



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CICLO DE REGENERAÇÃO DE SÍLICA GEL COMO DESUMIDIFICADOR DE FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO 3D**

Matheus Napolitano de Carvalho

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Fábio Luiz Zamberlam

Co-orientador: Nísio de Carvalho Lobo Brum

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**

Departamento de Engenharia Mecânica



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

DEM/POLI/UFRJ

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CICLO DE  
REGENERAÇÃO DE SÍLICA GEL COMO DESUMIDIFICAR DE  
FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO 3D**

Matheus Napolitano de Carvalho

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Fábio Luiz Zamberlan

---

Prof. Nísio de Carvalho Lobo Brum

---

Prof. Antonio MacDowell de Figueiredo

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

Carvalho, Matheus Napolitano

Análise de desempenho de um ciclo de regeneração de sílica gel como desumidificar de filamentos para impressão 3D / Matheus Napolitano de Carvalho. – Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2019.

X, 56 p.: il. 29,7 cm

Orientador:

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica /

Curso de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 01-56

1. Desumidificador
2. Manufatura Aditiva
3. Sílica gel
4. Impressora 3D. I. Zamberlan, Fábio Luiz II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Projeto Desumidificador de Filamentos

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais Claudia e Mauricio, pelo amor e carinho incondicional que através de esforço e dedicação puderam me proporcionar condições de chegar a faculdade.

A minha irmã, Natalia, com quem eu aprendi quase tudo na minha vida e principalmente a importância da educação, sem ela eu jamais estaria na faculdade.

A minha namorada, Layanne, pelo amor e apoio em todos os momentos difíceis que passei durante faculdade, sempre me auxiliando e incentivando a buscar cada vez mais e sempre acreditando em mim.

Aos meus orientadores, Prof. Fabio Luiz Zamberlan e Prof. Nísio de Carvalho Lobo Brum, pela paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento do projeto.

Aos amigos que conquistei na faculdade, os quais irei levar para o resto da vida, que sem o apoio os momentos difíceis, tornaria impossível a conclusão desse curso.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Mecânica.

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CICLO DE  
REGENERAÇÃO DE SÍLICA GEL COMO DESUMIDIFICAR DE  
FILAMENTOS PARA IMPRESSÃO 3D

Matheus Napolitano de Carvalho

Março/2019

Orientador: Fábio Luiz Zamberlan

Curso: Engenharia Mecânica

O presente trabalho consiste na análise do desempenho de um mecanismo que realiza um ciclo de regeneração da sílica gel para desumidificar filamentos para impressão 3D. O objetivo do mecanismo é tornar o ambiente onde serão alojadas as bobinas de filamento ideal para a conservação de suas propriedades mecânicas. Além disso, o estudo analisa numericamente a partir de um programa desenvolvido na linguagem C, o comportamento do fluxo de ar processado na saída do mecanismo, verificando a viabilidade da aplicação desse ciclo para desumidificar e manter as condições adequadas para o armazenamento do filamento. A partir do programa desenvolvido, o estudo avalia os melhores valores para que o mecanismo desempenhe a sua função de forma mais eficiente possível.

*Palavras-chave:* Silica Gel, Filamentos, Impressora 3D, Desumidificador.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a parcial fulfillment of the requirement for the degree of Mechanical Engineer.

PERFORMANCE ANALYSIS OF SILICA GEL REGENERATION  
CYCLE AS DEHUMIDIFIER OF FILAMENTS FOR 3D PRINTER

Matheus Napolitano de Carvalho

Março/2019

Advisor: Fábio Luiz Zamberlan

Course: Mechanical Engineering

The present work consists of the performance analysis of a mechanism that performs a silica gel regeneration cycle to dehumidify filaments for 3D printing. The purpose of the mechanism is to make the ideal environment where the filament coils will be housed for the conservation of its mechanical properties. In addition, from a program developed in language C, the study analyzes numerically the behavior of the airflow processed at the output of the mechanism, verifying the availability of applying this cycle to dehumidify and maintain adequate conditions for filament storage. From the developed program, the study evaluates the best parameters for the mechanism to perform its function in the most efficient way possible.

*Keywords:* Silica gel, Filaments, 3D Printer, Dehumidifier.

## Sumário

1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1. História da Impressão 3D.....	3
2.2. Fabricação por Filamento Fundido - FFF .....	5
2.3. Filamentos .....	6
2.3.1. ABS - Acrilonitrila butadieno estireno.....	6
2.3.2. Nylon .....	7
2.3.3. PLA - Ácido polilático.....	8
2.3.3.1. Propriedades do PLA.....	10
3. Fundamentação teórica .....	14
3.1. Projetos Existentes .....	14
3.1.1. PrintDry.....	14
3.1.2. Caixa desumidificadora – Becky Stern.....	15
3.2. Métodos de desumidificação.....	15
3.2.1. Desumidificação à base de resfriamento .....	16
3.2.2. Desumidificação à base de dessecantes .....	17
3.2.2.1. Sílica Gel.....	19
3.2.3. Torre dessecante.....	21
4. Modelagem matemática.....	23
4.1. Equações auxiliares.....	27
4.2. Procedimento numérico computacional .....	29
4.3. Validação do modelo computacional.....	30
5. Cálculo de desempenho do mecanismo .....	34
5.1. Análise de variáveis do ciclo de adsorção.....	35
5.1.1. Alturas da torre .....	35
5.1.2. Tipos de sílica gel .....	36
5.1.3. Tipos de coolers .....	39
5.2. Análise do ciclo de dessorção.....	42
6. Análises de viabilidade.....	44
7. Conclusão.....	47
8. Trabalhos futuros .....	48
Bibliografia .....	49
Apêndice.....	51

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Diferença de impressão com filamentos úmidos e secos. Disponível em: <a href="https://www.matterhackers.com/news/filament-and-water">https://www.matterhackers.com/news/filament-and-water</a> .....	1
Figura 1.2 - Teste de verificação de condições do filamento. Disponível em <a href="https://3dlab.com.br/umidade-no-filamento/">https://3dlab.com.br/umidade-no-filamento/</a> .....	2
Figura 2.1 - Principais etapas da tecnologia de impressão 3D. Autoria própria .....	4
Figura 2.2 - Esquema de impressão 3D utilizando a técnica de FDM. Adaptado de (CARNEIRO,2015).....	5
Figura 2.3 - Cadeia química do ABS. Disponível em <a href="https://brasilecola.uol.com.br/quimica/borracha-natural-sintetica.htm">https://brasilecola.uol.com.br/quimica/borracha-natural-sintetica.htm</a> .....	6
Figura 2.4 - Cadeia química do NYLON. Disponível em <a href="https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/nylon-um-polimero-resistente.htm">https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/nylon-um-polimero-resistente.htm</a> .....	7
Figura 2.5 - Objeto impresso a NYLON (esquerda) e bobina de filamento de NYLON (direita). Disponível em <a href="http://www.fablessy.com/stampa-3d-stampare-filamento-nylon-carbon-fiber-eumakers/">http://www.fablessy.com/stampa-3d-stampare-filamento-nylon-carbon-fiber-eumakers/</a> .....	8
Figura 2.6 - Etapas da fabricação do filamento de PLA. Disponível em <a href="http://bootsindustries.com/the-importance-of-high-quality-3d-printer-filament/">http://bootsindustries.com/the-importance-of-high-quality-3d-printer-filament/</a> .....	9
Figura 2.7 - Infográfico de usuários por tipo de filamento. Adaptado a partir de <a href="https://3dprint.com/210552/filaments-directory-2018-survey/">https://3dprint.com/210552/filaments-directory-2018-survey/</a> .....	10
Figura 2.8 – Hidrólise do grupo éster criando novas cadeias no final, carboxila e hidroxila. Adpatado (THEM <i>et. al</i> , 2014).....	11
Figura 2.9 - Gráfico de absorção de água do PLA. Charles (1963) .....	13
Figura 3.1 – PrintDry. Disponível em: <a href="https://www.printdry.com/">https://www.printdry.com/</a> .....	14
Figura 3.2 - Caixa desumidificadora - Becky Stern. Disponível em: <a href="https://beckystern.com/2017/11/24/3d-printer-filament-dry-box/">https://beckystern.com/2017/11/24/3d-printer-filament-dry-box/</a> .....	15
Figura 3.3 - Esquema de desumidificação a resfriamento. Adaptado (HARRIMAN III, 2002) .....	16
Figura 3.4 - Carta psicométrica do processo de desumidificação a resfriamento. Adaptado (HARRIMAN III, 2002).....	17
Figura 3.5 - Carta psicométrica do processo de desumidificação por dessecantes. Adaptado (HARRIMAN III, 2002).....	18
Figura 3.6 - Etapas do processo de desumidificação a base de dessecantes. Adaptado (HARRIMAN III, 2002).....	19
Figura 3.7 - Cadeia molecular da sílica gel. RUZHU, W, 2014 .....	20
Figura 3.8 - Imagem microscópica da superfície da sílica gel. RUZHU W., 2014 .....	21

Figura 3.9 - Ciclo da torre de desumidificação. Adaptado (HARRIMAN III, 2002) .....	22
Figura 4.1 - (a) Fluxo de ar através da torre dessecante. (b) Fluxo de ar através de um volume de controle. Adaptado RAMZY, 2011 .....	23
Figura 4.2 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN no teste 1. (PESARAN <i>et. al</i> , 1987) (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria .....	31
Figura 4.3 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 7 (PESARAN <i>et. al</i> , 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria .....	31
Figura 4.4 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 25 (PESARAN <i>et. al</i> , 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria .....	32
Figura 4.5 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 30 (PESARAN <i>et. al</i> , 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria .....	33
Figura 5.1 - Gráfico da média da temperatura e da umidade relativa na cidade do Rio de Janeiro ao longo de um ano.....	34
Figura 5.3 - Variação da umidade média na saída da torre para diferentes alturas (L). Autoria própria .....	35
Figura 5.4 - Variação da temperatura na saída da torre para diferentes alturas (L). Autoria própria .....	36
Figura 5.5 - Indicador de saturação para os 3 tipos de sílica. Adaptado - Disponível em: <a href="https://pt.aliexpress.com/item/40-g-caixa-S-lica-Gel-Absorvente-de-Umididade-Caixa-de-Gel-de-S-lica-Dessecante/32867810392.html">https://pt.aliexpress.com/item/40-g-caixa-S-lica-Gel-Absorvente-de-Umididade-Caixa-de-Gel-de-S-lica-Dessecante/32867810392.html</a> .....	37
Figura 5.6 - Variação da umidade na saída da torre para diferentes diâmetros de partícula de sílica gel (dp). Autoria própria .....	38
Figura 5.7 - Variação da temperatura média na saída da torre para diferentes diâmetros de partícula de sílica gel (dp). Autoria própria .....	39
Figura 5.8 - Modelos de coolers. Disponível em <a href="https://industrialfans.wordpress.com/2012/07/11/whats-the-difference-between-a-centrifugal-fan-and-an-axial-fan/">https://industrialfans.wordpress.com/2012/07/11/whats-the-difference-between-a-centrifugal-fan-and-an-axial-fan/</a> .....	40
Figura 5.9 - Variação da umidade na saída da torre para diferentes velocidades (V). Autoria própria .....	41
Figura 5.10- Variação da temperatura na saída da torre para diferentes velocidades (V). Autoria própria .....	42
Figura 5.11 - Volume de água no interior da sílica gel ao longo do tempo durante o ciclo de adsorção e dessorção da sílica gel. Autoria própria .....	43

Figura 6.1 - Temperatura de saída do ar processado (°C). Autoria própria .....	45
Figura 6.2 - Umidade do ar processado na saída do equipamento. Autoria própria .....	45
Figura 6.3 - Carta psicométrica .....	46

### **Lista de tabelas**

Tabela 2.1 - Resultado da variação do diâmetro dos filamentos expostos a diferentes condições.....	12
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados por PESARAN em seu modelo teórico e experimental .	30
Tabela 4.2 - Tabela de erros relativos experimento x teoria .....	33
Tabela 5.1 - Transformação de velocidade (m/s) em fluxo de ar (CFM) .....	40

# 1. Introdução

O uso da impressão 3D está se difundindo cada vez mais entre empresas e pessoas, e com o aumento da utilização, muitos problemas são detectados por usuários. Dentre os problemas mais recorrentes, encontramos vários relatos de erros de impressão devido a degradação do insumo.

A maioria dos insumos são materiais poliméricos que são higroscópicos, ou seja, tem capacidade de absorção de água, e isso faz com que se degradem e percam suas propriedades mecânicas. O poli ácido lático (PLA), por exemplo, pode absorver cerca de 1% do seu volume em água, causando hidrólise de suas cadeias poliméricas e consequentemente perda de performance.



Figura 1.1 - Diferença no acabamento da peça impressa com filamentos úmidos e secos.

Disponível em: <https://www.matterhackers.com/news/filament-and-water>

Além de piorar o acabamento das peças (Figura 1.1), outros problemas são relatados por usuários devido a umidade em filamentos, entre eles podemos citar:

- Alterações nas propriedades mecânicas;
- Variações de fluidez;
- Bolhas e espirros na peça;
- Entupimento do bico extrusor da impressora;
- Queda na adesão entre as camadas;

Um dos gargalos da impressão 3D é o tempo de fabricação da peça, dependendo do tamanho e complexidade da peça, uma impressão pode demorar de 10 minutos até 20 horas, ou seja, é de vital importância a boa manutenção dos insumos para que não haja perda de custo e tempo nos projetos.

No entanto, na maioria das vezes não é possível identificar esses problemas antes da impressão, apenas quando a peça é finalizada, como o caso da queda de adesão entre as camadas. Em outros casos, percebe-se através de testes simples que a qualidade do filamento não está própria para impressão (Figura 1.2).

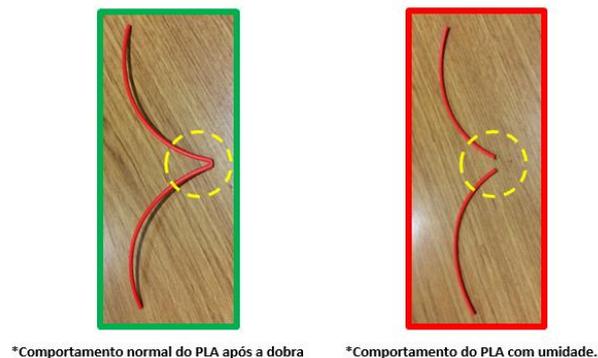


Figura 1.2 - Teste de verificação de condições do filamento. Disponível em: <https://3dlab.com.br/umidade-no-filamento/>

Com isso, verifica-se a necessidade de armazenamento dos materiais em condições próprias para manutenção de suas propriedades. Para solucionar esse problema, iremos analisar a eficiência de um mecanismo que utiliza uma técnica da regeneração a base de dessecante para manter os insumos em condições adequadas e que não haja perda de nenhuma propriedade mecânica, conservando o material com a umidade e a temperatura ideal para seu uso.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. História da Impressão 3D

Em 1984, o americano Charles Hull inventou a estereolitografia e também o formato de arquivos .STL (*Standard Tessellation Language*) derivado de um software CAD, uma técnica da manufatura aditiva. A máquina criada tinha como principal função produzir peças a partir da solidificação de resina exposta a luz. Considerado o precursor da prototipagem rápida, Hull é co-fundador da 3D Systems, uma das maiores empresas do ramo e que deu início a esta indústria. Desde então a impressão 3D vem crescendo e novas técnicas são criadas e aprimoradas.

Outro nome crucial para esta indústria é Scott Crump, inventor da técnica de Modelagem por Deposição de Filamento, FDM (Fused Deposition Modeling), em 1988, e co-fundador da Stratasys que introduziu o primeiro termoplástico no processo de prototipagem rápida, em 1994.

Os processos existentes de manufatura aditiva constroem e consolidam camadas utilizando materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos na forma líquida ou solução, sólida na forma de filamentos poliméricos e compósitos ou na forma de pós. São estas algumas das técnicas: estereolitografia (SLA), impressão a jato (inkjet printing), sinterização seletiva a laser (SLS), fabricação de objetos por laminação (LOM – laminate objects manufacturing) e modelagem por fusão e deposição (FDM – fused deposition modeling. (WONG & HERNANDEZ, 2012)

As técnicas de impressão 3D apresentam as principais etapas em comum: modelagem digital da peça em arquivo CAD, escaneamento 3D ou tomografia, conversão do arquivo CAD para o formato .STL e posterior fatiamento, determinação do padrão, criação do código G e finalmente a impressão camada por camada da peça (Figura 2.1).

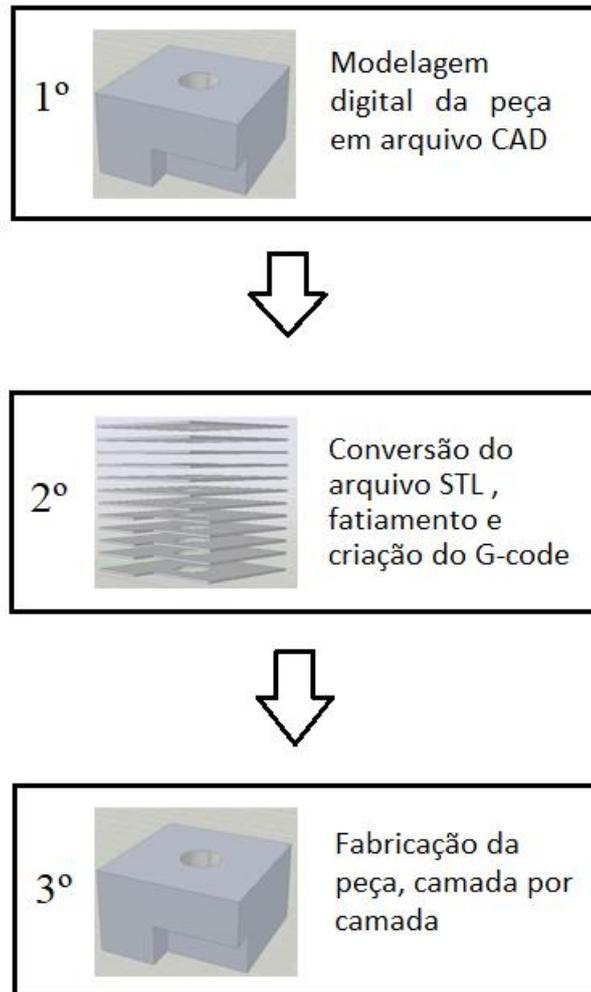


Figura 2.1 - Principais etapas da tecnologia de impressão 3D. Autoria própria

Os modelos tridimensionais podem ser gerados em programas digitais CAD (AutoCAD, Fusion 360, SolidWorks), imagens obtidas por tomografia computadorizada (TC), ressonância magnética (MRI) ou scanners 3D. Os dados obtidos são convertidos para o formato .STL, o qual capta a informação de cada superfície do modelo 3D na forma de seções triangulares, onde as coordenadas espaciais dos vértices são definidas e transmitidas à impressora para fabricação do objeto. O software da impressora promove o fatiamento do arquivo gerando o código G (G-code). Posteriormente, o código G é enviado para a impressão de consecutivas camadas do material designado (GROSS, 2014).

Dentre os principais materiais poliméricos aplicados a esta tecnologia, pode-se destacar o poli(ácido láctico) (PLA), poliamida (PA), poliestireno (PS), estireno-butadieno-acrilonitrila (ABS), nylon e o policarbonato (PC), além de materiais compósitos.

## 2.2. Fabricação por Filamento Fundido - FFF

Fabricação por Filamento Fundido é a tradução de Fused Filament Fabrication, cuja sigla é FFF, porém a sigla mais utilizada é FDM, abreviatura para Fused Deposition Modeling (FDM), termo criado por Scott Crump que foi registrado pela Stratasys Inc. anteriormente, por isso o termo Fused Filament Fabrication (FFF) foi criado pelos membros da RepRap para ser utilizado sem restrições de registro.

O FFF é uma das técnicas de fabricação por manufatura aditiva mais utilizadas. Esta técnica se popularizou nos últimos 10 anos devido a criação de máquinas compactas e mais simples de usar, sendo mais acessíveis para uso doméstico e de micro e pequena empresas. Tais máquinas podem utilizar diferentes tipos de filamentos termoplásticos, com diferentes características mecânicas.

No processo FDM (Figura 2.2), um filamento de polímero termoplástico adaptado a um carretel passa por cilindros de pressão e é aquecido por uma unidade de controle de temperatura para o estado semi-fundido e então extrudado por um bico de impressão que se move sobre uma plataforma ajustável, depositando o material nos três eixos axiais (x, y, z). A deposição se inicia no perímetro do objeto, seguido pelo preenchimento interno, de modo que o material depositado se solidifique a temperatura ambiente, construindo camada por camada um modelo tridimensional completo (GROSS *et al.*, 2014).

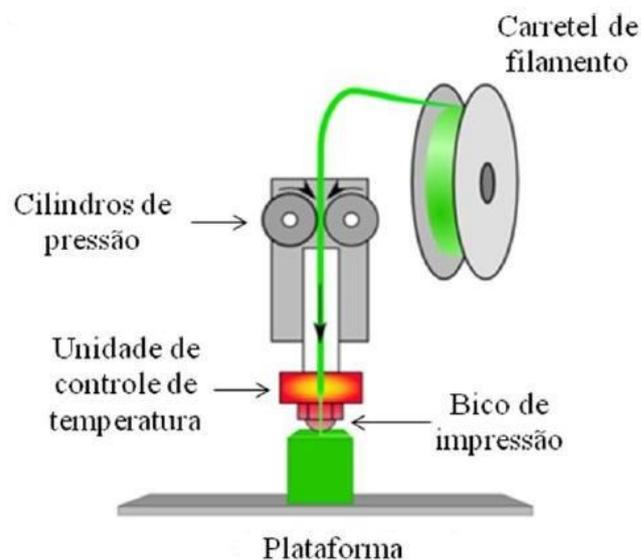


Figura 2.2 - Esquema de impressão 3D utilizando a técnica de FDM. Adaptado de (CARNEIRO,2015).

## 2.3. Filamentos

Os insumos da impressão 3D são em geral filamentos de 1,75mm ou 2,5mm fabricados de termoplásticos. Dentre os principais materiais utilizados por usuários, podemos destacar:

- ABS - Acrilonitrila butadieno estireno
- NYLON
- PLA

### 2.3.1. ABS - Acrilonitrila butadieno estireno

O acrilonitrila butadieno estireno, mais conhecido como ABS, é um termoplástico derivado do petróleo amplamente utilizado na indústria, e atualmente sendo um dos principais materiais aplicados na impressão 3D. O ABS é um copolímero composto pela combinação de 3 monômeros acrilonitrila, butadieno e estireno (Figura 2.3).

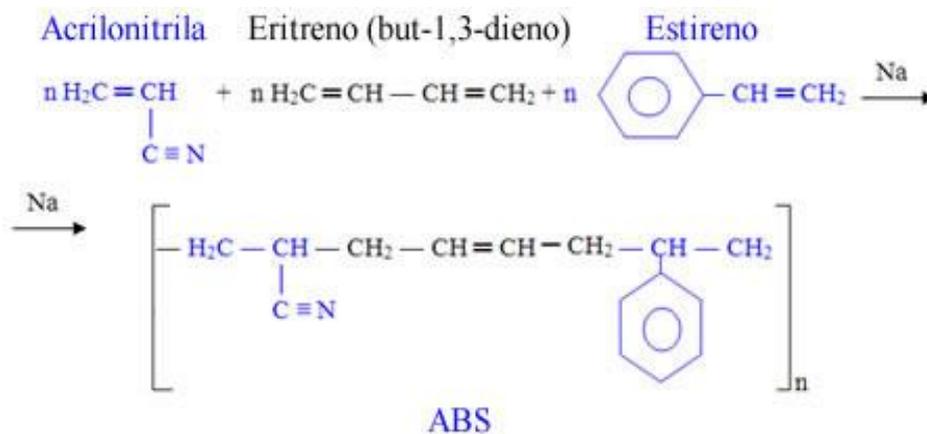


Figura 2.3 - Cadeia química do ABS. Disponível em

<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/borracha-natural-sintetica.htm>

Suas principais características são: resistência à impactos e atritos, durabilidade e flexibilidade, sendo mais fácil de trabalhar, permitindo uma pequena deformação ou flexão da peça, o que é bom para peças que necessitem de encaixes em sua montagem. Além de muito resistente a impactos, seu ponto de fusão é mais elevado (aproximadamente

230°C) comparado com outros polímeros, sendo adequado para peças de máquinas e para uma grande diversidade de peças funcionais. Seu aspecto é fosco, e os filamentos para impressão 3D estão disponíveis em diversas cores opacas.

O ABS tem também outras boas características: é o material mais fácil de realizar pós processamento/acabamento, pois pode ser lixado e usinado com facilidade, além de ser solúvel em acetona, que quando mergulhado rapidamente na solução, pode ter a sua superfície alisada de forma bastante prática. Outro fator de pós processamento é a fácil pintura, sendo útil pois em muitos casos não é possível imprimir o objeto da cor pretendida. A cola comum também interage muito bem com este material, permitindo a impressão de vários componentes, seguido da montagem permanente dos mesmos, obtendo-se um objeto sólido. As peças podem ser unidas com adesivos como, por exemplo, a cola epóxi, bem como usar a acetona como solvente para soldá-las.

Não possui contraindicações ao uso desse material, a não ser o apelo ecológico, por ser um material que possui alto tempo para degradação no meio ambiente e pela sua derivação de fonte não renovável, como o petróleo.

### 2.3.2. Nylon

O nylon (ou náilon em português) é uma fibra sintética obtida através de combinações químicas; é a mistura do ácido adípico e hexametilenodiamina (Figura 2.4). O nylon não é biodegradável e utiliza matérias primas não renováveis na sua produção.

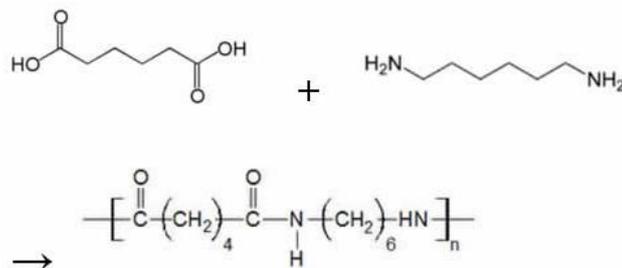


Figura 2.4 - Cadeia química do NYLON. Disponível em

<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/nylon-um-polimero-resistente.htm>

As principais características do nylon são a resistência e flexibilidade, fazendo com que o material não quebre ao ser dobrado e esticado. A resistência do nylon é justificada na sua própria cadeia, que tanto o ácido como a amina são constituídos por 6 carbonos

cada, a soma destes reagentes dá um produto de longa cadeia carbônica (12 carbonos) e quanto maior a cadeia carbônica, mais elevado será o ponto de fusão e ebulição da mesma. O mesmo vale para a flexibilidade da fibra, uma vez que para se tornar elástica, precisa ser fundida em altas temperaturas, ou seja, em ponto de fusão elevado, o que não é problema para a longa cadeia do nylon.

Apresenta um acabamento liso, brilhoso e lustroso ao produto final. Suas camadas de impressão ficam homogêneas e não descolam (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Objeto impresso a NYLON (esquerda) e bobina de filamento de NYLON (direita). Disponível em <http://www.fablesy.com/stampa-3d-stampare-filamento-nylon-carbon-fiber-eumakers/>

Ao utilizar o filamento de nylon, deve-se considerar que a sua temperatura para impressão é mais alta (cerca de 245°C), ele deve ser impresso sem resfriamento adicional (sem ventilação forçada – comumente utilizada em PLA) e que o material apresenta níveis de umidade. Caso o nylon não esteja completamente seco, a impressão não ficará tão uniforme e o produto final apresentará variações de cor.

### **2.3.3. PLA - Ácido polilático**

O ácido polilático, popularmente conhecido como PLA, é um termoplástico biodegradável derivado de fontes renováveis como amido de milho, raízes de mandioca e de cana-de-açúcar, por isso é a opção de filamento mais ecológica. A produção do filamento de PLA inicia durante o processo de fermentação bacteriana do amido de milho,

por exemplo, dando origem ao ácido láctico, na fase seguinte, para produzir o polímero a partir do ácido, utiliza-se o método de polimerização condensada direta, que é realizada em 3 etapas principais: 1) remoção de água 2) poli condensação do oligômero 3) poli condensação do PLA de alta massa. Após esta etapa, o PLA é cristalizado e secado para a transformação de pellets que posteriormente serão utilizados no processo de extrusão para criação do filamento de impressão 3D.

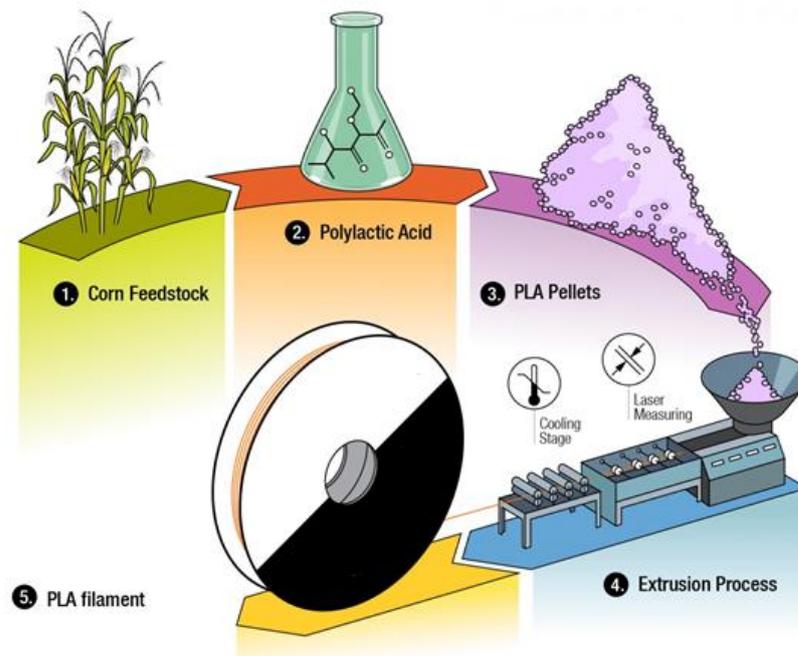


Figura 2.6 - Etapas da fabricação do filamento de PLA. Disponível em <http://bootsindustries.com/the-importance-of-high-quality-3d-printer-filament/>

Suas principais características são a alta fluidez de extrusão e a baixa contração, produzindo peças com dimensões mais precisas e com maior fidelidade aos detalhes, cantos mais acentuados e melhor acabamento de superfície do que os outros termoplásticos. Contudo, é um termoplástico bastante rígido e resistente, sendo difícil de deformar ou flexionar, possui baixa resistência ao atrito e a temperaturas elevadas, podendo se desgastar e deformar rapidamente quando submetido a essas condições. O material pode ser lixado e usinado, mas com certa dificuldade por causa do calor gerado nesses processos, pois o material pode ficar meio pastoso quando aquecido pela fricção de lixas e brocas e pela sua alta dureza.

É indicado para produção de protótipos que não sejam submetidos às condições de esforços mecânicos, atritos ou altas temperaturas, produção de maquetes, peças decorativas ou peças mais rígidas, com dimensões fiéis e precisas, melhor nos detalhes e

com melhor o acabamento possível sem necessidade de pós processamento/acabamento na peça.

Não é indicado para peças que possuam montagem que necessitem de uma certa flexibilidade do plástico ou que possam estar em contato com ambientes ou peças que possuam temperaturas mais elevadas.

Apresenta um aspecto brilhante e disponível em diversas cores opacas e translúcidas, contudo, em (WITTBRODT B., 2015) foi verificado que a pigmentação usada para dar cor ao PLA, influencia as propriedades mecânicas do mesmo, sendo que o PLA natural (sem pigmentação) apresenta os melhores resultados. Foi apurado igualmente que a percentagem de cristalinidade é afetada pela pigmentação, sendo o PLA natural a apresentar o menor valor.

### 2.3.3.1. Propriedades do PLA

De acordo com uma pesquisa realizada pela “Filaments Directory”, o PLA é o filamento mais utilizado na impressão 3D, cerca de 73% dos usuários relataram que utilizam o PLA mais do que qualquer outro filamento.

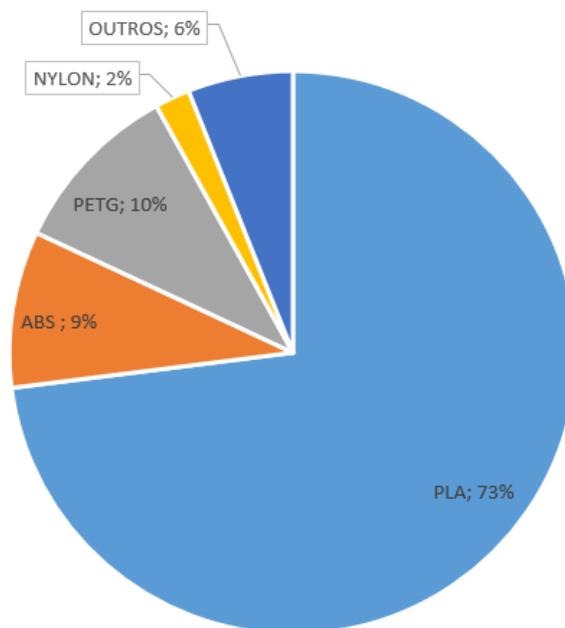


Figura 2.7 - Infográfico de usuários por tipo de filamento. Adaptado a partir de <https://3dprint.com/210552/filaments-directory-2018-survey/>

Apesar do PLA apresentar excelentes propriedades mecânicas, ser o filamento mais comum e mais fácil de manipular ao realizar uma impressão, ele apresenta alguns problemas caso seja exposto a ambientes não controlados, o que pode promover sua degradação, que leva a mudanças no polímero até que ele gradualmente perca várias propriedades. Tal perda de propriedades pode ocorrer sob diferentes tipos de degradação, sendo uma delas a hidrólise química.

De acordo com (YEW, 2005), a degradação hidrolítica ocorre quando o PLA é exposto à umidade: os grupos éster da cadeia principal do polímero são quebrados, resultando em uma diminuição do peso molecular e na liberação de oligômeros e monômeros. Assim, a hidrólise do PLA inicia-se pela difusão de moléculas de água nas regiões amorfas, que por sua vez inicia a quebra das ligações do éster. A seguinte reação mostra a hidrólise dos grupos ésteres de poliésteres alifáticos, como em PLA, na presença de água:  $\text{— COO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{COOH} + \text{OH}$ . Com isso, temos uma ligação de hidrogênio entre dois finais de cadeia, uma carboxila e outro hidroxila (Figura 2.8).

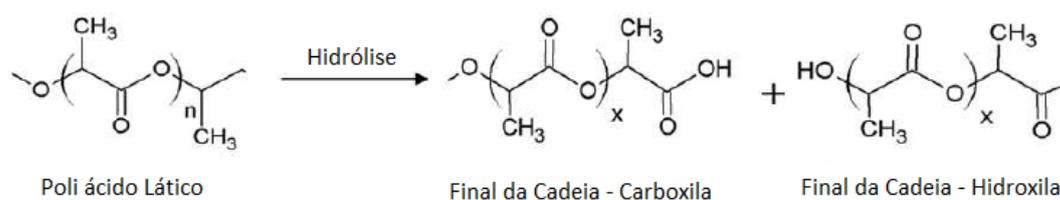


Figura 2.8 – Hidrólise do grupo éster criando novas cadeias no final, carboxila e hidroxila.

Adpatado (THEM *et. al*, 2014)

Em certas aplicações, o PLA é usado para armazenar produtos frescos ou recipientes de bebidas, sendo assim está exposto a ambientes úmidos que podem ocasionar reações de hidrólise. Foi relatado que, na alta umidade relativa, a taxa de hidrólise aumenta devido à absorção de moléculas de água no PLA. Como resultado, observou-se uma diminuição da massa molecular, levando a uma redução na temperatura de transição vítrea de 60° C a 19,4 ° C quando expostos a 100% UR, e também a redução de 50% do alongamento inicial até ruptura a 30 ° C, quando os filmes de PLA foram expostos ao ambiente de 100% de umidade relativa durante um período de 10 a 15 semanas. (YEW, 2005)

Outro problema relatado com a absorção de umidade do PLA é o aumento do diâmetro do filamento. Os responsáveis pelo site 'MatterHackers' realizaram testes em que mediram o filamento de PLA exposto a 3 variações de ambiente:

- Ambiente controlado – Esse caso o filamento foi tratado em um forno com baixa temperatura para secagem do filamento;
- Ambiente regular – Amostras do filamento foram deixadas em um quarto a temperatura ambiente (23 °C);
- Ambiente úmido – Amostras dos filamentos foram imersas em água;

A tabela a seguir mostra a variação do diâmetro de amostras de filamento PLA em cada um dos ambientes em que foram expostas.

Tabela 2.1 - Resultado da variação do diâmetro dos filamentos expostos a diferentes condições

Filament	Control 1 (mm)	Control 2 (mm)	Control 3 (mm)	Final Value (mm)	Test value 1 (mm)	Test value 2 (mm)	Test value 3 (mm)	Final Test Value (mm)	Change in value (mm)
<b>ECO – PLA – Control</b>	178	174	178	176,67	178	175	177	176,67	0,00
ECO – PLA – Room	178	178	179	178,33	179	178	179	178,67	0,33
ECO – PLA – Water	181	179	180	180,00	181	181	179	180,33	0,33
<b>Filamentive – PLA - Control</b>	177	177	177	177,00	176	177	177	176,67	-0,33
Filamentive – PLA – Room	180	180	180	180,00	181	180	181	180,67	0,67
Filamentive – PLA – Water	179	178	179	178,67	181	180	181	180,67	2,00

Como podemos observar na tabela 2.1, os filamentos de PLA imersos em água evidenciam que a absorção de umidade pelo polímero ocasiona em uma grande variação no diâmetro do filamento. Devido ao “inchaço” do filamento, foram notados alguns fatores que prejudicaram a impressão natural de algumas peças, pois como o bico extrusor da impressora é padronizado com 1,75mm de diâmetro, o aumento do diâmetro do filamento pode causar uma variação o fluxo de extrusão e até entupimento do mecanismo.

Durante a impressão pode-se observar outro grave problema causado pela umidade no filamento, ao aquecer o filamento para realizar a extrusão, o calor evapora a umidade do filamento criando bolhas/lacunas no material que fazem com que o filamento perca a aderência entre as camadas na hora da impressão, causando descolamento e falha no acabamento de algumas peças.

De acordo com (YEW, 2005), conforme a figura 2.9, podemos observa que o percentual de absorção do PLA pode chegar a 1% do total da sua massa, sendo assim,

para uma bobina de impressão 3D de aproximadamente 1kg, podemos ter 10 gramas de água absorvida.

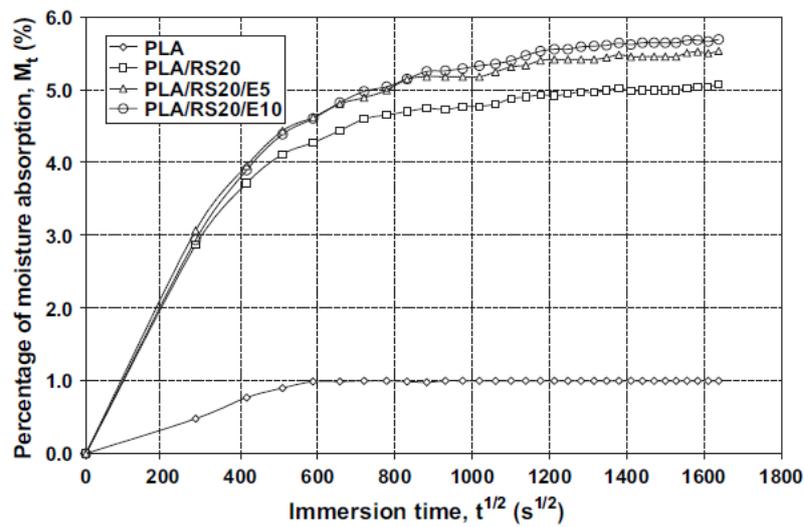


Figura 2.9 - Gráfico de absorção de água do PLA. Charles (1963)

Alguns fabricantes de impressora 3D e seus insumos, acreditam que manter os filamentos em condições adequadas são essenciais para um bom uso do equipamento, a Ultimaker, por exemplo, avalia que um ótimo armazenamento do PLA seja abaixo dos 15% de umidade relativa. Outro positivo para a utilização da máquina é o pré condicionamento do material antes da utilização, ou seja, manter o filamento aquecido aumenta a efetividade da extrusora na hora da impressão.

## 3. Fundamentação teórica

### 3.1. Projetos Existentes

Atualmente no campo da impressão 3D alguns usuários e empresas elaboraram projetos para corrigir o problema da umidade nos filamentos. Dentre eles destacamos 2 produtos com conceitos distintos:

- PrintDry (Patente)
- Caixa desumidificadora - Becky Stuart (Open Source)

#### 3.1.1. PrintDry

O PrintDry (Figura 3.1) é um secador de filamentos que funciona com um método semelhante ao desidratador, que usa calor para aquecer os filamentos e fazer com que as moléculas dos mesmos se movam com mais vigor, enfraquecendo e rompendo as ligações das moléculas de água das cadeias dos polímeros. Isso permite que as moléculas de água se movimentem livremente; enquanto fluxo de ar transporta o calor para o filamento, este também transporta as moléculas de água liberadas para longe.

Os filamentos não secam instantaneamente, primeiro, leva tempo para o calor penetrar pelo interior do filamento, e segundo, leva tempo para as moléculas de água recém-liberadas se desarmarem na superfície do filamento. Com isso, dependendo do filamento e da umidade, o tempo de secagem pode variar entre 2 e 12 horas.

O custo do aparelho PrintDry é a partir de U\$ 120,00, não havendo revenda no Brasil.



Figura 3.1 – PrintDry. Disponível em: <https://www.printdry.com/>

### 3.1.2. Caixa desumidificadora – Becky Stern

Este modelo Open Source foi criado por Becky Stern (Figura 12), uma usuária norte americana de impressão 3D, divulgado em sua página no YouTube o projeto é uma forma amadora de controlar a umidade no ambiente para armazenar filamentos de impressão 3D.

Em seu trabalho, Becky utiliza uma caixa hermética com pequenas sacolas de sílica gel para controlar a umidade. Também é criado, utilizando peças feitas na impressora 3D, um sistema de eixo como suporte para as bobinas de filamento serem utilizadas durante a impressão.

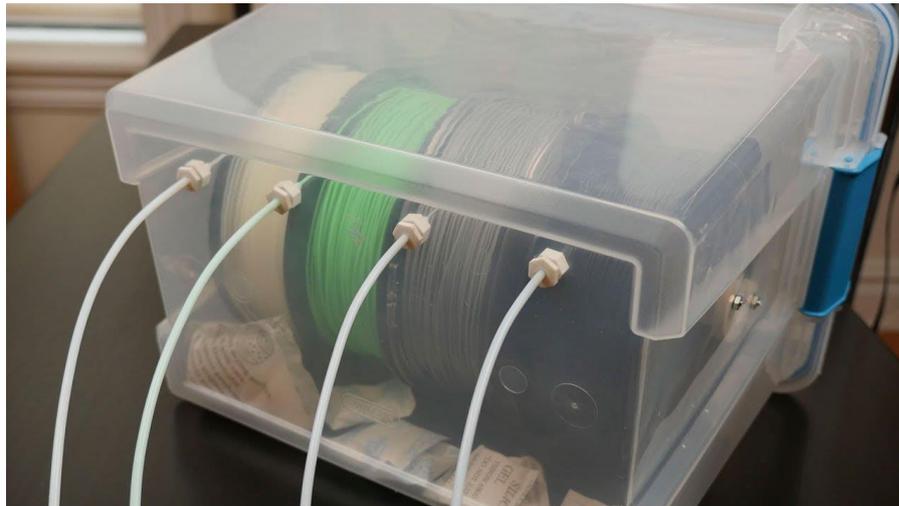


Figura 3.2 - Caixa desumidificadora - Becky Stern. Disponível em: <https://beckystern.com/2017/11/24/3d-printer-filament-dry-box/>

## 3.2. Métodos de desumidificação

Existem dois métodos principais de remover o vapor d'água do ar:

- Resfriar o ar para condensar o vapor;
- Passar o ar por um material dessecante, retirando o vapor através da diferença de pressão;

### 3.2.1. Desumidificação à base de resfriamento

O processo de desumidificação acontece quando o ar é resfriado abaixo de sua temperatura de ponto de orvalho, o vapor d'água condensa na superfície mais próxima. O ar é desumidificado pelo processo de resfriamento e condensação. A quantidade de vapor d'água removida depende do quão frio o ar pode ser resfriado - quanto menor a temperatura, mais seco o ar.

Este é o princípio operacional por trás da maioria dos sistemas comerciais e residenciais de ar condicionado. Um sistema de refrigeração esfria o ar e drena alguma da sua umidade como condensado e envia o ar mais frio e seco de volta para o espaço.

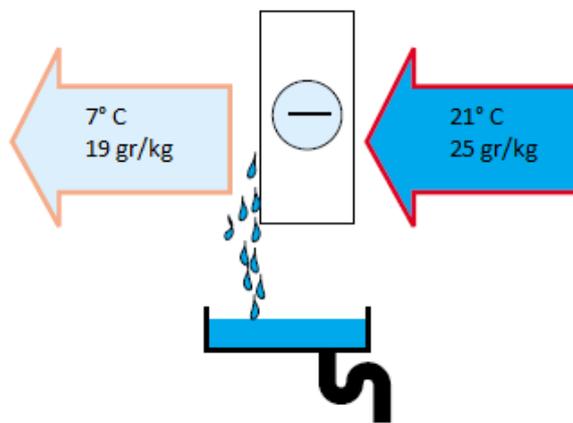


Figura 3.3 - Esquema de desumidificação a resfriamento. Adaptado (HARRIMAN III, 2002)

Primeiramente, o calor é retirado do ar desumidificado transferindo sua energia térmica para um gás refrigerante, que está dentro da serpentina que resfria o ar processado. O evaporador, é onde o refrigerante entra em ebulição. Para tal, é necessário calor, que é obtido pelo resfriamento do ar processado escoando contra a superfície externa da serpentina.

Este processo pode ser muito eficiente, porém tem um custo elevado devido aos componentes necessários para realização do ciclo de desumidificação e não cabe na nossa proposta, pois o ar sai com temperatura menor o que é prejudicial a manutenção dos filamentos. (HARRIMAN III, 2002)

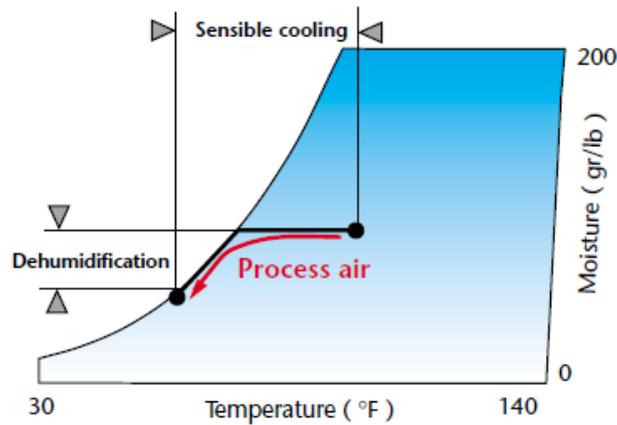


Figura 3.4 - Carta psicómetrica do processo de desumidificação a resfriamento. Adaptado (HARRIMAN III, 2002)

### 3.2.2. Desumidificação à base de dessecantes

Os desumidificadores dessecantes são diferentes dos desumidificadores à base de resfriamento. Em vez de resfriar o ar para condensar sua umidade, dessecantes atraem o vapor d'água do ar criando uma área de baixa pressão de vapor na superfície do dessecante, com isso a pressão exercida pelo vapor d'água no ar é maior, então as moléculas de água se movem do ar para o dessecante e o ar é desumidificado.

A característica essencial dos dessecantes é sua baixa pressão de vapor superficial. Se o dessecante estiver frio e seco, sua pressão de vapor na superfície é baixa, sendo assim pode atrair a umidade do ar. Depois que o dessecante se torna úmido e quente, a pressão de vapor da superfície é alta, e irá libertar vapor de água para o ar circundante. O vapor se move do ar para o dessecante e volta novamente dependendo das diferenças de pressão de vapor.

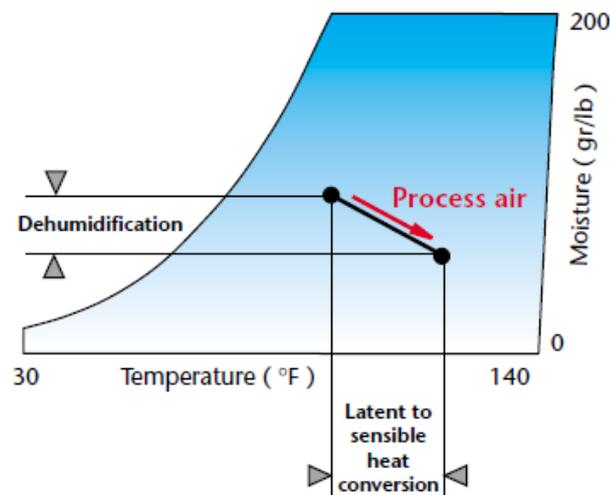


Figura 3.5 - Carta psicométrica do processo de desumidificação por dessecantes.

Adaptado (HARRIMAN III, 2002)

Desumidificadores dessecantes fazem uso das mudanças de pressão de vapor para secar ar continuamente em um ciclo repetitivo descrito pelo equilíbrio simplificado no diagrama (Figura 3.7). O dessecante começa o ciclo no ponto 1, onde está com a pressão do vapor da superfície baixo porque está seco e frio. Como o dessecante pega a umidade do ar circundante, a superfície dessecante muda para a condição descrita pelo ponto 2. Sua pressão de vapor é agora igual ao do ar circundante, porque o dessecante está úmido e quente. No ponto 2, o dessecante não pode coletar mais umidade porque não há diferença de pressão entre a superfície e a vapor no ar.

Em seguida, o dessecante é retirado do ar úmido, aquecido e colocado em uma corrente de ar diferente. A pressão de vapor da superfície do dessecante fica muito alta - mais alto que o ar circundante - assim o vapor d'água se afasta superfície para o ar equalizando o diferencial de pressão. No ponto três, o dessecante é seco, mas como está quente, sua pressão de vapor ainda é muito alta para coletar umidade do ar. Para restaurar sua baixa pressão de vapor, o dessecante é resfriado - retornando-o para o ponto 1 no diagrama e completando o ciclo para que ele possa coletar umidade novamente. (HARRIMAN III, 2002)

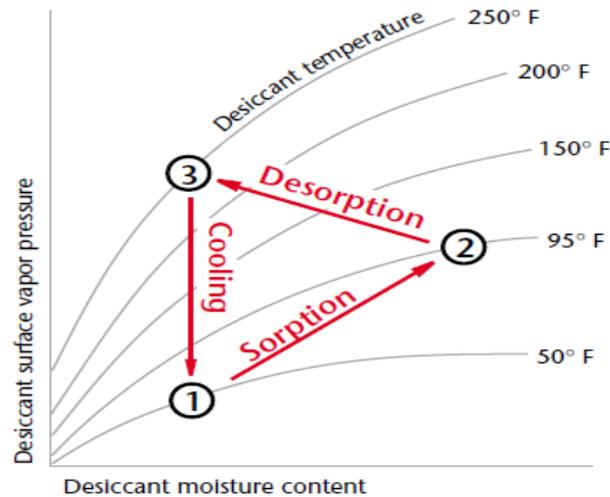


Figura 3.6 - Etapas do processo de desumidificação a base de dessecantes. Adaptado (HARRIMAN III, 2002)

### 3.2.2.1. Sílica Gel

A sílica gel é um tipo de composto sintético e amorfo do silício, constituída por uma rede rígida e contínua de sílica coloidal (Figura 3.7), e é composto de grãos muito pequenos de  $\text{SiO}_4$  hidratado. A hidroxila na estrutura é um componente importante para adsorção, porque é polar e pode formar ligações de hidrogênio com óxidos polares, como água e álcool. Cada tipo de gel de sílica tem apenas um tipo de poro, que geralmente é confinado em canais estreitos. Os diâmetros de poros da sílica gel são 2 nm, 3 nm (tipo A) e 0,7 nm (tipo B), e a área superficial específica está entre de 100-1000  $\text{m}^2 / \text{g}$ . A sílica gel é amplamente usada para desumidificação por causa de sua alta capacidade de adsorção. O gel de sílica Tipo A pode ser usado para todos os tipos de dessecação condições, mas a sílica gel tipo B só pode ser usada quando a umidade relativa (UR) for maior de 50%. (RUZHU, 2014)

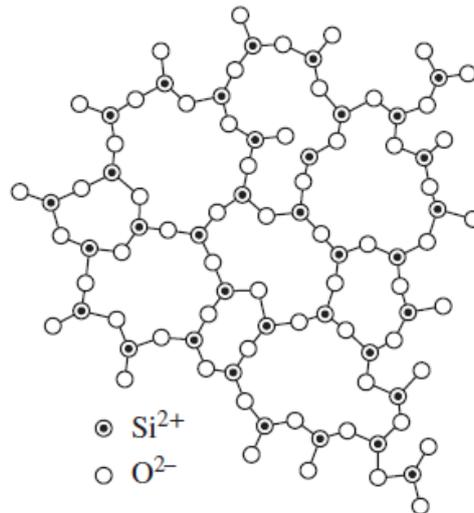


Figura 3.7 - Cadeia molecular da sílica gel. RUZHU, W, 2014

No processo de adsorção entre água e sílica gel, a molécula de água é conectada com o grupo álcool de sílica = Si-OH - OH<sub>2</sub> enquanto o grau de cobertura da superfície é baixo. Conforme o grau da superfície de cobertura aumenta, a ligação de hidrogênio se torna a principal força de conexão. O calor de adsorção para este par é de cerca de 2500 kJ / kg e a temperatura de dessorção pode ser muito baixa, mas acima de 50° C. Há cerca de 4 a 6% de água em massa conectada a um único grupo hidroxila na superfície de átomo de sílica, que não pode ser removido, caso contrário, a sílica gel perderia a adsorção capacidade. Assim, a temperatura de dessorção não pode ser superior a 120 °C, e é geralmente inferior a 90 °C. A menor temperatura de acionamento do par de sílica gel-água retirado em experimentos é cerca de 55 °C . Essa baixa temperatura de dessorção é muito adequada para energia solar utilização. (RUZHU, 2014)

De acordo com a TED PELLA Inc., as partículas de sílica gel são capazes de absorver até 40% do seu peso em água, ou seja, a faixa de vapor de água dentro da sílica gel varia entre 4% - 40%.

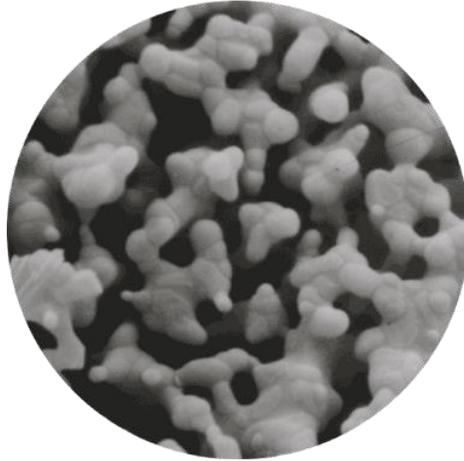


Figura 3.8 - Imagem microscópica da superfície da sílica gel. Ruzhu W., 2014

### **3.2.3. Torre dessecante**

De acordo com (HARRIMAN III, 2002), no processo de desumidificação da torre dessecante, são utilizadas duas torres preenchidas com grãos de gel sílica para realizar o ciclo de adsorção e dessorção separadamente, onde são chamados o fluxo de ar processado e regenerado, respectivamente.

Na primeira parte do ciclo, o fluxo de ar processado entra diretamente em contato com as partículas de sílica gel que estão com a pressão de vapor mais baixa que a do ar, com isso a umidade fica retida em sua superfície. Esse processo de transferência de umidade para as partículas dessecantes é acompanhado pela geração de calor, referido como calor de adsorção. Sendo isso, o ar processado para o ambiente fica mais seco e quente.

Na segunda parte do ciclo os grãos de sílica gel estão saturados, sendo assim o fluxo de ar regenerado deve ser aquecido para elevar a pressão de vapor da superfície das partículas, com isso a umidade é retirada do interior da sílica gel. Sendo assim, as partículas de sílica gel são regeneradas e pronta para serem utilizadas na primeira parte do ciclo de adsorção novamente.

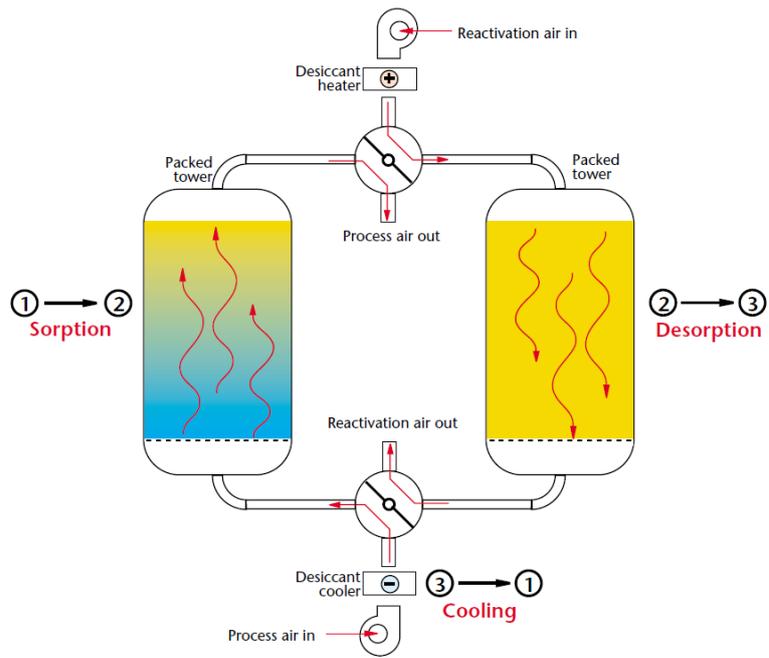


Figura 3.9 - Ciclo da torre de desumidificação. Adaptado (HARRIMAN III, 2002)

## 4. Modelagem matemática

Na torre dessecante, o ar perde parte de sua umidade para as partículas de sílica gel em um processo transiente de transferência de calor e massa.

Um modelo teórico validado experimentalmente apresentado por (PESARAN et al., 1987) para a transferência de calor e massa na torre dessecante é proposto considerando um leito fixo com partículas esféricas e uniformes de sílica gel com temperatura  $T_b$  e quantidade média de água em seu interior  $q$ . O leito está em equilíbrio com a camada de ar adjacente e com uma taxa de umidade  $w_s$  até que entra em contato com o ar processado com uma fração de umidade  $w_a$ . O vapor d'água é transferido por convecção para o interior das partículas de sílica gel e esse processo de adsorção libera calor, fazendo com que aumente a temperatura ao longo da torre.

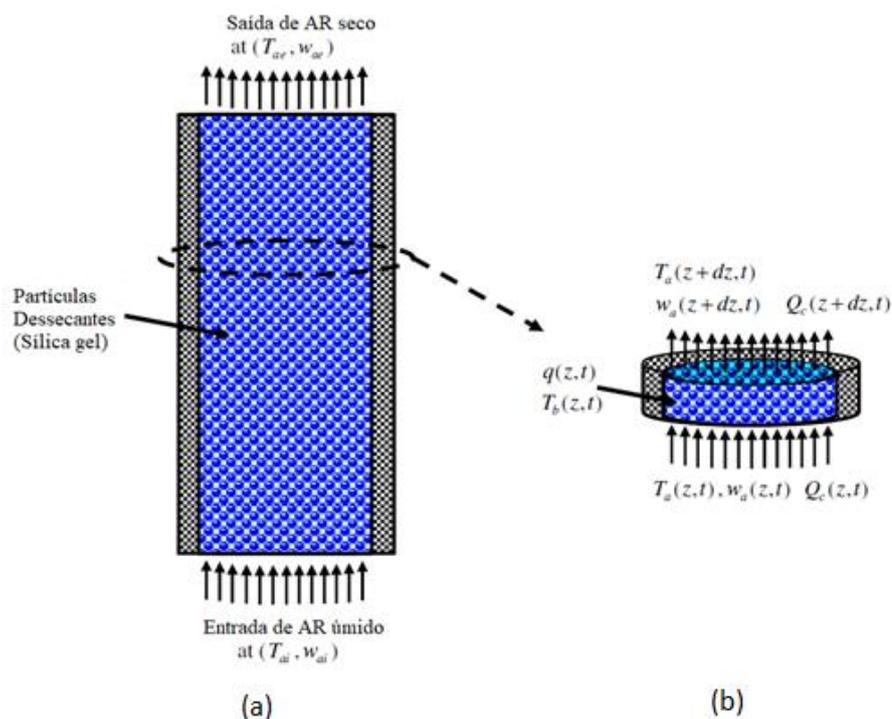


Figura 4.1 - (a) Fluxo de ar através da torre dessecante. (b) Fluxo de ar através de um volume de controle. Adaptado RAMZY, 2011

Como discutido em (PESARAN et al., 1987), a modelagem teórica para simular a transferência de umidade e calor no processo de desumidificação da torre dessecante, algumas premissas são assumidas:

1. As partículas dessecantes são esféricas e de tamanho uniforme;
2. O fluxo de ar úmido se comporta como um gás ideal e contém apenas vapor de água;
3. A variação da velocidade do ar na direção radial e a porosidade da torre na direção radial são negligenciadas e utiliza-se de um valor médio para a velocidade do fluxo de ar e para a porosidade da estrutura;
4. Não é considerada a queda de pressão para uma pequena camada de sílica gel, essa premissa é verdadeira para torres com altura máxima de 0.15m (PESARAN et al. 1987) e (KAFUI, 1994);
5. A transferência de calor só é calculada na direção do eixo z e as paredes da torre são adiabáticas;
6. A dispersão radial não é considerada importante, visto que o diâmetro da torre é muito maior que o diâmetro das partículas;

Com isso, assumindo todas essas premissas e aplicando a equação de conservação de massa para o fluxo de ar no volume de controle, temos:

$$\frac{\partial w_a}{\partial t} = -\frac{\dot{m}}{\rho_a \varepsilon_b A_b} \frac{\partial w_a}{\partial z} - \frac{h_m a}{\rho_a \varepsilon_b} (w_a - w_s)(1 - w_a) \quad (1)$$

Onde,  $w_a$  é a umidade relativa do ar processado (vapor d'água/ kg ar seco),  $\dot{m}$  é o fluxo de ar (kg/s),  $\rho_a$  é a densidade do ar processado (kg/m<sup>3</sup>),  $\varepsilon_b$  é a porosidade do leito,  $A_b$  é a área da secção transversal (m<sup>2</sup>),  $h_m$  é o coeficiente de transferência mássica (kg/m<sup>2</sup>\*s) de,  $a$  é área da superfície volumétrica (1/m),  $w_s$  é a umidade relativa no espaço adjacente as partículas (vapor d'água/ kg ar seco).

Aplicando a equação de conservação de energia para o fluxo de ar no volume de controle temos

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -\frac{\dot{m}}{\rho_a \varepsilon_b A_b} \frac{\partial T_a}{\partial z} - \left( -\frac{ha}{\rho_a c_a \varepsilon_b} + \frac{h_m c_v a}{\rho_a c_a \varepsilon_b} (w_a - w_s) \right) (T_a - T_b) \quad (2)$$

Onde  $T_a$  é a temperatura do ar processado ( $^{\circ}$  C),  $h$  é coeficiente de transferência térmica ( $W/m^2 \cdot K$ ),  $c_a$  é o calor específico do ar processado ( $KJ/kg \cdot K$ ),  $c_v$  é o calor específico do vapor d'água ( $KJ/kg \cdot K$ ),  $T_b$  é a temperatura do leito ( $^{\circ}$  C).

Por simplificação, com base em (PESARAN et al. 1987), neste estudo iremos negligenciar o termo de armazenamento temporal  $\frac{\partial w_a}{\partial t}$  e  $\frac{\partial T_a}{\partial t}$ , nas equações (1) e (2) respectivamente, com isso teremos:

$$\frac{\partial w_a}{\partial z} = \frac{h_m a A_b}{\dot{m}} (w_s - w_a)(1 - w_a) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_a}{\partial z} = (c_v h_m (w_a - w_s) - h) \frac{a A_b}{\dot{m} c_a} (T_a - T_b) \quad (4)$$

As condições de contorno para as equações (1) e (2) são as condições de entrada do ar, tanto para o ciclo de adsorção, quanto para o ciclo de regeneração:

$$T_{a(z=0,t)} = T_{ai} \quad (5)$$

$$w_{a(z=0,t)} = w_{ai} \quad (6)$$

$$T_{a(z,t=0)} = T_{a0} \quad (7)$$

$$w_{a(z,t=0)} = w_{a0} \quad (8)$$

Aplicando a equação da conservação de massa para a sílica gel, temos:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_e r^2 \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (9)$$

Onde  $q$  é a quantidade de água no interior da sílica gel ( $kg$  vapor d'água/ $kg$  sílica gel),  $r$  é o raio da partícula ( $m$ ) e  $D_e$  é o coeficiente de difusão ( $kg/m^2 \cdot s$ ).

As relações para o efeito de difusão da água ( $D_e$ ) em partículas de sílica gel são calculadas através da difusão de Knudsen e referidas em (PESARAN et al. 1987). Com isso, temos as equações de continuidade na particuladas definidas:

$$-D_e \rho_p \left. \frac{\delta q}{\delta r} \right|_{r=\frac{d_p}{2}} = h_m (w_s - w_a) \quad (10)$$

$$-D_e \rho_p \left. \frac{\delta q}{\delta r} \right|_{r=0} = 0 \quad (11)$$

Porém, neste estudo utilizaremos o modelo de capacitância global para descrever a conservação de massa e energia nas partículas de sílica gel, visto que de acordo com (KAFUI, 1994) este modelo é aceito para partículas de diâmetro muito pequeno. Sendo assim, a equação (3) é reescrita como:

$$\rho_b \frac{\partial q}{\partial t} = h_m a (w_a - w_s) \quad (12)$$

E a condição de contorno para equação (10) é descrita como:

$$q_{(z,t=0)} = q_0 \quad (13)$$

E para conservação de energia na sílica gel, temos:

$$k_b \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2} + H_A h_m a (w_a - w_s) + ha(T_a - T_b) = \rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} \quad (14)$$

Onde  $k_b$  é o coeficiente de condução térmica (kW/m\*K),  $H_A$  é o calor de adsorção (kJ/kg),  $c_b$  é o calor específico da sílica gel (kJ/kg\*K).

O primeiro termo da equação de conservação de energia da sílica gel  $k_b \frac{\partial^2 T_a}{\partial z^2}$ , representa o fluxo de calor por condução de uma camada para outra, de acordo com (KAFUI, 1994), a transferência de calor e massa por convecção é muito maior que a transferência de calor por condução, sendo assim, negligenciaremos o primeiro termo. O segundo termo da equação trata-se do calor liberado pelo processo de adsorção e dessorção e o terceiro termo da equação representa a transferência de calor através da convecção. Sendo assim, a equação de conservação de energia da sílica gel será:

$$\rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = H_A h_m a (w_a - w_s) + ha(T_a - T_b) \quad (16)$$

A condição de inicial referente a equação (16) é:

$$T_{b(z,t=0)} = T_{b0} \quad (17)$$

Com as equações (3), (4), (12), e (16) e as condições de contorno (5), (6), (7), (8), (13), e (17) podemos descrever todo o processo transiente de transferência de massa e calor na torre dessecante.

#### 4.1. Equações auxiliares

O calor específico da sílica gel e do ar processado são calculados de acordo com (PESARAN *et. al*, 1987) e (KAFUI, 1994) as seguintes equações:

$$c_b = 4.186 * q + 0.921 \quad (18)$$

$$c_a = 1.884 * w_a + 1.004 (1 - w_a) \quad (19)$$

Onde  $c_b$  é o calor específico da sílica gel (kJ/kg\*K) e  $c_a$  é o calor específico da ar processado (kJ/kg\*K).

O calor de adsorção e dessorção para sílica gel do tipo regular é calculado com base os estudos feitos por (PESARAN *et. al*, 1987) com a seguinte relação:

$$\begin{aligned} HA &= 3500 - 12400 * q & q \leq 0.05 \\ HA &= 2950 - 1400 * q & q > 0.05 \end{aligned} \quad (20)$$

A isoterma de equilíbrio para sílica gel foi obtida através de equações polinomiais de quarto grau, definida por (PESARAN,1983):

$$RH_s = 0.0078 - 0.05759 * q + 24.1655 * q^2 - 123.478 * q^3 + 204.226 * q^4 \quad (21)$$

Onde  $RHS$  é a isoterma de equilíbrio (%).

De acordo com (PESARAN *et al.*, 1987), o vapor d'água em equilíbrio presente no ar adjacente à superfície da partícula de sílica gel é calculado através da seguinte expressão:

$$w_s = \frac{0.622 * RH_s * P_{sat}(T_s)}{P_{tot} - 0.378 * RH_s * P_{sat}(T_s)} \quad (22)$$

Onde a pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura da torre é dada por:

$$P_{sat} = e^{(23.196 - \frac{3816.44}{T_b + 227.02})} \quad (23)$$

Onde,  $P_{sat}$  é a pressão de saturação do vapor d'água ().

Para o modelo estudado, o coeficiente de transferência de calor e massa por convecção em uma torre cilíndrica é calculado de acordo com as correlações feitas por (Hougen *et al.*, 1947) a partir dos dados experimentais realizados por (Ahlberg, 1939), expressos nas seguintes equações:

$$h = 0.683 * \rho_a V C_a Re^{-0.51} \quad (24)$$

$$h_m = 0.704 * \rho_a V Re^{-0.51} \quad (25)$$

De acordo com (RAMZY, 2011), a relação entre a densidade do leito e densidade da partícula é determinado a partir da equação:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_b) * \rho_p \quad (26)$$

Assim como em (RAMZY, 2011) e como é comum encontrar no mercado, o presente estudo utilizará a sílica gel com densidade de 1200 kg/m<sup>3</sup>. Foi determinado experimentalmente por (RAMZY, 2011) que o leito tem densidade de 830 kg/m<sup>3</sup>, com isso a porosidade da torre torna-se 0.31.

## 4.2. Procedimento numérico computacional

As equações diferenciais parciais (3) e (4) que definem a evolução da umidade do ar processado e a temperatura do ar processado, respectivamente, foram desenvolvidas utilizando o método Runge Kutta Fehlberg (RK4) com as condições de contorno definidas (5) – (8). As equações que determinam o desenvolvimento da quantidade de água no interior da partícula de sílica gel (12) e da temperatura no espaço adjacente a sílica gel (16), utilizamos do método de Euler com as condições iniciais definidas em (13) e (17).

Um código computacional foi criado a partir do software MatLab para solucionar numericamente o mecanismo, utilizando um passo temporal de 0.1s e uma malha espacial de 0.1mm para garantir a simulação estabilidade e precisão. O programa foi desenvolvido seguindo o seguinte fluxograma:

1. Defina o tempo total de operação e as características da torre ( $L$ ,  $d_b$ ,  $d_p$ ).
2. Defina as propriedades do ar ( $V$ ,  $T_{ai}$ ,  $w_{ai}$ ) e as propriedades da torre ( $T_{b0}$ ,  $q_0$ ).
3. Defina os tamanhos da malha e do passo ( $\Delta Z$  e  $\Delta T$ ).
4. Para o incremento inicial de volume ( $i=1$ ) assuma  $w_{a(i+1)}^j$  e  $T_{a(i+1)}^j$ 
  - a. Calcule  $C_a$  (equação (19)),  $C_b$  (equação (18)),  $h$  (equação (24)),  $h_m$  (equação (25)) e  $H_A$  (equação (20))
  - b. Use o método de Runge Kutta Fehlberg para calcular  $w_{a(i+1)}^j$  e  $T_{a(i+1)}^j$  das equações 3 e 4, respectivamente.
  - c. Use o método de Euler para calcular  $q_{(i,t+dt)}$  e  $T_{b(i,t+dt)}$  das equações 12 e 16, respectivamente
  - d. Calcule os erros  $w_{a(i+1)}^{j+1} - w_{a(i+1)}^j$  e  $T_{a(i+1)}^{j+1} - T_{a(i+1)}^j$
  - e. Repita os passos a – d até que o erro seja  $\leq 1.0^{-10}$
  - f. Repita o passo 4 para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$
5. Defina os novos valores de volume de água na sílica ( $q$ ) e temperatura ( $T_b$ )
6. Repita os passos 4 – 6 até que todos o tempo de processo seja completado.

### 4.3. Validação do modelo computacional

Foi realizada uma comparação com quatro testes feitos no modelo teórico desenvolvido por (PESARAN et al., 1987), para verificar se o perfil da curva do programa computacional desenvolvido é válido.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados por PESARAN em seu modelo teórico e experimental

Teste	Tipo de processo*	R $m^{-3}$	L $m^{-3}$	$q_0$ $kg_v/kg_s$	$T_{b0}$ $^{\circ}C$	$w_{a0}$ $kg_v/kg_a$	$T_{a0}$ $^{\circ}C$	V $m/s$	Re	t (s)
1	AD	1,94	77,5	0,0417	23,3	0,01	23,3	0,21	49,3	1800
7	AD	1,27	65,0	0,041	24,7	0,0106	24,7	0,39	70	1800
25	DE	2,60	50,0	0,260	25,4	0,0007	25,4	0,67	218,5	1200
30	DE	2,60	50,0	0,37	23,8	0,009	23,5	0,65	205	1200

\*AD – adsorção / DE – dessorção

Os testes 1 e 7 são do processo de adsorção da umidade no ar processado e os testes 25 e 30 são de dessorção da sílica gel, completando o ciclo regenerativo.

Para o teste número 1, como podemos observar na figura 21, a uma perfeita compatibilidade entre o estudo teórico (PGC) e experimental realizado por (PESARAN et al., 1987) e o modelo computacional criado a partir da análise numérica do comportamento do ciclo. Em ambos os casos, encontramos uma umidade média na saída do leito de aproximadamente 0.0035 kg vapor d'água/kg ar seco e uma temperatura de aproximadamente 43° C.

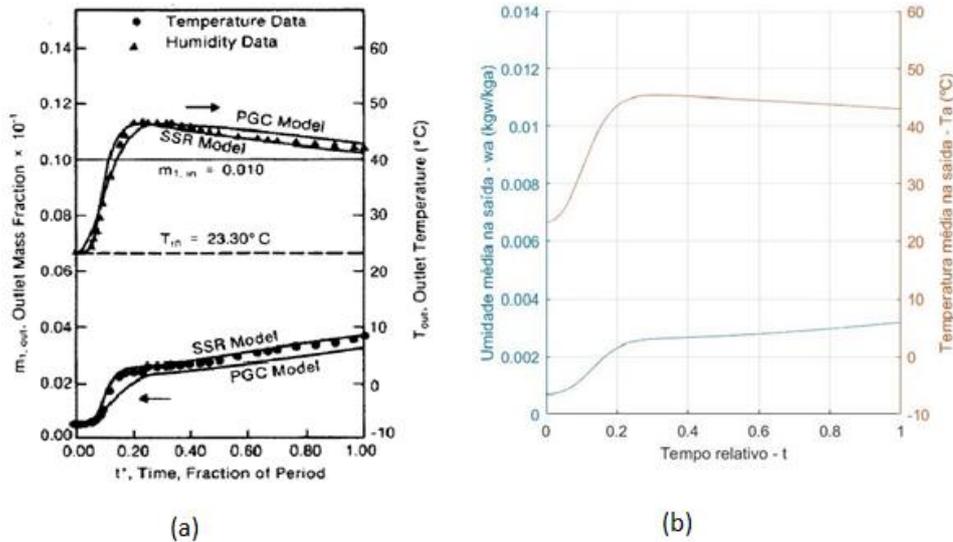


Figura 4.2 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN no teste 1. (PESARAN *et. al*, 1987) (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria

O teste número 7, como podemos observar na figura 22, a também uma notável compatibilidade entre o estudo teórico (PGC) e experimental realizado por (PESARAN *et al.*, 1987) e o modelo computacional criado a partir da análise numérica do comportamento do ciclo. Em ambos os casos, encontramos uma umidade média na saída do leito de aproximadamente 0.005 kg vapor d'água/kg ar seco e uma temperatura de aproximadamente 40° C.

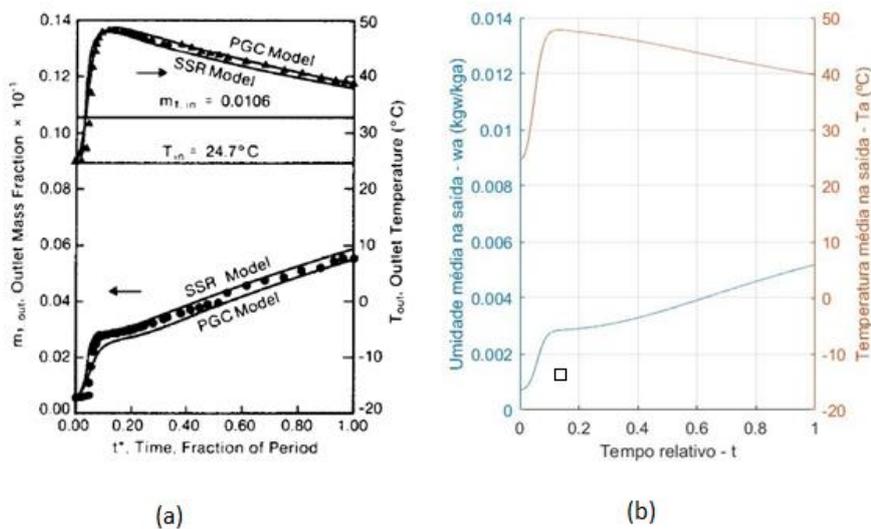


Figura 4.3 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 7 (PESARAN *et. al*, 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria

Para o teste número 25, trata-se de uma dessorção e como podemos observar na figura 23, o perfil da curva do estudo teórico (PGC) e experimental realizado por (PESARAN et al., 1987) é compatível com o modelo computacional criado a partir da análise numérica do comportamento do ciclo. Em ambos os casos, encontramos uma umidade média na saída da torre de aproximadamente 0,003 kg vapor d'água/kg ar seco e uma temperatura de aproximadamente 20° C.

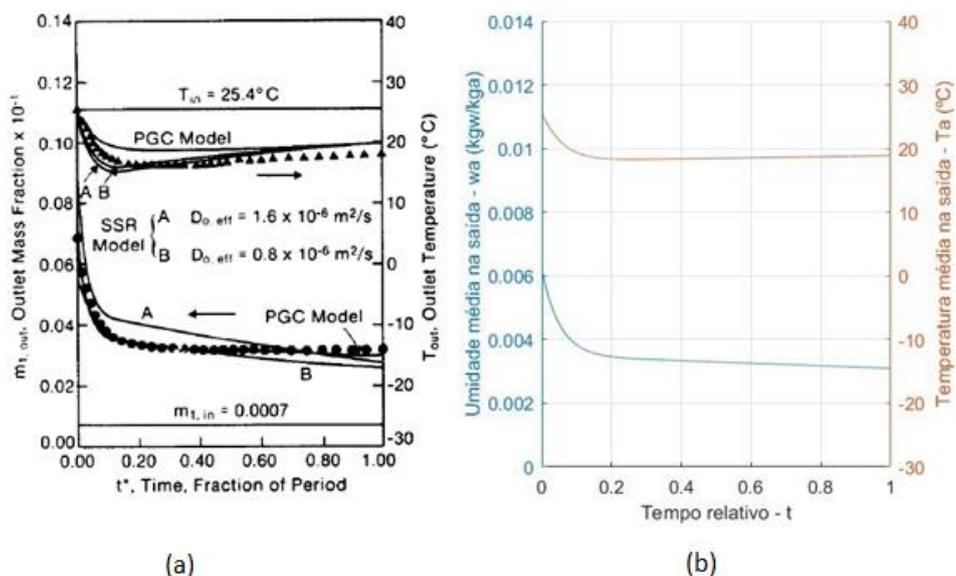


Figura 4.4 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 25 (PESARAN et al., 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria

E por fim, para o teste número 30 também de dessorção, a figura 24 mostra a uma perfeita compatibilidade entre o estudo de (PESARAN et al., 1987) e o modelo computacional criado a partir da análise numérica do comportamento do ciclo. Em ambos os casos, encontramos uma umidade média na saída do leito de aproximadamente 0.001 kg vapor d'água/kg ar seco e uma temperatura de aproximadamente 22° C.

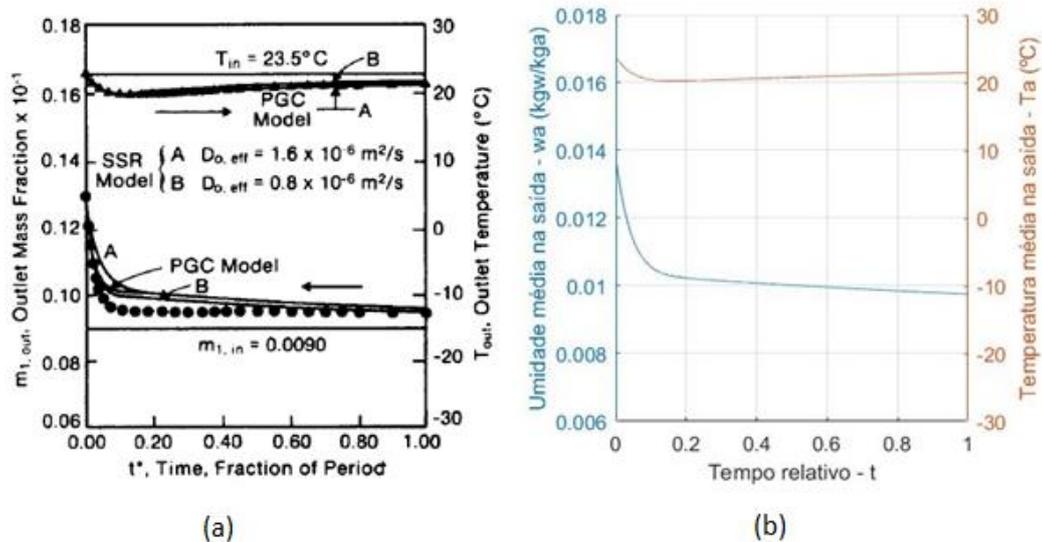


Figura 4.5 - (a) Resultado teórico e experimental encontrado por PESARAN teste 30 (PESARAN *et. al*, 1987). (b) Resultado teórico obtido a partir do modelo computacional. Autoria própria

Visto isso, podemos afirmar qualitativamente que o modelo computacional desenvolvido é compatível com a análise teórica e experimental validada por (PESARAN *et al.*, 1987).

Para validar quantitativamente o modelo, analisamos o erro da temperatura e da umidade na saída da torre comparando os resultados do teste experimental (PESARAN *et al.*, 1987) com o modelo computacional a partir da seguinte equação:

$$\delta(X)[\%] = \frac{|X_{experimental} - X_{teorico}|}{X_{teorico}} * 100 \quad (27)$$

Tabela 4.2 - Tabela de erros relativos experimento x teoria

TESTE	$\delta(w_a)(\%)$	$\delta(T_a)(\%)$
1	6,58	1,88
7	1,85	2,74
25	3,23	5,22
30	4,26	1,22

Com isso, nota-se a compatibilidade entre as análises qualitativamente, visto que o maior erro encontrado é de 6,58%.

## 5. Cálculo de desempenho do mecanismo

De acordo com os dados climáticos obtidos através do programa ASHRAE que analisa os dados meteorológicos capturados pelo observatório do Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, temos a curva de temperatura e umidade média ao longo do ano na cidade do Rio de Janeiro.

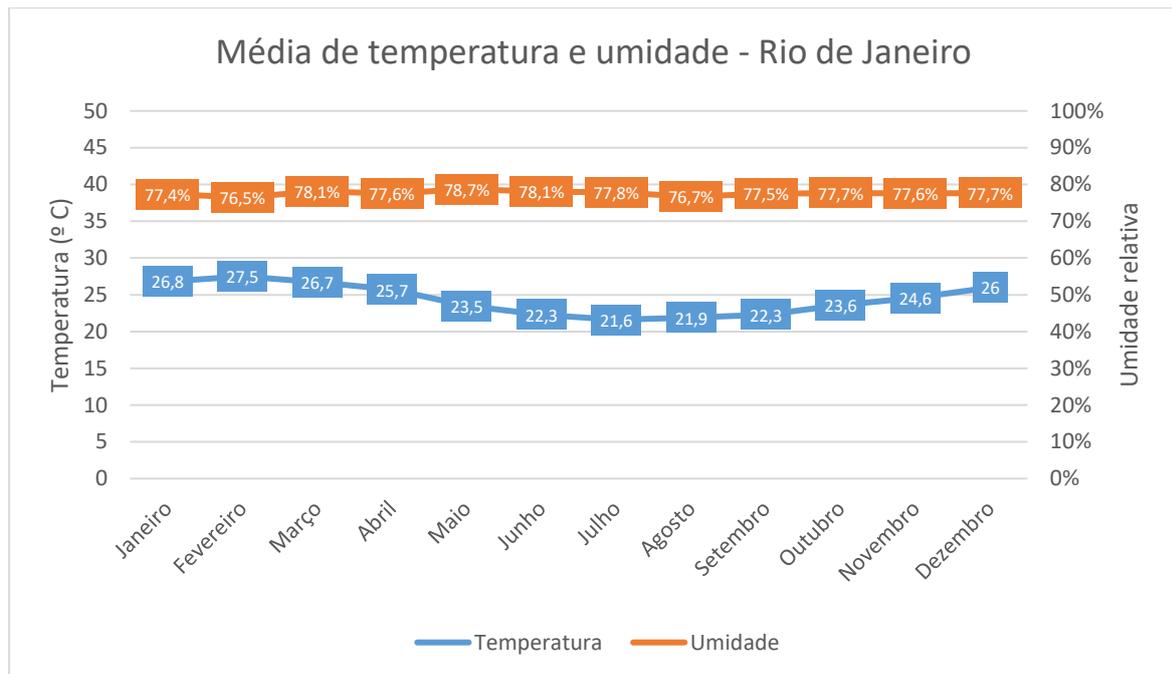


Figura 5.1 - Gráfico da média da temperatura e da umidade relativa na cidade do Rio de Janeiro ao longo de um ano.

A temperatura média anual da cidade do Rio de Janeiro observada no mesmo centro de meteorologia é de 24,4° C, com máxima de 27,5° C e mínima de 21,6° C. A umidade média não apresenta grande variedade ao longo do ano, com média de 77,4% de umidade relativa, com máxima de 78,7% e mínima de 77,4%.

Com isso, nossa temperatura inicial para a análise de dados será de 25° C e a umidade relativa inicial será de 77,4%, sendo assim para essa temperatura temos a umidade absoluta inicial de 0,015 kg vapor d'água/kg ar seco.

## 5.1. Análise de variáveis do ciclo de adsorção

### 5.1.1. Alturas da torre

Uma das variáveis mais importantes do mecanismo é a altura da torre, porém de acordo com (PESARAN et al. 1987) e (KAFUI, 1994), o limite de altura da torre para que não haja queda de pressão é de 0,15m. Sendo assim, iremos analisar o desempenho do mecanismo com 4 diferentes alturas: 0,05m; 0,08m; 0,12m; 0,15m.

Para essa análise iremos manter a velocidade do fluxo de ar em 1m/s constante, utilizaremos de uma sílica gel de diâmetro 0.052m e com um tempo de processo de 1200 segundos, com isso avaliaremos todas as alturas nas mesmas condições. Lembrando que, as condições iniciais de temperatura e umidade serão iguais em todas as análises, 25°C e 0,015 kg vapor d'água/ kg ar seco.

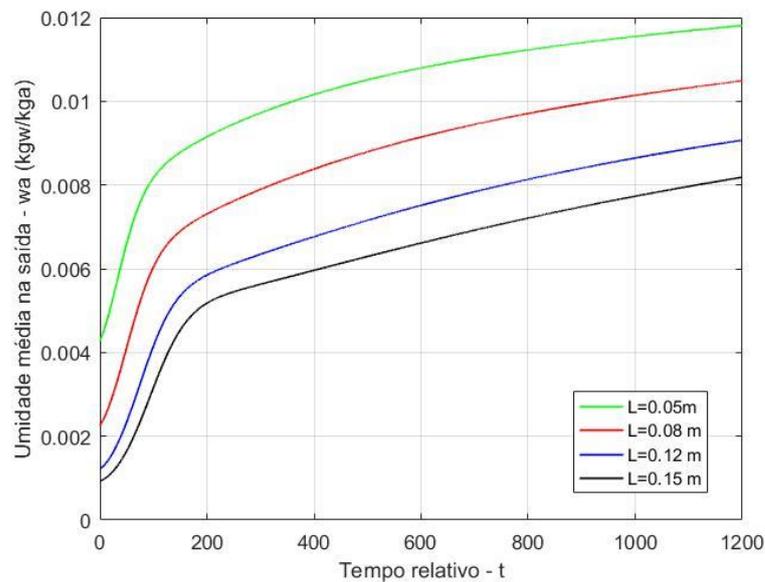


Figura 5.2 - Variação da umidade média na saída da torre para diferentes alturas (L).  
Autoria própria

De acordo com a figura 27, podemos perceber que a medida que aumentamos o tamanho da torre temos um maior rendimento do desumidificador, visto que a umidade na saída da torre de 0,05m no final do ciclo é de aproximadamente 0,012 kg vapor d'água/ kg ar seco da torre de 0,15m é de aproximadamente 0,008 kg vapor d'água/kg ar seco, sendo assim um rendimento de 50%.

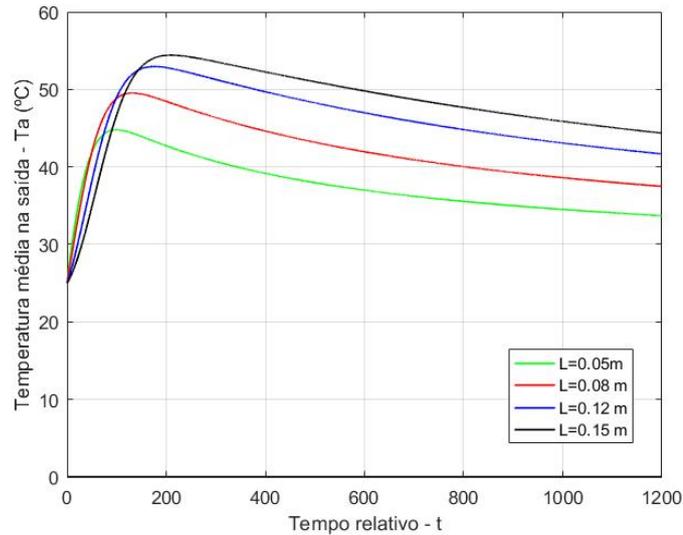


Figura 5.3 - Variação da temperatura na saída da torre para diferentes alturas (L). Autoria própria

A partir da figura 28, observamos que a medida que aumentamos a altura da torre, a temperatura média de saída também aumenta. Para uma altura de 0,05m temos a temperatura de saída no final do ciclo de aproximadamente 35° C e para a altura de 0,15m encontramos uma temperatura na saída de 44° C aproximadamente, ou seja, uma diferença de 9° C. Podemos observar também que o pico das temperaturas é decrescente a medida que aumentamos a altura da torre.

É importante lembrar que a temperatura de transição vítrea do filamento de PLA é de 60° C e para a torre de 0,15m podemos ter um pico de 55° C, sendo assim muito importante o parametrizar a altura a partir do limite de temperatura que podemos chegar.

### 5.1.2. Tipos de sílica gel

É comum encontrar no mercado 3 tipos de sílica gel a venda: sílica gel branca, sílica gel azul e sílica gel laranja.

Sílica gel branca é um tipo de sílica sem indicador de saturação, ou seja, as partículas não recebem nenhum tratamento que faça com que ela mude de cor ao absorber água. Com isso, é o tipo de sílica de menor custo no mercado.

A sílica gel azul por sua vez, recebe um aditivo que é o cloridrato de cobalto, fazendo com que sua coloração fique azulada e quando entra em contato com a água, esse aditivo faz com que a partícula de sílica fique rosa, com isso temos a indicação de saturação do

dessecante. O cloridrato de cobalto é um agente tóxico, sendo assim não é aconselhável a utilização dessa sílica em contato com alimentos. Esse tipo de sílica é o mais comercializado.

No caso da sílica gel laranja, ela tem essa coloração devido a inclusão do componente orgânico violeta de metila, deixando a sílica com a cor laranja. Quando a partícula começa a absorver água a pigmentação laranja torna-se verde, indicando a saturação da sílica. Por ser um componente orgânico, a sílica gel laranja não é tóxica, podendo ser utilizada nos alimentos.

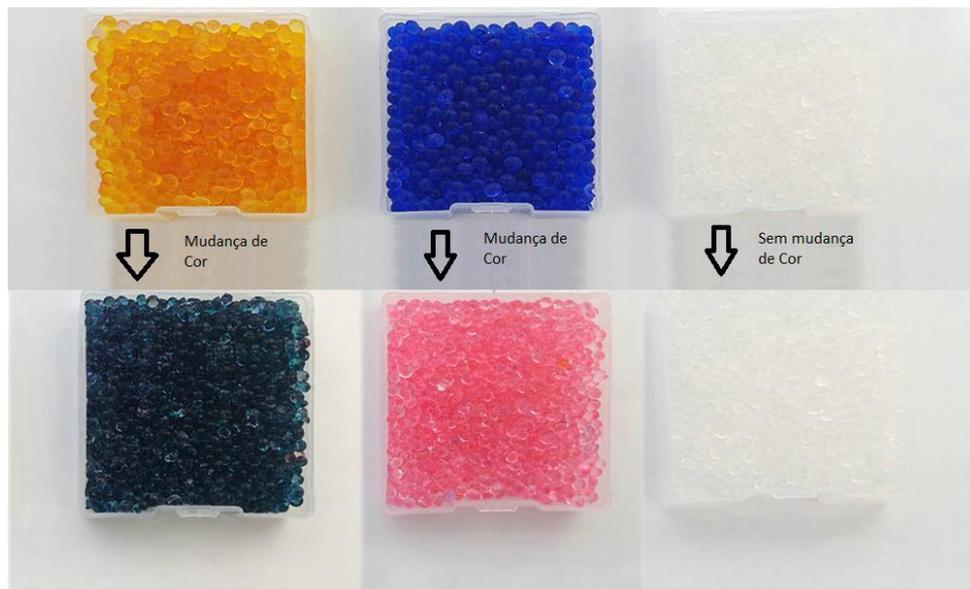


Figura 5.4 - Indicador de saturação para os 3 tipos de sílica. Adaptado - Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/40-g-caixa-S-lica-Gel-Absorvente-de-Umidade-Caixa-de-Gel-de-S-lica-Dessecante/32867810392.html>

Todas as sílicas apresentam a mesma capacidade de absorção e podem ser encontradas em dois tipos de tamanhos, são eles: grão que variam o diâmetro de 1mm até 4mm ou grãos que variam de 4mm até 8mm. Com isso, iremos analisar o desempenho dos dois diferentes tamanhos de partículas de sílica gel encontrados no mercado, por fins de simplificação iremos considerar partículas uniformes com um diâmetro médio, para os grãos que variam de 1mm – 3mm iremos utilizar um diâmetro médio de 2mm e para os grãos de 4mm – 8mm iremos utilizar como diâmetro médio 6 mm.

Para essa análise iremos manter a velocidade do fluxo de ar em 1m/s constante, altura da torre de 0.1m e com um tempo de processo de 1200 segundos, com isso avaliaremos todas as alturas nas mesmas condições. Lembrando que, as condições iniciais

de temperatura e umidade serão iguais em todas as análises, 25°C e 0,015 kg vapor d'água/ kg ar seco.

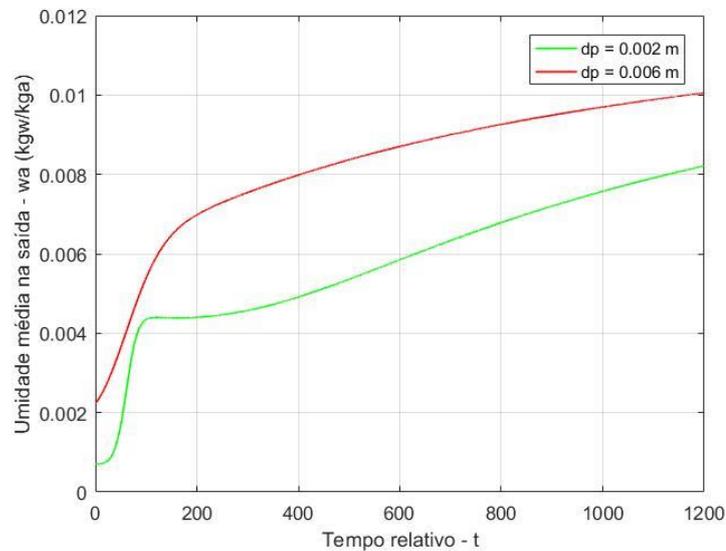


Figura 5.5 - Variação da umidade na saída da torre para diferentes diâmetros de partícula de sílica gel ( $d_p$ ). Autoria própria

De acordo com a figura 30, podemos observar que o quanto menor o tamanho da partícula de sílica gel menor a umidade do ar processado na saída da torre, visto que para as sílicas de diâmetro 0,002m verificamos uma umidade de 0,008 kg de vapor d'água/kg de ar seco na saída do leito, já para as sílicas de diâmetro médio 0,006m observamos que a umidade na saída é de 0,01 kg de vapor d'água/kg de ar seco. Sendo assim, é mais eficiente a utilização de sílica gel com a variação de 1mm até 3mm de diâmetro.

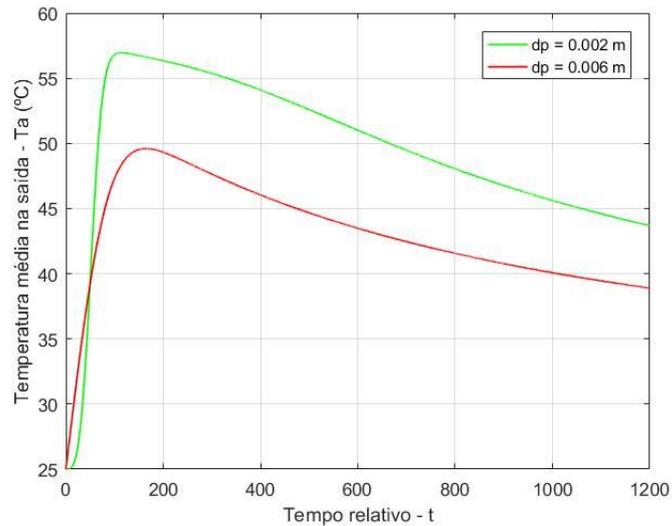


Figura 5.6 - Variação da temperatura média na saída da torre para diferentes diâmetros de partícula de sílica gel ( $d_p$ ). Autoria própria

Para o desempenho térmico, conforme a figura 31, podemos afirmar que o quanto menor o tamanho da partícula de sílica gel maior a temperatura do ar processado na saída da torre, visto que para as sílicas de diâmetro 0,002m verificamos uma temperatura de 45° C na saída do leito ao final do experimento, podendo ter um pico de 57° C, já para as sílicas de diâmetro médio 0,006m observamos que a temperatura na saída é de 38° C, com pico registrando 49° C. Sendo assim, avaliando o PLA com a temperatura limite de 60° C é ainda possível utilizar a sílica de diâmetro menor.

### 5.1.3. Tipos de coolers

Outro parâmetro importante para análise do desempenho do desumidificador é a velocidade do fluxo de ar que irá passar pela torre, variando a velocidade é esperado obter diferentes valores na saída de umidade e temperatura.

É comum encontrarmos coolers de 3 modelos no mercado: axial, centrífugo e o “blower”. Todos esses modelos realizam a mesma função, alimentar um fluxo de ar para uma determinada direção, porém cada um tem uma forma de direcionar diferente e cabe ao projetista escolher o que melhor se encaixa no estudo.



Figura 5.7 - Modelos de coolers. Disponível em

<https://industrialfans.wordpress.com/2012/07/11/whats-the-difference-between-a-centrifugal-fan-and-an-axial-fan/>

Para nossa análise iremos focar apenas no fluxo de ar que os coolers são capazes de desempenhar. Os fabricantes informam a capacidade do volume de ar que as ventoinhas realizam, essa leitura é feita pelo CFM (pés cúbicos por minuto). Como queremos analisar a velocidade do fluxo de ar, é preciso multiplicar a área da secção transversal do no mecanismo pelo volume de ar que o cooler é capaz de deslocar, com isso teremos a velocidade desejada.

Para o nosso experimento, iremos utilizar o diâmetro da torre de 0.1m e iremos analisar 4 variações de velocidade: 0,5 m/s; 0,8 m/s; 1 m/s e 1,2 m/s. Sendo assim, temos a seguinte tabela com os CFM's desejados:

Tabela 5.1 - Transformação de velocidade (m/s) em fluxo de ar (CFM)

Velocidade do fluxo de ar (m/s)	Diâmetro torre (m)	Área da secção transversal (m <sup>2</sup> )	Fluxo de ar (m <sup>3</sup> /s)	Fluxo de ar pé <sup>3</sup> /min
0,5	0,1	0,008	0,004	8
0,8	0,1	0,008	0,006	13
1	0,1	0,008	0,008	17
1,2	0,1	0,008	0,009	20

Para essa análise iremos utilizar a sílica gel com partículas de diâmetro igual a 0,052m, a altura da torre será de 0.1m e com um tempo de processo de 1200 segundos,

com isso avaliaremos todas as alturas nas mesmas condições. Lembrando que, as condições iniciais de temperatura e umidade serão iguais em todas as análises, 25°C e 0,015 kg vapor d'água/ kg ar seco.

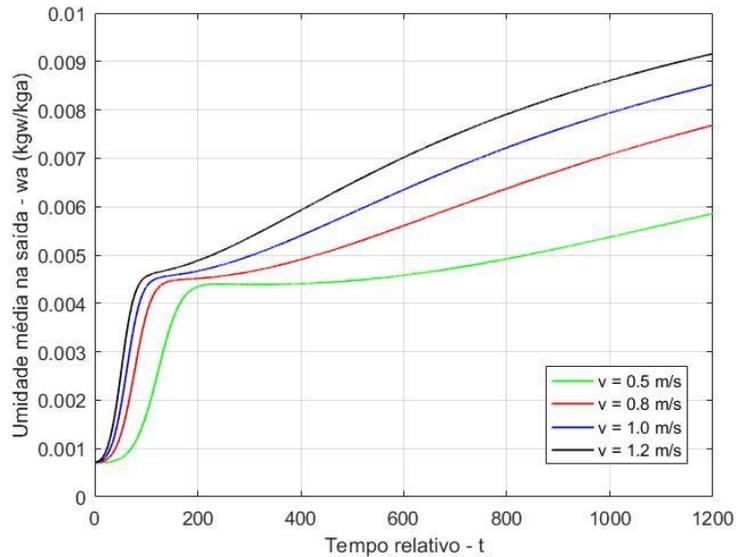


Figura 5.8 - Variação da umidade na saída da torre para diferentes velocidades (V). Autoria própria

Como podemos observar na figura 33, à medida que aumentamos a velocidade cresce a umidade na saída do leito, ao contrário do que ocorre quando aumentamos a altura da torre. Para a velocidade 0,5 m/s, temos a umidade na saída do leito de 0,006 kg de vapor d'água/kg de ar seco e para a velocidade de 1,2 m/s obtemos uma umidade na saída aproximadamente de 0,009 kg de vapor d'água/kg de ar seco.

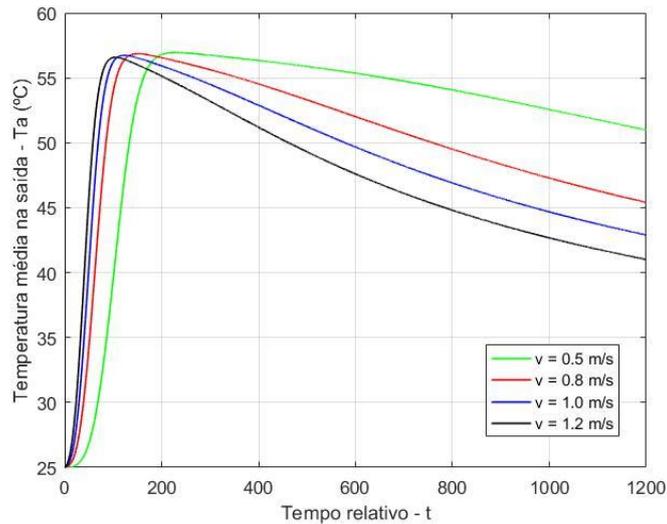


Figura 5.9- Variação da temperatura na saída da torre para diferentes velocidades (V).  
 Autoria própria

De acordo com a imagem 34, podemos ver o desenvolvimento da temperatura nas 4 variações de velocidade. Observa-se que para todas as velocidades o pico de temperatura permanece o mesmo, 57° C, porém cada uma velocidade chega nesse pico em seu determinado tempo. A diferença entre as velocidades encontra-se no final do ciclo, quanto maior a velocidade menor a temperatura da saída no final do ciclo, por exemplo, para a velocidade de 0,5 m/s temos a temperatura de 52° C e para a velocidade de 1,2 m/s encontramos a temperatura de 42° C.

## 5.2. Análise do ciclo de dessorção

Outro ponto importante é o comportamento das partículas de sílica gel durante o ciclo de adsorção e dessorção. Para isso, verificamos o volume de água que contém a primeira camada de sílica gel ao longo do tempo de processo que iremos avaliar, sendo assim, podemos afirmar se o ciclo de sílica gel é regenerativo.

Para análise do ciclo de adsorção, utilizamos das seguintes condições: temperatura inicial de 25°C, umidade do ar de 0,015 kg vapor d'água/ kg ar seco, vapor de água no interior da sílica gel de 0,04 vapor d'água/ kg sílica gel, altura da torre de 0,15 m, velocidade do ar de 1m/s e a partículas de 2mm de diâmetro. Com isso, obtemos a condição inicial de umidade para o ciclo de dessorção de acordo com a figura 27, sendo assim, a umidade inicial será de 0,008 kg vapor d'água/ kg ar seco, também é observado de acordo com a figura 35 que o volume de água no interior da sílica gel é de 0,36 vapor d'água/ kg sílica

gel no final do ciclo de adsorção, ou seja, esse é o volume inicial de água no interior das partículas no início do ciclo de dessorção. Contudo, de acordo com (PESARAN et al. 1987), para o ciclo de dessorção é necessário um ciclo de ar quente com uma temperatura em torno de relativamente inferior a 90°C, com isso, para a análise utilizaremos a temperatura inicial de 80°C.

Como visto na figura 35, para o ciclo de adsorção categorizado pela linha verde, observamos o volume de água na sílica gel subir de 0,04 para 0,36 vapor d'água/ kg sílica gel, respeitando os limites de capacidades estudados por (RUZHU, 2014). Já para o ciclo de dessorção, podemos observar que o volume inicial de água no interior da sílica é de 0,36 vapor d'água/ kg sílica gel, e no final do ciclo esse valor encontra-se próximo de 0,04 vapor d'água/ kg sílica gel, confirmando que o ciclo é regenerativo.

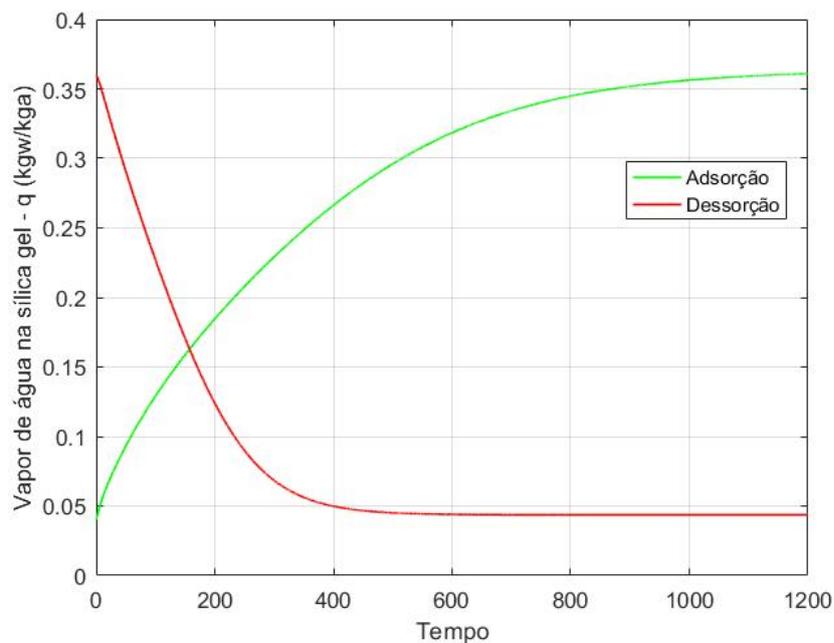


Figura 5.10 - Volume de água no interior da sílica gel ao longo do tempo durante o ciclo de adsorção e dessorção da sílica gel. Autoria própria

## 6. Análises de viabilidade

De acordo com a premissa número 5 do nosso modelo teórico, determinamos que as paredes da torre são adiabáticas, sendo assim, e sugerido a utilização de um isolamento a base de fibra de vidro, por exemplo, para aproximarmos o mecanismo do modelo estudado.

Como observado nas análises anteriores, podemos alterar 3 variáveis e obter diferentes resultados na saída do fluxo de ar processado. Para otimizar o mecanismo, avaliamos os melhores resultados que retornariam as condições adequadas para o desenvolvimento das condições necessárias para o bom armazenamento do filamento de impressão 3D de PLA.

Supondo que o mecanismo será utilizado na cidade do Rio de Janeiro, as condições iniciais serão adotadas conforme explicado anteriormente. Temperatura inicial de 25°C e umidade absoluta inicial de 0,015 kg vapor d'água/kg ar seco.

Lembrando que as condições ideais que queremos encontrar para os filamentos de PLA são aproximadamente 50°C até 60°C e com umidade relativa de até 15% UR. Com esses valores encontramos o modelo ideal de operação para o filamento.

Com o objetivo de maximizar o potencial do desumidificador, respeitando as condições máximas de armazenamento do filamento, utilizaremos os parâmetros que retornaram os maiores valores de temperatura e menores valores de umidade. Com isso, teremos um para uma torre de 0,15m de altura, com um fluxo de ar na velocidade de 0,5 m/s e utilizando uma sílica gel de diâmetro médio de 0,002 m.

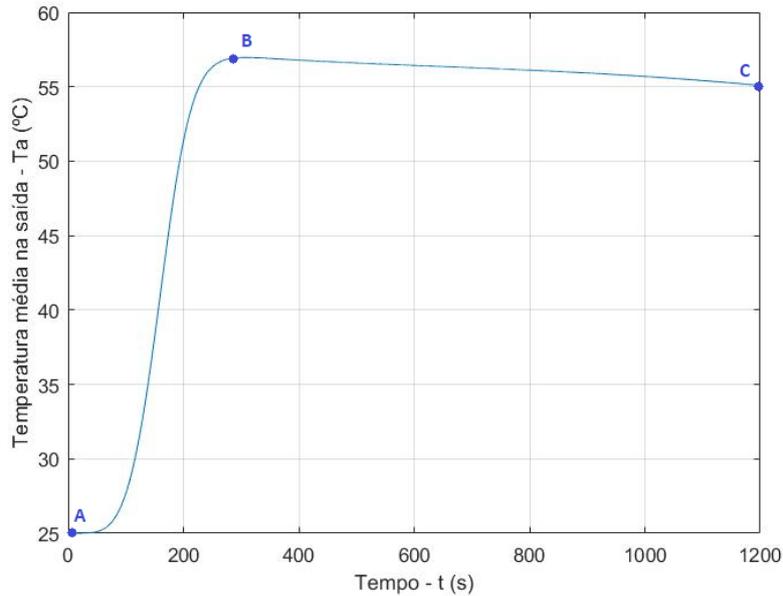


Figura 6.1 - Temperatura de saída do ar processado (°C). Autoria própria

Com os parâmetros definidos, de acordo com a figura 36 podemos observar que a temperatura do ar processado na saída do mecanismo apresenta um crescimento rápido, iniciando a 25°C e após aproximadamente 300 segundos atinge o pico de 57°C e à medida que algumas camadas de sílica gel vão saturando, a temperatura decresce e no final do processo é obtido uma temperatura de 55°C, durante todo o processo é respeitado o limite de transição vítrea do PLA, 60°C.

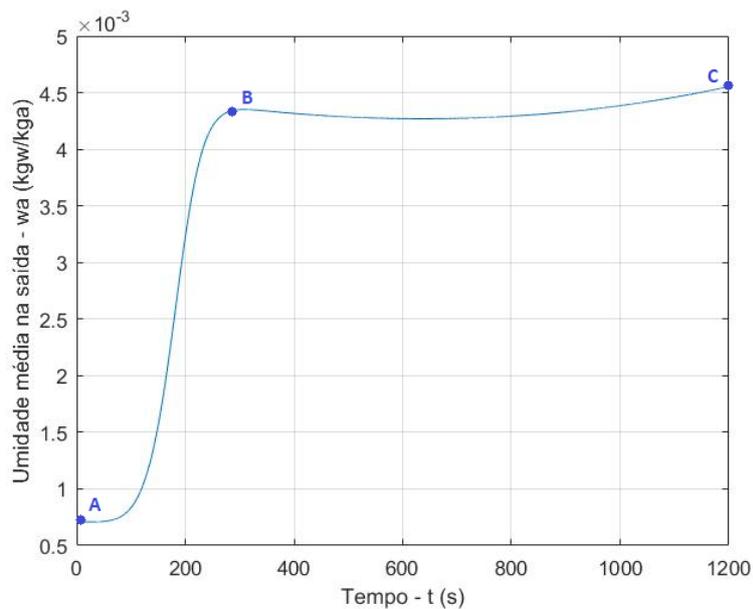


Figura 6.2 - Umidade do ar processado na saída do equipamento. Autoria própria

Para umidade do ar na saída do equipamento, encontramos o valor de inicial de 0,00075 kg vapor d'água/kg ar seco, à medida que as camadas de sílica gel saturam, a umidade na saída do mecanismo aumento, após 300 segundos de processo é verificada uma umidade de 0,0042 kg vapor d'água/kg ar seco e no final do processo podemos obter uma umidade de 0,0046 kg vapor d'água/kg ar seco.

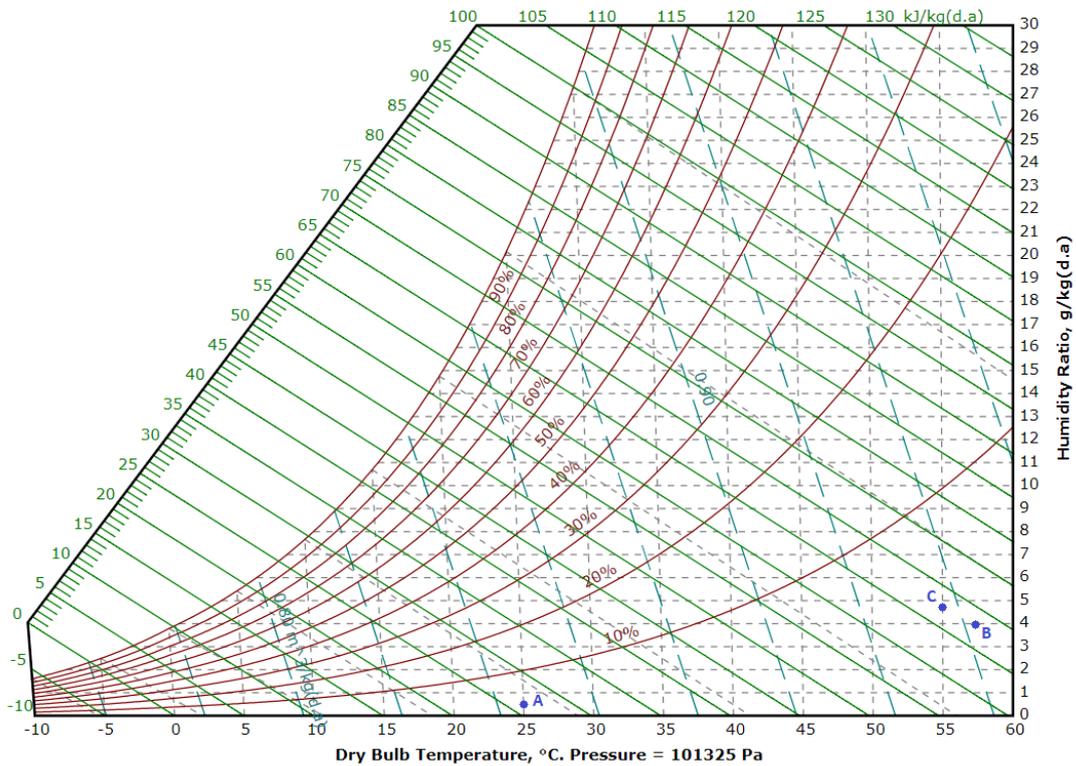


Figura 6.3 - Carta psicométrica

De acordo com a carta psicométrica, para os pontos A, B e C, encontramos as umidades relativas de, 4%, 3,5% e 5%, respectivamente. Com isso, podemos afirmar que os resultados do equipamento atendem satisfatoriamente os valores desejados para a manutenção e armazenamento das bobinas de filamento de impressão 3D.

## 7. Conclusão

Como visto, a umidade gera uma série de problemas para o usuário de impressoras 3D do modelo FFF (Fused Filament Fabrication), verifica-se a urgência em soluções para esse obstáculo, tendo em vista que um dos maiores gargalos da impressão 3D é o tempo de fabricação das peças, não é aceitável o desperdício de peças devido à falta de manutenção do filamento. Além disso, outro fator é o custo de reposição de peças defeituosas que o filamento degradado pode gerar, como é o caso do entupimento do bico extrusor.

O estudo propõe de forma simples, a utilização de sílica gel para criar um fluxo de desumidificação do ambiente onde será alojada a bobina de filamentos. Sabendo que o PLA, por exemplo, tem suas especificações adequadas para a manutenção de suas propriedades, o projeto analisou em que condições o modelo adotado cumpriria tais requisitos. O estudo focou apenas na análise teórica do desempenho do ciclo, pois algumas limitações físicas e monetárias, como aquisição de sensores de umidade e temperatura, não permitiram a execução prática do projeto.

Através de um estudo realizado por PESARAN, 1987, foi testado o comportamento do fluxo de ar através de um leito preenchido com sílica gel, com base nesse estudo, foi desenvolvido um modelo matemático que avalia o desempenho desse fluxo de ar, com isso, criamos um programa em MATLAB para criticar o funcionamento do mecanismo e se atenderá as necessidades propostas.

A partir do modelo matemático proposto, encontramos resultados satisfatórios para implementação do mecanismo como desumidificador de filamentos, visto que, para o PLA, por exemplo, que necessita de condições em que a temperatura máxima é de 60° C e a umidade relativa do ar abaixo de 15%. Como observado nas análises, o mecanismo em regime proporciona um fluxo de ar com temperatura de 55° C e 5% de umidade relativa e com isso cumprirá os requisitos para manter o insumo em condições adequadas para manutenção de suas propriedades.

Enfim, com base nas análises, chegamos à conclusão de que o modelo proposto atende os requisitos necessários para processar o ar e estabelecer as condições ideais de armazenamento do filamento de PLA para impressão 3D. Além disso, devido a temperatura de saída do ar, o mecanismo também exerce o papel de pré-aquecer o filamento, diminuindo assim o esforço do bico extrusor da impressora 3D e reduzindo o custo de energia e aumentando a vida útil do equipamento.

## 8. Trabalhos futuros

Considerando o modelo teórico adotado, uma proposta futura é modelar um produto utilizando do mecanismo de desumidificação com o ciclo de regeneração da sílica gel e testar a eficácia real aplicada aos filamentos de impressão 3D, com isso, analisar a taxa de desumidificação que o mecanismo é capaz de exercer. Também desenvolver o estudo prático analisando custos e otimizando de forma real os parâmetros aqui verificados teoricamente.

Além de estudar o efeito da desumidificação, analisar também os ganhos no processo de impressão, comparando impressões realizados em materiais sem a utilização do protótipo e ganhos com a utilização do mesmo e também, mensurar os ganhos a longo prazo, tendo em vista que com a manutenção do filamento de forma adequada, menos peças serão desperdiçadas e menos problema na impressora ocorrerá.

E por último, testar o mecanismo para outros tipos de filamentos, como o NYLON, por exemplo, que também apresenta a característica de absorção de água, fazendo com que suas propriedades mecânicas se degradem com tempo de exposição.

## Bibliografia

RUZHU, W., LIWEI, W., JINGYI, W., **Adsorption Refrigeration Technology Theory and Application**, 1 ed. Singapura, Wiley, 2014

HARRIMAN III, L., G., **The Dehumidification Handbook**, 2 ed. Massachusetts, Munters Corporation, 1998 e 2002

PESARAN, A., A., MILLS, A., F., "Moisture transport in silica gel packed beds-I Theoretical study", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.30, pp. 1037–1049, 1987.

PESARAN, A., A., MILLS, A., F., "Moisture transport in silica gel packed beds-II. Experimental study", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.30, pp. 1051–1060, 1987.

KAFUI, K.D., "Transient heat and moisture transfer in thin silica gel beds", **ASME Heat Transfer Journal**, v.116, pp. 946–953, 1994.

RAMZY, A.K., ASHOK BABU, T.P., KADOLI, R., "Semi-analytical method for heat and moisture transfer in silica gel packed beds", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.54, pp. 983-993, 2011.

RAMZY, A.K., ASHOK BABU, T.P., KADOLI, R., "Significance of axial heat conduction in non-isothermal adsorption process in a desiccant packed bed", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.76, pp 68-81, 2014.

E. CASTRO-AGUIRRE, "Poly (lactic acid) - Mass production, processing, industrial applications, and end of life", **Advanced Drug Delivery Reviews**, v.107, pp. 333 - 366, 2016.

FARAH, S., "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review", **Advanced Drug Delivery Reviews**, v.107, pp. 367 - 392, 2016.

YEW, G.H., "Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites", **Polymer Degradation and Stability**, v.90, pp. 488-500, 2005.

PESARAN A. A., "Moisture transport in silica gel particle beds", Ph.D. Dissertation, School of Engineering and Applied Sciences, University of California, Los Angeles (1983).

WITTBRODT B., PEARCE J. M., "The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components", **Additive Manufacturing**, v. 8, pp. 110-116, 2015.

Orange, White and Blue Silica Gel, What's the Difference Between all of them? Disponível em: <https://www.molsivcn.com/2013/01/21/what-s-the-difference-between-blue-orange-and-white-silica-gel/>

Print Dry. Disponível em: <https://www.printdry.com/>

CHARLES, N. S., THOMAS, K. S., **The Role of Diffusion in Catalysis**, 1 ed., Addison-Wesley, 1963.

HOUGEN, A., MARSHALL, W. R., "Adsorption from a fluid stream flowing through a stationary granular bed", **Chem. Engng Prog.**, v.43, pp. 197-208, 1947.

AHLBERG, J. E., "Rates of water vapor adsorption for air by silica gel", v.31, pp. 988-992, 1939.

Facts and Information about indicating dessicant. Disponível em: [https://www.tedpella.com/technote\\_html/desiccant.pdf](https://www.tedpella.com/technote_html/desiccant.pdf)

GROSS, B. C. et al., "Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences", **Anal Chem**, v. 86, n. 7, p. 3240-53, 2014.

CARNEIRO, O. S., SILVA, A. F., GOMES, R., "Fused deposition modeling with polypropylene", **Materials & Design**, v. 83, p. 768-776, 2015.

WONG, K. V., HERNANDEZ, A., "A Review of Additive Manufacturing", **ISRN Mechanical Engineering**, v. 2012, p. 1-10, 2012.

C.Y. THAM, Z. A ABDUL HAMID, Z. AHMAD, H. ISMAIL, "Surface Engineered Poly (lactic acid) (PLA) Microspheres by Chemical Treatment for Drug Delivery System", **Key Engineering Materials**, vol. 594-595, p. 214-218, 2014.

J.Y. SAN, G.D. JIANG, "Modeling and testing of a silica gel packed-bed system", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.37, 1173-1179, 1994.

## Apêndice

Script Matlab:

```
clc

clear all

L = 0.05;   %%% Tamanho da torre (m)

db = 0.01;  %%% Diametro da torre (m)

dp = 0.0052; %%% Diametro da particula (m)

A = pi*(dp/2)^2; % m^2

Ab = pi*(db/2)^2; % m^2

a = 1650;   %%% Volumetric surface area (m^(-1))

per = pi*dp; % m

tf = 1200;  %%% Tempo de processo (s)

pa = 1.22;  %%% Densidade do ar (kg/m^3)

e = 0.3;    %%% Porosidade da torre

V = 1;      %%% Velocidade do ar (m/s)

mp = pa*V*A; %%% Fluxo de ar (kg/s)

u = 1.9*10^(-5); %%% Viscosidade dinamica do ar (kg . m / s)

Re = pa*V*dp/u; %%% Reynolds

ptot = 101.326; %%% Pressão total (kPa = N/m^2)

Cv = 1.864; %%% Calor especifico vapor d'agua (KJ/Kg K)

pp = 1200;  %%% densidade da silica gel kg/m^3

pb = (1 - e)*pp; %%% densidade da torre kg/m^3

hm = 0.704 * pa * V * Re^(-0.51); % [hm] = Kg/m^2 s
```

```
%%% Discretizando em relação ao tempo
```

```
t0 = 0;
```

```
n_t = 10 * (tf - t0) + 1;
```

```
deltaT = 0.1;
```

```
t = 0: deltaT : tf ;
```

```
%%% Discretizando em relação ao espaço
```

```
z0 = 0;
```

```
zf = L; % m
```

```
n_z = 10000 * (zf - z0) + 1;
```

```
deltaZ = 0.0001;
```

```
z = z0:deltaZ:zf;
```

```
%%% Condições iniciais da umidade do ar processado
```

```
w_a = zeros(n_t,n_z);
```

```
w_a(:,1) = 0.014;
```

```
w_a(1,:) = 0.014;
```

```
%%% Condições iniciais da temperatura do ar processado
```

```
T_a = zeros (n_t,n_z);
```

```
T_a(:,1) = 25;
```

```
T_a(1,:) = 25;
```

```
%%% Condições iniciais para sílica gel
```

```
q = zeros(n_t,n_z);
```

```
q (1,:) = 0.004;    %%% Umidade inicial na silica gel
```

```
%% Condições iniciais para a temperatura do entorno da silica gel
```

```
T_b = zeros(n_t,n_z);
```

```
T_b (1,:) = 25;    %%% Temperatura inicial na silica gel
```

```
%% Definindo HA inicial e ws inicial
```

```
RHs = (0.0078 - 0.05779 * q(1,1) + 24.16555 * (q(1,1)^2) - 124.478 * (q(1,1)^3) + 204.226 * (q(1,1)^4)); %%% Isoterma da silica gel
```

```
cb = 4.186 * q(1,1) + 0.921;
```

```
psat = exp(23.196 - (3816.44 / ((T_b(1,1) + 273.15) - 46.13))) / 1000; %%% Equação de Antonine para pressão de saturacao
```

```
w_s = zeros(n_t,n_z);
```

```
w_s(1,:) = 0.622 * RHs * psat / (ptot - (0.378 * RHs * psat)) ; %%% Equilibrio da umidade do ar adjacente a superficie da particula
```

```
if q(1,1) <= 0.05
```

```
    HA = (3500 - 12400 * q(1,1)); %%% Calor de adsorção da silica gel depende de q
```

```
else
```

```
    HA = (2950 - 1400 * q(1,1)); %%% Calor de adsorção da silica gel depende de q
```

```
end
```

```
kwa = (hm * per) / mp;
```

```
for i = 1 : n_t-1 %%% Variação no tempo
```

```
%k = 0.01;
```

```
%w_s = 0.010; % <<<<< Atenção !!!
```

```
%T_b = 30; % <<<<< Atenção !!!
```

```
% Método de RK4
```

```
for j = 1:n_z-1 %%% Variação no espaço
```

```
% f(z, w_a)
```

```
% Primeiro para wa
```

```
k1 = kwa * ( w_s(i, j) - w_a(i, j)) * (1 - w_a(i, j));
```

```
k2 = kwa * ( w_s(i, j) - w_a(i, j) + (k1/2) * deltaZ) * (1 - w_a(i, j) + (k1/2) * deltaZ) ;
```

```
k3 = kwa * ( w_s(i, j) - w_a(i, j) + (k2/2) * deltaZ) * (1 - w_a(i, j) + (k2/2) * deltaZ) ;
```

```
k4 = kwa * ( w_s(i, j) - w_a(i, j) + k3* deltaZ) * (1 - w_a(i, j) + k3* deltaZ) ;
```

```
h = (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6 ;
```

```
w_a(i , j + 1) = w_a(i, j) + h*deltaZ;
```

```
Ca = 1.884 * w_a(i, j) + 1.004 * ( 1 - w_a(i, j));
```

```
ha = 0.683 * pa * V * Ca * Re^(-0.51); %%% coeficiente de convecção térmica
```

```
kta = (Cv * hm * ((w_a(i, j) - w_s(i, j))) - ha) * (per/(Ca * mp));
```

```

% Segundo para Ta

h1 = kta * (T_a(i, j) - T_b(i, j));

h2 = kta * (T_a(i, j) + ((h1/2)* deltaZ) - T_b(i, j)) ;

h3 = kta * (T_a(i, j) + ((h2/2)* deltaZ) - T_b(i, j));

h4 = kta * (T_a(i, j) + (h3* deltaZ) - T_b(i, j));

hf = (h1 + 2*h2 + 2*h3 + h4) / 6 ;

T_a(i , j + 1) = T_a(i, j) + hf*deltaZ;

% Passo numérico:

T_b(i+1, j) = T_b(i, j) + ((HA * hm * ( w_a(i, j) - w_s(i, j)) + ha * ( T_a(i, j) - T_b(i, j)))
* per / (A * pb * cb)) * deltaT;

q(i+1, j) = q(i, j) + (hm * per * ( w_a(i, j) - w_s(i, j))/ (A * pb)) * deltaT;

% Atualização de valores:

RHs = (0.0078 - 0.05779 * q(i+1, j) + 24.16555 * (q(i+1, j)^2) - 124.478 * (q(i+1, j)^3)
+ 204.226 * (q(i+1, j)^4)); %%% Isoterma da silica gel

cb = 4.186 * q(i+1, j) + 0.921;

psat = exp(23.196 - (3816.44 / ((T_b(i+1, j) + 273.15) - 46.13))) / 1000; %%% Equação
de Antonine para pressão de saturacao

w_s(i+1, j) = 0.622 * RHs * psat / (ptot - 0.378 * RHs * psat) ; %%% Equilibrio da
umidade do ar adjacente a superficie da particula

if q(i+1, j) <= 0.05

    HA = (3500 - 12400 * q(i+1, j)); %%% Calor de adsorção da silica gel depende de
q

else

```

```

        HA = (2950 - 1400 * q(i+1, j)); %%% Calor de adsorção da sílica gel depende de q
    end
end
end

w_a(end,end-1) = w_a(end-1,end-1);
T_a(end,end-1) = T_a(end-1,end-1);

hold on
yyaxis left
plot(t/tf, w_a(:, end - 1))
ylim([0 0.014])
xlabel('Tempo relativo - t')
ylabel('Umidade média na saída - wa (kgw/kga)')
grid on

yyaxis right
plot(t/tf, T_a(:, end - 1))
ylim([-10 60])
ylabel('Temperatura média na saída - Ta (°C)')
grid on
hold off

```