34,34	55,75	9,99
120	64	24,9	37,5	134,118	55,87	34,16	55,69	9,87
130	64	24,9	38,8	133,267	55,85	34,20	55,73	10,00
140	64	24,9	40,3	132,557	55,84	34,18	55,63	10,01
150	63	25,0	41,5	131,939	55,88	34,24	55,73	10,01
160	63	25,0	42,3	131,432	55,78	34,17	55,62	9,92
170	63	25,0	43,4	130,977	55,86	34,26	55,66	9,90
180	63	25,0	44,1	130,652	55,93	34,25	55,65	9,94
200	63	25,1	45,5	129,980	55,82	34,13	55,59	9,90
220	63	25,1	46,3	129,536	55,84	34,14	55,51	9,81

240	63	25,1	47,2	129,182	55,80	34,14	55,53	9,90
270	63	25,1	47,4	128,784	55,88	34,15	55,50	9,83
300	63	25,3	47,8	128,497	55,92	34,16	55,51	9,91
330	63	25,4	48,2	128,301	55,83	34,11	55,52	9,74
360	63	25,4	48,0	128,172	55,82	34,16	55,62	9,82
390	64	25,4	48,0	128,074	55,80	34,12	55,52	9,75
420	64	25,4	48,8	128,002	55,98	34,12	55,64	9,90
1860	62	25,4	48,1	127,555	55,81	34,12	55,52	9,93
3300	60	24,6	103,1	125,617	55,79	34,07	55,45	9,97

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 20** – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R70°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A0%S70°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	65	25,6	26,9	169,635	61,83	35,73	58,54	10,47
5	63	25,8	34,4	167,809	61,59	35,45	58,21	10,47
10	63	25,9	36,0	165,529	61,24	35,17	57,97	10,48
15	63	25,9	36,7	163,943	60,73	34,92	57,69	10,58
20	63	25,9	37,5	162,320	60,49	34,73	57,41	10,61
25	63	25,9	38,5	160,716	60,52	34,52	57,04	10,42
30	63	25,9	39,8	159,188	60,32	34,32	56,75	10,35
35	63	25,9	40,0	157,750	60,25	34,20	56,46	10,21
40	62	25,9	41,7	156,625	60,07	34,13	56,18	10,07
45	64	25,9	42,8	154,995	60,00	34,00	55,96	10,00
50	61	25,9	44,3	153,935	59,91	34,00	55,96	10,06
55	61	25,9	45,6	152,889	59,89	33,94	55,82	10,02
60	61	25,9	47,2	151,980	59,77	33,94	55,76	9,98
70	60	25,9	50,1	150,513	59,82	33,92	55,75	10,00
80	58	25,9	54,2	149,231	59,85	33,95	55,68	9,97
90	58	25,9	56,3	148,309	59,86	33,94	55,72	9,98
100	58	26,0	59,5	147,584	59,81	33,95	55,68	9,93
110	58	26,0	60,0	146,936	59,80	33,95	55,67	10,01
120	58	26,1	61,1	146,449	59,78	33,95	55,65	9,94
130	58	26,1	61,3	146,036	59,80	34,00	55,61	9,94
140	58	26,1	62,0	145,708	59,80	33,89	55,61	9,99
150	58	26,1	63,0	145,380	59,82	33,87	55,63	10,00
160	58	26,3	63,2	145,124	59,85	33,85	55,60	10,03
170	58	26,3	63,7	144,916	59,76	33,87	55,62	9,95
180	58	26,3	63,7	144,743	59,77	33,89	55,66	9,96
200	58	26,4	64,5	144,447	59,83	33,91	55,65	9,92
220	58	26,4	64,8	144,210	59,76	33,91	55,65	10,02



240	58	26,4	65,1	144,037	59,75	33,90	55,60	9,97
270	58	26,5	65,5	143,834	59,72	33,87	55,61	9,92
300	57	26,5	65,8	143,669	59,71	33,88	55,61	9,98
330	57	26,5	65,8	143,545	59,72	33,96	55,59	9,98
360	56	26,6	65,9	143,445	59,70	33,90	55,58	9,97
390	57	26,6	65,9	143,363	59,71	33,88	55,60	9,99
420	58	26,6	66,2	143,298	59,78	33,96	55,58	9,90
1920	55	26,0	65,80	142,847	59,74	33,83	55,57	9,96
3360	55	26,4	101,50	141,764	59,68	33,83	55,57	9,97

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 21** – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R70°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A5%S70°					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	73	24,5	27,3	149,202	61,03	35,80	58,34	9,74
5	73	24,5	34,1	147,720	60,79	35,51	58,24	9,80
10	72	24,6	35,5	145,769	60,45	35,12	57,95	9,83
15	72	24,6	35,8	143,721	59,79	34,81	57,54	9,83
20	72	24,6	36,5	141,462	59,31	34,58	57,37	9,80
25	72	24,6	36,5	139,485	58,87	34,33	56,92	9,77
30	71	24,6	37,3	137,209	58,43	33,90	56,22	9,54
35	71	24,8	37,8	135,074	58,03	33,51	56,08	9,56
40	71	24,8	38,6	132,869	57,66	33,08	55,13	9,46
45	72	24,8	38,8	131,529	57,40	32,86	54,87	9,43
50	72	24,9	39,3	130,029	57,27	32,75	54,43	8,99
55	72	24,9	40,7	128,602	57,19	32,46	54,35	9,07
60	72	24,9	41,2	127,228	57,16	32,32	54,15	8,87
70	72	24,9	42,5	125,016	56,81	32,19	54,09	8,51
80	72	24,9	46,1	122,352	56,48	32,30	54,17	8,78
90	71	24,9	49,5	120,748	56,92	32,28	53,78	8,79
100	71	25,0	53,3	119,390	56,82	32,13	53,69	8,55
110	71	25,0	57,8	118,341	56,96	32,16	53,79	8,48
120	71	25,0	59,8	117,585	56,94	32,18	53,83	8,82
130	70	25,1	60,8	117,032	56,94	32,27	53,61	8,42
140	70	25,1	62,3	116,574	56,77	32,14	53,87	8,62
150	70	25,1	64,0	116,209	56,71	32,20	53,72	8,65
160	70	25,1	64,2	115,920	56,90	32,24	53,72	8,65
170	70	25,1	65,1	115,658	56,90	32,25	53,99	8,89
180	70	25,1	66,1	115,462	56,99	32,23	53,92	8,67
200	70	25,1	66,2	115,195	56,73	32,16	53,36	8,60
220	70	25,3	66,2	114,996	56,71	32,19	53,52	8,59

240	69	25,3	66,3	114,860	56,76	32,02	53,66	8,65
270	69	25,3	66,4	114,705	56,91	32,13	53,87	8,68
300	68	25,4	67,0	114,519	56,67	32,19	54,04	8,51
330	68	25,4	67,1	114,505	56,75	32,02	53,87	8,31
360	68	25,4	67,1	114,455	56,64	32,23	53,40	8,46
390	67	25,4	67,1	114,415	56,78	32,16	53,76	8,64
420	67	25,4	67,3	114,390	56,75	32,15	53,85	8,41
450	67	25,4	66,5	114,375	56,69	32,12	53,75	8,42
1890	71	24,5	66,8	114,141	56,71	32,23	53,44	8,40
3330	71	24,5	103,2	113,245	56,72	32,16	53,60	8,38

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 22** – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R70°S.

<i>t</i> (min)	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A10%S70°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	60	25,1	24,9	168,445	61,4	35,94	58,68	9,19
5	60	25,1	35,8	167,345	61,41	35,72	58,70	9,33
10	61	25,1	35,2	165,632	60,95	35,36	58,07	8,81
15	60	25,1	39,2	163,805	60,47	35,18	58,27	9,11
20	60	25,1	40,7	162,186	60,08	34,96	58,13	9,04
25	60	25,1	40,5	160,534	59,91	34,90	57,98	8,75
30	60	25,1	41,1	158,835	59,49	34,54	57,24	8,88
35	59	25,1	44,9	157,379	59,40	34,08	57,70	8,67
40	60	25,1	42,5	155,911	59,35	33,92	57,56	8,73
45	60	25,1	43,5	154,483	59,31	33,96	57,23	8,77
50	60	25,3	42,6	153,038	59,15	33,81	56,62	8,81
55	59	25,3	44,3	151,368	59,08	33,70	56,36	8,79
60	60	25,4	46,2	150,148	59,05	33,69	56,18	8,76
70	60	25,4	47,3	147,659	59,07	33,74	55,73	9,09
80	59	25,4	49,5	146,019	59,16	33,69	55,59	8,82
90	60	25,4	50,6	144,562	59,16	33,81	55,55	8,96
100	59	25,4	52,5	143,273	59,09	33,86	55,42	8,70
110	60	25,4	54,8	142,045	59,08	33,79	55,40	8,93
120	59	25,4	57,2	141,253	59,08	33,69	55,62	8,86
130	59	25,4	58,0	140,604	59,17	33,79	55,38	8,75
140	58	25,4	60,3	140,021	59,15	33,74	55,40	8,77
150	59	25,4	61,1	139,533	59,09	33,77	55,38	8,94
160	59	25,5	62,0	139,181	58,97	33,84	55,81	8,76
170	59	25,5	63,1	138,882	59,13	33,76	55,39	8,74
180	59	25,5	63,6	138,642	59,06	33,73	55,42	8,88
200	59	25,6	64,1	138,267	59,03	33,94	55,66	8,94
220	59	25,6	65,1	138,015	59,17	33,82	55,37	8,81

240	59	25,6	66,2	137,803	59,18	33,8	55,4	8,82
270	59	25,6	66,5	137,587	58,950	33,67	55,36	8,87
300	59	25,6	66,3	137,416	58,93	33,86	55,73	8,91
330	59	25,6	66,5	137,308	59,01	33,80	55,29	8,90
360	59	25,6	67,0	137,232	59,01	33,76	55,3	8,91
390	59	25,6	66,5	137,183	59,18	33,72	55,76	8,84
1830	61	24,9	66,8	136,868	58,87	33,74	55,76	8,88
3270	59	25,2	102,1	135,979	58,87	33,73	55,29	8,82

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 23** – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R70°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A15%S70°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	64	24,9	27	153,779	60,08	35,87	58,34	10,65
5	64	25,0	34,6	152,044	59,92	35,77	58,10	
10	64	25,1	35,1	149,960	59,45	35,41	57,94	
15	64	25,1	36,7	147,921	59,09	35,11	57,86	
20	64	25,1	36,7	145,791	58,76	34,89	57,65	
25	64	25,1	37,5	143,544	58,31	34,69	57,44	10,28
30	64	25,3	38,2	141,845	58,21	34,39	57,01	10,39
35	64	25,3	38,2	139,999	57,97	34,17	56,53	10,29
40	64	25,3	40,0	138,658	57,84	34,13	56,22	10,23
45	64	25,4	40,3	137,380	57,77	34,11	55,88	10,08
50	64	25,4	40,7	136,208	57,76	33,97	55,68	9,93
55	64	25,4	41,9	135,030	57,72	33,89	55,32	9,97
60	64	25,4	43,3	133,914	57,84	33,88	55,37	9,83
70	64	25,4	46,8	132,148	57,72	33,89	55,32	9,79
80	64	25,5	51,1	130,756	57,65	33,89	55,16	9,80
90	64	25,5	53,8	129,598	57,62	33,85	55,15	9,77
100	64	25,5	59,6	128,581	57,74	33,81	55,19	9,74
110	64	25,5	59,6	127,886	57,66	33,83	55,13	9,80
120	64	25,5	61,0	127,301	57,72	33,85	55,13	9,81
130	66	25,6	62,7	126,694	57,59	33,82	55,13	9,71
140	68	25,6	63,4	126,364	57,70	33,78	55,11	9,79
150	69	25,6	63,4	126,152	57,63	33,77	55,06	9,83
160	69	25,6	64,5	125,976	57,65	33,75	55,13	9,70
170	69	25,6	64,8	125,828	57,67	33,78	55,10	9,68
180	69	25,6	64,3	125,712	57,65	33,74	55,08	9,82
200	69	25,6	65,6	125,517	57,64	33,77	55,08	9,88
220	69	25,6	66,1	125,366	57,66	33,85	55,10	9,81

240	69	25,6	66,1	125,249	57,60	33,79	55,07	9,82
270	69	25,6	66,1	125,128	57,57	33,74	55,01	9,85
300	69	25,6	65,8	125,033	57,64	33,72	55,07	9,77
330	69	25,6	66,7	124,967	57,47	33,74	54,97	9,69
360	69	25,6	66,2	124,924	57,49	33,68	54,97	9,77
1800	67	24,9	66,3	124,621	57,48	33,67	54,92	9,66
3240	62	24,6	101,80	123,728	33,70	55,00	9,84	33,70

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 24** – Dados coletados durante a secagem da amostra A0%R90°S.

<i>t</i> ( <i>min</i> )	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A0%S90°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	66	24,6	26,3	169,028	60,96	35,83	58,26	10,40
5	65	24,8	39,2	166,883	60,61	35,51	58,02	10,41
10	65	24,8	41,8	164,214	59,94	35,11	57,63	10,41
15	65	24,9	43,1	161,366	59,28	34,68	57,16	10,41
20	64	24,9	44,4	159,060	59,10	34,40	56,67	10,14
25	64	24,9	46,8	156,953	59,16	34,30	56,35	10,17
30	64	24,9	48,6	155,140	58,73	34,26	56,05	10,03
35	64	24,9	51,6	153,409	58,81	34,24	55,83	10,04
40	64	24,9	57,4	151,942	58,79	34,16	55,77	9,97
45	64	24,9	60,5	150,814	58,84	34,19	55,68	10,00
50	64	25,0	63,5	149,815	58,64	34,28	55,69	9,97
55	64	25,0	66,0	148,800	58,66	34,15	55,64	9,98
60	64	25,0	67,9	148,151	58,74	34,22	55,63	9,99
70	64	25,1	71,7	147,023	58,89	34,20	55,61	10,01
80	64	25,1	75,3	146,134	58,83	34,13	55,59	10,01
90	64	25,1	77,5	145,429	58,61	34,25	55,63	10,00
100	63	25,3	78,2	144,848	58,69	34,22	55,57	9,97
110	63	25,3	80,6	144,419	58,59	34,16	55,57	9,99
120	62	25,4	81,6	144,080	58,70	34,16	55,61	10,00
130	62	25,4	81,2	143,825	58,67	34,18	55,55	9,98
140	62	25,4	82,3	143,603	58,65	34,13	55,58	9,95
150	62	25,4	83,3	143,411	58,88	34,24	55,51	9,97
160	62	25,4	82,6	143,267	58,76	34,22	55,52	9,98
170	63	25,5	83,3	143,144	58,65	34,18	55,56	9,92
180	63	25,6	82,8	143,040	58,64	34,22	55,54	9,98
200	62	25,6	85,3	142,860	58,70	34,21	55,55	9,96
220	61	25,6	85,1	142,709	58,80	34,27	55,57	9,98



240	61	25,6	85,2	142,594	58,64	34,19	55,54	10,00
270	61	25,6	85,4	142,456	58,66	34,18	55,55	9,99
300	61	25,8	85,7	142,347	58,56	34,20	55,51	9,98
330	61	25,8	85,7	142,269	58,60	34,22	55,50	9,98
360	61	25,9	85,1	142,210	58,65	34,21	55,54	9,92
1800	63	25,9	84,60	141,886	58,54	34,04	55,25	9,94
3240	61	26,4	100,1	141,495	58,50	34,04	55,27	9,95

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 25** – Dados coletados durante a secagem da amostra A5%R90°S.

<i>t</i> (min)	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A5%S90°					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	65	24,4	26,7	149,197	61,49	35,41	58,22	9,82
5	65	24,4	39,0	146,587	60,98	35,00	57,83	9,95
10	65	24,4	40,0	143,934	60,35	34,63	57,42	9,99
15	65	24,5	40,3	141,186	59,73	34,36	56,87	10,01
20	65	24,5	41,1	138,672	59,19	34,02	56,14	9,93
25	65	24,5	41,3	136,172	58,70	33,62	55,65	10,06
30	64	24,6	42,5	133,606	58,30	33,18	55,15	9,67
35	65	24,6	43,2	131,430	58,04	32,84	54,55	9,64
40	64	24,6	44,0	129,477	57,71	32,64	54,20	9,51
45	64	24,6	46,0	127,502	57,68	32,43	53,60	9,34
50	64	24,6	46,3	125,782	57,63	32,27	53,64	9,30
55	63	24,6	48,7	124,139	57,56	32,21	53,50	9,14
60	63	24,6	51,5	122,816	57,37	32,19	53,68	9,05
70	63	24,6	58,2	120,558	57,31	32,18	53,62	9,21
80	62	24,8	63,9	118,864	57,33	32,17	53,27	9,03
90	63	24,8	69,5	117,602	57,33	32,18	53,43	8,88
100	63	24,8	75,1	116,738	57,29	32,17	53,26	9,02
110	63	24,8	77,5	116,030	57,57	32,13	53,07	8,78
120	62	24,9	80,2	115,510	57,32	32,14	53,66	9,01
130	62	24,9	81,0	115,147	57,30	32,18	53,60	8,95
140	63	24,9	82,9	114,864	57,42	32,14	53,21	9,27
150	62	24,9	83,2	114,648	57,45	32,20	53,62	8,93
160	62	24,9	83,1	114,501	57,23	32,11	53,55	8,93
170	63	24,9	84,2	114,371	57,54	32,30	53,47	8,94
180	62	24,9	84,8	114,250	57,54	32,13	53,37	8,88
200	63	24,9	85,6	114,069	57,25	32,10	53,59	9,06
220	63	24,9	86,9	113,945	57,27	32,09	53,25	8,86

240	63	25,0	86,3	113,864	57,18	32,15	53,17	8,73
270	62	24,0	87,2	113,779	57,49	32,09	53,55	8,91
300	62	25,0	87,3	113,698	57,27	32,10	53,54	8,91
330	62	25,0	87,0	113,663	57,31	32,18	53,43	8,89
360	63	25,1	87,1	113,618	57,24	32,10	53,57	8,85
1800	69	24,6	87,8	113,439	57,17	32,04	53,27	8,85
3240	69	24,6	103,7	113,172	57,28	32,08	53,27	8,88

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 26** – Dados coletados durante a secagem da amostra A10%R90°S.

<i>t</i> (min)	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A10%S90°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	64	24,8	26,7	166,056	61,19	36,29	59,35	10,32
5	63	24,9	36,7	163,565	61,12	36,24	59,32	10,40
10	63	24,9	41,0	160,938	60,59	35,88	58,94	10,27
15	63	24,9	42,0	158,398	60,23	35,62	58,27	10,09
20	63	24,9	43,0	156,931	59,87	35,39	57,36	10,29
25	63	24,9	43,8	153,658	59,17	35,01	57,29	10,21
30	63	25,0	44,8	151,577	59,30	34,69	56,45	9,92
35	63	25,0	45,3	149,553	59,05	34,45	55,99	9,94
40	63	25,0	47,3	147,928	58,75	34,28	55,89	9,79
45	63	25,0	48,6	146,226	58,91	34,17	55,50	9,71
50	63	25,1	50,5	144,401	58,86	34,24	55,46	9,64
55	63	25,1	54,7	143,047	59,10	34,20	55,55	9,68
60	63	25,1	60	141,989	58,74	34,17	55,3	9,78
70	63	25,1	64,7	140,170	58,81	34,05	55,09	9,67
80	64	25,1	68,6	138,831	58,72	34,14	55,08	9,66
90	64	25,3	72,0	137,855	58,71	34,12	55,06	9,67
100	64	25,4	74,0	137,161	59,03	34,18	55,23	9,73
110	63	25,4	77,6	136,620	58,93	34,11	55,24	9,76
120	63	25,4	79,1	136,235	58,78	34,10	55,14	9,59
130	63	25,4	80,6	135,905	58,48	34,24	55,02	9,53
140	64	25,5	82,2	135,690	58,61	34,15	55,16	9,57
150	64	25,5	83,5	135,496	58,66	34,03	55,42	9,45
160	64	25,6	84,2	135,363	58,57	34,08	55,05	9,75
170	64	25,6	83,7	135,272	58,43	34,02	55,04	9,56
180	64	25,6	84,5	135,194	58,52	33,97	55,32	9,67
200	65	25,6	85,3	135,068	58,45	34,10	55,00	9,61
220	65	25,6	85,9	134,967	58,70	34,00	55,01	9,63

240	65	25,8	86,1	134,902	58,49	33,92	55,02	9,65
270	65	25,9	86,3	134,838	58,73	34,04	55,02	9,70
300	64	25,9	86,4	134,792	58,51	33,89	55,01	9,74
1740	67	25,3	86,0	134,600	58,53	34,02	55,04	9,64
3180	66	24,9	102,9	134,337	58,72	33,99	54,99	9,59

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 27** – Dados coletados durante a secagem da amostra A15%R90°S.

<i>t</i> (min)	AMBIENTE EXTERNO		AMOSTRA A15%S90°.					
	UR (%)	<i>T</i> (°C)	<i>T</i> (°C)	<i>m</i> (g)	<i>C</i> (mm)	<i>L</i> (mm)	<i>H</i> (mm)	<i>D</i> (mm)
0	63	24,3	27,0	155,048	58,30	35,99	57,52	10,74
5	62	24,5	38,2	152,151	57,94	35,69	57,52	10,62
10	62	24,4	40,2	149,632	57,35	35,37	57,04	10,48
15	61	24,4	41,1	147,133	56,68	35,13	56,80	10,72
20	61	24,5	45,3	144,478	56,34	34,66	56,50	10,64
25	61	24,5	45,5	141,582	56,08	34,31	56,08	10,45
30	61	24,5	46,1	139,469	55,95	34,15	55,77	10,32
35	61	24,6	48,0	137,050	55,92	34,05	55,47	9,96
40	60	24,6	50,9	135,558	55,69	33,99	54,82	10,15
45	60	24,6	53,0	134,300	55,70	34,03	54,80	10,00
50	60	24,6	57,3	133,144	55,70	33,94	54,79	9,91
55	60	24,6	60,5	132,077	55,71	33,94	54,61	10,06
60	60	24,6	64,5	131,132	55,56	34,01	54,65	10,08
70	59	24,8	67,8	129,768	55,72	33,85	54,72	10,02
80	58	24,8	73,2	128,660	55,54	34,04	54,74	10,06
90	58	24,9	76,6	127,907	55,73	33,98	54,71	9,99
100	57	24,9	78,7	127,400	55,70	33,98	54,61	9,98
110	56	24,9	80,6	126,999	55,60	33,97	54,60	10,00
120	55	24,9	82,3	126,709	55,49	33,97	54,59	10,07
130	55	24,9	82,1	126,533	55,73	33,97	54,60	10,11
140	54	24,9	82,6	126,380	55,54	33,93	54,63	10,00
150	54	24,9	83,7	126,245	55,75	33,94	54,57	10,03
160	53	24,9	84,5	126,144	55,69	33,97	54,64	9,94
170	53	24,9	83,0	126,068	55,53	33,88	54,60	9,92
180	54	24,9	84,1	125,996	55,47	33,92	54,53	10,00
200	54	25,0	85,0	125,884	55,81	33,91	54,54	9,90
220	53	25,0	85,2	125,799	55,52	33,91	54,56	10,09

240	53	25,1	85,8	125,743	55,58	33,90	54,53	9,84
270	53	25,1	85,8	125,677	55,58	33,90	54,53	9,88
300	52	25,1	85,9	125,621	55,77	33,89	54,51	9,99
1740	60	24,6	85,50	125,424	55,59	33,88	54,52	9,81
3180	67	24,9	102,20	125,233	55,57	33,88	54,53	9,82

Fonte: Dados da pesquisa.

**APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE QUEIMA, ABSORÇÃO E  
POROSIDADE**

**Tabela 28** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R50°S800°Q.

AMOSTRA				0% R50°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	23/09/2022	Data do término	27/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
70,29	128,82	142,89	76,40	21,16%	10,92%	2,15	1,83	7,08
70,58	130,53	145,49	76,96	21,83%	11,46%	2,12	1,85	7,07
71,20	133,46	147,89	78,59	20,82%	10,81%	2,13	1,87	7,05
66,02	125,68	139,39	75,64	21,51%	10,91%	2,19	1,90	6,92
<b>MÉDIA</b>				21,33%	11,03%	2,15	1,87	7,03
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,22%	0,15%	0,01	0,02	0,04
<b>MEDIANA</b>				21,33%	10,92%	2,14	1,86	7,06
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,43%	0,29%	0,03	0,03	0,07
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,01
<b>MÍNIMO</b>				20,82%	10,81%	2,12	1,83	6,92
<b>MÁXIMO</b>				21,83%	11,46%	2,19	1,90	7,08

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 29** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R50°S1000°Q.

AMOSTRA				0% R50°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	27/09/2022	Data do término	29/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
69,36	132,50	143,48	75,07	16,05%	8,29%	2,10	1,91	7,46
67,65	130,15	140,71	74,62	15,98%	8,11%	2,13	1,92	7,49
68,26	128,96	139,26	73,85	15,75%	7,99%	2,13	1,89	7,42
72,75	133,43	144,22	73,73	15,31%	8,09%	2,05	1,83	7,45
<b>MÉDIA</b>				15,77%	8,12%	2,10	1,89	7,45
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,17%	0,06%	0,02	0,02	0,01
<b>MEDIANA</b>				15,86%	8,10%	2,11	1,90	7,46
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,34%	0,12%	0,04	0,04	0,03
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				15,31%	7,99%	2,05	1,83	7,42
<b>MÁXIMO</b>				16,05%	8,29%	2,13	1,92	7,49

Fonte: Dados da pesquisa.



**Tabela 30** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R70°S900°Q.

AMOSTRA				0%R70°S900°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	21/09/2022	Data do término	27/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
71,54	130,95	146,74	78,68	23,20%	12,06%	2,16	1,83	6,31
74,71	136,81	152,41	81,70	22,06%	11,40%	2,16	1,83	6,29
75,09	129,36	145,40	77,96	23,78%	12,40%	2,16	1,72	6,36
73,36	132,73	147,97	78,96	22,08%	11,48%	2,14	1,81	6,32
<b>MÉDIA</b>				22,78%	11,84%	2,15	1,80	6,32
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,43%	0,24%	0,00	0,03	0,02
<b>MEDIANA</b>				22,64%	11,77%	2,16	1,82	6,32
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,85%	0,48%	0,01	0,05	0,03
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				22,06%	11,40%	2,14	1,72	6,29
<b>MÁXIMO</b>				23,78%	12,40%	2,16	1,83	6,36

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 31** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R90°S800°Q.

AMOSTRA				0%R90°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	21/09/2022	Data do término	23/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
72,04	131,75	147,11	79,14	22,60%	11,66%	2,16	1,83	5,26
70,77	130,79	147,3	78,73	24,08%	12,62%	2,15	1,85	5,58
73,50	130,81	147,89	79,63	25,02%	13,06%	2,17	1,78	5,47
78,54	137,25	155,22	83,60	25,09%	13,09%	2,17	1,75	5,48
<b>MÉDIA</b>				24,20%	12,61%	2,16	1,80	5,45
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,58%	0,33%	0,00	0,02	0,07
<b>MEDIANA</b>				24,55%	12,84%	2,17	1,80	5,48
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,16%	0,67%	0,01	0,05	0,13
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,00	0,02
<b>MÍNIMO</b>				22,60%	11,66%	2,15	1,75	5,26
<b>MÁXIMO</b>				25,09%	13,09%	2,17	1,85	5,58

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 32** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A0%R90°S1000°Q.

AMOSTRA				0%R90°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	27/09/2022	Data do término	29/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
69,15	131,82	142,98	76,57	16,80%	8,47%	2,15	1,91	6,07
69,97	130,91	142,45	76,49	17,50%	8,82%	2,16	1,87	6,06
64,83	125,01	135,85	72,99	17,24%	8,67%	2,16	1,93	6,04
70,13	129,70	143,18	76,48	20,21%	10,39%	2,15	1,85	6,02
<b>MÉDIA</b>				17,94%	9,09%	2,16	1,89	6,05
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,77%	0,44%	0,00	0,02	0,01
<b>MEDIANA</b>				17,37%	8,74%	2,16	1,89	6,05
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,54%	0,88%	0,01	0,04	0,02
<b>VARIÂNCIA</b>				0,02%	0,01%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				16,80%	8,47%	2,15	1,85	6,02
<b>MÁXIMO</b>				20,21%	10,39%	2,16	1,93	6,07

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 33** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R50°S800°Q.

AMOSTRA				5%R50°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	20/10/2022	Data do término	21/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
74,66	127,97	145,84	77,73	26,24%	13,96%	2,14	1,71	6,45
72,17	126,85	144,78	77,03	26,46%	14,13%	2,14	1,76	6,18
71,52	127,05	145,02	77,59	26,65%	14,14%	2,15	1,78	6,26
70,79	124,27	141,91	75,14	26,42%	14,19%	2,13	1,76	6,15
<b>MÉDIA</b>				26,44%	14,11%	2,14	1,75	6,26
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,08%	0,05%	0,01	0,01	0,07
<b>MEDIANA</b>				26,44%	14,14%	2,14	1,76	6,22
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,17%	0,10%	0,01	0,03	0,13
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,02
<b>MÍNIMO</b>				26,24%	13,96%	2,13	1,71	6,15
<b>MÁXIMO</b>				26,65%	14,19%	2,15	1,78	6,45

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 34** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R50°S1000°Q.

AMOSTRA				5%R50°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	20/10/2022	Data do término	21/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
64,55	120,74	131,59	71,12	17,94%	8,99%	2,18	1,87	7,20
68,41	128,36	140,59	76,35	19,04%	9,53%	2,19	1,88	7,03
62,61	120,16	129,31	69,93	15,41%	7,61%	2,18	1,92	7,10
64,78	124,41	134,81	72,64	16,73%	8,36%	2,17	1,92	7,21
<b>MÉDIA</b>				17,28%	8,62%	2,18	1,90	7,13
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,78%	0,41%	0,00	0,01	0,04
<b>MEDIANA</b>				17,34%	8,67%	2,18	1,90	7,15
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,56%	0,82%	0,01	0,03	0,09
<b>VARIÂNCIA</b>				0,02%	0,01%	0,00	0,00	0,01
<b>MÍNIMO</b>				15,41%	7,61%	2,17	1,87	7,03
<b>MÁXIMO</b>				19,04%	9,53%	2,19	1,92	7,21

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 35** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R70°S900°Q.

AMOSTRA				5%R70°S900°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	20/10/2022	Data do término	21/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
74,05	126,75	144,09	75,49	25,28%	13,68%	2,10	1,71	6,32
65,50	118,53	133,49	70,85	23,88%	12,62%	2,13	1,81	6,30
71,29	123,84	140,89	73,34	25,24%	13,77%	2,09	1,74	6,40
71,05	122,05	139,74	73,14	26,56%	14,49%	2,10	1,72	6,20
<b>MÉDIA</b>				25,55%	13,85%	2,10	1,74	6,30
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,53%	0,37%	0,01	0,02	0,03
<b>MEDIANA</b>				25,28%	13,77%	2,10	1,73	6,30
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,18%	0,82%	0,02	0,04	0,07
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,01%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				23,88%	12,62%	2,09	1,71	6,20
<b>MÁXIMO</b>				26,80%	14,70%	2,13	1,81	6,40

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 36** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R90°S800°Q.

AMOSTRA				5% R90°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	20/10/2022	Data do término	21/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
67,32	123,18	140,43	75,21	26,45%	14,00%	2,15	1,83	5,01
76,54	131,18	149,52	80,05	26,40%	13,98%	2,15	1,71	5,04
68,14	120,69	138,36	73,24	27,13%	14,64%	2,12	1,77	5,02
74,49	132,98	151,62	81,32	26,51%	14,02%	2,16	1,79	4,74
<b>MÉDIA</b>				26,62%	14,16%	2,15	1,78	4,95
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,17%	0,16%	0,01	0,02	0,07
<b>MEDIANA</b>				26,48%	14,01%	2,15	1,78	5,01
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,34%	0,32%	0,01	0,05	0,14
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,02
<b>MÍNIMO</b>				26,40%	13,98%	2,12	1,71	4,74
<b>MÁXIMO</b>				27,13%	14,64%	2,16	1,83	5,04

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 37** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A5%R90°S1000°Q.

AMOSTRA				5% R90°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	27/09/2022	Data do término	29/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
65,84	121,99	133,40	70,62	18,17%	9,35%	2,12	1,85	5,76
75,06	138,81	150,01	80,44	16,10%	8,07%	2,16	1,85	5,75
64,06	123,31	133,15	71,91	16,07%	7,98%	2,17	1,93	5,76
79,29	149,13	161,74	86,76	16,82%	8,46%	2,16	1,88	5,86
<b>MÉDIA</b>				16,79%	8,46%	2,15	1,88	5,78
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,49%	0,31%	0,01	0,02	0,03
<b>MEDIANA</b>				16,46%	8,26%	2,16	1,87	5,76
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,99%	0,63%	0,02	0,04	0,05
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				16,07%	7,98%	2,12	1,85	5,75
<b>MÁXIMO</b>				18,17%	9,35%	2,17	1,93	5,86

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 38** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R50°S800°Q.

AMOSTRA				10%R50°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	20/10/2022	Data do término	21/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
66,90	122,44	139,63	73,57	26,02%	14,04%	2,11	1,83	6,12
65,46	116,57	132,82	68,01	25,07%	13,94%	2,05	1,78	6,73
69,37	125,86	142,89	75,18	25,15%	13,53%	2,11	1,81	6,18
68,51	121,44	138,12	72,03	25,24%	13,74%	2,09	1,77	6,05
<b>MÉDIA</b>				25,37%	13,81%	2,09	1,80	6,27
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,22%	0,11%	0,01	0,01	0,16
<b>MEDIANA</b>				25,19%	13,84%	2,10	1,80	6,15
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,44%	0,23%	0,03	0,03	0,31
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,10
<b>MÍNIMO</b>				25,07%	13,53%	2,05	1,77	6,05
<b>MÁXIMO</b>				26,02%	14,04%	2,11	1,83	6,73

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 39** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R50°S1000°Q.

AMOSTRA				10%R50°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	27/09/2022	Data do término	29/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
56,15	108,42	119,28	62,61	19,16%	10,02%	2,10	1,93	6,94
66,94	131,10	142,69	72,75	16,57%	8,84%	2,04	1,96	6,95
60,16	116,22	126,62	66,42	17,28%	8,95%	2,10	1,93	6,91
63,23	121,34	132,29	69,77	17,51%	9,02%	2,12	1,92	6,95
<b>MÉDIA</b>				17,63%	9,21%	2,09	1,93	6,94
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,55%	0,27%	0,02	0,01	0,01
<b>MEDIANA</b>				17,40%	8,99%	2,10	1,93	6,95
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,10%	0,54%	0,03	0,02	0,02
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				16,57%	8,84%	2,04	1,92	6,91
<b>MÁXIMO</b>				19,16%	10,02%	2,12	1,96	6,95

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 40** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R70°S900°Q.

AMOSTRA				10%R70°S900°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	27/09/2022	Data do término	29/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
73,85	131,80	149,78	78,81	25,33%	13,64%	2,11	1,78	5,56
72,36	133,54	152,29	79,84	25,88%	14,04%	2,10	1,85	5,50
71,76	129,20	147,61	77,17	26,14%	14,25%	2,10	1,80	5,72
78,52	136,20	155,19	81,41	25,74%	13,94%	2,10	1,73	5,67
<b>MÉDIA</b>				25,77%	13,97%	2,10	1,79	5,61
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,17%	0,13%	0,00	0,02	0,05
<b>MEDIANA</b>				25,81%	13,99%	2,10	1,79	5,62
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,33%	0,25%	0,01	0,05	0,10
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,01
<b>MÍNIMO</b>				25,33%	13,64%	2,10	1,73	5,50
<b>MÁXIMO</b>				26,14%	14,25%	2,11	1,85	5,72

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 41** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R90°S800°Q.

AMOSTRA				10%R90°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início		Data do término		
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
	125,08	142,78	75,46	26,29%	14,15%	2,12		
	121,93	138,96	73,52	26,02%	13,97%	2,12		
	129,60	147,73	78,2	26,08%	13,99%	2,12		
	117,32	134,14	70,98	26,63%	14,34%	2,12		
<b>MÉDIA</b>				26,26%	14,11%	2,12		
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,14%	0,09%	0,00		
<b>MEDIANA</b>				26,18%	14,07%	2,12		
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,28%	0,17%	0,00		
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00		
<b>MÍNIMO</b>				26,02%	13,97%	2,12		
<b>MÁXIMO</b>				26,63%	14,34%	2,12		

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 42** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A10%R90°S1000°Q.

AMOSTRA				10%R90°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início		Data do término		
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
66,61	123,00	135,90	70,66	19,77%	10,49%	2,08	1,85	5,41
64,69	121,62	132,54	71,67	17,94%	8,98%	2,18	1,88	5,50
63,01	119,47	130,74	68,17	18,01%	9,43%	2,09	1,90	5,48
64,10	125,36	136,87	71,88	17,71%	9,18%	2,11	1,96	5,53
<b>MÉDIA</b>				18,36%	9,52%	2,11	1,89	5,48
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,48%	0,34%	0,02	0,02	0,03
<b>MEDIANA</b>				17,98%	9,31%	2,10	1,89	5,49
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,95%	0,67%	0,04	0,05	0,05
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				17,71%	8,98%	2,08	1,85	5,41
<b>MÁXIMO</b>				19,77%	10,49%	2,18	1,96	5,53

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 43** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R50°S800°Q.

AMOSTRA				15%R50°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	13/10/2022	Data do término	14/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
83,43	140,33	160,77	84,58	26,83%	14,57%	2,11	1,68	5,80
73,33	127,05	145,28	72,29	24,98%	14,35%	1,99	1,73	5,95
66,46	122,03	140,22	73,64	27,32%	14,91%	2,11	1,84	5,90
77,12	129,68	149,05	76,51	26,70%	14,94%	2,05	1,68	5,89
<b>MÉDIA</b>				26,46%	14,69%	2,07	1,73	5,88
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,51%	0,14%	0,03	0,04	0,03
<b>MEDIANA</b>				26,77%	14,74%	2,08	1,71	5,90
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,02%	0,28%	0,06	0,07	0,06
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,00%	0,00	0,01	0,00
<b>MÍNIMO</b>				24,98%	14,35%	1,99	1,68	5,80
<b>MÁXIMO</b>				27,32%	14,94%	2,11	1,84	5,95

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 44** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R50°S1000°Q.

AMOSTRA				10%R50°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	13/09/2022	Data do término	14/09/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
76,07	136,62	152,24	80,41	21,75%	11,43%	2,12	1,80	6,56
71,44	128,91	144,04	76,08	22,26%	11,74%	2,12	1,80	6,56
70,78	128,62	143,79	75,97	22,37%	11,79%	2,12	1,82	6,51
71,14	139,69	158,05	83,10	24,50%	13,14%	2,11	1,96	6,40
<b>MÉDIA</b>				22,72%	12,03%	2,12	1,85	6,51
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,61%	0,38%	0,00	0,04	0,04
<b>MEDIANA</b>				22,32%	11,77%	2,12	1,81	6,54
<b>DESVIO PADRÃO</b>				1,22%	0,76%	0,01	0,08	0,08
<b>VARIÂNCIA</b>				0,01%	0,01%	0,00	0,01	0,01
<b>MÍNIMO</b>				21,75%	11,43%	2,11	1,80	6,40
<b>MÁXIMO</b>				24,50%	13,14%	2,12	1,96	6,56

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 45** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R70°S900°Q.

AMOSTRA				15%R70°S900°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	19/10/2022	Data do término	20/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	ρA (g/cm <sup>3</sup> )	ρgeo (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
70,49	127,79	145,89	76,41	26,05%	14,16%	2,10	1,81	5,53
72,50	133,53	152,82	80,24	26,58%	14,45%	2,11	1,84	5,50
76,18	137,10	157,23	82,08	26,79%	14,68%	2,09	1,80	5,48
76,16	134,62	154,29	80,80	26,77%	14,61%	2,10	1,77	5,40
<b>MÉDIA</b>				26,66%	14,53%	2,10	1,80	5,43
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,17%	0,11%	0,00	0,01	0,05
<b>MEDIANA</b>				26,77%	14,61%	2,10	1,80	5,48
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,39%	0,24%	0,01	0,03	0,10
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,01
<b>MÍNIMO</b>				26,05%	14,16%	2,09	1,77	5,27
<b>MÁXIMO</b>				27,11%	14,76%	2,11	1,84	5,53

Fonte: Dados da pesquisa.



**Tabela 46** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R90°S800°Q.

AMOSTRA				15%R90°S800°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	13/10/2022	Data do término	14/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
75,14	130,67	150,09	79,11	27,36%	14,86%	2,11	1,74	4,47
76,60	131,10	150,65	78,94	27,26%	14,91%	2,10	1,71	4,64
70,28	125,68	145,04	76,39	28,20%	15,40%	2,11	1,79	4,44
77,42	129,74	149,69	77,67	27,70%	15,38%	2,08	1,68	4,57
<b>MÉDIA</b>				27,63%	15,14%	2,10	1,73	4,53
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,21%	0,15%	0,01	0,02	0,05
<b>MEDIANA</b>				27,53%	15,14%	2,11	1,73	4,52
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,42%	0,29%	0,02	0,05	0,09
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,01
<b>MÍNIMO</b>				27,26%	14,86%	2,08	1,68	4,44
<b>MÁXIMO</b>				28,20%	15,40%	2,11	1,79	4,64

Fonte: Dados da pesquisa.

**Tabela 47** – Testes experimentais de absorção de água da amostra A15%R90°S1000°Q.

AMOSTRA				15%R90°S1000°Q				
Local de Execução		LTM/UFCG		Data do início	13/10/2022	Data do término	14/10/2022	
Vol. (cm <sup>3</sup> )	PS* (g)	PU (g)	PI (g)	Popen (%)	AA (%)	$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{geo}$ (g/cm <sup>3</sup> )	PF (%)
77,92	130,36	146,39	77,01	23,10%	12,30%	2,11	1,67	5,94
69,15	124,39	139,74	73,14	23,05%	12,34%	2,10	1,80	5,97
71,11	125,54	141,72	74,58	24,10%	12,89%	2,11	1,77	5,88
72,82	127,06	143,61	75,06	24,14%	13,03%	2,09	1,74	5,91
<b>MÉDIA</b>				23,60%	12,64%	2,10	1,75	5,92
<b>ERRO PADRÃO</b>				0,30%	0,19%	0,00	0,03	0,02
<b>MEDIANA</b>				23,60%	12,61%	2,10	1,76	5,93
<b>DESVIO PADRÃO</b>				0,60%	0,37%	0,01	0,05	0,04
<b>VARIÂNCIA</b>				0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,00
<b>MÍNIMO</b>				23,05%	12,30%	2,09	1,67	5,88
<b>MÁXIMO</b>				24,14%	13,03%	2,11	1,80	5,97

Fonte: Dados da pesquisa.