



INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Murilo Pierre Gabriel

**ESTUDO DO FENÔMENO DE ADSORÇÃO PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS
DE REFRIGERAÇÃO**

Lages
2023

Murilo Pierre Gabriel

**ESTUDO DO FENÔMENO DE ADSORÇÃO PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS
DE REFRIGERAÇÃO**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal
de Santa Catarina como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica
Orientador: Prof. Matheus Fontanelle Pereira,
Dr. Eng
Coorientador: Prof. Fernando da Silva Osório,
Msc. Eng

Lages
2023

Murilo Pierre Gabriel

ESTUDO DO FENÔMENO DE ADSORÇÃO PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 12 de dezembro de 2023.

Profª. Natália Madalena Boelter, Msc. Eng.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Matheus Fontanelle Pereira, Dr. Eng.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando da Silva Osório, Msc. Eng.
Coorientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Diego Bitencourt Machado, Dr. Eng.
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Gustavo Henrique Flores Ponce, Dr. Eng.
Avaliador
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me fortalecido no árduo caminho para concluir o meu curso. Agradeço a meus pais e familiares pelo apoio e incentivo sempre prestados.

Também àqueles que me auxiliaram neste trabalho, meu professor Matheus pela paciência e excelente orientação, meu coorientador professor Fernando e também a minha professora Vilma pela sua contribuição.

Deixo o agradecimento aos meus amigos de curso, por todas as vezes que nos ajudamos nos estudos.

Agradeço também a Instituição pela estrutura e oportunidade oferecida ao longo deste percurso, e a todos os demais professores que em algum momento de minha jornada me transmitiram conhecimento.

Não permaneça sempre na estrada principal, indo apenas onde os outros já foram, seguindo um atrás do outro como um rebanho de ovelhas. Ocasionalmente, deixe a trilha já traçada e mergulhe na floresta. Cada vez que você fizer isso, certamente encontrará algo que nunca viu antes.
(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Este trabalho realiza um estudo referente ao fenômeno da adsorção, focando em possível aplicação em sistemas de refrigeração. O objetivo é identificar a capacidade que o carvão apresenta para adsorver o formiato de metila, fluido selecionado devido a sua compatibilidade e propriedades de saturação. Foi construída uma câmara na qual uma massa mensurada de carvão foi posta dentro, e em seguida feito um vácuo parcial. Após isso inseriu-se o fluido que atuou como adsorvato no processo, o formiato de metila. Ao ser inserido ele evaporava rapidamente devido ao vácuo ali presente, e na forma de vapor, era adsorvido pelo carvão. Esse processo retirava partículas de formiato de metila da atmosfera interna da câmara, tornando o ar ali presente mais rarefeito, e diminuindo a pressão novamente até um determinado ponto. Os experimentos foram feitos iterativamente a fim de se coletar dados, e os mesmos foram plotados em um gráfico a partir de uma tabela. Por meio de computação numérica foi feita uma regressão polinomial para encontrar as equações que descrevessem os gráficos, substituídas na Equação dos Gases Ideais, e feito a derivação da massa em relação ao tempo, para assim encontrar a taxa de adsorção. Foi feita a análise dos resultados obtidos referente ao comportamento do fenômeno nas experimentações feitas e realizada análise estatística dos números obtidos. Os experimentos e sua investigação, demonstrou que a capacidade de gerar gradientes de pressão do par adsorvente/adsorvato estudado é considerável, e pode ser utilizada para testes em protótipos.

Palavras-chave: Adsorção, refrigeração, refrigeração por adsorção, pressão, taxa de adsorção, termodinâmica.

ABSTRACT

This work carries out a study on the phenomenon of adsorption, focusing on potential applications in refrigeration systems. The objective is to identify the capacity of coal to adsorb methyl formate, a selected fluid due to its compatibility and saturation properties. A chamber was constructed in which a measured mass of coal was placed, and then a partial vacuum was created. After that, the fluid, acting as the adsorbate in the process, methyl formate, was introduced. Upon insertion, it evaporated rapidly due to the vacuum present, and in vapor form, it was adsorbed by the coal. This process removed methyl formate particles from the internal atmosphere of the chamber, making the air less dense and reducing the pressure again to a certain point. Experiments were conducted iteratively to collect data, and the data were plotted on a graph from a table. Through numerical computation, a polynomial regression was performed to find the equations that described the graphs, substituted into the Ideal Gas Equation, and the mass was then derived with respect to time to find the adsorption rate. An analysis of the results obtained regarding the behavior of the phenomenon in the conducted experiments was carried out, and a statistical analysis of the obtained numbers was performed. The experiments and their investigation demonstrated that the ability to generate pressure gradients of the studied adsorbent/adsorbate pair is considerable and can be used for testing in prototypes.

Keywords: Adsorption, Refrigeration, Refrigeration by adsorption, pressure, Adsorption rate, Thermodynamics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz energética brasileira	18
Figura 2.1 - Ciclo de refrigeração por absorção.....	21
Figura 2.2 - Ciclo de refrigeração por Adsorção	31
Figura 2.3 - Representação de uma máquina de refrigeração por adsorção	33
Figura 3.1 - Modelo Conceitual Vista Isométrica	35
Figura 3.2 - Modelo Conceitual Vista Frontal.....	36
Figura 3.3 - Modelo Conceitual Vista Dimétrica.....	36
Figura 3.4 - Modelo Conceitual Vista Lateral.....	37
Figura 3.5 - Tensão de Von Mises.....	39
Figura 3.6 - Representação de tensões.....	40
Figura 3.7 - Atuação de forças.....	42
Figura 3.8 - Diagrama ΣF	42
Figura 3.9 - Diagrama do Momento Fletor	43
Figura 3.10 - Carvão ativado visto no microscópio ampliado de 1200x.....	44
Figura 3.11 - Bomba de vácuo utilizada	47
Figura 3.12 – Câmara de teste confeccionada	48
Figura 3.14 - Policarbonato após contatos com Formiato de Metila	51
Figura 3.15 - Tampa de policarbonato ampliada	52
Figura 3.16 – Câmara montada com tampa de aço.....	53
Figura 3.17 - Aço 1020 após contatos com vapor de Formiato de Metila.....	54
Figura 3.18 - Parte interna da câmara de teste	55
Figura 4.1 - Comportamento de um teste com 100 gramas de carvão.....	56
Figura 4.2 - Tratamentos com 100g de carvão. (Média \pm Desv. Pad)	57
Figura 4.3 - Tratamentos com 125g de carvão. (Média \pm Desv. Pad)	58
Figura 4.4 – Tratamentos com 150g de carvão. (Média \pm Desv. Pad).....	58
Figura 4.5 – Razão de massas.....	62
Figura 4.6 - Massas adsorvidas de formiato de metila	63
Figura 4.7 - Relação entre a razão de massas e a variação de pressão	64
Figura 4.8 - Gráfico da equação 4.9 (100 gramas de carvão)	68
Figura 4.9 - Gráfico da equação 4.12 (125 gramas de carvão)	69

Figura 4.10 - Gráfico da equação 4.13 (150 gramas de carvão)	69
Figura 4.11 - Curvas dos dois testes com formiato de metila	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Dimensões da Câmara de Testes	38
Tabela 3.2 - Tensão e Parâmetros de Cálculo	38
Tabela 4.1 – Volumes considerados.....	60
Tabela 4.2 – Valores obtidos nos testes.....	60
Tabela 4.3 - Razão entre as massas de formiato de metila e carvão	61
Tabela 4.4 - Valores para o cálculo da relação 4.3.....	65
Tabela 4.5 - Pressão absoluta final para cada segunda fase de teste	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MME	Ministério de Minas e Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Desv. Pad	Desvio Padrão
NIST	National Institute of Standards and Technology

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

$\frac{1}{n}$	Constante da heterogeneidade da superfície
b	Comprimento da base (m)
c	Distância até a linha neutra (m)
C_e	Concentração da espécie química (mol/L)
C_{eq}	Concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L)
COP_{ideal}	Coefficiente de performance ideal (-)
F_r	Força Resultante (N)
h	Comprimento da altura (m)
I	Momento de inércia (m^4)
k	Constante relacionada a energia de adsorção (-)
K_F	Constante de capacidade de adsorção de Freundlich (mg/g)
K_L	Constante de interação adsorvato/adsorvente (L/mg)
\bar{R}	Constante dos Gases Ideais ($J/mol.K$)
m	Massa (kg)
M	Momento ($N.m$)
\dot{m}_{100}	Taxa de adsorção para 100 gramas de carvão (kg)
\dot{m}_{125}	Taxa de adsorção para 125 gramas de carvão (kg)
\dot{m}_{150}	Taxa de adsorção para 150 gramas de carvão (kg)
m_c	Massa de carvão (g)
M_{MF}	Massa Molar de Formiato de Metila (kg/mol)
$m_{FM,vap}$	Massa de vapor de Formiato de Metila (g)
p	Pressão Manométrica interna (MPa)
P	Pressão (bar)
$P(t)_{100}$	Pressão para 100 gramas de carvão em função do tempo (bar)
$P(t)_{125}$	Pressão para 125 gramas de carvão em função do tempo (bar)
$P(t)_{150}$	Pressão para 150 gramas de carvão em função do tempo (bar)
q	Quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g)

q_e	Quantidade do soluto (mg/g)
q_{eq}	Capacidade de adsorção no Equilíbrio (mol/g)
q_m	Capacidade de adsorção máxima teórica (mol/g)
q_{max}	Capacidade máxima de adsorção (mg/g)
Q_{cold}	Calor da fonte fria (J)
Q_{hot}	Calor da fonte quente (J)
Q_{mid}	Calor do ambiente (J)
r	Raio interno (mm)
R	Constante dos Gases Ideais ($J/mol.K$)
s	Espessura de Parede (mm)
T	Temperatura (K)
T_{cold}	Temperatura da Fonte Fria (K)
T_{hot}	Temperatura da Fonte Quente (K)
T_{mid}	Temperatura do ambiente (K)
V	Volume (m^3)

Alfabeto Grego

ε	Potencial de Polanyi (-)
σ_1	Tensão Circunferencial (Mpa)
σ_2	Tensão Longitudinal (Mpa)
σ_e	Tensão de Escoamento (Mpa)
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima (Mpa)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivos gerais.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	ABSORÇÃO	19
2.1.1	Ciclo de refrigeração por absorção.....	20
2.2	REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO.....	22
2.2.1	O Fenômeno da Adsorção.....	22
2.2.2	Isotermas de adsorção	25
2.2.3	Ciclo de refrigeração por adsorção.....	29
2.2.4	Limitações	32
2.3	COEFICIENTE DE PERFORMANCE.....	33
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	CÂMARA DE TESTES	34
3.1.1	Modelo Conceitual.....	35
3.1.2	Dimensionamento da câmara.....	37
3.2	PAR ADSORVENTE/ADSORVATO	44
3.3	SEÇÃO DE TESTES E INSTRUMENTAÇÃO	46
3.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	49
3.5	AJUSTES E CARACTERIZAÇÃO	50
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
4.1	RAZÃO DE ADSORÇÃO m_{FM}/m_C	59
4.2	TAXA DE ADSORÇÃO.....	64
4.3	RECARGA DA CÂMARA.....	70
4.4	VARIAÇÕES OBSERVADAS	73

		15
5	CONCLUSÕES	74
5.1	TRABALHOS FUTUROS.....	74
6	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

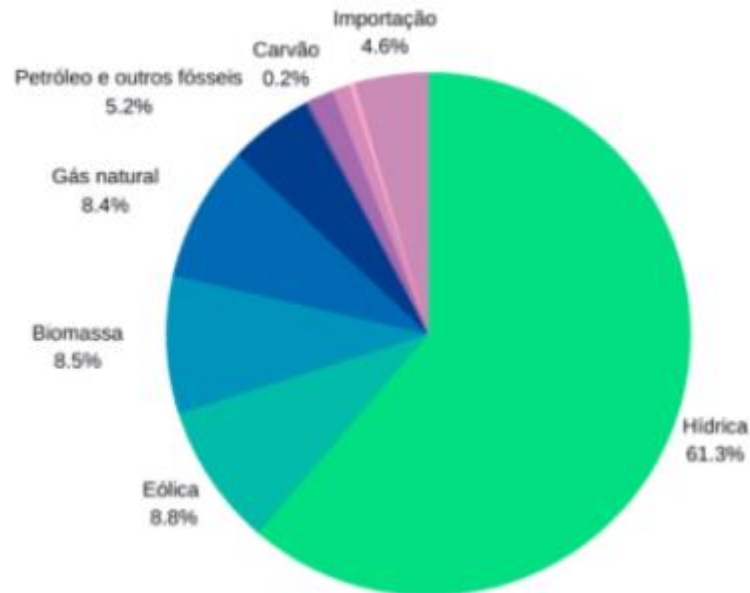
Com o mundo se modernizando progressivamente, indústrias e comércios buscam evoluir para se adaptar a novos cenários. Nessa perspectiva, é visto que, desde o século passado para os dias de hoje, cada vez mais processos dependem de sistemas frigoríficos para armazenamento e conservação de perecíveis, mecanismos de condicionamento de ar e também sistemas de arrefecimento.

Em estudo publicado em dezembro de 2018, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), divulgou que nos últimos 12 anos o consumo de energia elétrica devido a condicionamento de ar em residências brasileiras mais do que triplicou, atingindo 18,7 TWh no ano de 2017. Esse aumento ocorreu ao mesmo tempo em que a eficiência dos equipamentos aumentou, o que mostra um crescimento na quantidade de equipamentos, ou do tempo em que eles ficam em atividade neste mesmo período. De modo geral, este cenário demonstra o quão dependentes são os sistemas frigoríficos, em relação ao setor energético no nosso país. Tomando o Brasil como exemplo, a alta volatilidade da moeda faz com que o preço de setores como energético e de combustíveis tenha sido fortemente impactado pela inflação, o que pode ser visto com o aumento do preço dos preços entre 2020 até a data do presente estudo (2023). Assim, sistemas que apresentam baixa demanda por energia representam uma vantagem comercial e industrial, pois é um auxílio na redução de custo em cadeias produtivas e suas etapas subsequentes. Em tempo, é preciso considerar também que no Brasil, o setor energético é majoritariamente dependente do setor hídrico. De acordo com o MME (Ministério de Minas e Energia), mais de 60% da energia que compõe a matriz energética brasileira, é proveniente de fontes hídricas. Sendo assim, quando passamos por períodos de estiagem e seca a capacidade de produção energética neste segmento cai consideravelmente surgindo a necessidade de ativação de usinas termelétricas, alimentadas a óleo ou gás, cuja produção apresenta alto custo.

Frente ao exposto, faz-se necessário o estudo de novas tecnologias de sistemas de refrigeração de modo a minimizar o impacto do aumento dos preços das fontes energéticas sobre o custo da refrigeração nos diferentes setores. É neste contexto que se propõe o estudo encontrado neste trabalho sobre a tecnologia de refrigeração por adsorção

Na figura 1.1 a seguir pode-se ver a matriz energética do Brasil, cuja principal fonte de geração é o sistema hídrico.

Figura 1.1 - Matriz energética brasileira



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2018

Diferentemente dos ciclos de refrigeração por absorção (água/amônia e água/brometo de lítio) já aplicados no setor industrial, os ciclos de adsorção (fluido/sólido) ainda estão pouco maduros e observa-se um potencial de aplicação nos setores doméstico e comercial.

A maioria dos trabalhos publicados sobre refrigeração por adsorção utilizam o par água/zeólita ou sílica gel/água, o que resulta em performances muito baixas. Por outro lado, espera-se que a utilização de outros pares de adsorvente/adsorvato possa oferecer ciclos de maior performance termodinâmica.

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista o cenário e a oportunidade descrita, este trabalho propõe dar início a uma série de investigações no sentido de se compreender o funcionamento e limitações de sistemas de refrigeração por adsorção.

1.1.1 Objetivos gerais

Avaliar a capacidade de adsorção do par formiato de Metila/Carvão e levantar dados empíricos para um futuro projeto de um protótipo de reator de adsorção/dessorção.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar e revisar a bibliografia referente ao tema;
- Desenvolver uma sessão de testes a fim de avaliar a capacidade de adsorção do par selecionado.
- Determinar empiricamente a capacidade de adsorção m_{FM}/m_C (massa de formiato de metila pela massa de carvão);
- Determinar a taxa de adsorção do par fluido/carvão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dada as semelhanças dos ciclos e sua inter-relação histórica, será aqui apresentado, primeiramente, o ciclo de refrigeração por absorção e, em seguida, o ciclo de refrigeração por adsorção, objeto de estudo deste trabalho.

2.1 ABSORÇÃO

Máquinas térmicas de refrigeração são amplamente empregadas nos dias de hoje, quase sempre utilizando a compressão de vapor como meio de atingir o resfriamento de um ambiente e/ou objeto. Sabe-se, entretanto, que a refrigeração por compressão de vapor, por mais eficiente e prática que seja, não é a única alternativa para métodos

de refrigeração. Em localidades onde a energia elétrica é escassa, ou há oferta gratuita de calor, a utilização da refrigeração por absorção se torna interessante, pois pode-se fazer a ativação do ciclo utilizando-se apenas uma fonte térmica, seja solar, geotérmica, de biomassa ou mesmo o calor rejeitado de processos industriais (ASHRAE, 2001).

A absorção é um processo físico-químico onde uma substância na forma de vapor é absorvida por outra substância (chamada de absorvente). Quando uma substância evapora ela absorve calor latente do ambiente, promovendo resfriamento. É partindo dessa premissa que a refrigeração por absorção funciona (SANTOS e TORRES, 2002).

Em muitos aspectos esse ciclo se assemelha ao ciclo de compressão de vapor. Possui um evaporador, um condensador, válvula de expansão e um fluido refrigerante. Gradientes de pressão também são gerados e necessários para a ocorrência do ciclo. Contudo, uma das distinções fundamentais entre a refrigeração por compressão de vapor e a do ciclo por absorção é a forma como a pressão é gerada, uma vez que no ciclo de absorção não há compressor.

2.1.1 Ciclo de refrigeração por absorção

Partindo do evaporador, temos o refrigerante na forma de vapor de baixa pressão. Neste ambiente irá ocorrer o ganho de calor para o refrigerante, calor este, proveniente do ambiente e/ou objeto refrigerado. O fluido refrigerante se desloca do evaporador em direção ao absorvedor, onde irá se encontrar com a substância absorvedora. O fluido refrigerante será incorporado a essa substância, formando uma solução forte (MOHANTY, 2015).

Para que este processo seja possível é importante que haja um controle de temperatura nesta etapa, pois, caso a temperatura se eleve, o processo de absorção poderá cessar (ASHRAE, 2001).

Após isso, a solução forte seguirá em direção a uma bomba, onde irá sofrer um aumento de pressão. Este é o único ponto onde ocorrerá utilização de energia elétrica, pois bomba utilizada nessa etapa, para funcionamento, demandará corrente.

Depois de sofrer aumento de pressão, a solução se desloca para o gerador. Nesta etapa uma fonte térmica é necessária para abastecer o sistema com energia, possibilitando o funcionamento do ciclo.

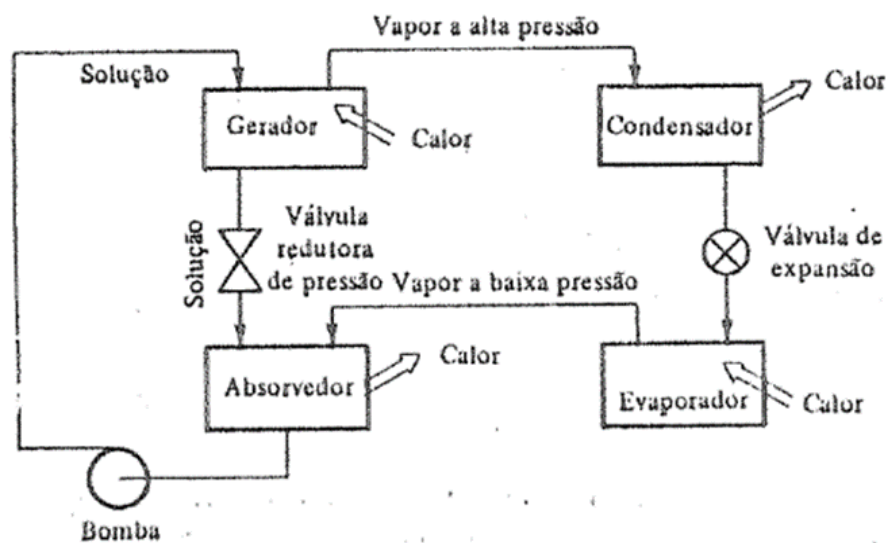
No gerador ocorre um incremento de calor ao sistema e assim, o fluido refrigerante outrora absorvido, volta para seu estado de vapor, e assim se dissocia do fluido absorvedor. O produto desta ação é uma solução fraca, pobre em refrigerante, que é levada novamente até o absorvedor, onde aguardará sua atuação no ciclo novamente.

O refrigerante, por sua vez, após sofrer aumento de pressão pela bomba, e receber calor no gerador, encontra-se em altas temperaturas. Neste estado, ele se desloca do gerador até o condensador, onde ocorrerá perda de calor para o meio externo, dessa forma se resfriando. Nota-se que essa etapa (condensador) é idêntica ao que ocorre em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. A esta altura, as principais diferenças entre estes ciclos já ocorreram, sendo as próximas etapas basicamente as mesmas.

Estando agora em uma temperatura mais baixa, o fluido perde pressão, e para isso é utilizada uma válvula de expansão. Com essa etapa concluída, o fluido refrigerante retorna para a forma que se encontrava no início do ciclo, voltando a ser um vapor de baixa pressão, se deslocando para o evaporador em seguida, onde o ciclo se reinicia.

Este é o ciclo de refrigeração por absorção (OLIVEIRA JÚNIOR, et al., 2004) e na figura 2.1 pode-se ver a esquematização deste processo.

Figura 2.1 - Ciclo de refrigeração por absorção



Fonte: Stoecker, et al., 1985

A característica distinta deste processo, como citado no terceiro parágrafo, é que a quantidade de trabalho necessário a ser incrementado no sistema para seu funcionamento, é de natureza ínfima, e pode ser obtido por meio de $-\int v dP$, e o volume específico do fluido refrigerante em seu estado líquido é significativamente menor que o volume específico do mesmo no estado de vapor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2018, 442).

2.2 REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

Uma alternativa para o processo de absorção, que para algumas situações, pode ser mais vantajosa, é a adsorção, que da mesma forma, se trata de um fenômeno de transferência de massa, onde:



A adsorção nada mais é que o mesmo processo anteriormente citado, porém ocorrendo com um par de substâncias onde o adsorvente é uma substância sólida.

2.2.1 O Fenômeno da Adsorção

A adsorção se trata de um fenômeno de natureza superficial (RUTHVEN, 1984). Enquanto no processo de absorção um fluido (vapor) é incorporado por outro (líquido), no processo de adsorção é um sólido que incorpora um fluido (vapor), em um processo que ocorre em razão da presença de microporos em sua superfície, os quais fornecem ao material a propriedade de reter fluidos em sua interface (NASCIMENTO et al, 2014). A capacidade que uma substância apresenta para adsorver, vai depender, além da sua natureza, de outras variáveis.

Se tratando de um fenômeno de interface, a área de superfície do sólido poroso envolvido é um dos principais fatores na definição da capacidade adsorviva. Quanto maior a superfície de contato entre o adsorvente e o adsorvato (fluido refrigerante), mais adsorção poderá ocorrer, pois mais micro poros estarão envolvidos no processo (MASEL, 1996).

Pressão e temperatura são outras variáveis de grande importância para se considerar afim de estabelecer a capacidade de adsorção do par empregado no ciclo (NASCIMENTO, 2014).

A natureza de um processo de adsorção pode ser física ou química. É importante fazer destaque a este aspecto: Como se trata de um processo de refrigeração, e cíclico, é de interesse que este processo seja reversível. Nesse sentido, a adsorção química, ou quimissorção, não serve para este propósito.

A quimissorção envolve reações químicas, mais especificamente ligações covalentes (NASCIMENTO et al, 2014), ou seja, ocorrendo compartilhamento de elétrons, algo que por sua vez acaba afetando as propriedades físico-químicas das substâncias envolvidas, tornando este um processo muitas vezes irreversível, e dessa forma, inviável para um fenômeno cíclico. Tendo isso em mente, por mais que o caso o qual está sendo tratado seja de um ciclo intermitente, não ocorrendo de forma contínua, em um dado instante, o ciclo terá de se repetir.

Com este fato em vista, para este estudo, o processo de adsorção necessário deverá ser de origem puramente física, e quando se fala de adsorção de natureza física, refere-se a fisissorção. Este fenômeno ocorre em razão principalmente de forças de Van der Waals, que em superfícies sólidas, criam um campo de força que aprisiona as moléculas a serem adsorvidas (ANDIA, 2009). Essa força é de origem eletrostática e ocorre em função da polaridade das partículas. Basicamente existem três possibilidades: Uma interação dipolo-dipolo (onde os polos opostos das moléculas se atraem), uma interação dipolo-dipolo induzido (quando ocorre a deformação da nuvem eletrônica de uma molécula, causada pela interação polar-apolar), ou uma dipolo instantâneo-dipolo induzido (causada pela deformação da nuvem eletrônica devido a uma mudança instantânea da polaridade de uma molécula). Em todos estes casos trata-se de forças que ocorrem em razão dos gradientes de densidade eletrônica de uma molécula, sem alterar suas propriedades químicas. Em situações de adsorção física o calor de adsorção envolvido é inferior a 20 kJ/mol e este fato faz com que o processo de dessorção (separação entre o sólido poroso e o adsorvente) seja de mais fácil ocorrência (NASCIMENTO et al, 2014).

Uma maneira de se conceituar a adsorção de natureza física, é que se trata de um fenômeno que ocorre quando a força de coesão molecular de uma substância na fase

fluida e superfície sólida é numericamente maior que a força de coesão das moléculas de fase fluida entre si (CLAUDINO, 2003).

A adsorção possui vários parâmetros que irão influenciar os seus resultados, e é importante tê-los em vista para um bom entendimento e adequada reprodução do processo. Além de necessitar que o adsorvente possua sítios em sua superfície para que o fluido seja incorporado as propriedades químicas (como já citado) também exercem influência, bem como as condições nas quais o processo está sendo realizado.

- Área Superficial

No que tange a intensidade da adsorção, ela será proporcional a área da face externa do sólido poroso. Segundo NASCIMENTO et.al. (2014), pelo fato de estarmos tratando de um fenômeno de superfície, a parte interna da partícula do adsorvente não fica disposta para adsorção (M. SEKAR, 2004 Apud NASCIMENTO et.al. 2014). Sendo assim, quanto maior a área participante do processo (superfície), mais microporos estarão envolvidos, e assim, maior a capacidade de adsorção, visto que a superfície de contato sólido-fluido será maior.

- Temperatura

A temperatura de ocorrência do processo é não apenas um fator de influência, mas também, um fator de estudo para o dimensionamento do sistema. Vale ressaltar que a dessorção ocorre justamente em função do aumento de temperatura devido ao incremento de calor oferecido ao sólido poroso pelo gerador.

O aumento deste parâmetro oferece uma diminuição na máxima capacidade de adsorção (BESINELLA, et al., 2009 Apud Khattri e Singh, 2000). Ao aumentar a temperatura, acaba-se por afetar o potencial químico do adsorvato, bem como sua solubilidade.

- Adsorvente e Adsorvato

As propriedades físico-químicas do par adsorvente-adsorvato escolhidos são fatores de grande influência. O adsorvente precisa, por necessidade, tratar-se de um

sólido poroso. ALBUQUERQUE (2005), afirma que a dimensão dos poros presentes no adsorvente irá impactar o quão as moléculas do adsorvato terão acesso à superfície interna do sólido.

Outro fator que influi grande relevância é a polaridade. Como dito, pelo fato de nosso estudo utilizar como base a adsorção por fisissorção, as forças de Van der Waals terão a responsabilidade de causar o fenômeno. Uma vez que essa força é de origem eletrostática e possui as interações polares como causa, tem-se o entendimento da importância da polaridade. Os adsorventes polares são nomeados hidrofílicos, pois interagem prontamente com a água. Um exemplo de adsorvente dessa espécie são os aluminossilicatos, como zeólitas (ALBUQUERQUE, 2005). Já os adsorventes apolares são chamados de hidrofóbicos, como o carvão ativado, e interagem pouco, ou não interagem, com a água.

- Acidez e Basicidade

O pH das substâncias utilizadas é outro fator que possui influência nos resultados. SILVA et.al. (2019), realizaram um estudo sobre a influência do pH na adsorção de um corante utilizando a zeólita mordenita. O que se viu nos resultados é que este aluminossilicato apresentou melhor desempenho em meios fortemente ácidos, com pH 1.

A importância do pH na adsorção (soluções aquosas) é devido ao fato de que este parâmetro determina a carga de superfície do adsorvente, o que vai influenciar as interações de Van der Waals no par adsorvente adsorvato (Nascimento, et al., 2014 Apud Toledo, et al., 2005).

2.2.2 Isotermas de adsorção

Para que um fenômeno físico-químico, como é o caso da adsorção, seja bem-sucedido, a definição de ferramentas matemáticas e estabelecimento de parâmetros é parte importante do processo. Utilizando o modelo matemático ideal, é possível descrever o fenômeno e obter dados capazes de demonstrar que o processo em questão de fato pode ser denominado físico e reversível.

É possível afirmar que, quando um adsorvente entra em contato com uma massa de fluido contendo uma determinada concentração de adsorvato, o processo

de adsorção irá ocorrer até o instante que atingir o equilíbrio. Posto isto, o estado de equilíbrio é definido como quando a velocidade de adsorção e de dessorção são iguais, e, assim, nessa situação não existe taxa líquida de nenhum dos dois fenômenos ocorrendo (NASCIMENTO et.al. 2014).

Essas informações são importantes, pois a partir delas, pode-se concluir que o que definirá a capacidade de adsorção que um adsorvente possui em relação a um adsorvato é, justamente, quando o equilíbrio é atingido.

Isotermas de adsorção são relações matemáticas capazes de descrever a adsorção de solutos por sólidos, a uma temperatura constante (ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú, 1996). Basicamente, uma isoterma mostra a quantidade de adsorvato que foi incorporada a um adsorvente. Essas equações são obtidas de maneira empírica, adicionando uma determinada quantidade de soluto a um sistema que contém um adsorvente. A partir dos dados obtidos, elabora-se as equações chamadas de isotermas de adsorção.

- Isoterma de Dubinin-Radushkevich

NASCIMENTO et.al (2014), trata a equação de Dubinin-Radushkevich como um instrumento bastante satisfatório para descrever o equilíbrio de adsorção de um composto orgânico em fase gasosa, sobre um adsorvente sólido. Apesar dessa definição, Albuquerque (2005) obteve resultados consistentes utilizando este modelo matemático para a análise de um sistema de refrigeração utilizando o par sílica-gel e água, sendo o adsorvato água um composto inorgânico.

Sendo assim, independente do par o qual venha-se a optar por fazer uso em um futuro protótipo, a isoterma de Dubinin-Radushkevich pode ser tratada como uma ferramenta matemática interessante para auxiliar na descrição do fenômeno, e ajudar a obter dados consistentes a fim de utilizá-los para fins de dimensionamento.

Em sua forma não linear, pode-se escrever a equação de Dubinin conforme o que se segue:

$$q_e = q_m \exp(-k\varepsilon^2) \quad (2.2)$$

Sendo:

q_{eq}	Capacidade de adsorção no equilíbrio (mol/g)
q_m	Adsorção máxima teórica (mol/g)
k	Constante relacionada a energia de adsorção
ε	Potencial de Polanyi

Onde ε , por sua vez, pode ser obtido como:

$$\varepsilon = RT \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (2.3)$$

Onde:

R	Constante dos Gases Ideais ($J/(mol \cdot K)$)
T	Temperatura (K)
C_e	Concentração da espécie química (mol/L)

- Isoterma de Langmuir

O modelo matemático de Langmuir é um dos mais comumente utilizados a fim de representar processos de adsorção de gases por sólidos (ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú, 1996). Para esta isoterma, alguns pressupostos precisam ser feitos.

Para NASCIMENTO, et.al (2014)

- A superfície do sólido é uniforme, os sítios de adsorção possuem energia equivalente;
- Os sítios possuem um número definido;
- A adsorção ocorre em uma monocamada.

Já para Alleoni, Luis Reynaldo Ferracciú, (1996)

- A superfície onde ocorrerá a adsorção é homogênea, a adsorção é constante e independente da extensão da cobertura da superfície;
- A adsorção ocorre em sítios específicos, onde as moléculas de soluto não interagem uma com a outra;
- A máxima adsorção é atingida quando toda a superfície do sólido se encontrar coberta por uma monocamada.

Como pode-se notar, existe compatibilidade entre os pressupostos de ambos os autores.

A seguir, é mostrada a equação:

$$q = \frac{q_{\max} K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (2.4)$$

Onde:

- q Quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg/g);
- q_{\max} Capacidade máxima de adsorção (mg/g);
- K_L Constante de interação adsorvato/adsorvente (L/mg);
- C_{eq} Concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L).

Sendo assim, para as situações que vão de encontro com os pressupostos mostrados, é adequada a aplicação da Isoterma de Langmuir.

- Isoterma de Freundlich

Este modelo matemático é útil para situações não ideais. Ao contrário da equação de Langmuir, essa isoterma descreve processos de adsorção onde o fenômeno ocorre em multicamada, e em superfícies heterogêneas (NASCIMENTO et.al, 2014). Este modelo também pode ser utilizado para processos de adsorção com soluções altamente diluídas (ALLEONI, 1996).

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.5)$$

Ou de forma linear:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad (2.6)$$

Onde:

- q_e Quantidade do soluto (mg/g);
 C_{eq} Concentração do adsorvato no equilíbrio (mg/L);
 K_F Constante de capacidade de adsorção de Freundlich (mg/g);
 $\frac{1}{n}$ Constante vinculada à heterogeneidade da superfície.

Para este modelo, é necessário fazer um adendo. Analisando a equação, pode-se ver que é matematicamente possível q_e continuar aumentando conforme C_e aumenta. No entanto, para o processo de adsorção, isso não é algo fisicamente possível. Sendo assim, processos com dados experimentais que forneçam altos valores de C_e não são bem ajustáveis a esta equação (COONEY, 1999 Apud NASCIMENTO, 2014).

2.2.3 Ciclo de refrigeração por adsorção

Um ciclo de refrigeração por adsorção, pode ser compreendido em duas etapas distintas (ARAÚJO, André Luiz De Souza et al). Uma delas, a adsorção, é quando o sólido poroso entra em contato com o fluido refrigerante, e o incorpora superficialmente em razão das interações de Van der Waals. Neste processo, o fluido refrigerante na forma de vapor, perde calor latente mudando de fase. Este calor perdido, por sua vez, é rejeitado para um sumidouro de calor. A outra etapa é o aquecimento, quando a solução adsorvato-adsorvente recebe calor de uma fonte, o que tem por consequência a dessorção. Nesta etapa do processo, o fluido, até então incorporado à superfície porosa, ganha calor latente, e assim se dissocia do sólido voltando a forma de vapor. Como dito anteriormente, como o fenômeno aqui tratado é o da adsorção física (ideal para um ciclo reversível), a quantidade de calor necessária para sua ativação é menor, pois a coesão entre a superfície sólida e o fluido adsorvido é considerada fraca, sendo, portanto, de fácil interrupção.

Como se trata de um processo dividido em duas etapas, (adsorção e dessorção), este ciclo deve ser intermitente. Sendo assim, para que o resfriamento ocorra de maneira contínua é necessário que haja pelo menos dois reatores no sistema, atuando ao mesmo tempo, porém em etapas distintas.

Detalhando então, para o bom funcionamento, é necessário no ciclo:

- Um evaporador;
- Um condensador;
- Pelo menos dois reatores;
- Um sumidouro de calor;
- Um gerador (fonte de calor);
- Uma válvula de expansão;
- Quatro válvulas de controle de fluxo.

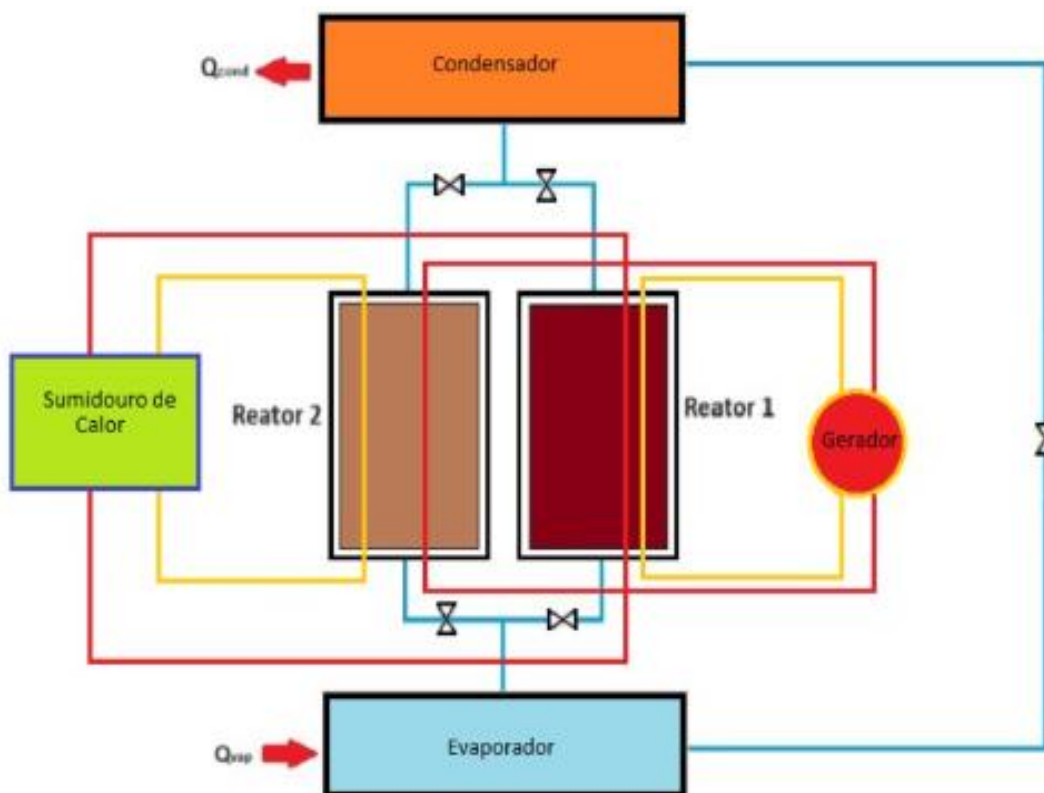
Com base nos princípios explorados nos capítulos 2.2.1, pode-se idealizar o funcionamento de um ciclo de refrigeração por adsorção.

Partindo do evaporador temos nele fluido refrigerante de uma mistura de líquido e vapor saturado. Por meio de um trocador, ocorrerá ganho de calor latente se tornando assim o refrigerante vapor saturado. Este ganho de calor, destaca-se, é proveniente do ambiente que está sendo refrigerado. Após essa mudança de fase, o fluido, agora vapor, se dirige até um dos reatores onde irá de encontro ao sólido poroso. Em função da interação de Van der Waals, inicia-se o processo de adsorção, onde as moléculas do fluido começam a se alojar nos sítios presentes na superfície do sólido. Com isso, a pressão manométrica, que era negativa no reator, e aumentou com a entrada do refrigerante, torna a diminuir. É essa redução de pressão que promove o gradiente responsável por fazer o fluido escoar do evaporador até o reator. Ao passo que o vapor vai sendo adsorvido pela superfície porosa, ele vai liberando calor latente que por sua vez, é rejeitado para um sumidouro de calor. Pode-se dizer que o processo assumiu um estado de equilíbrio quando a adsorção cessar, o que ocorre quando se alcançar uma pressão de estabilização, baixa o suficiente para que a adsorção não ocorra. Até este instante, o processo que ocorre neste reator era o de adsorção, no entanto tem-se dois reatores no sistema, e no outro ocorre, paralelamente, o processo de dessorção. Entre o evaporador e os reatores há duas válvulas, uma para cada reator, sendo elas responsáveis por alternar para qual reator o fluido irá escoar. O fluido irá sempre escoar para o reator que está ocorrendo o processo de adsorção devido à baixa pressão ali presente, portanto neste reator a válvula deve estar aberta. Já, no reator que estiver ocorrendo a dessorção, a válvula estará fechada, obstruindo a passagem de fluido. Portanto as válvulas dos reatores trabalham abrindo e fechando

alternadamente, de acordo com o processo físico que estiver ocorrendo dentro de seu respectivo reator, podendo ser este, um processo automatizado.

Quando a adsorção cessa, a válvula entre o evaporador e o reator se fecha e abre-se a válvula entre o reator e o condensador (no reator paralelo, ocorre o processo contrário). O gerador presente no sistema começa a incrementar calor ao reator, e inicia-se o processo de dessorção. Aqui, conforme o par adsorvente-adsorvato vai recebendo calor, a dissociação entre ambos vai ocorrendo, e com isso a pressão vai crescendo, formando um novo pico de pressão que irá forçar o fluido a escoar até o condensador. No condensador, este fluido na forma de vapor saturado, interagindo com um trocador, vai perder calor latente para o meio externo, passando de vapor saturado para líquido saturado. Este, por sua vez, segue no sistema, escoando até a válvula de expansão, responsável por diminuir a pressão do fluido (aumentando seu volume e diminuindo a temperatura em um processo adiabático), gerando uma mistura líquido-vapor, antes de ele retornar para o evaporador.

Figura 2.2 - Ciclo de refrigeração por Adsorção



Fonte: Do autor, 2023

Pode-se ver, portanto, que a única diferença do ciclo de refrigeração por adsorção para o de compressão de vapor, é a substituição do compressor, por um par de reatores e 1 gerador. Antes e depois dos processos que ocorrem nos reatores, é possível destacar que ambos os sistemas são iguais.

2.2.4 Limitações

Uma das questões expostas em estudos feitos sobre refrigeração por adsorção, se trata das limitações acerca dos resultados obtidos. MENDES, 2002, conclui que em condições ideais seria possível liberar ar de um sistema implantado em um veículo, a temperaturas entre 7 e 10°C. Embora seja suficiente para proporcionar conforto térmico, o tempo necessário para se alcançar tais temperaturas seria extenso, em torno de 300 minutos. Em ciclo reduzido de 100 minutos, a mesma autora demonstra ser possível chegar a temperaturas entre 15 e 25°C no evaporador, algo insuficiente para proporcionar o mesmo conforto térmico de um ar condicionado convencional.

Quando se utiliza água, por exemplo, como refrigerante, pelo fato de não ser tão volátil quanto outros fluidos, é necessário trabalhar com valores de pressão extremamente baixos para conseguir promover evaporação mais facilmente. Ainda sobre o uso de água como refrigerante, precisa-se tomar cuidado com as faixas de temperatura trabalhadas, para evitar cristalização e solidificação (MENNA, 2008). Essa ocorrência, evidentemente, pode obstruir o circuito de escoamento do fluido, sendo indesejável. Embora essa observação seja feita para um sistema de absorção, e não de adsorção, como o princípio de funcionamento é muito semelhante, também se mantém válida.

Com isso, o estudo de outros pares, especialmente que não utilizem água como adsorvato, possivelmente pode trazer opções que possibilitem atingir temperaturas desejáveis em um menor espaço de tempo, ou mesmo em maior escala (temperaturas mais baixas).

Outra limitação encontrada ao tentar desenvolver ciclos de refrigeração com uso do princípio da adsorção é o tamanho, uma vez que para atingir variações relevantes de temperatura, é necessário a utilização de grandes quantidades de adsorvente e adsorvato (MENDES, 2022).

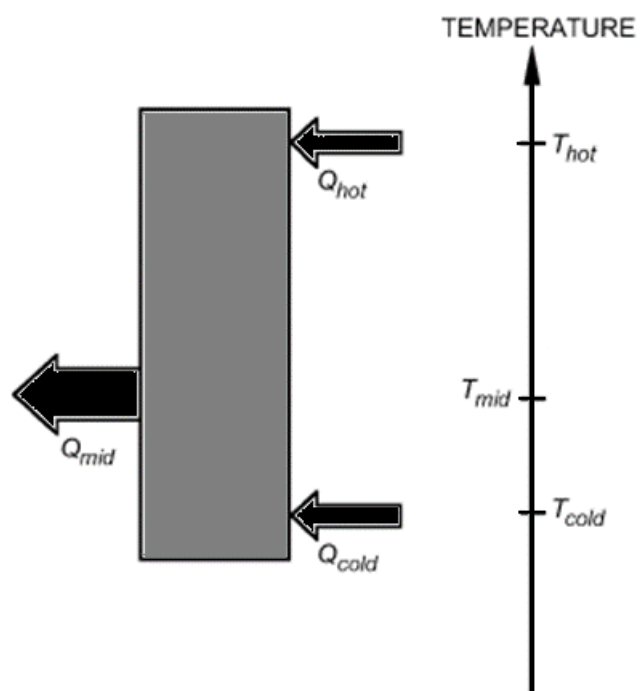
Espera-se que a exploração de outras alternativas de adsorvente/adsorvato possa trazer alguma solução para parte destes problemas.

2.3 COEFICIENTE DE PERFORMANCE

Uma das informações mais importantes para se analisar os sistemas de refrigeração é seu Coeficiente de Performance (COP). Ainda que o presente estudo não esteja na fase de construir e testar um sistema completo de refrigeração por adsorção, é importante apresentar-se o modelamento matemático que permite calcular o COP de tais sistemas. Nesta fase da investigação, será apresentado apenas o modelamento do COP ideal (ASHRAE, 2001), ou seja, do refrigerador que opera conforme processos reversíveis.

Tomando o esquema da figura 2.3 como a representação da máquina de refrigeração por adsorção ideal, Q_{hot} representa o calor fornecido da fonte quente ao sistema na temperatura T_{hot} , Q_{cold} representa o calor fornecido da fonte fria ao sistema na temperatura T_{cold} , ou seja, a capacidade de refrigeração, e Q_{mid} representa o calor rejeitado do sistema para o meio ambiente na temperatura T_{mid} .

Figura 2.3 - Representação de uma máquina de refrigeração por adsorção



Fonte: ASHRAE, 2001

A equação 2.7 representa a aplicação da 1ª Lei da Termodinâmica para este sistema de refrigeração. Já a equação 2.8 representa a aplicação da 2ª Lei da Termodinâmica para tal sistema, indicando a condição termodinâmica para a viabilidade técnica do sistema, conforme determina a desigualdade de Clausius (ASHRAE, 2001).

$$Q_{hot} + Q_{cold} = Q_{mid} \quad (2.7)$$

$$\frac{Q_{hot}}{T_{hot}} + \frac{Q_{cold}}{T_{cold}} + \frac{Q_{mid}}{T_{mid}} \geq 0 \quad (2.8)$$

Considerando que o coeficiente de performance deste sistema é a razão da capacidade de refrigeração, Q_{cold} , pelo calor fornecido para operação do sistema, Q_{hot} , e ainda, a equivalência entre as razões dos calores trocados e das temperaturas absolutas dos reservatórios térmicos para processos reversíveis, proposta por Lord Kelvin, $Q_c/Q_h = T_c/T_h$ obtém-se a seguinte equação

$$COP_{ideal} = \frac{Q_{cold}}{Q_{hot}} = \frac{T_{hot}-T_{mid}}{T_{hot}} \cdot \frac{T_{cold}}{T_{mid}-T_{cold}} \quad (2.9)$$

3 METODOLOGIA

Como o presente estudo trata do projeto de uma câmara de testes para verificar ideias de potencializar a refrigeração por adsorção, segue adiante a metodologia planejada para este projeto.

3.1 CÂMARA DE TESTES

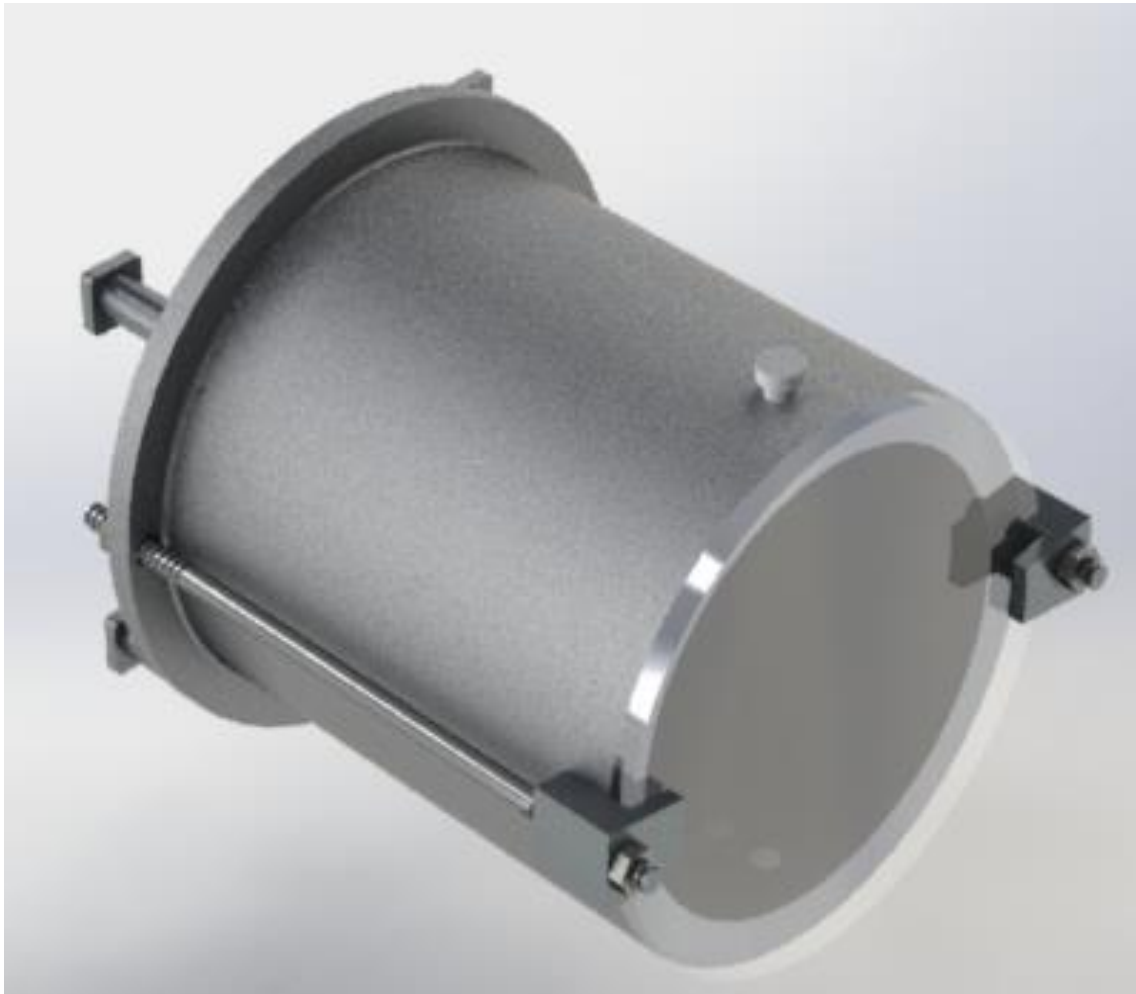
Para que os testes pretendidos sejam realizados, foi planejada a confecção de uma câmara de testes que servirá para ser feito um vácuo interno, a fim de criar um ambiente de baixa pressão. Este ambiente deverá ser adequado para forçar uma evaporação do fluido selecionado, e o carvão, que estará dentro da câmara, deverá adsorver o vapor. Dessa maneira, será possível a obtenção de dados empíricos.

3.1.1 Modelo Conceitual

A ideia do modelo conceitual é obter algo simples e funcional. Ao mesmo tempo, é interessante conseguir ver dentro da câmara de teste, e também que ela possua resistência para suportar os testes.

A seguir, é possível ver como ficou o modelo conceitual

Figura 3.1 - Modelo Conceitual Vista Isométrica



Fonte: Do autor, 2023

Figura 3.2 - Modelo Conceitual Vista Frontal



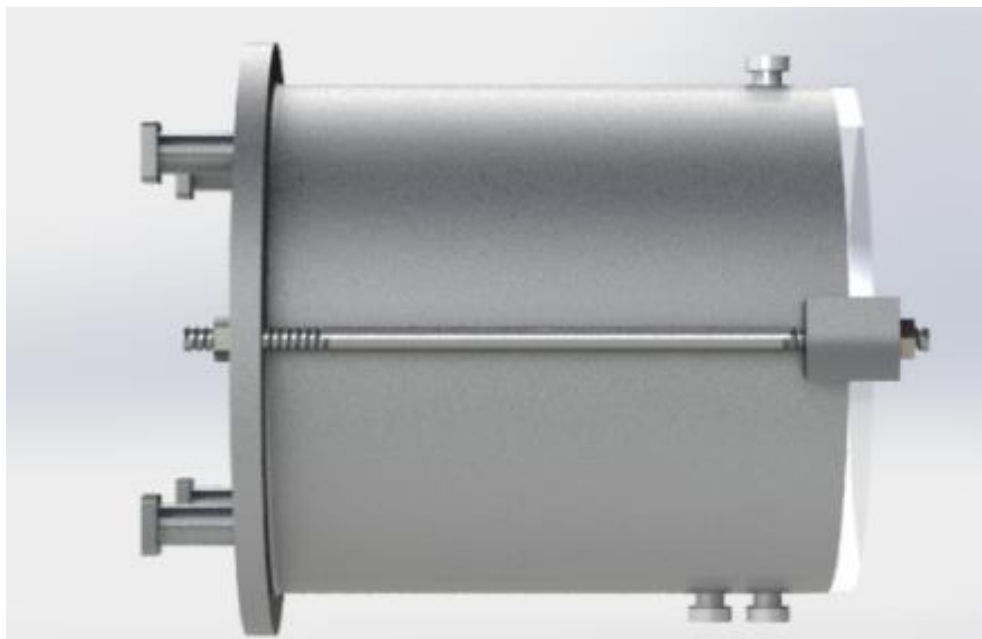
Fonte: Do autor, 2023

Figura 3.3 - Modelo Conceitual Vista Dimétrica



Fonte: Do autor, 2023

Figura 3.4 - Modelo Conceitual Vista Lateral



Fonte: Do autor, 2023

Nas imagens, é possível notar que a tampa feita de um material transparente, atende ao interesse de se visualizar dentro da câmara de teste os processos ocorrendo.

É importante destacar também, que essa é uma ideia inicial, e que durante o processo de fabricação poderá passar por alteração e/ou adaptações.

3.1.2 Dimensionamento da câmara

Para a construção da sessão de testes, será utilizado aço. Além de ser um metal com uma resistência bastante elevada, convenientemente há uma peça à disposição na faculdade, a qual poderá ser adaptada para uso.

Para essa peça, será cortado um comprimento adequado, aproveitando a parte traseira para fazer um flange, e manter um comprimento para atingir um volume de aproximadamente 1 litro. Levando em conta que o diâmetro externo da peça é de cerca de 130mm, baseando-se na concepção de vasos de pressão de paredes finas, apresentada pelo livro “Resistência dos Materiais” de R.C. Hibbeler, tem-se a seguinte fórmula

$$\sigma_1 = \frac{pr}{s} \quad (3.1)$$

Onde σ_1 se trata da tensão circunferencial (no sentido do aro) do cilindro, p se trata da pressão manométrica (interna), r é o raio interno do cilindro e s é a espessura da parede.

Ainda, na mesma sessão da obra é fornecida a fórmula para a tensão longitudinal. No entanto, de acordo com a matemática exposta no livro, pode-se concluir que a tensão longitudinal sempre será exatamente a metade da tensão circunferencial. Assim, se o cilindro resistir a tensão circunferencial, automaticamente também irá resistir a tensão longitudinal.

Os valores medidos para as dimensões da câmara de teste podem ser vistos na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Dimensões da Câmara de Testes

Diâmetro externo (mm)	130,5
Diâmetro interno (mm)	116
Espessura de parede (mm)	7,5
Espessura do flange traseiro (mm)	7,25
Comprimento (mm)	101

Fonte: Do autor, 2023

Aplicando a fórmula do cálculo de tensão para vasos de pressão para os valores expostos, e considerando para fins de dimensionamento a espessura da parede como 7mm, e uma pressão manométrica de 1,01325 Bar (pensando em um vácuo absoluto, uma situação hipotética, e a pior possível), para o valor de σ_1 é obtido 0,83955 Mpa

Tabela 3.2 - Tensão e Parâmetros de Cálculo

Tensão (Mpa)	0,83955
Pressão (Mpa)	0,101325
Raio (mm)	58
espessura (mm)	7

Fonte: Do autor, 2023

Sabendo que a tensão longitudinal será a metade deste valor, pode-se estabelecer o valor de σ_2 em 0,41977

Utilizando o Critério de Falha de Von Mises conforme a equação 3.2

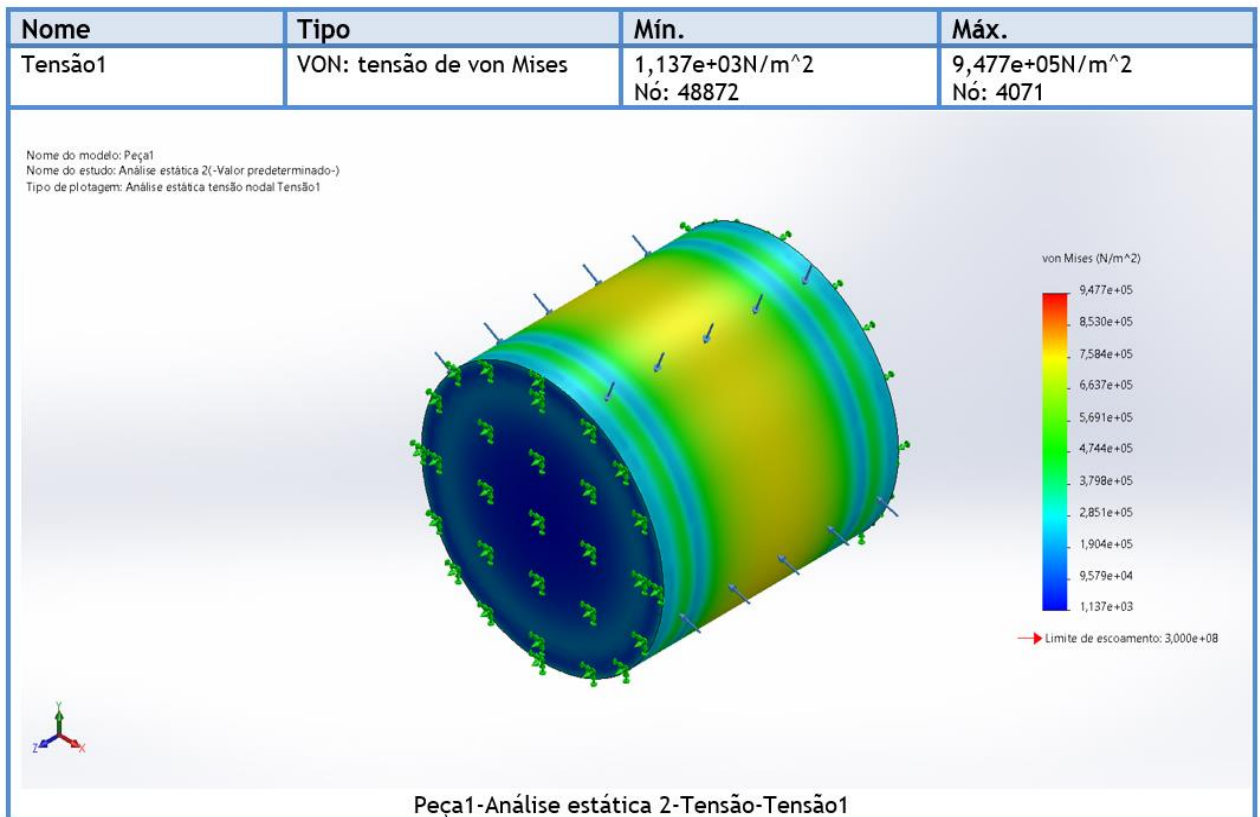
$$\sigma_1^2 + \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2^2 < \sigma_e^2 \quad (3.2)$$

Sabendo que σ_e se trata do limite de escoamento do aço 1020, cujo valor é de 300 MPa, basta substituir os valores na fórmula anterior, e concluir que a condição é atendida

Assim sendo, a câmara de testes não terá nenhum problema em resistir às tensões proporcionadas pela diferença da pressão interna e da atmosfera.

Fazendo a simulação no SolidWorks, é visto que a maior tensão, previsivelmente, ocorrerá no centro do cilindro. Como o software utilizou o mesmo critério de cálculo (critério de falha de Von Mises), pode ser feita uma comparação com os resultados para assim se obter a validade matemática.

Figura 3.5 - Tensão de Von Mises

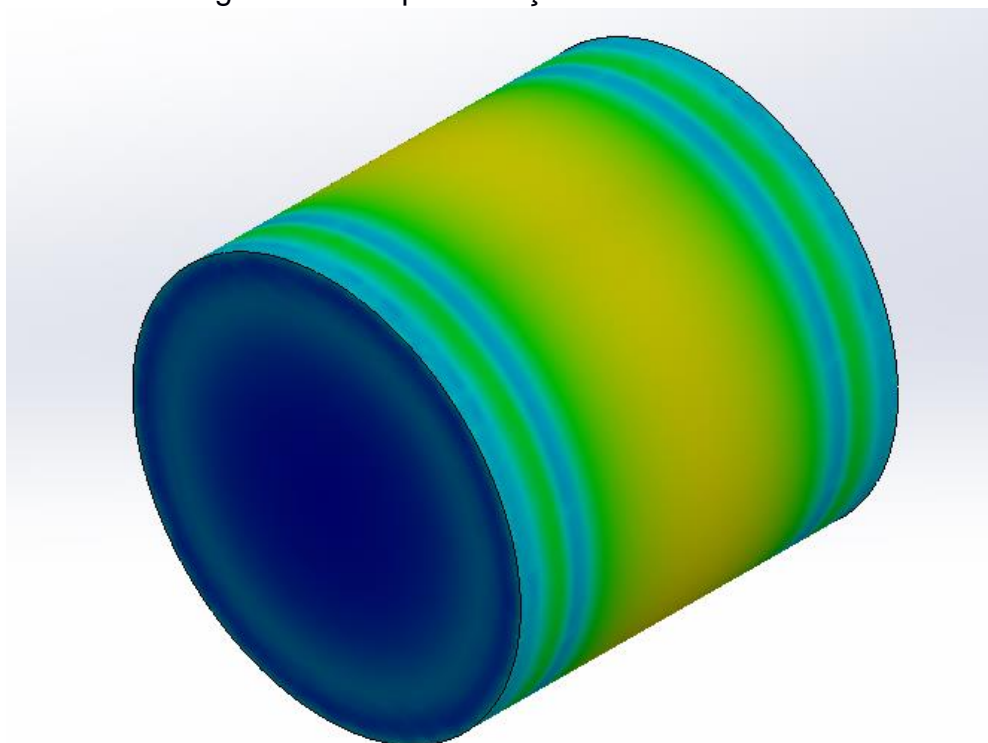


Fonte: Do autor, 2023

Conforme a figura 3.5, pode-se notar a diferença de valores obtidos para tensão de Von Mises é muito pequena, e pode ser atribuída à arredondamentos. O Software fornece um valor máximo de $9,477 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, o qual ao ser convertido para MPa , se torna $0,9477 \text{ MPa}$, muito próximo dos $0,93864$ obtidos nos cálculos. Assim sendo, pode-se ter certeza da assertividade dos resultados.

Na figura 3.6, é mostrada uma representação simplificada das tensões na câmara de testes. A fim de economizar trabalho computacional, e simplificar a simulação, a mesma foi feita separadamente, neste primeiro momento somente a tensão no cilindro, não considerando as paredes planas presentes no plano ortogonal à longitude da peça.

Figura 3.6 - Representação de tensões



Fonte: Do autor, 2023

Agora precisa-se verificar as partes remanescentes da sessão de testes. Além da parte cilíndrica, haverá também outras duas paredes ortogonais à longitude da peça fechando a câmara, sendo uma de aço com 13 mm de espessura, e outra de policarbonato com $7,5 \text{ mm}$ de espessura. Tendo em vista as propriedades mecânicas

do Policarbonato e do aço, pode-se concluir que se a tampa plástica resistir às tensões, o aço também resistirá, com facilidade. Assim sendo, basta calcular as tensões exercidas na tampa de policarbonato para ter certeza que a câmara possui integridade suficiente para os testes.

Por meio da equação 3.3, é calculada a tensão máxima que será exercida na parede de policarbonato:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (3.3)$$

Onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ se trata da tensão máxima, M o momento máximo resultante obtido pelo diagrama de momento fletor e I o momento de inércia, obtido pela fórmula

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.4)$$

Fazendo um corte no centroide da tampa de policarbonato e observando por essa perspectiva, será obtida uma geometria semelhante a uma viga. Sabendo que a área da tampa que estará sujeita às tensões é equivalente a seção transversal do cilindro, sabe-se que seu comprimento é de 116 mm.

Para descobrir o momento fletor, será necessário primeiro saber qual a força resultante exercida pela atmosfera sobre a tampa. Como será considerado que a pressão interna da câmara será de vácuo absoluto (pior situação possível para fins de dimensionamento), a força resultante é dada por:

$$F_r = pA \quad (3.5)$$

Onde 101325 é o valor da pressão atmosférica em Pascal, e 0,058 é o raio interno do cilindro em metros.

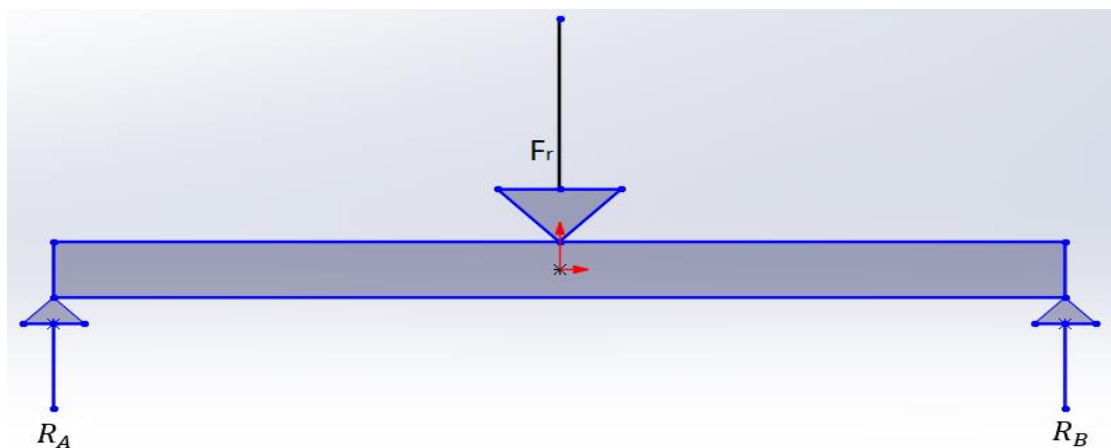
Assim:

$$F_r = 1070,8347 \text{ N}$$

Sabendo que essa força estará localizada aproximadamente no centro da peça, é possível, por meio de uma somatória de força e momento, adquirir os valores de

reação da parede do cilindro sobre a peça de policarbonato no eixo do centroide. Sendo a peça uniformemente cilíndrica, os valores de reação serão metade do valor da força resultante, em cada lado. De maneira ilustrada, são mostradas as forças de acordo com a imagem 3.7, onde a força central da imagem é F_r e as forças nas extremidades são as resultantes R_A e R_B .

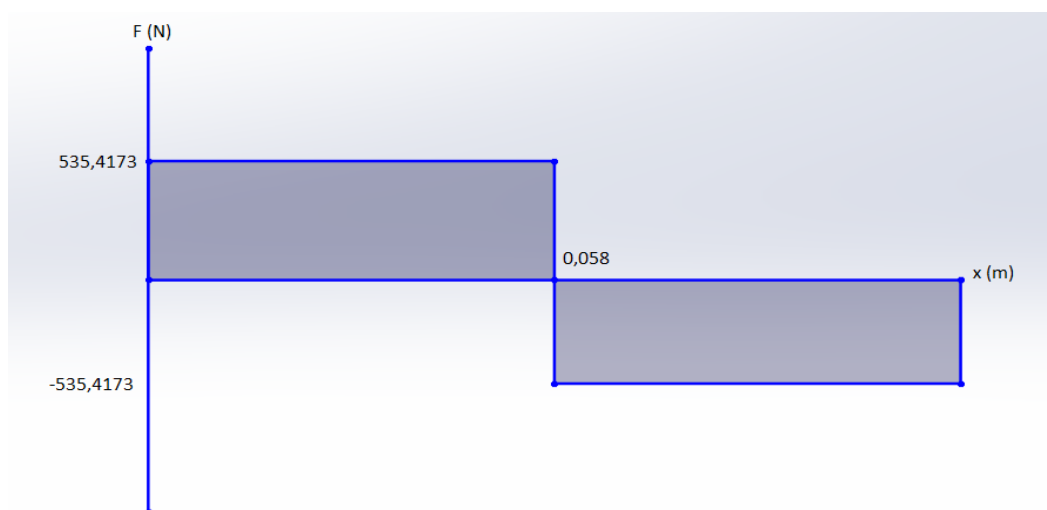
Figura 3.7 - Atuação de forças



Fonte: Do autor, 2023

O resultado para cada força de reação é de $535,4173 \text{ N}$. A seguir é mostrado o diagrama de $\sum F = 0$

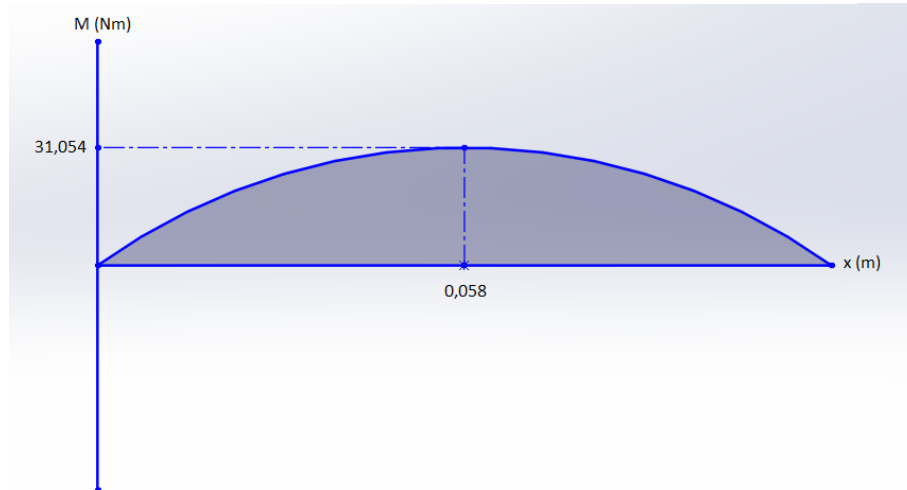
Figura 3.8 - Diagrama ΣF



Fonte: Do autor, 2023

Para esboçar o diagrama de momento fletor, pode-se calcular a área da parte hachurada da figura 3.8.

Figura 3.9 - Diagrama do Momento Fletor



Fonte: Do autor, 2023

Com isso, o momento máximo imposto sobre a tampa de policarbonato será de 31,0542 Nm.

Para calcular o momento de inércia da tampa

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.6)$$

Como $b = 0,116$ metros e $h = 0,0075$ metros.

$$I = 4 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Aplicando na formulação, onde a linha neutra está no meio da peça, e para $c = 0,00375$ m, utilizando os valores de momento de inércia e momento máximo encontrados, chega-se a

$$\sigma_{\text{máx}} = 29,1133 \text{ MPa}$$

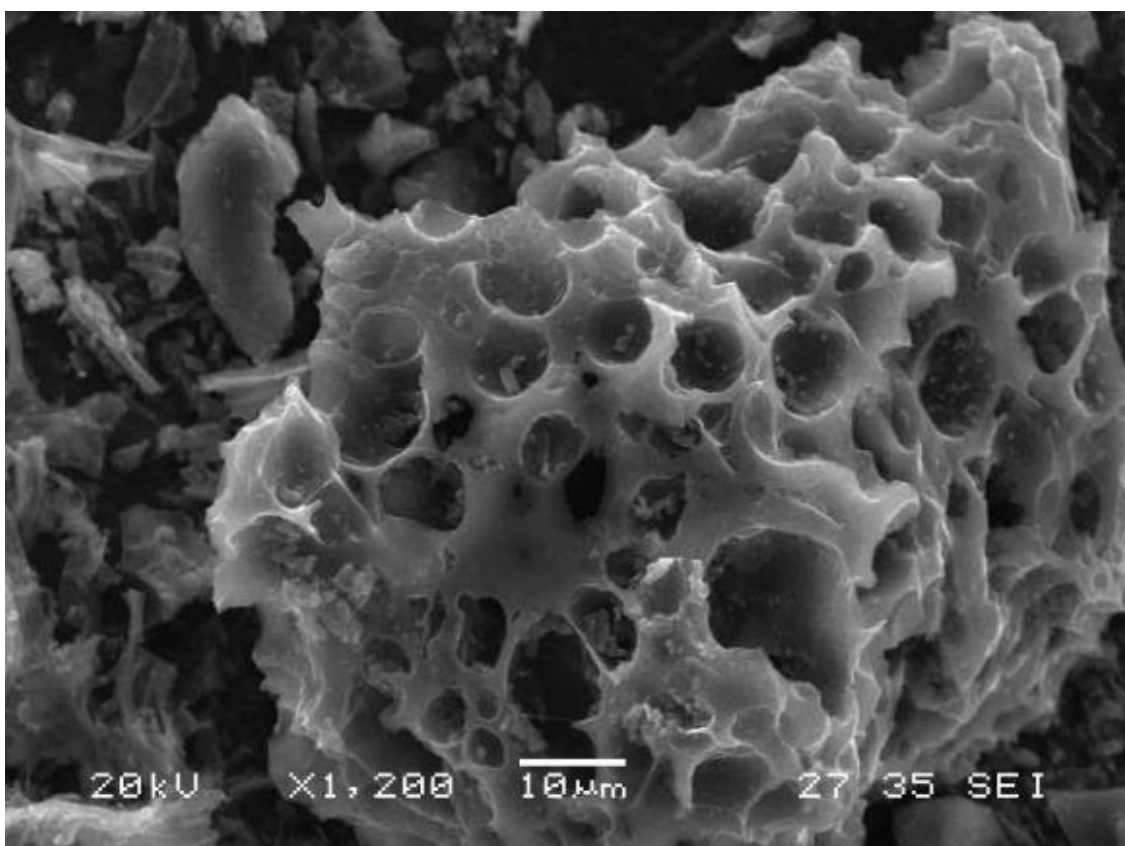
Considerando que a Resistência à tração do policarbonato no escoamento é de aproximadamente 70 MPa , podendo variar de acordo com o fabricante, também conclui-se que a tampa de policarbonato resistirá às tensões resultantes das diferenças de pressão interna e externa na câmara. O módulo de segurança para a tampa de policarbonato será de aproximadamente 2,4.

3.2 PAR ADSORVENTE/ADSORVATO

Para a seleção de materiais, é necessário se certificar de que os mesmos irão servir para o propósito do trabalho, e estarão aptos para os experimentos e geração de dados empíricos.

Por exemplo, para definir qual o melhor sólido poroso a ser utilizado, será preciso levar em conta a capacidade de adsorção que o material apresenta, bem como sua acessibilidade.

Figura 3.10 - Carvão ativado visto no microscópio ampliado de 1200x



Fonte: SOUZA, Juber P, 2010

Ciclos de refrigeração por adsorção mais normalmente utilizam como par adsorvente-adsorvato sílica gel e água, ou zeólita e água.

No entanto, conforme já anteriormente exposto, uma das limitações apresentadas por este processo é referente a variação de temperatura que se é alcançada em ciclos mais curtos, ou pelo extenso tempo para se atingir temperaturas mais baixas nos ciclos mais longos.

Uma das maneiras pensadas para otimizar estes parâmetros é a utilização de outro par, que tenha um fluido refrigerante com maior volatilidade do que a água. Foi pensado em alternativas como o etanol, cujo ponto de fusão é consideravelmente mais baixo que o da água.

Outra possibilidade pensada é o Octano, popularmente gasolina. Além de ter compatibilidade polar com o adsorvente (carvão), a gasolina é ainda mais volátil do que o etanol. O Pentano também foi considerado, no entanto precisaria ser adquirido.

O metanol é uma opção já aplicada em outros estudos, que mostrou resultados interessantes, mas que para as condições que se deseja trabalhar, não seria o ideal.

Portanto, aqui tomou-se a decisão de escolher pelo Formiato de Metila, que é um fluido bastante volátil, entrando em ebulição a 31,5°C, atendendo a proposta deste estudo mais facilmente.

O formiato de metila é o substituto comercial do R141b cujas propriedades foram verificadas no site do “National Institute of Standards and Technology” (NIST) do departamento de comércio dos EUA. Inicialmente o fluido que seria o mais adequado para as pretensões deste estudo seria o R141b, no entanto, houve dificuldade de encontrá-lo em função do fato de que ele é considerado ecologicamente ruim. Pelas informações de saturação encontradas no site do NIST, o R141b se torna vapor sob uma pressão de aproximadamente 0,601 bar a 18°C. Comparando com o Etanol, Octano e com o Hexano ele se mostrou mais viável para utilização por se tornar vapor com maior facilidade, demandando uma potência menor da bomba de vácuo que se possui. Infelizmente, não foi possível localizar uma tabela de saturação para este fluido, e por essa razão é importante mencionar que embora será utilizado o formiato de metila nos testes, as propriedades de saturação que estão sendo consideradas são a do R141b, partindo do princípio de que apresentam grande similaridade. Entrado em contato com o fabricante, foi solicitada a tabela de saturação, mas o mesmo não retornou as solicitações.

O sólido poroso selecionado foi o carvão. Acessível e prático, ele possui compatibilidade para adsorver o formiato de metila, devido às forças de Van der Waals, pelo fato de o formiato de metila ser um composto polar formado por um grupo metila (CH_3) e um grupo Formil (HCOO). Ao entrar em contato com o carvão, as regiões polarizadas do formiato de metila interagem com grupos funcionais apolares presentes na superfície do mesmo, resultando na interação de Van der Waals. O carvão é caracterizado pela grande superfície de contato que possui, resultado dos poros em sua superfície. Quanto menor for a granulometria do carvão, maior será a superfície de contato disponível, pois mais sítios existirão disponíveis para que o fluido seja incorporado. Para este experimento, foi utilizado carvão vegetal de eucalipto.

3.3 SEÇÃO DE TESTES E INSTRUMENTAÇÃO

Para a obtenção de dados se fez necessária a utilização de instrumentos de medição. Para medir com precisão a pressão interna atingida com o vácuo, foi utilizado um manômetro. Com isso se fez possível a medição do ambiente interno da câmara e a coleta de dados, principal ação para o estudo.

Para gerar o vácuo, foi utilizada uma bomba para retirar o ar de dentro da câmara e gerar o ambiente propício para os testes.

Figura 3.11 - Especificações da bomba de vácuo utilizada

Bomba de duplo estágio	VE245ND
Velocidade de deslocamento	5CFM - 142 l/min
Vácuo máximo - pressão parcial	$2 \times 10^{-1} Pa$
Vácuo mínimo - pressão total	15 micron
Potência	1/2 HP
Entradas	1/4" e 3/8" Flare
Capacidade de óleo	325 ml
Dimensões	338x138x244 mm
Peso	10,4 kg

Fonte: Especificações na caixa do equipamento, 2023

Figura 3.12 - Bomba de vácuo utilizada



Fonte: Do autor, 2023

Foi incluído um pequeno tubo de cobre em um dos orifícios da câmara para a utilização de um termopar para obter-se as variações de temperatura interna. No entanto, este procedimento se mostrou ineficiente, possivelmente pela posição em que o tubo foi posicionado na câmara, muito distante do carvão. Foi constatada alguma alteração de temperatura no fundo da câmara após os experimentos, mas seria interessante que o tubo de cobre estivesse nessa região, para que fosse possível a introdução do termopar, afim de mensurar com precisão o quão significativa era essa variação.

Para o controle de injeção de formiato de metila, e também de retirada de ar de dentro da câmara para fazer o vácuo, foram utilizadas duas válvulas esferas com alavanca borboleta, que permitia controle de abertura e fechamento para saída e entrada de fluidos. Para controlar a quantidade de fluido que seria inserido, buscando precisão foi feito uso de uma bureta graduada, onde era posta uma quantidade X de líquido, e liberado apenas o que se era desejado.

Na figura 3.10 pode-se ver como ficou a câmara de testes após sua fabricação. É possível notar algumas diferenças para o modelo conceitual, pois ao longo do processo foi-se percebendo o que era ou não era viável de ser feito na prática, e possíveis melhorias, como manter a posição dela deitada ao invés de em pé, para evitar que o formiato de metila caísse imediatamente, e ainda líquido, sobre o carvão, e a utilização de quatro hastes de fixação da tampa ao invés de duas, evitando flambagem da tampa.

Figura 3.132 – Câmara de teste confeccionada



Fonte: Do autor, 2023

Após o início dos procedimentos experimentais, a câmara precisou passar por alguns ajustes, que serão abordados na seção 3.5

3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o propósito de assegurar a validade e a confiabilidade dos resultados alcançados durante os experimentos, faz-se necessário a implementação de um plano de testes bem estruturado. A presente seção foi elaborada com base no comportamento que se espera obter do par adsorvente/adsorvato escolhido, e também da pressão.

A expectativa é que se tem é que, ao inserir o formiato de metila na câmara de testes sob condição de vácuo, ocorra um aumento abrupto de pressão decorrente da injeção de fluido, seguido de uma pronta evaporação. Isso deve ocorrer pelo fato de que, ao diminuir a pressão, diminui-se também o ponto de saturação do fluido. Em baixas pressões, todo fluido possui maior dificuldade de se manter coeso, em razão de sua pressão interna fazer com que suas moléculas se soltem com maior facilidade.

Conforme ocorrer a evaporação do fluido, a pressão deverá continuar a subir, e será medida por meio de um manômetro. Espera-se é que a pressão suba até se estabilizar, quando a taxa de evaporação se igualar à taxa de adsorção de fluido pelo carvão. Quando a taxa de adsorção se tornar maior do que a taxa de evaporação do formiato de metila, então o vácuo começará a ser refeito pelo processo de adsorção, onde as moléculas de fluido serão capturadas e depositadas nos sítios presentes em sua superfície.

O fenômeno deve cessar quando o carvão estiver saturado, quando todo o fluido livre se esgotar ou ao se atingir uma pressão parcial de estabilização.

É possível ver a seguir o plano de teste elaborado.

- Com as conexões vedadas e instaladas, colocar o carvão dentro da câmara;
- Fechar a tampa e ligar a bomba para fazer o vácuo;
- Anotar os valores de temperatura e pressão obtido no vácuo;
- Após atingir o vácuo, inserir devagar, uma quantidade pré-determinada de fluido, iniciando com 5 mL;
- Anotar os valores de temperatura e pressão obtido após a inserção do fluido;
- Observar o processo de adsorção ocorrer até cessar, o que será identificado a ocorrência quando a pressão parar de diminuir;

- No equilíbrio, anotar os valores de temperatura e pressão obtidos após ter cessado o processo de adsorção;
- Inserir mais uma quantidade pré-determinada (3 ou 4 mL) de fluido, para que o carvão adsorva;
- Retirar o vácuo, limpar a câmara e refazer o processo com outra massa de carvão limpa.

Para a obtenção de dados adequados, o procedimento foi realizado variando a massa de carvão. Os tratamentos foram feitos utilizando 100 g de carvão e 5 mL de fluido, 125 g de carvão e 5 mL de fluido, e outro com 150 g de carvão e também 5 mL de fluido. Dessa forma é possível compreender melhor a influência da massa de carvão no processo (uma vez que mais carvão apresentará uma maior superfície de contato total), e modelar a taxa de adsorção para cada uma das massas, conforme será mostrado na seção 4.2.

3.5 AJUSTES E CARACTERIZAÇÃO

Após a confecção da câmara de testes e o início dos experimentos, alguns contratempos ocorreram, demandando correções.

A tampa de policarbonato inicialmente estava atendendo as necessidades, no entanto, depois de algumas repetições de experimentos iniciais feitos para teste, foi identificado que o formiato de metila interagiu bastante com o este material, dissolvendo sua superfície, conforme imagens que serão apresentadas a diante. Caso fosse mantido a utilização da tampa de policarbonato, seria alta a possibilidade de ela se romper, não sendo, portanto, seguro sua continuidade.

Além disso, essa reação do formiato de metila com a tampa, causou problemas de vedação, uma vez que abriu espaços para vazamento nas bordas.

Figura 3.14 - Policarbonato após contatos com Formiato de Metila



Fonte: Do autor, 2023

Ao se observar mais de perto, é possível ver o surgimento de trincas sobre a superfície interna, além de lascas que se soltaram da tampa (parte inferior esquerda da figura 3.15).

Figura 3.15 - Tampa de policarbonato ampliada



Fonte: Do autor, 2023

Com isso, fez-se necessário alterar a tampa, para uma que fosse feita de outro material e, portanto, confeccionou-se uma de aço, que era um material disponível.

Na figura 3.16 é mostrada a câmara montada para os testes com a alteração da tampa. Nota-se ainda na imagem a presença do termopar frente ao manômetro, no entanto, conforme já comentado, ele acabou não tendo uma utilidade muito eficaz.

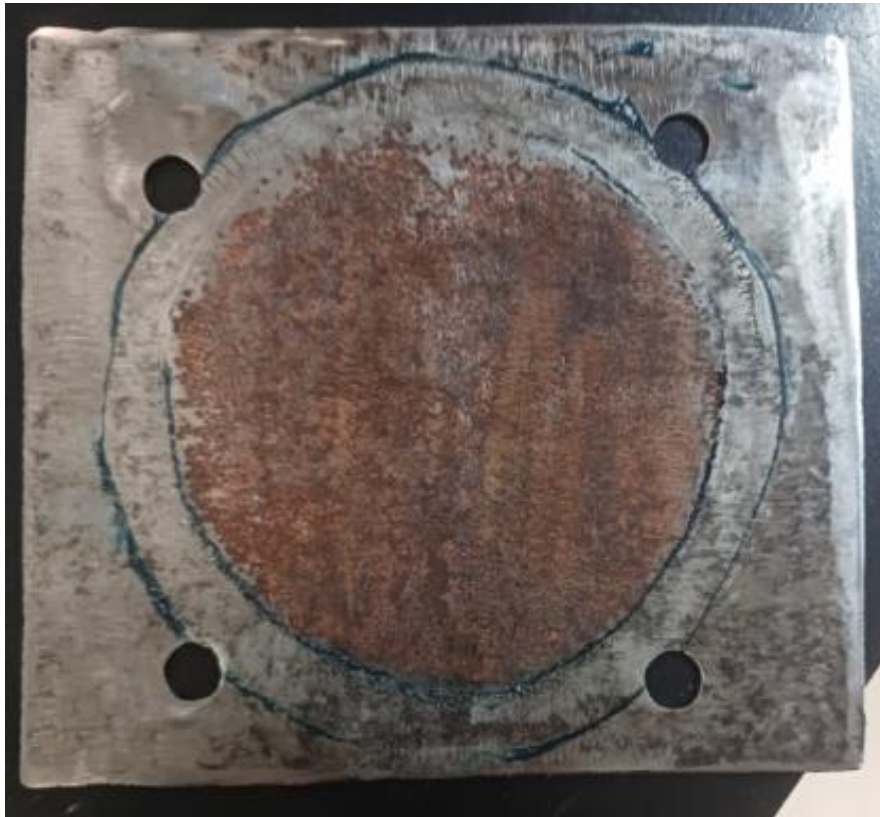
Figura 3.16 – Câmara montada com tampa de aço



Fonte: Do autor, 2023

Mesmo após essa alteração, foi identificado após algum tempo, que a parte interna da tampa se oxidava em contato com o formiato de metila. No dia foram feitos alguns testes experimentais, e a câmara foi esvaziada e guardada, mas algum resíduo de fluido acabou ficando dentro. A constatação foi feita no dia seguinte, e o resultado pode ser visto na figura 3.17

Figura 3.17 - Aço 1020 após contatos com vapor de Formiato de Metila



Fonte: Do autor, 2023

Como a oxidação da tampa de aço demandava mais tempo para ocorrer do que os danos causados na tampa de policarbonato, continuou-se a utilizá-la, e apenas era retirada a ferrugem antes dos testes. Após mais alguns ciclos de experimentos, notou-se que a superfície interna da câmara, que era feita do mesmo material que a tampa (Aço 1020) também estava demonstrando sinais de oxidação, conforme a imagem 3.18. A oxidação da tampa e da câmara resulta em óxido de ferro. É importante ressaltar que este produto poderia potencialmente adsorver parte do formiato de metila injetado na câmara. No entanto, como se tratava de uma quantidade muito pequena em comparação com a quantidade de carvão, à essa possibilidade não foi dada muita importância.

Figura 3.18 - Parte interna da câmara de teste



Fonte: Do autor, 2023

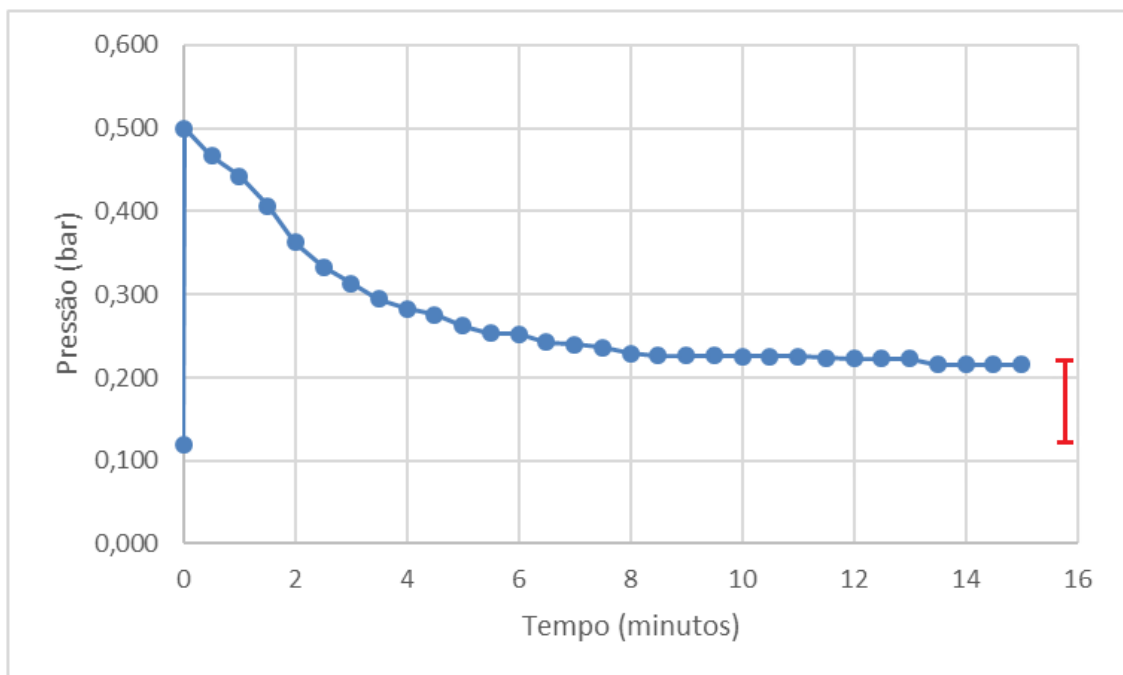
Outros ajustes incluem a alteração do par adsorvente-adsorvato. Como já comentado, no princípio do projeto a intenção era realizar os testes utilizando álcool etílico e gasolina. No entanto, analisando as propriedades de saturação destes fluidos, foi constatado que seria inviável suas utilizações, uma vez que demandaria uma bomba de vácuo mais forte do que a que se tinha. Foi tentado também realizar o experimento utilizando o hexano, que possui um ponto de ebulição mais baixo que o da gasolina e do etanol. O que foi visto é que ao inserir o fluido na câmara, a pressão interna pouco aumentou, devido ao fato de que a substância apresentava demasiada demora para evaporar. Em comparação, como poderá ser visto na próxima sessão, o formiato de metila evaporava quase que instantaneamente ao ser inserido no vácuo, promovendo um grande salto de pressão.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme o esperado, ao se inserir o fluido no ambiente de vácuo parcial no interior da câmara, ele se expande rapidamente em vapor, e ocorre um abrupto aumento de pressão, seguido por uma queda, com perfil exponencial, em função da adsorção.

A figura 4.1 mostra o comportamento típico observado nos experimentos. Para um dos exemplos feitos, inicialmente a câmara apresentava uma pressão manométrica de -670 mmHg (vácuo parcial), isto é, aproximadamente 0,119 bar de pressão absoluta. Nesta condição, encontrava-se no interior da câmara uma massa de 100 gramas de carvão vegetal. Em seguida, foi injetado na câmara um volume de 5 mL de formiato de metila no estado líquido, que logo após se tornou vapor. Após isso, a pressão subiu de forma abrupta para, aproximadamente 0,5 bar para, em seguida, ocorrer sua diminuição dentro da câmara, indicando, portanto, a adsorção.

Figura 4.1 - Comportamento de um teste com 100 gramas de carvão

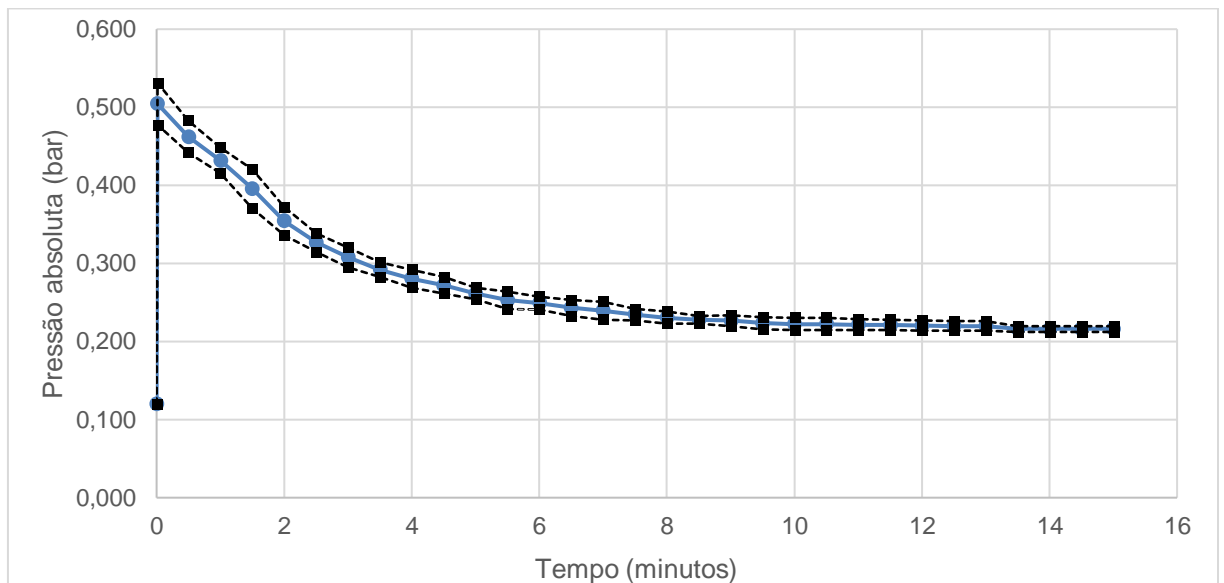


Fonte: Do autor, 2023

Ainda na mesma imagem, pode-se ver em vermelho a indicação do ΔP obtido, que se refere a diferença entre a pressão inicial de vácuo parcial e a pressão final de estabilização.

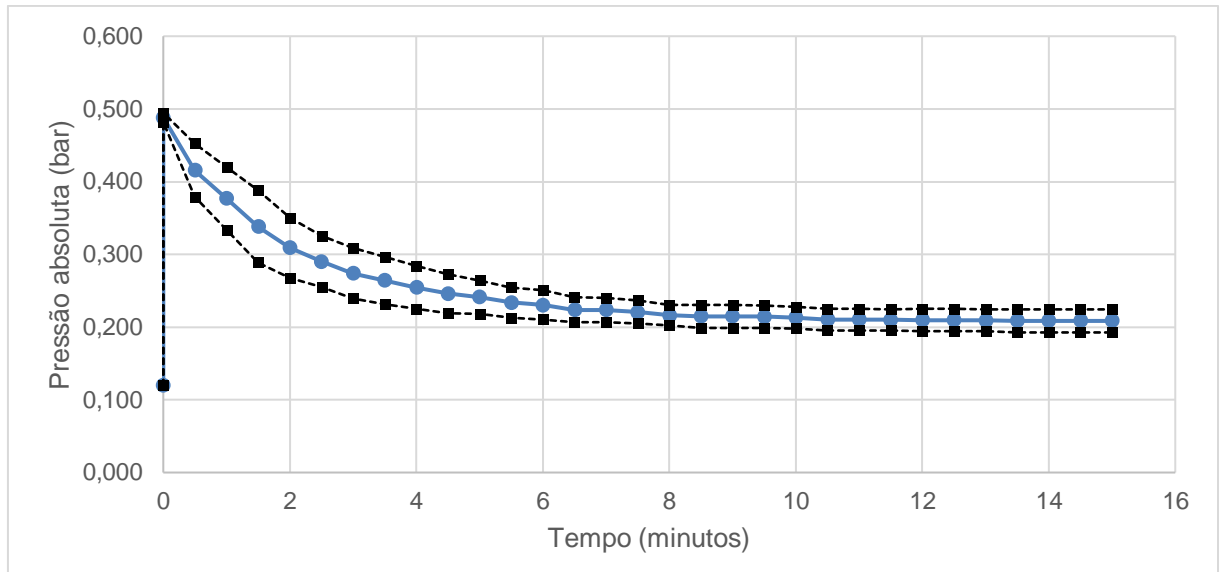
Conforme explicado no capítulo 3.4, foram estudados três tratamentos experimentais com três ou quatro repetições em cada um deles. Foram feitos com 100 gramas, 125 gramas e 150 gramas de carvão, todos eles com uma injeção de aproximadamente 5 mL de formiato de metila. Os dados brutos obtidos a partir das medições realizadas durante os experimentos encontram-se no Apêndice A. As Figuras 4.2 a 4.4 a seguir, mostram os resultados das médias obtidas para os três tratamentos estudados.

Figura 4.2 - Tratamentos com 100g de carvão. (Média \pm Desv. Pad)



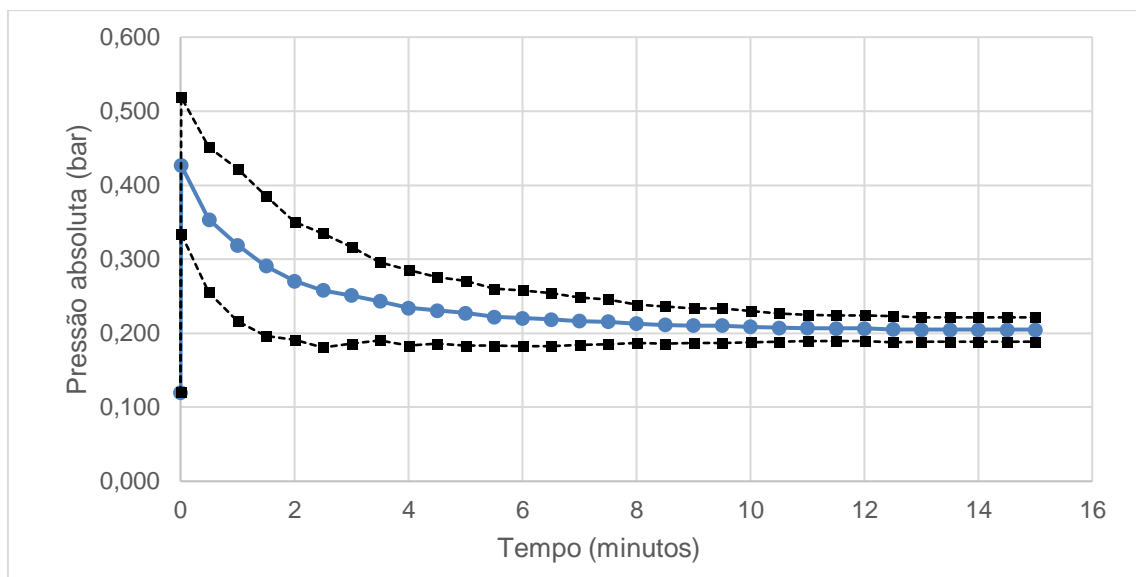
Fonte: Do autor, 2023

Figura 4.3 - Tratamentos com 125g de carvão. (Média \pm Desv. Pad)



Fonte: Do autor, 2023

Figura 4.4 – Tratamentos com 150g de carvão. (Média \pm Desv. Pad)



Fonte: Do autor, 2023

Como é se pode observar, o fenômeno da adsorção apresenta um comportamento assintótico com a pressão tendendo a um valor de estabilização com o decorrer do tempo. É possível observar ainda que a pressão média estabilizou em torno de valores muito próximos para as três massas de carvão. Isto indica que a faixa de variação da

massa de carvão deve ser ampliada para que se observe variações significativas dos valores de estabilização da pressão.

4.1 RAZÃO DE ADSORÇÃO m_{MF}/m_c

Nesta seção é apresentada a razão entre as massas de formiato de metila (adsorvente) e de carvão (adsorvato). Para se obter a massa de formiato de metila adsorvida foi desenvolvida uma relação entre a massa de ar e de vapor presente na câmara e a pressão medida. Tal relação foi obtida por meio do modelo de *Gás Ideal*, equação conforme a 4.1.

$$P.V = m_{FM,vap} \cdot R.T \quad (4.1)$$

Onde R é a constante do gás, obtida pela divisão da constante universal dos gases \bar{R} ($8,314 \text{ kJ/kmol K}$) pela massa molar do formiato de metila M_{MF} ($60,05 \text{ g/mol}$) e V é o volume da câmara com base nas medidas apresentadas no capítulo 3. Para este cálculo foi considerado também uma temperatura ambiente média de 20°C ($293,15 \text{ K}$). Assim, a massa de formiato de metila adsorvida, m_{MF} , é obtida pela subtração da massa de formiato de metila líquida injetada na câmara, $m_{FM,in}$, pela massa de vapor restante na câmara na pressão de estabilização, $m_{FM,vap}$.

$$m_{Ads} = m_{FM,in} - m_{FM,vap} \quad (4.2)$$

Destaca-se a necessidade de se considerar a massa residual de ar atmosférico dentro da câmara após a realização do vácuo parcial, tendo em vista que não é possível realizar um vácuo perfeito. Em todos os testes foi observado uma constância no vácuo atingido, alcançando o mesmo valor de pressão manométrica de -670 mmHg ($0,119 \text{ bar}$ de pressão absoluta). Isso significa que estes $0,119 \text{ bar}$ eram promovidos pelo ar ali presente, e somente o que era observado além disso era devido ao formiato de metila. Portanto, o valor de pressão que se deve utilizar na equação da Lei dos Gases Ideais é a variação de pressão Δp ocasionada pelo fluido inserido, e mostrado na figura 4.1.

Outra observação a ser feita é na diferença de volume livre dentro da câmara. Ao inserir 100 gramas de carvão, a quantidade de volume livre é maior do que com

150 gramas. Para fazer essa consideração, é preciso, no cálculo, levar em conta a diferença do volume total da câmara pelo volume ocupado pelo carvão, que é obtido considerando a massa específica do carvão vegetal de eucalipto como sendo em média de 350 kg/m^3 . Temperatura, constante dos gases (R) e massa molar do formiato de metila se mantem constantes.

O valor do volume ocupado por cada massa de carvão pode ser visto na Tabela 4.1 abaixo, juntamente com o volume livre para cada caso.

Tabela 4.1 – Volumes considerados

Teste com carvão	Volume da câmara (m^3)	Volume de carvão (m^3)	Volume livre (m^3)
100 gramas	$1,0674 \cdot 10^{-3}$	$2,857 \cdot 10^{-4}$	$7,817 \cdot 10^{-4}$
125 gramas	$1,0674 \cdot 10^{-3}$	$3,571 \cdot 10^{-4}$	$7,103 \cdot 10^{-4}$
150 gramas	$1,0674 \cdot 10^{-3}$	$4,286 \cdot 10^{-4}$	$6,388 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Do autor, 2023

Com os valores de volume mostrados na tabela, a massa residual de fluido após a estabilização da pressão é obtida fazendo as devidas substituições na equação 4.1. Por meio da Equação 4.2, é obtido o valor da massa adsorvida de carvão.

Tabela 4.2 – Valores obtidos nos testes

	100 gramas			125 gramas				150 gramas		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Varição de pressão (bar)	0,092	0,096	0,100	0,067	0,104	0,092	0,092	0,077	0,104	0,073
Massas remanescentes (g)	0,177	0,185	0,193	0,117	0,182	0,161	0,161	0,122	0,164	0,115
Massas adsorvidas (g)	4,723	4,715	4,707	4,783	4,718	4,739	4,739	4,778	4,736	4,785

Fonte: Do autor, 2023

Da tabela 4.2, pode-se ver que a variação da pressão (pressão de estabilização menos pressão inicial, conforme imagem 4.1), diminui com o aumento de massa. Isso é atribuído sobretudo ao fato de que, com mais massa de carvão, a quantidade de fluido adsorvida foi maior, conforme mostrado na mesma tabela, o que resulta em uma pressão final menor, mais próxima da pressão inicial.

Os valores das razões entre as massas de formiato de metila adsorvida (m_{FM}) e carvão (m_C) para todos os tratamentos e repetições realizados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Razão entre as massas de formiato de metila e carvão

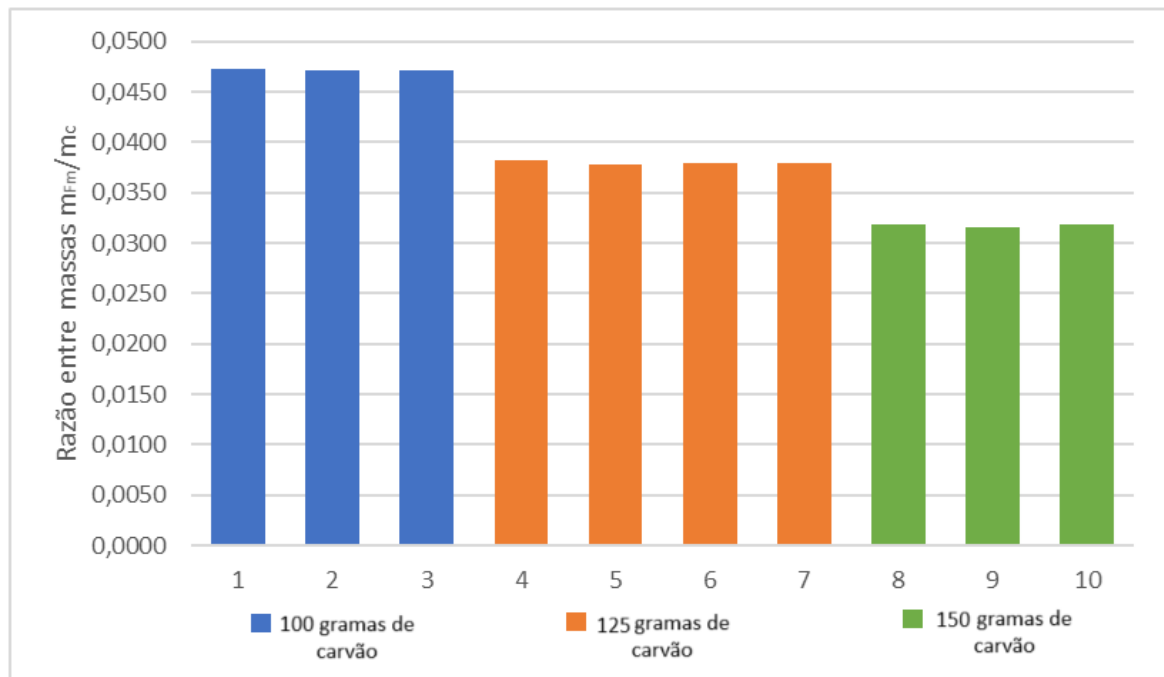
Massa de carvão (g)	Repetição	m_{FM}/m_C
100	1	0,0472
100	2	0,0472
100	3	0,0471
125	4	0,0383
125	5	0,0377
125	6	0,0379
125	7	0,0379
150	8	0,0319
150	9	0,0316
150	10	0,0319
Média		0,0389

Fonte: Do autor, 2023

Nota-se que a razão diminui com o aumento de massa de carvão, e isso é ocasionado pelo fato de que o aumento de massa de carvão nos testes foi proporcionalmente maior do que o aumento na quantidade adsorvida de formiato de metila.

A representação gráfica dos resultados da tabela 4.3 é mostrada na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Razão de massas



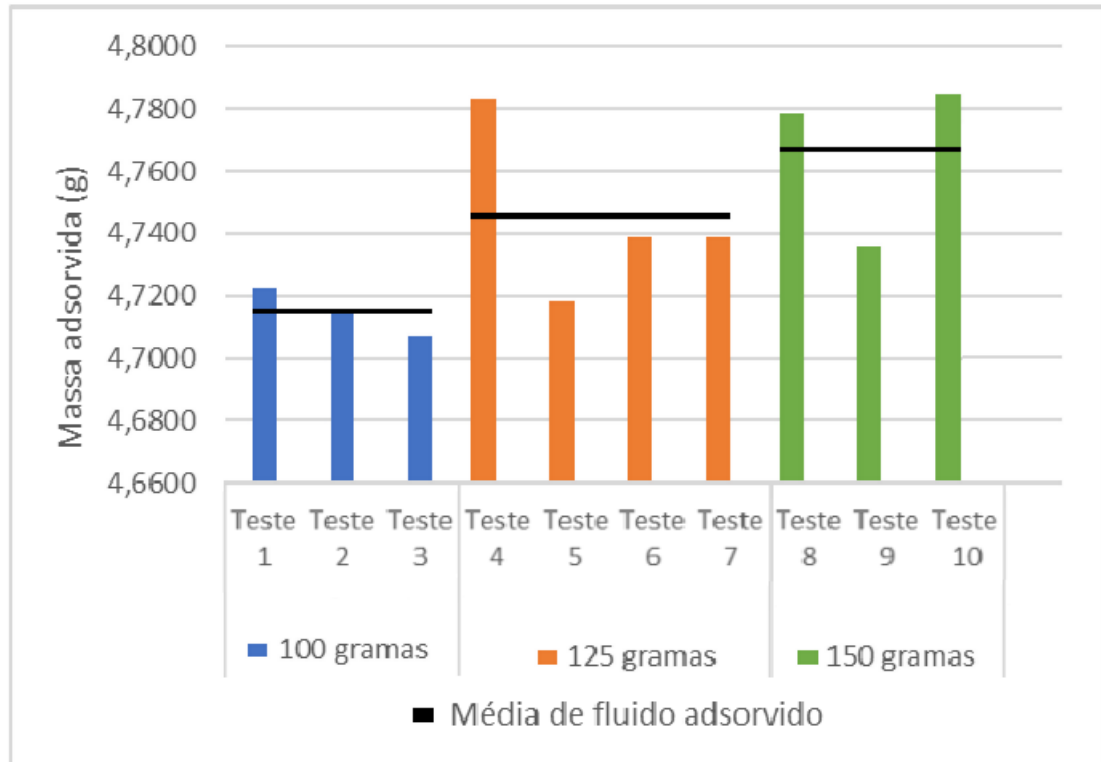
Fonte: Do autor, 2023

Paralelamente ao fato de as razões diminuírem com o aumento de massa de carvão, nota-se que experimentos com massas iguais apresentaram razões bastante próximas, com pouca variação. A tendência é isso ocorrer mesmo para tratamentos com massas de carvão e fluido maiores, no entanto essa hipótese precisa ser testada empiricamente.

Outra observação é que o processo de adsorção não cessou devido a uma saturação das massas de carvão ou devido a uma indisponibilidade de fluido livre na atmosfera interna da câmara, mas sim devido ao fato de se ter atingido uma pressão de estabilização, onde para cada razão tem-se uma pressão associada. Intuitivamente, quanto maior a massa de carvão, menor será a pressão de estabilização, pois mais adsorção ocorre. Nota-se ainda que, no entanto, o carvão adsorveu o formiato de metila inserido quase que em sua totalidade.

A esquematização a seguir mostra o aumento na quantidade de fluido que foi adsorvido para cada repetição.

Figura 4.6 - Massas adsorvidas de formiato de metila

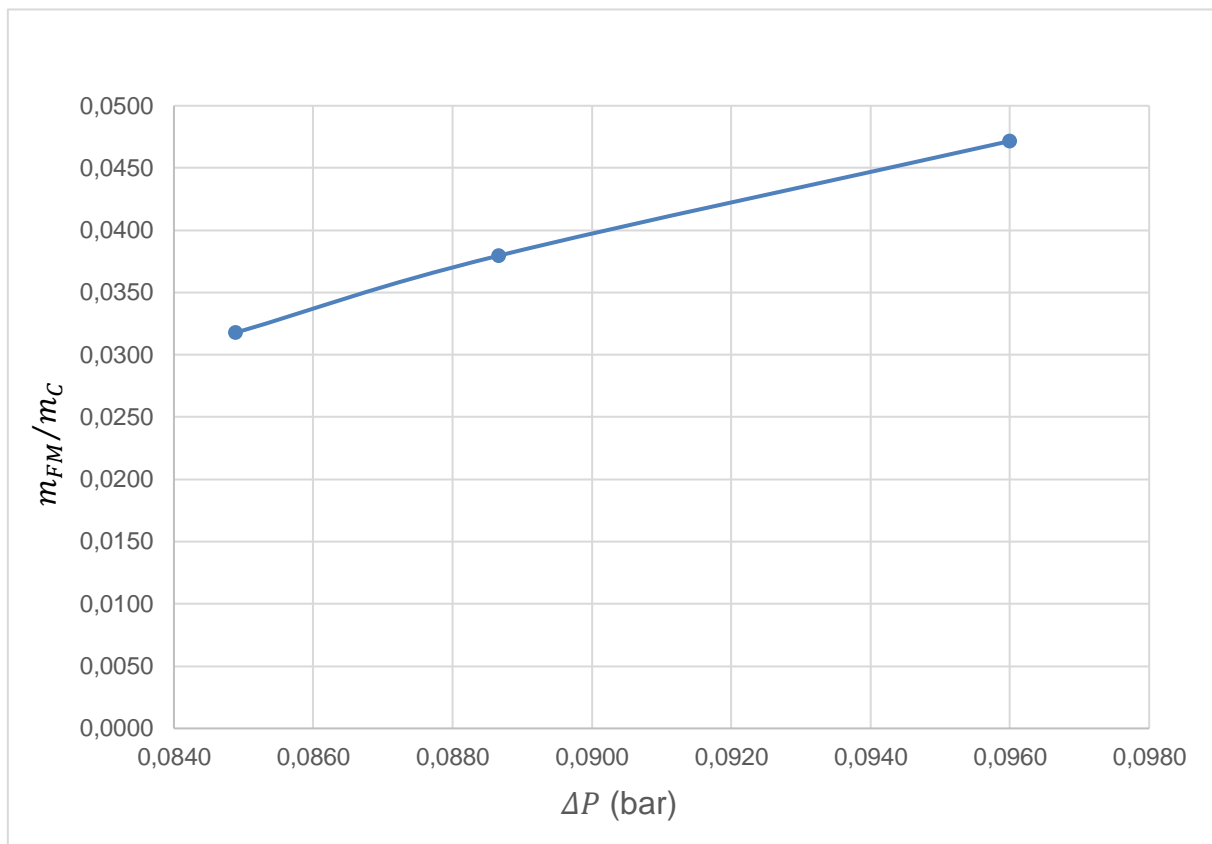


Fonte: Do autor, 2023

Pela figura, é visto que os testes de número 4 (125 gramas) e 9 (150 gramas) apresentaram demasiada discrepância em relação a seus pares, o que pode indicar algum ruído experimental. Algumas possibilidades podem ser levantadas como uma possível falta de precisão na inserção do formiato de metila na câmara ou algum vazamento na vedação.

A Figura 4.7 mostra o gráfico da razão m_{FM}/m_C pela pressão parcial ΔP , representando uma tentativa preliminar de criar uma isoterma dos testes realizados.

Figura 4.7 - Relação entre a razão de massas e a variação de pressão



Fonte: Do Autor, 2023

4.2 TAXA DE ADSORÇÃO

Determinar a capacidade de adsorção do carvão em relação ao formiato de metila é um dos objetivos centrais deste estudo. Para isso, é necessário encontrar uma equação matemática capaz de descrever corretamente o processo ao longo do tempo. Assim, foi utilizado além dos dados obtidos nas experimentações, uma plataforma de programação para aplicação de um código em *Python*.

Para o início deste processo, foram feitas planilhas com os valores de pressão medidos, e calculada a média para cada massa tratada. Se foram feitos 3 tratamentos com 100 gramas de carvão, calculou-se a média dos valores de pressão para cada instante de tempo, e fez-se o mesmo para os tratamentos com 125 e 150 gramas. Com estes dados, foi possível criar um gráfico que demonstrasse visualmente a diminuição de pressão, conforme foi apresentado no início do Capítulo 4.1 (pag. 55), para cada quantidade de massa.

Afim de encontrar uma equação que definisse o gráfico, foi feito um ajuste de curvas, e constatado que, para o caso dos tratamentos com 100 gramas, um polinômio do quarto grau descreve adequadamente a curva, obtendo um resíduo bastante baixo de apenas 0,000353.

Então, com um código em Python chegou-se na equação 4.3 a seguir, para a pressão ao longo do tempo, para a massa de 100 gramas de carvão.

$$P(t)_{100} = 1,965t^4 - 83,931t^3 + 1,344.10^3t^2 - 9,844.10^3t + 5,0836.10^4 \quad (4.3)$$

Após encontrada a equação, se faz necessário um fator de multiplicação de quinta ordem (10^5), pelo fato de que a equação foi gerada com os valores de pressão em bar. Na equação 4.3, este valor já foi multiplicado pelos termos.

Para saber a taxa de adsorção, foi utilizada novamente a equação geral da Lei dos Gases Ideais, no formato abaixo:

$$m = \frac{PV}{RT} \quad (4.4)$$

Conforme comentado anteriormente, é necessário considerar a diferença de volume entre cada teste, devido a diferença nas massas de carvão, que irão ocupar espaços distintos dentro da câmara. Assim sendo, o volume livre dentro da câmara, isto é, o volume disponível para o vapor ocupar dentro da câmara, será diferente para cada tratamento.

Sabendo que os valores de R e T (293,15 K) são constantes, é possível realizar o cálculo utilizando os dados da tabela 4.4, para o tratamento com 100 gramas:

Tabela 4.4 - Valores para o cálculo da relação 4.3

Volume da câmara (m^3)	$1,0674.10^{-3}$
Volume de 100 gramas de carvão (m^3)	$2,857.10^{-4}$
Volume livre (m^3)	$7,817.10^{-4}$
R (J/mol.K)	137,421
Temperatura (K)	293,15

Fonte: Do autor, 2023

Assim, prossegue-se com a relação abaixo

$$m = 1,940 \cdot 10^{-8} \cdot P(t)_{100} \quad (4.5)$$

Como $P(t)_{100}$ é uma função que depende do tempo, para se obter a taxa de variação de massa, basta realizar a derivação da equação 4.3

$$\frac{dm}{dt} = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{V}{RT} \quad (4.6)$$

Sabendo que V/RT é constante, prossegue-se conforme o processo abaixo

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} (1,965t^4 - 83,931t^3 + 1,344 \cdot 10^3 t^2 - 9,844 \cdot 10^3 t + 5,0836 \cdot 10^4)$$

Onde resolvendo, chega-se em

$$\frac{dP}{dt} = (7,860t^3 - 2,518 \cdot 10^2 t^2 + 2,688 \cdot 10^3 t - 9,844 \cdot 10^3) \quad (4.7)$$

A equação 4.7 descreve a variação da pressão ao longo do tempo. É de conhecimento, conforme a relação 4.6, que a taxa de variação de massa é igual a taxa de variação de pressão, multiplicada pela razão V/RT . Portanto, fazendo as substituições e simplificando, obtém-se

$$\frac{dm}{dt} = (0,153t - 4,885) \cdot 10^{-6} t^2 + (0,522t - 1,190) 10^{-4} \quad (4.8)$$

A equação 4.8, descreve a taxa de diminuição de formiato de metila livre dentro da câmara. Contudo, como a quantidade adsorvida é igual a essa taxa de diminuição de fluido, então a taxa de adsorção pode ser representada pelo oposto da equação 4.8

$$\dot{m}_{100} = (4,885 - 0,153t) \cdot 10^{-6}t^2 + (1,910 - 0,522t)10^{-4} \quad (4.9)$$

Generalizando o processo para os tratamentos com as demais massas de carvão, obtém-se as equações 4.10 e 4.11 a seguir para descrever o comportamento da pressão para 125 e 150 gramas respectivamente.

$$P(t)_{125} = 3,412t^4 - 1,293 \cdot 10^2t^3 + 1,784 \cdot 10^3t^2 - 1,0897 \cdot 10^4t + 4,733 \cdot 10^4 \quad (4.10)$$

$$P(t)_{150} = -0,4911t^5 + 21,837t^4 - 3,688 \cdot 10^2t^3 + 2,971 \cdot 10^3t^2 - 1,185 \cdot 10^4t + 4,162 \cdot 10^4 \quad (4.11)$$

E as equações de número 4.12 e 4.13, respectivamente, para as taxas de adsorção

$$\dot{m}_{125} = (7,525 - 0,265t)10^{-6}t^2 + (2,114 - 0,692t)10^{-4} \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_{150} = (4,765 \cdot 10^{-2}t - 1,694)10^{-6}t^3 + (0,215t - 1,153)10^{-4}t - 2,299 \cdot 10^{-4} \quad (4.13)$$

Essas relações podem ser úteis para o desenvolvimento de um protótipo futuro, que faça uso de uma tecnologia de refrigeração por adsorção, substituindo o compressor pelos reatores.

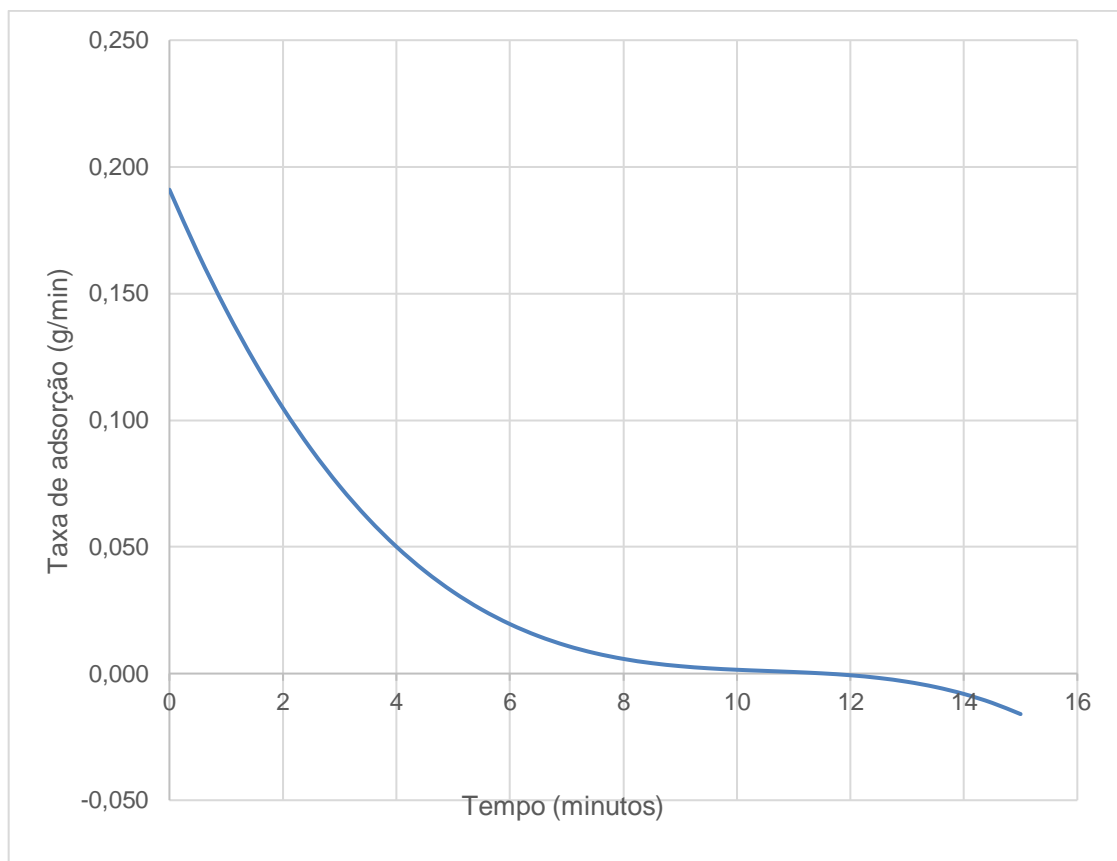
Deve-se ressaltar que essas relações encontradas são adequadas para descrever a taxa de adsorção especificamente de 5 mL de formiato de metila pelas massas de carvão mencionadas, e à temperatura ambiente, em torno de 20°C. Em situações, por exemplo, onde a temperatura é radicalmente diferente disso, recomenda-se refazer este processo, considerando a temperatura local no começo da manipulação matemática. Além disso, massas diferentes de carvão, irão influenciar de maneiras diferentes no volume livre dentro da câmara, e aumentar a quantidade de fluido também influenciaria na ocorrência do fenômeno, visto que o salto de pressão inicial seria maior, e as pressões ao longo do tempo também seriam

diferentes. Isso definitivamente é capaz de influenciar nos resultados de processos experimentais realizados com condições iniciais diferentes das vistas neste estudo.

Reproduzir estes tratamentos em uma escala maior, e com um número superior de repetições seria interessante, pois possibilitaria uma comparação com os resultados aqui apresentados, a fim de identificar quais padrões se mantiveram com mudanças nas condições iniciais.

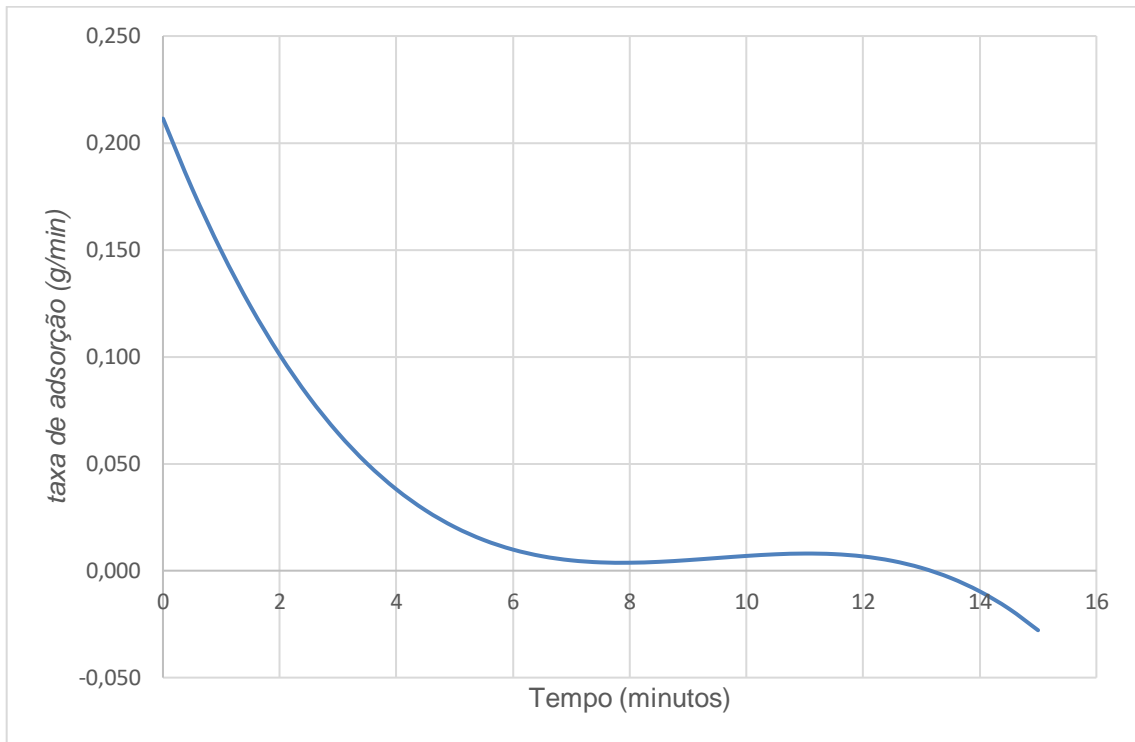
A figuras 4.7 a 4.9 apresentam os gráficos que descrevem o comportamento para cada uma das equações de adsorção encontradas.

Figura 4.8 - Gráfico da equação 4.9 (100 gramas de carvão)



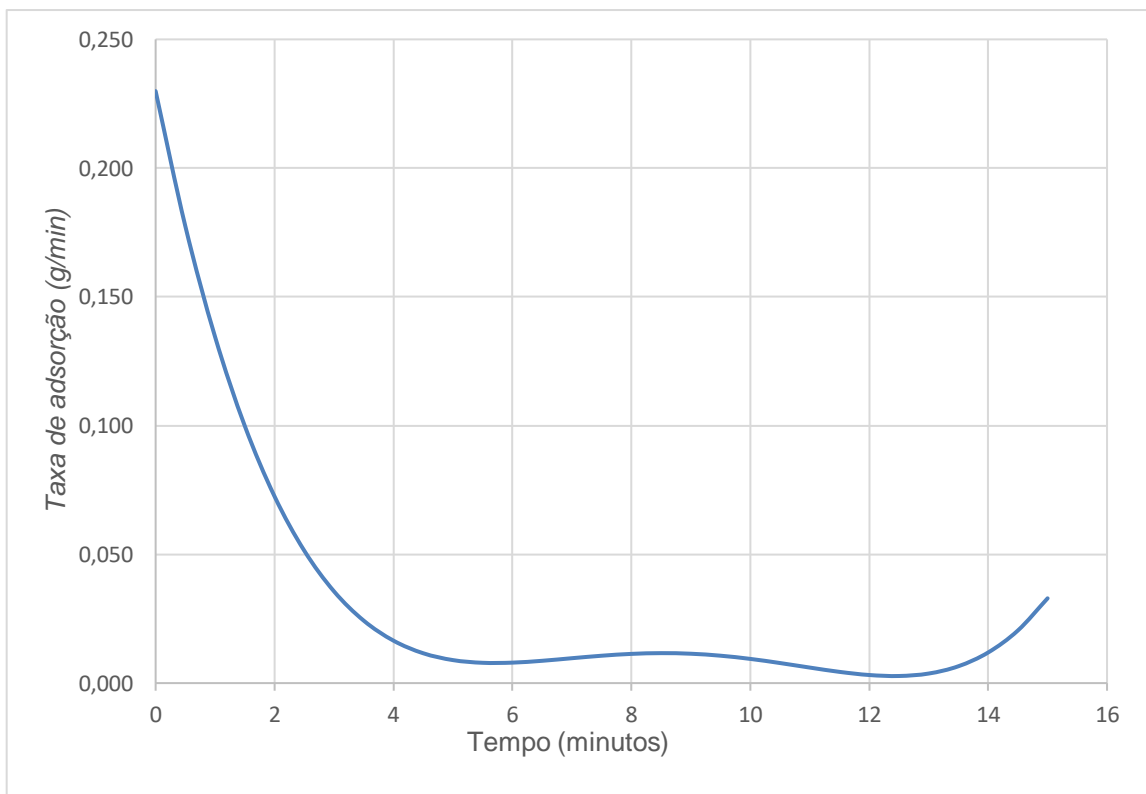
Fonte: Do autor, 2023

Figura 4.9 - Gráfico da equação 4.12 (125 gramas de carvão)



Fonte: Do autor, 2023

Figura 4.10 - Gráfico da equação 4.13 (150 gramas de carvão)



Fonte: Do autor, 2023

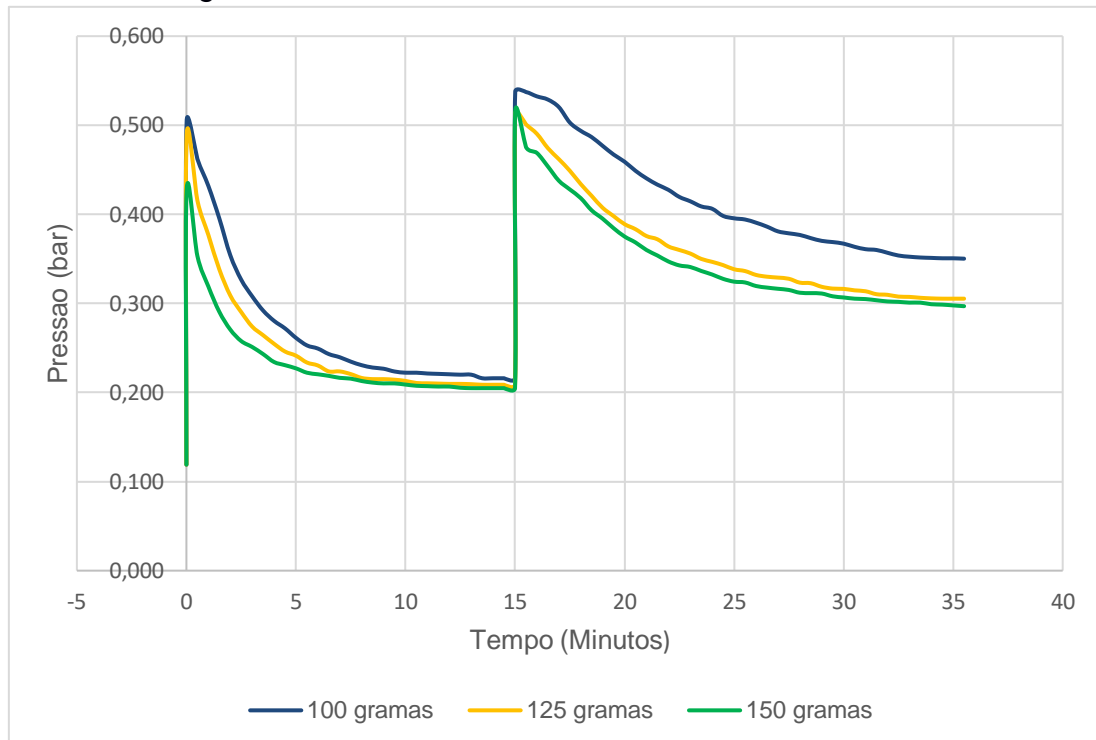
4.3 RECARGA DA CÂMARA

Conforme comentado no capítulo 4.1 (pág. 61), todas as massas de carvão, conseguiram adsorver quantidades significativas de formiato de metila. Uma diferença importante observada estava na velocidade com que isso ocorria. Além disso, todos os tratamentos, independentemente da quantidade de massa, estabilizaram em valores de pressão bastante próximos, convergindo em torno de 0,210 bar de pressão absoluta. Isso demonstra que, para que as variações ocorram de maneira mais visível, é necessário trabalhar com massas de carvão e fluido muito mais altas

Tendo em vista, portanto, o fato relatado de que todas as variações de massa de carvão adsorveram os 5 mL de fluido quase que em sua totalidade, após os primeiros testes experimentou-se inserir mais fluido dentro da câmara após a estabilização. Com este segundo teste, seria possível saber de maneira empírica se a massa de carvão havia atingido a saturação ou não.

Na figura 4.9 a seguir, é apresentado o gráfico completo dos dados médios dos experimentos, desde a primeira injeção de formiato de metila até o segundo teste, quando foi inserido aproximadamente mais 3 mL de fluido após a estabilização da pressão.

Figura 4.11 - Curvas dos dois testes com formiato de metila



Fonte: Do autor, 2023

É possível notar que a segunda curva apresenta uma característica mais suave do que a do teste inicial, entretanto, ainda com uma queda substancial de pressão, demonstrando que a massa ali presente ainda apresentava grande capacidade de adsorção.

Um fato observado especialmente na segunda parte dos testes é que, em muitos momentos, a curva parecia que iria se estabilizar, e assim ficava por alguns instantes, até voltar a ocorrer queda de pressão proveniente da adsorção. Outra observação pertinente é que, muito embora o desvio padrão ainda se encontre em uma ordem de grandeza menor que a da média, ele foi maior do que em relação à primeira fase de testes, mostrando uma maior variabilidade de dados entre os experimentos.

Hipóteses para explicar isto são um acúmulo de incertezas, e também o fato de que na segunda fase de testes a injeção de fluido ocorre em uma pressão inicial maior que na primeira, visto que, como comentado anteriormente, uma massa residual de fluido não adsorvida exerce alguma pressão, não permitindo o retorno total para a condição inicial de pressão.

A tabela 4.5 a seguir mostra o valor da variação da pressão, para a medição completa de cada um dos tratamentos, isto é, a diferença entre a pressão na última medição da segunda fase de teste e da medição no tempo zero.

Tabela 4.5 - Pressão absoluta final para cada segunda fase de teste

Teste	Repetição	Pressão (bar)
100 gramas	1	0,160
	2	0,279
	3	0,252
125 gramas	4	0,121
	5	0,224
	6	0,201
	7	0,195
150 gramas	8	0,149
	9	0,220
	10	0,161
Média		0,196
Desvio Padrão		0,0492

Fonte: Do autor, 2023

Tomando os dados apresentados, constata-se que os testes com 150 gramas de carvão, apresentaram uma uniformidade maior entre si nessa segunda fase de tratamento, onde apenas a repetição 9 apresentou uma divergência maior. Os tratamentos com 100 gramas foram os que apresentaram maior variabilidade de dados, com um desvio padrão de 0,0624 frente aos 0,0492 geral.

A conclusão que se é possível chegar com essa segunda fase de experimentação é que o teste inicial feito com 5 mL de formiato de metila, pode ser realizado com uma massa maior de fluido para a mesma massa de carvão utilizada. Novamente, também se faz interessante a reprodução deste teste em maior escala, e com um maior número de repetições, para ser observado o comportamento dos dados estatísticos.

4.4 VARIAÇÕES OBSERVADAS

Um fator importante observado, foram as diferenças no aumento da pressão imediatamente após o fluido ser inserido para cada experimento. Quando era trabalhado com as mesmas massas de carvão e de formiato de metila, ao inserir o fluido dentro da câmara o aumento de pressão que ocorria não era exatamente o mesmo. A maior variação ocorreu para 150 gramas de carvão, onde dos três testes, dois apresentaram exatamente o mesmo aumento de pressão, mas um deles variou significativamente.

Para as demais massas, embora tenha-se observado alguma diferença neste aumento de pressão, ela foi muito mais suave, dentro de um intervalo aceitável. Nestes casos, é possível, neste primeiro momento, atribuir isto a diferenças na temperatura (visto que os testes não foram feitos todos no mesmo dia), e variações imperceptíveis na hora, no volume de fluido inserido, mas que ao entrarem no ambiente interno da câmara, o aumento de volume decorrente da evaporação pode ter contribuído para as variações observadas. Em relação a variação de temperatura, em dias mais frios o fluido pode demorar um pouco mais para evaporar por completo, e em dias mais quentes essa evaporação pode ser mais rápida (ou até mesmo instantânea), influenciando no aumento inicial de pressão. Ressalta-se novamente que nos cálculos apresentados para a obtenção das equações e suas derivadas foi considerado uma temperatura média de 20°C, no entanto como dito, os testes foram feitos ao longo de alguns dias, e essa temperatura pode ter variado. No que tange às possíveis pequenas discrepâncias na quantidade de fluido inserida dentro da câmara, isso pode ocorrer pelo fato de que, embora tenha-se utilizado uma bureta graduada para realizar o controle, o processo era feito manualmente, estando mais suscetível a pequenas variações, do que se fosse um processo automatizado.

A diferença observada entre experimentos com massas de carvão diferentes possui também como fator de influência o fato de que diferentes quantidades de carvão, ocupam diferentes volumes dentro da câmara. Assim, o espaço interno da câmara, disponível para a acomodação do vapor de formiato de metila era diferente entre experimentos com massas de carvão distintas, e isso pode ter influenciado nos valores de pressão medidos imediatamente após a entrada do fluido na câmara.

5 CONCLUSÕES

Os testes de adsorção de formiato de metila por carvão se mostraram promissores, podendo no futuro o estudo ser avançado até a parte de desenvolvimento de um protótipo, para assim ser analisado empiricamente o real potencial da aplicação dessa tecnologia em sistemas de refrigeração. As equações aqui propostas serão de importância no andamento destes estudos, auxiliando no dimensionamento de um sistema mais robusto, por proporcionar uma previsão mais segura do comportamento e taxa de adsorção do par estudado.

Os dados estatísticos apresentados referente às diferentes fases dos testes fornecem uma confiabilidade em relação aos resultados apresentados.

Estudar diferentes pares de adsorvente/adsorvato é importante para uma maior abrangência e entendimento do fenômeno e suas possíveis aplicações. Foi observado que o formiato de metila e o carvão podem ser alternativas à sílica gel/água e a zeólita/água, pares mais comumente aplicados neste tipo de estudo, podendo possivelmente otimizar sistemas de refrigeração por adsorção. Isso é demonstrado pela significativa variação de pressão obtida nos testes e também pela constatação de que o carvão adsorveu o fluido quase que em sua totalidade, restando uma massa residual muito pequena na câmara. Conforme demonstrado, o processo cessou inicialmente não por ter atingido a saturação, mas sim por ter alcançado uma pressão de equilíbrio para cada razão de massa adsorvida por adsorvente.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para futuros estudos, propõem-se a execução destes tratamentos em escala maior, e um contingente mais abundante de testes para obtenção de mais dados. Isso é importante para ser feita uma comparação de resultados em relação aos experimentos realizados neste estudo.

Fazer os mesmos testes aqui apresentados com outros pares, pode também ser interessante, possibilitando uma comparação dos resultados.

Como otimizações, é interessante buscar maneiras de realizar a injeção de fluido dentro da câmara com uma precisão mais significativa do que a alcançada manualmente, pois isso pode proporcionar uma diminuição na incerteza relacionada

ao aumento de pressão imediatamente após a entrada do adsorvato dentro da câmara.

A instalação de um sistema de iluminação interno na câmara também é bem-vindo para a execução destes testes em maior escala, facilitando a visualização do processo e identificação de falhas de vedação.

Outra otimização importante seria a utilização de materiais não reativos com o formiato de metila (visto que essa substância se mostrou extremamente reativa, tanto com o policarbonato como com o aço 1020). Para fazer o estudo em dimensões aumentadas, é crucial que o material seja inerte ao fluido.

Outra melhoria é realizar os testes em um ambiente com temperatura ambiente controlada, em torno de 20°C, pois isso ajudaria a diminuir a incerteza relacionada a este parâmetro.

6 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Ricardo Fiorenzano de. **Refrigeração Solar: Uma proposta para a refrigeração de leite no Semi-Árido Nordestino**. Universidade Federal de Pernambuco. 2005

ALLEONI, Luis Reynaldo Ferracciú. **Adsorção de Boro em Podzólico e Latossolos Paulistas**. USP, 1996

ANDIA, Javier Paul Montalvo. **Remoção de Boro de Águas e Efluentes de Petróleo por Adsorção**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2009

ARAÚJO, André Luiz De Souza et al. **Simulação do ciclo de adsorção em um refrigerador solar**. UFPB

ASHRAE, **The 2001 ASHRAE Handbook**, 2001

BESINELLA Junior, Expedito et.al. **Efeito da Temperatura e do tamanho de partículas na adsorção do corante Remazol Amarelo Ouro RNL em carvão ativado**. Universidade estadual do Oeste do Paraná. 2009

BORGNAKKE, Claus & Sonntag, Richard E. **Fundamentals of Thermodynamics 8e**. University of Michingan

CLAUDINO, Andréia. **Preparação de Carvão ativado a partir de Turva e sua utilização na remoção de poluentes**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003

EPE, **Consumo de energia por ar condicionado triplica**. 2018

ESCOBEDO, João Francisco et.al. **Simulação de ciclos de refrigeração por Adsorção sólida com Energia Solar. I. Teoria e condições necessárias para a simulação**. Universidade Estadual Paulista. 1993

FÁVERE, et.al. **Cloreto de N-(2-Hidroxil) propil-3-trimetil amônio quitosana como adsorvente de Corantes Reativos em solução aquosa**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2010

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais 7ª Edição**, 2009

MASEL, Richard I. **Principles of adsorption and reaction on solid surfaces**. Vol. 3. University of Illinois. 1996

MENNA, Márcio R Mirapalheta. **Modelagem e análise de custo de sistemas de refrigeração por Adsorção**. Unioeste, 2008

MENDES, Amanda de Castro Almeida. **Modelagem Dinâmica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção Aplicado a Veículos de Passeio**. Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, 2022

MOHANTY, Soumya R, **Design, Optimization, and Economic Feasibility of Absorption Refrigeration System Using (Lithium Bromide + Water) as Working Pair**. National Institute of Technology Rourkela. 2015

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et.al. **Adsorção aspectos teóricos e ambientais**. Universidade Federal do Ceará. 2014

OLIVEIRA JÚNIOR, S. et al. **Sistemas de Refrigeração por Adsorção**. Universidade de São Paulo. 2004

ORO, Marcos Vinicius. **Solução integrada de aproveitamento do rejeito térmico de células a combustível em sistemas de adsorção**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2018

RUTHVEN, Douglas M. **Principles of Adsorption and Adsorption process**. University of New Brunswick. 1984

SANTOS, Carlos Marlon Silva & Torres, Ednildo Andrade. **Estudo da arte de refrigeração por absorção para aplicações em sistemas Industriais**. II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2002

SEKAR, M & Selvaraj, Rengaraj. **Kinetics and Equilibrium Adsorption Study of Lead (II) Onto Activated Carbon Prepared From Coconut Shell**. Journal of colloid and interface science. 2004

SHMROUKH. Ahmed N. et al. **Adsorption Refrigeration Working Pairs: The State-of-the-Art in the Application**. International Journal of Chemical and Molecular Engineering. 2013

SILVA, Êmilys Thaynara dos Santos etc al. **Análise da influência do pH na adsorção do corante azul reativo BF-5G utilizando a zeólita mordenita**. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, UFCG. 2019

SOUZA, Juber Pereira de. **Produção e modificação de carvões ativados a partir de matérias-primas de baixo custo: osso bovino e cascas de sementes de moringa.**, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010

TADINI et al, **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**, 2019

WANG, Kai & Vineyard, Edward A. **New Opportunities for Solar Adsorption Refrigeration.** ASHRAE Journal, 2011

APÊNDICE A – Descrição

A seguir são apresentadas as tabelas com os dados brutos coletados nos testes experimentais

Tabela A1 - Dados brutos para o primeiro ciclo de testes com 100 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

100 gramas											
Tempo	Pressão medida mmHg			Pressão abs em Bar			Estatística				
Minuto	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Média	Variancia	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-670	-670	-670	0,120	0,120	0,120	0,120	0,000000	0,0000	0,120	0,120
0,01	-400	-385	-360	0,480	0,500	0,533	0,504	0,000726	0,0269	0,531	0,477
0,5	-430	-410	-400	0,440	0,467	0,480	0,462	0,000415	0,0204	0,483	0,442
1	-450	-428	-430	0,413	0,443	0,440	0,432	0,000263	0,0162	0,448	0,416
1,5	-485	-455	-450	0,367	0,407	0,413	0,396	0,000637	0,0252	0,421	0,370
2	-510	-488	-485	0,333	0,363	0,367	0,354	0,000331	0,0182	0,372	0,336
2,5	-525	-510	-510	0,313	0,333	0,333	0,327	0,000133	0,0115	0,338	0,315
3	-540	-525	-522	0,293	0,313	0,317	0,308	0,000165	0,0129	0,321	0,295
3,5	-549	-539	-535	0,281	0,295	0,300	0,292	0,000092	0,0096	0,302	0,282
4	-559	-548	-542	0,268	0,283	0,291	0,280	0,000132	0,0115	0,292	0,269
4,5	-565	-553	-550	0,260	0,276	0,280	0,272	0,000112	0,0106	0,283	0,261
5	-570	-563	-559	0,253	0,263	0,268	0,261	0,000055	0,0074	0,269	0,254
5,5	-579	-570	-562	0,241	0,253	0,264	0,253	0,000129	0,0113	0,264	0,242
6	-580	-571	-568	0,240	0,252	0,256	0,249	0,000069	0,0083	0,258	0,241
6,5	-585	-578	-570	0,233	0,243	0,253	0,243	0,000100	0,0100	0,253	0,233
7	-589	-580	-572	0,228	0,240	0,251	0,240	0,000129	0,0113	0,251	0,228
7,5	-590	-583	-579	0,227	0,236	0,241	0,235	0,000055	0,0074	0,242	0,227
8	-592	-588	-581	0,224	0,229	0,239	0,231	0,000055	0,0074	0,238	0,223
8,5	-592	-590	-585	0,224	0,227	0,233	0,228	0,000023	0,0048	0,233	0,223
9	-595	-590	-585	0,220	0,227	0,233	0,227	0,000044	0,0067	0,233	0,220
9,5	-599	-590	-588	0,215	0,227	0,229	0,224	0,000061	0,0078	0,231	0,216
10	-600	-591	-589	0,213	0,225	0,228	0,222	0,000061	0,0078	0,230	0,214
10,5	-600	-591	-589	0,213	0,225	0,228	0,222	0,000061	0,0078	0,230	0,214
11	-600	-591	-591	0,213	0,225	0,225	0,221	0,000048	0,0069	0,228	0,214
11,5	-600	-592	-591	0,213	0,224	0,225	0,221	0,000043	0,0066	0,227	0,214
12	-600	-593	-591	0,213	0,223	0,225	0,220	0,000040	0,0063	0,227	0,214
12,5	-600	-593	-592	0,213	0,223	0,224	0,220	0,000034	0,0058	0,226	0,214
13	-600	-593	-592	0,213	0,223	0,224	0,220	0,000034	0,0058	0,226	0,214
13,5	-601	-598	-595	0,212	0,216	0,220	0,216	0,000016	0,0040	0,220	0,212
14	-601	-598	-595	0,212	0,216	0,220	0,216	0,000016	0,0040	0,220	0,212
14,5	-601	-598	-595	0,212	0,216	0,220	0,216	0,000016	0,0040	0,220	0,212
15	-601	-598	-595	0,212	0,216	0,220	0,216	0,000016	0,0040	0,220	0,212

Tabela A2 - Dados brutos para o segundo ciclo de testes com 100 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

100 gramas											
Tempo	Pressão medida mmHg			Pressão abs em Bar			Estatística				
Minuto	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Exp 1	Exp 2	Exp 3	Média	Variancia	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-410	-350	-310	0,467	0,547	0,600	0,538	0,004503	0,0671	0,605	0,471
0,5	-421	-320	-330	0,452	0,587	0,573	0,537	0,005505	0,0742	0,611	0,463
1	-430	-320	-332	0,440	0,587	0,571	0,532	0,006472	0,0805	0,613	0,452
1,5	-430	-321	-339	0,440	0,585	0,561	0,529	0,006069	0,0779	0,607	0,451
2	-442	-327	-340	0,424	0,577	0,560	0,520	0,007050	0,0840	0,604	0,436
2,5	-459	-330	-359	0,401	0,573	0,535	0,503	0,008141	0,0902	0,593	0,413
3	-469	-330	-370	0,388	0,573	0,520	0,494	0,009101	0,0954	0,589	0,398
3,5	-475	-330	-380	0,380	0,573	0,507	0,487	0,009643	0,0982	0,585	0,388
4	-482	-335	-390	0,371	0,567	0,493	0,477	0,009805	0,0990	0,576	0,378
4,5	-490	-340	-399	0,360	0,560	0,481	0,467	0,010150	0,1007	0,568	0,366
5	-495	-350	-402	0,353	0,547	0,477	0,459	0,009592	0,0979	0,557	0,361
5,5	-500	-360	-410	0,347	0,533	0,467	0,449	0,008947	0,0946	0,543	0,354
6	-502	-369	-418	0,344	0,521	0,456	0,440	0,008042	0,0897	0,530	0,351
6,5	-510	-375	-420	0,333	0,513	0,453	0,433	0,008399	0,0916	0,525	0,342
7	-510	-380	-428	0,333	0,507	0,443	0,428	0,007681	0,0876	0,515	0,340
7,5	-515	-390	-431	0,327	0,493	0,439	0,420	0,007217	0,0850	0,504	0,335
8	-520	-391	-436	0,320	0,492	0,432	0,415	0,007620	0,0873	0,502	0,327
8,5	-520	-400	-440	0,320	0,480	0,427	0,409	0,006636	0,0815	0,490	0,327
9	-523	-401	-442	0,316	0,479	0,424	0,406	0,006851	0,0828	0,489	0,323
9,5	-527	-409	-448	0,311	0,468	0,416	0,398	0,006424	0,0802	0,478	0,318
10	-530	-410	-450	0,307	0,467	0,413	0,396	0,006636	0,0815	0,477	0,314
10,5	-530	-413	-450	0,307	0,463	0,413	0,394	0,006357	0,0797	0,474	0,314
11	-530	-419	-452	0,307	0,455	0,411	0,391	0,005775	0,0760	0,467	0,315
11,5	-532	-420	-459	0,304	0,453	0,401	0,386	0,005745	0,0758	0,462	0,310
12	-537	-426	-460	0,297	0,445	0,400	0,381	0,005749	0,0758	0,457	0,305
12,5	-537	-430	-461	0,297	0,440	0,399	0,379	0,005388	0,0734	0,452	0,305
13	-539	-431	-462	0,295	0,439	0,397	0,377	0,005497	0,0741	0,451	0,303
13,5	-540	-435	-465	0,293	0,433	0,393	0,373	0,005199	0,0721	0,445	0,301
14	-540	-439	-468	0,293	0,428	0,389	0,370	0,004807	0,0693	0,440	0,301
14,5	-540	-440	-470	0,293	0,427	0,387	0,369	0,004681	0,0684	0,437	0,300
15	-541	-443	-470	0,292	0,423	0,387	0,367	0,004555	0,0675	0,435	0,300
15,5	-543	-448	-471	0,289	0,416	0,385	0,364	0,004366	0,0661	0,430	0,297
16	-545	-450	-473	0,287	0,413	0,383	0,361	0,004366	0,0661	0,427	0,295
16,5	-545	-450	-475	0,287	0,413	0,380	0,360	0,004310	0,0657	0,426	0,294
17	-547	-451	-479	0,284	0,412	0,375	0,357	0,004332	0,0658	0,423	0,291
17,5	-549	-456	-479	0,281	0,405	0,375	0,354	0,004171	0,0646	0,418	0,289
18	-549	-458	-480	0,281	0,403	0,373	0,352	0,004007	0,0633	0,416	0,289
18,5	-550	-458	-481	0,280	0,403	0,372	0,352	0,004075	0,0638	0,415	0,288
19	-550	-459	-481	0,280	0,401	0,372	0,351	0,004007	0,0633	0,414	0,288
19,5	-550	-460	-481	0,280	0,400	0,372	0,351	0,003941	0,0628	0,413	0,288
20	-550	-460	-481	0,280	0,400	0,372	0,351	0,003941	0,0628	0,413	0,288
20,5	-550	-461	-481	0,280	0,399	0,372	0,350	0,003876	0,0623	0,412	0,288

Tabela A3 - Dados brutos para o primeiro ciclo de testes com 125 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

125 gramas													
Tempo	Valores medidos mmHg				Valores abs em bar				Estatística				
Minuto	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Exp 4	Exp 5	Exp 6	Exp 7	Média	Variância	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-670	-670	-670	-670	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,0000000	0,00000	0,120	0,120
0	-400	-390	-390	-395	0,480	0,493	0,493	0,487	0,488	0,0000407	0,00638	0,495	0,482
0,5	-488	-445	-430	-430	0,363	0,420	0,440	0,440	0,416	0,00134	0,0366	0,452	0,379
1	-522	-463	-447	-477	0,317	0,396	0,417	0,377	0,377	0,00185	0,0430	0,420	0,334
1,5	-550	-500	-460	-515	0,280	0,347	0,400	0,327	0,338	0,00247	0,0497	0,388	0,289
2	-563	-520	-490	-540	0,263	0,320	0,360	0,293	0,309	0,00170	0,0413	0,350	0,268
2,5	-575	-539	-510	-545	0,247	0,295	0,333	0,287	0,290	0,00126	0,0355	0,326	0,255
3	-585	-549	-522	-562	0,233	0,281	0,317	0,264	0,274	0,00123	0,0350	0,309	0,239
3,5	-590	-555	-532	-570	0,227	0,273	0,304	0,253	0,264	0,00106	0,0326	0,297	0,232
4	-595	-561	-543	-577	0,220	0,265	0,289	0,244	0,255	0,000877	0,0296	0,284	0,225
4,5	-600	-570	-552	-580	0,213	0,253	0,277	0,240	0,246	0,000713	0,0267	0,273	0,219
5	-601	-570	-562	-583	0,212	0,253	0,264	0,236	0,241	0,000515	0,0227	0,264	0,219
5,5	-605	-575	-570	-589	0,207	0,247	0,253	0,228	0,234	0,000439	0,0209	0,255	0,213
6	-607	-580	-572	-590	0,204	0,240	0,251	0,227	0,230	0,000405	0,0201	0,250	0,210
6,5	-610	-590	-579	-590	0,200	0,227	0,241	0,227	0,224	0,000297	0,0172	0,241	0,206
7	-610	-585	-582	-592	0,200	0,233	0,237	0,224	0,224	0,000280	0,0167	0,240	0,207
7,5	-611	-589	-583	-595	0,199	0,228	0,236	0,220	0,221	0,000258	0,0161	0,237	0,205
8	-612	-590	-589	-600	0,197	0,227	0,228	0,213	0,216	0,000204	0,0143	0,231	0,202
8,5	-615	-590	-590	-600	0,193	0,227	0,227	0,213	0,215	0,000248	0,0158	0,231	0,199
9	-615	-590	-590	-600	0,193	0,227	0,227	0,213	0,215	0,000248	0,0158	0,231	0,199
9,5	-615	-590	-592	-600	0,193	0,227	0,224	0,213	0,214	0,000229	0,0151	0,229	0,199
10	-616	-592	-593	-600	0,192	0,224	0,223	0,213	0,213	0,000218	0,0148	0,228	0,198
10,5	-618	-592	-598	-600	0,189	0,224	0,216	0,213	0,211	0,000223	0,0149	0,226	0,196
11	-618	-592	-599	-600	0,189	0,224	0,215	0,213	0,210	0,000218	0,0148	0,225	0,196
11,5	-618	-592	-600	-600	0,189	0,224	0,213	0,213	0,210	0,000215	0,0147	0,225	0,195
12	-619	-592	-600	-600	0,188	0,224	0,213	0,213	0,210	0,000234	0,0153	0,225	0,194
12,5	-619	-592	-600	-600	0,188	0,224	0,213	0,213	0,210	0,000234	0,0153	0,225	0,194
13	-619	-592	-600	-601	0,188	0,224	0,213	0,212	0,209	0,000231	0,0152	0,225	0,194
13,5	-620	-592	-601	-601	0,187	0,224	0,212	0,212	0,209	0,000247	0,0157	0,224	0,193
14	-620	-592	-601	-601	0,187	0,224	0,212	0,212	0,209	0,000247	0,0157	0,224	0,193
14,5	-620	-592	-601	-601	0,187	0,224	0,212	0,212	0,209	0,000247	0,0157	0,224	0,193
15	-620	-592	-601	-601	0,187	0,224	0,212	0,212	0,209	0,000247	0,0157	0,224	0,193

Tabela A4 - Dados brutos para o segundo ciclo de testes com 125 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

125 gramas													
Tempo	Valores medidos mmHg				Valores abs em bar				Estatística				
Minuto	Exp 7	Exp 9	Exp 12	Exp 14	Exp 7	Exp 9	Exp 12	Exp 14	Média	Variância	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-430	-380	-355	-335	0,440	0,507	0,540	0,567	0,513	0,0029921	0,0547	0,568	0,459
0,5	-430	-380	-365	-362	0,440	0,507	0,527	0,531	0,501	0,0017637	0,0420	0,543	0,459
1	-432	-382	-370	-385	0,437	0,504	0,520	0,500	0,490	0,0013229	0,0364	0,527	0,454
1,5	-460	-382	-375	-400	0,400	0,504	0,513	0,480	0,474	0,0026525	0,0515	0,526	0,423
2	-480	-382	-380	-412	0,373	0,504	0,507	0,464	0,462	0,0038743	0,0622	0,524	0,400
2,5	-495	-388	-390	-420	0,353	0,496	0,493	0,453	0,449	0,0044477	0,0667	0,516	0,382
3	-507	-400	-401	-430	0,337	0,480	0,479	0,440	0,434	0,0044964	0,0671	0,501	0,367
3,5	-512	-410	-418	-438	0,331	0,467	0,456	0,429	0,421	0,0038459	0,0620	0,483	0,359
4	-520	-420	-429	-449	0,320	0,453	0,441	0,415	0,407	0,0036504	0,0604	0,468	0,347
4,5	-530	-430	-436	-450	0,307	0,440	0,432	0,413	0,398	0,0038317	0,0619	0,460	0,336
5	-540	-435	-442	-456	0,293	0,433	0,424	0,405	0,389	0,0042024	0,0648	0,454	0,324
5,5	-540	-440	-450	-460	0,293	0,427	0,413	0,400	0,383	0,0037179	0,0610	0,444	0,322
6	-540	-450	-458	-465	0,293	0,413	0,403	0,393	0,376	0,0030790	0,0555	0,431	0,320
6,5	-543	-450	-461	-470	0,289	0,413	0,399	0,387	0,372	0,0031556	0,0562	0,428	0,316
7	-550	-455	-468	-475	0,280	0,407	0,389	0,380	0,364	0,0032575	0,0571	0,421	0,307
7,5	-550	-460	-470	-480	0,280	0,400	0,387	0,373	0,360	0,0029625	0,0544	0,414	0,306
8	-555	-461	-473	-483	0,273	0,399	0,383	0,369	0,356	0,0031805	0,0564	0,412	0,300
8,5	-557	-465	-480	-488	0,271	0,393	0,373	0,363	0,350	0,0029583	0,0544	0,404	0,296
9	-559	-470	-481	-490	0,268	0,387	0,372	0,360	0,347	0,0028689	0,0536	0,400	0,293
9,5	-560	-470	-488	-493	0,267	0,387	0,363	0,356	0,343	0,0027627	0,0526	0,396	0,290
10	-561	-475	-490	-499	0,265	0,380	0,360	0,348	0,338	0,0025422	0,0504	0,389	0,288
10,5	-561	-478	-492	-500	0,265	0,376	0,357	0,347	0,336	0,0023870	0,0489	0,385	0,287
11	-565	-480	-498	-501	0,260	0,373	0,349	0,345	0,332	0,0024565	0,0496	0,382	0,282
11,5	-568	-480	-499	-503	0,256	0,373	0,348	0,343	0,330	0,0026123	0,0511	0,381	0,279
12	-569	-480	-500	-504	0,255	0,373	0,347	0,341	0,329	0,0026513	0,0515	0,380	0,277
12,5	-569	-482	-501	-505	0,255	0,371	0,345	0,340	0,328	0,0025470	0,0505	0,378	0,277
13	-570	-490	-505	-505	0,253	0,360	0,340	0,340	0,323	0,0022663	0,0476	0,371	0,276
13,5	-570	-488	-508	-506	0,253	0,363	0,336	0,339	0,323	0,0022799	0,0477	0,370	0,275
14	-570	-490	-509	-515	0,253	0,360	0,335	0,327	0,319	0,0020986	0,0458	0,364	0,273
14,5	-571	-490	-510	-519	0,252	0,360	0,333	0,321	0,317	0,0021194	0,0460	0,363	0,271
15	-571	-490	-510	-520	0,252	0,360	0,333	0,320	0,316	0,0021157	0,0460	0,362	0,270
15,5	-573	-493	-510	-520	0,249	0,356	0,333	0,320	0,315	0,0021176	0,0460	0,361	0,269
16	-573	-495	-511	-520	0,249	0,353	0,332	0,320	0,314	0,0020291	0,0450	0,359	0,269
16,5	-575	-500	-513	-521	0,247	0,347	0,329	0,319	0,310	0,0019343	0,0440	0,354	0,266
17	-575	-500	-515	-521	0,247	0,347	0,327	0,319	0,310	0,0019024	0,0436	0,353	0,266
17,5	-576	-501	-517	-523	0,245	0,345	0,324	0,316	0,308	0,0018798	0,0434	0,351	0,264
18	-576	-501	-518	-523	0,245	0,345	0,323	0,316	0,307	0,0018658	0,0432	0,351	0,264
18,5	-577	-502	-519	-523	0,244	0,344	0,321	0,316	0,306	0,0018739	0,0433	0,350	0,263
19	-578	-502	-519	-524	0,243	0,344	0,321	0,315	0,306	0,0019213	0,0438	0,349	0,262
19,5	-579	-502	-519	-524	0,241	0,344	0,321	0,315	0,305	0,0019777	0,0445	0,350	0,261
20	-579	-502	-519	-524	0,241	0,344	0,321	0,315	0,305	0,0019777	0,0445	0,350	0,261
20,5	-579	-502	-519	-524	0,241	0,344	0,321	0,315	0,305	0,0019777	0,0445	0,350	0,261

Tabela A5 - Dados brutos para o primeiro ciclo de testes com 150 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

150 gramas											
Tempo	Valores medidos mmHg			Valores abs em Bar			Estatística				
Minuto	Exp 8	Exp 9	Exp 10	Exp 8	Exp 9	Exp 10	Média	Variancia	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-670	-670	-670	0,120	0,120	0,120	0,120	0,00000	0,0000	0,120	0,120
0,01	-480	-360	-480	0,373	0,533	0,373	0,427	0,00853	0,0924	0,519	0,334
0,5	-540	-410	-535	0,293	0,467	0,300	0,353	0,00964	0,0982	0,452	0,255
1	-570	-432	-560	0,253	0,437	0,267	0,319	0,01053	0,1026	0,422	0,216
1,5	-583	-460	-583	0,236	0,400	0,236	0,291	0,00896	0,0947	0,385	0,196
2	-591	-488	-592	0,225	0,363	0,224	0,271	0,00635	0,0797	0,350	0,191
2,5	-600	-500	-600	0,213	0,347	0,213	0,258	0,00592	0,0770	0,335	0,181
3	-600	-515	-600	0,213	0,327	0,213	0,251	0,00428	0,0654	0,317	0,186
3,5	-600	-532	-601	0,213	0,304	0,212	0,243	0,00278	0,0527	0,296	0,190
4	-605	-540	-608	0,207	0,293	0,203	0,234	0,00262	0,0512	0,285	0,183
4,5	-605	-548	-608	0,207	0,283	0,203	0,231	0,00203	0,0451	0,276	0,186
5	-607	-552	-610	0,204	0,277	0,200	0,227	0,00190	0,0435	0,271	0,184
5,5	-610	-560	-610	0,200	0,267	0,200	0,222	0,00148	0,0385	0,261	0,184
6	-610	-562	-612	0,200	0,264	0,197	0,220	0,00142	0,0377	0,258	0,183
6,5	-610	-565	-613	0,200	0,260	0,196	0,219	0,00129	0,0358	0,254	0,183
7	-610	-570	-613	0,200	0,253	0,196	0,216	0,00102	0,0320	0,248	0,184
7,5	-610	-572	-613	0,200	0,251	0,196	0,216	0,00093	0,0305	0,246	0,185
8	-610	-578	-613	0,200	0,243	0,196	0,213	0,00067	0,0259	0,239	0,187
8,5	-612	-580	-613	0,197	0,240	0,196	0,211	0,00063	0,0250	0,236	0,186
9	-612	-582	-613	0,197	0,237	0,196	0,210	0,00055	0,0235	0,234	0,187
9,5	-612	-582	-613	0,197	0,237	0,196	0,210	0,00055	0,0235	0,234	0,187
10	-612	-585	-613	0,197	0,233	0,196	0,209	0,00045	0,0212	0,230	0,188
10,5	-612	-588	-613	0,197	0,229	0,196	0,208	0,00036	0,0189	0,226	0,189
11	-612	-589	-613	0,197	0,228	0,196	0,207	0,00033	0,0181	0,225	0,189
11,5	-612	-590	-613	0,197	0,227	0,196	0,207	0,00030	0,0173	0,224	0,189
12	-612	-590	-613	0,197	0,227	0,196	0,207	0,00030	0,0173	0,224	0,189
12,5	-612	-591	-615	0,197	0,225	0,193	0,205	0,00030	0,0174	0,223	0,188
13	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
13,5	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
14	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
14,5	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
15	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188

Tabela A6 - Dados brutos para o segundo ciclo de testes com 150 gramas de carvão e 5 ml de formiato de metila

150 gramas											
Tempo	Valores medidos mmHg			Valores abs em Bar			Estatística				
Minuto	Exp 8	Exp 9	Exp 10	Exp 8	Exp 9	Exp 10	Média	Variancia	Des. Pad	+ Desv.Pad	- Desv.Pad
0	-670	-670	-670	0,120	0,120	0,120	0,120	0,00000	0,0000	0,120	0,120
0,01	-480	-360	-480	0,373	0,533	0,373	0,427	0,00853	0,0924	0,519	0,334
0,5	-540	-410	-535	0,293	0,467	0,300	0,353	0,00964	0,0982	0,452	0,255
1	-570	-432	-560	0,253	0,437	0,267	0,319	0,01053	0,1026	0,422	0,216
1,5	-583	-460	-583	0,236	0,400	0,236	0,291	0,00896	0,0947	0,385	0,196
2	-591	-488	-592	0,225	0,363	0,224	0,271	0,00635	0,0797	0,350	0,191
2,5	-600	-500	-600	0,213	0,347	0,213	0,258	0,00592	0,0770	0,335	0,181
3	-600	-515	-600	0,213	0,327	0,213	0,251	0,00428	0,0654	0,317	0,186
3,5	-600	-532	-601	0,213	0,304	0,212	0,243	0,00278	0,0527	0,296	0,190
4	-605	-540	-608	0,207	0,293	0,203	0,234	0,00262	0,0512	0,285	0,183
4,5	-605	-548	-608	0,207	0,283	0,203	0,231	0,00203	0,0451	0,276	0,186
5	-607	-552	-610	0,204	0,277	0,200	0,227	0,00190	0,0435	0,271	0,184
5,5	-610	-560	-610	0,200	0,267	0,200	0,222	0,00148	0,0385	0,261	0,184
6	-610	-562	-612	0,200	0,264	0,197	0,220	0,00142	0,0377	0,258	0,183
6,5	-610	-565	-613	0,200	0,260	0,196	0,219	0,00129	0,0358	0,254	0,183
7	-610	-570	-613	0,200	0,253	0,196	0,216	0,00102	0,0320	0,248	0,184
7,5	-610	-572	-613	0,200	0,251	0,196	0,216	0,00093	0,0305	0,246	0,185
8	-610	-578	-613	0,200	0,243	0,196	0,213	0,00067	0,0259	0,239	0,187
8,5	-612	-580	-613	0,197	0,240	0,196	0,211	0,00063	0,0250	0,236	0,186
9	-612	-582	-613	0,197	0,237	0,196	0,210	0,00055	0,0235	0,234	0,187
9,5	-612	-582	-613	0,197	0,237	0,196	0,210	0,00055	0,0235	0,234	0,187
10	-612	-585	-613	0,197	0,233	0,196	0,209	0,00045	0,0212	0,230	0,188
10,5	-612	-588	-613	0,197	0,229	0,196	0,208	0,00036	0,0189	0,226	0,189
11	-612	-589	-613	0,197	0,228	0,196	0,207	0,00033	0,0181	0,225	0,189
11,5	-612	-590	-613	0,197	0,227	0,196	0,207	0,00030	0,0173	0,224	0,189
12	-612	-590	-613	0,197	0,227	0,196	0,207	0,00030	0,0173	0,224	0,189
12,5	-612	-591	-615	0,197	0,225	0,193	0,205	0,00030	0,0174	0,223	0,188
13	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
13,5	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
14	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
14,5	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188
15	-612	-592	-615	0,197	0,224	0,193	0,205	0,00028	0,0167	0,222	0,188

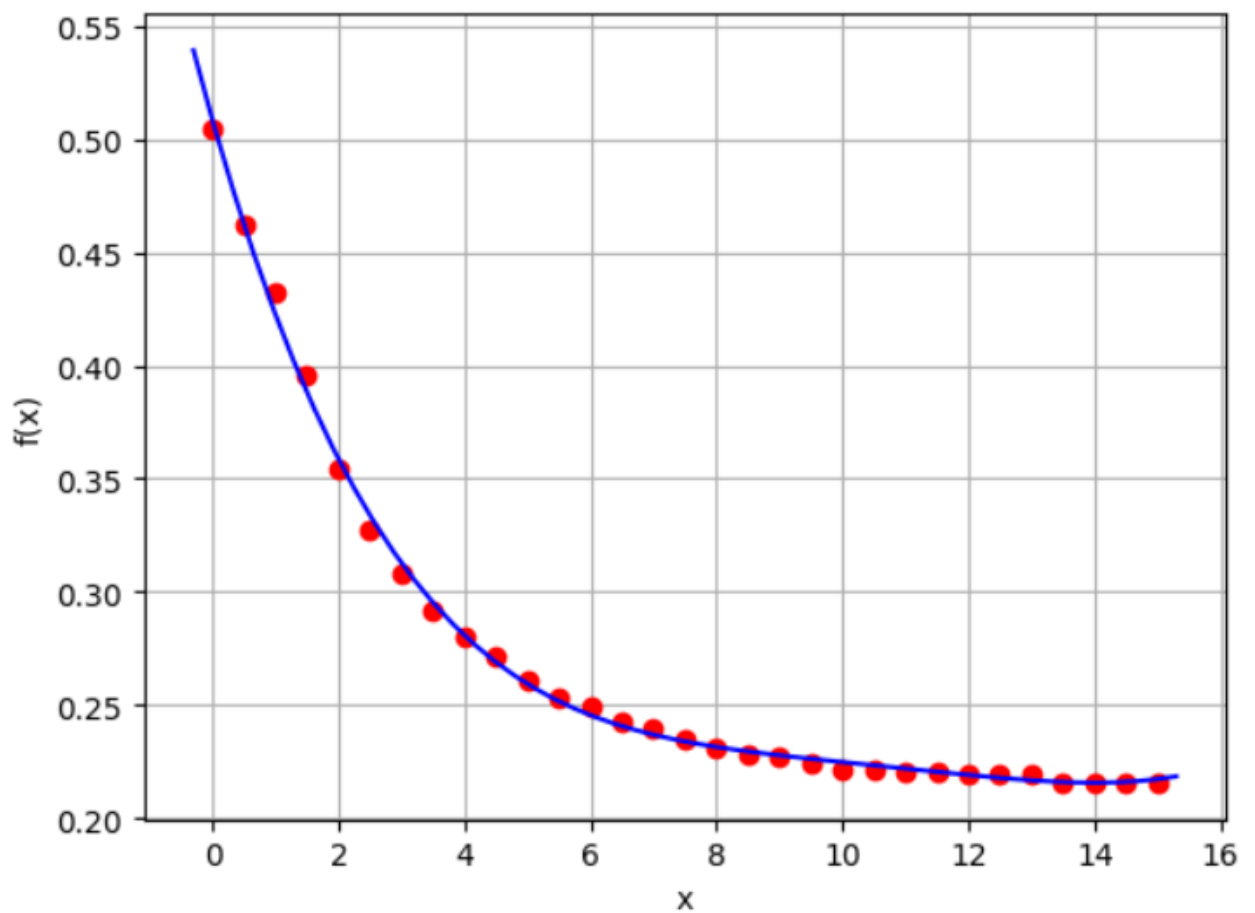
Aqui são apresentadas as equações geradas com o código em Python sem arredondamento, e seus respectivos resíduos e gráficos

Equação A1 – Equação original 4.3 gerada com Python

$$f(t) = 1.9650473193652152e-05*t^4 - 0.0008393114551924091*t^3 + 0.01343774648600167*t^2 - 0.09843896416894363*t + 0.508364994824905$$

Resíduo: 0,000353

Figura A1 – Gráfico da equação 4.3 gerado com Python



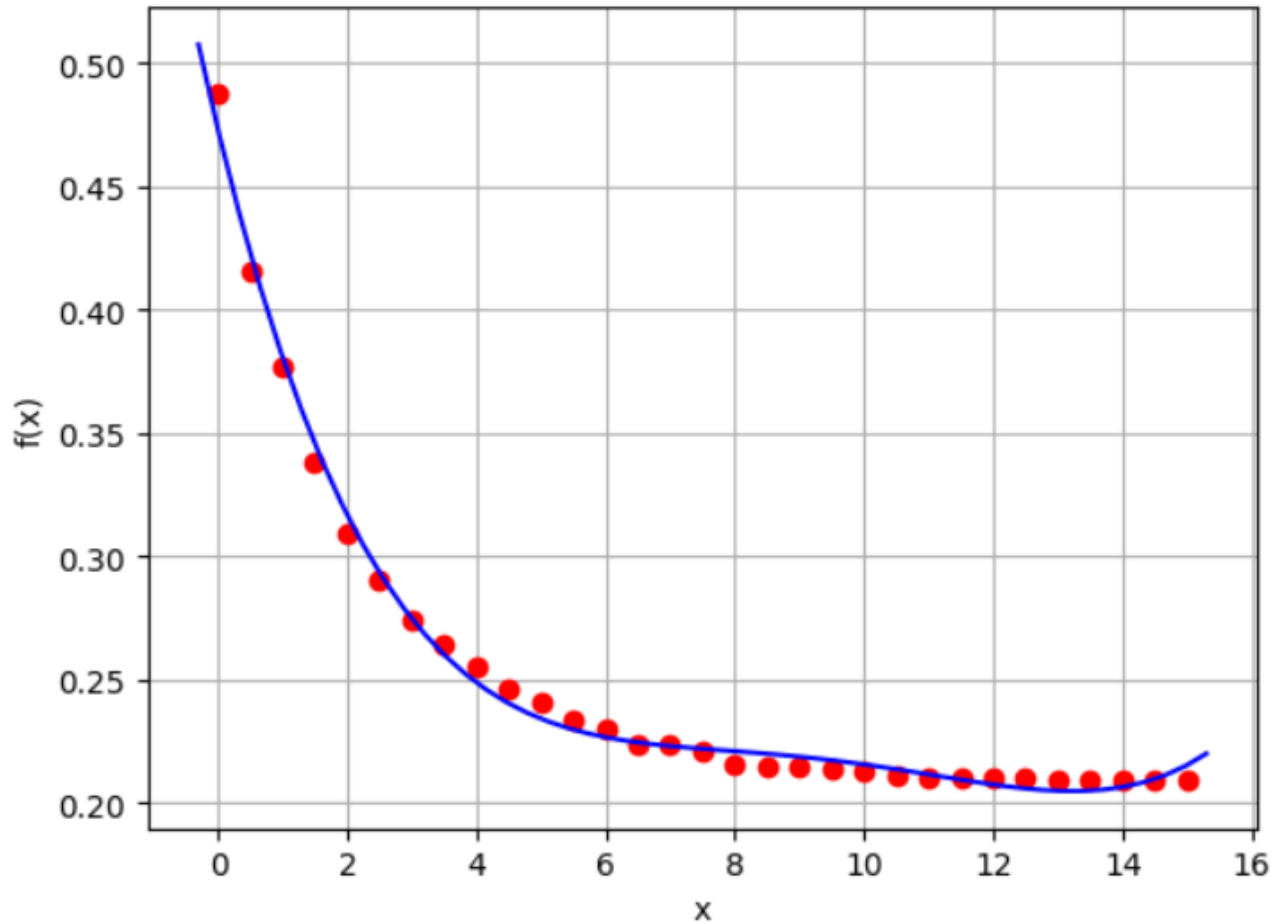
Fonte: Do autor

Equação A2 – Equação original 4.10 gerada com Python

$$f(t) = 3.411528092549816e-05*t^4 - 0.0012932809082788304*t^3 + 0.017841283012692527*t^2 - 0.10897251030557967*t + 0.4733382784198738$$

Resíduo: 0,000776

Figura A2 – Gráfico da equação 4.10 gerado com Python



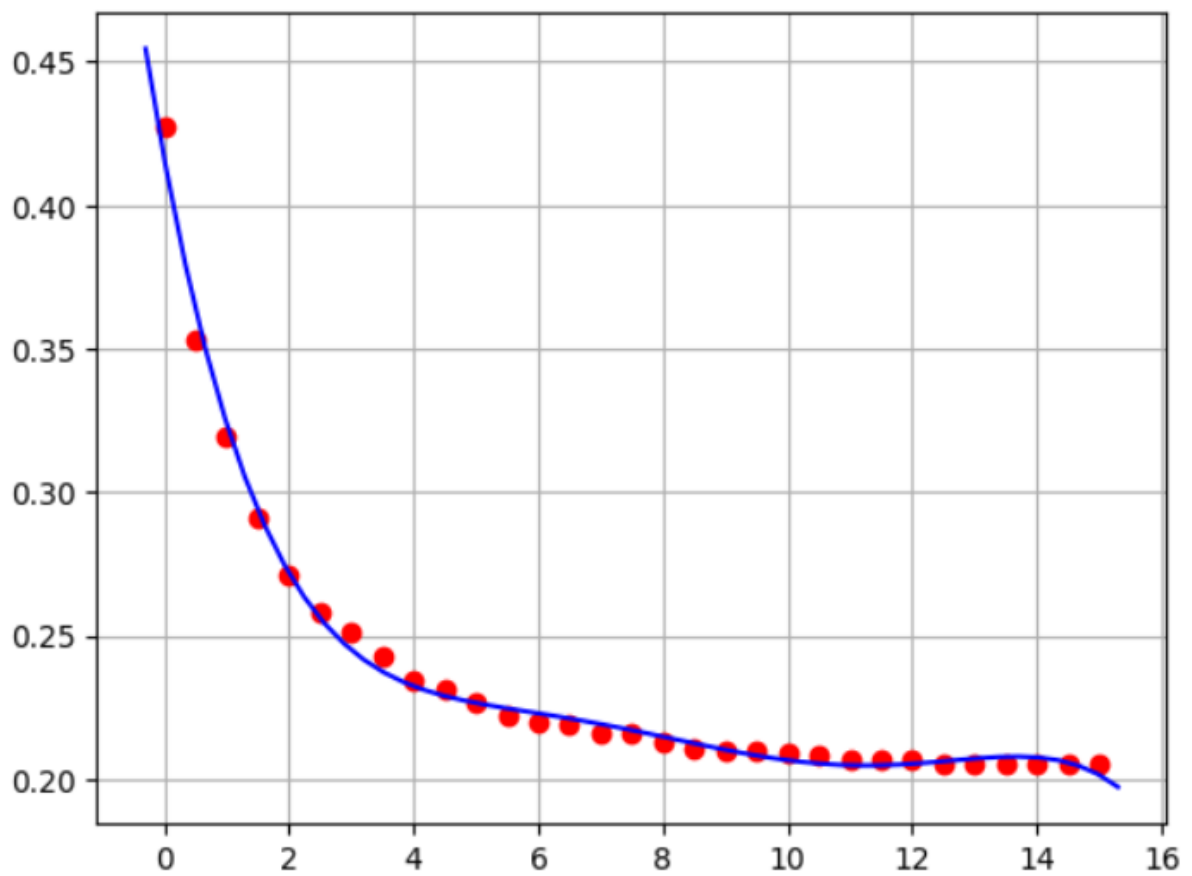
Fonte: Do autor

Equação A3 – Equação original 4.11 gerada com Python

$$f(x) = -4.9112163613792955e-06*t^5 + 0.00021837512017921194*t^4 - 0.0036881750805640226*t^3 + 0.029709414920612756*t^2 - 0.11850351251985043*t + 0.41621927289878213$$

Resíduo: 0,000446

Figura A3 – Gráfico da equação 4.11 gerado com Python



Fonte: Do autor

APENDICE B

Tabela de saturação do R141b retirado do site do NIST.

Figura B1 – Tabela de saturação do R141b na fase líquida

NIST Chemistry WebBook, SRD 69

Saturation Properties for 1,1-Dichloro-1-fluoroethane (R141b) – Temperature Increments

- [Liquid Phase Data](#)
- [Vapor Phase Data](#)
- [Auxiliary Data](#)
- [References and Notes](#)
- [Notes](#)
- **Other Data Available:**
 - [Use the interactive display.](#) (requires JavaScript / HTML 5 canvas capable browser).
 - [Download data as a tab-delimited text file.](#)
 - [Main NIST Chemistry WebBook page](#) for this species.
 - [Recommended citation](#) for data from this page.
 - [Fluid data for other species](#)

Liquid Phase Data

Data on Saturation Curve

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m3)	Volume (m3/kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Surf. Tension (N/m)	Phase
0.0000	0.28098	1281.1	0.00078055	44.387	44.409	0.17566	0.78749	1.1249	914.99	-0.041872	552.61	0.097720	0.021328	liquid
2.0000	0.30756	1277.4	0.00078282	46.638	46.662	0.18387	0.78883	1.1269	907.31	-0.041558	538.58	0.097149	0.021074	liquid
4.0000	0.33614	1273.7	0.00078512	48.893	48.919	0.19204	0.79020	1.1289	899.66	-0.041235	525.07	0.096577	0.020820	liquid
6.0000	0.36683	1270.0	0.00078743	51.151	51.180	0.20016	0.79160	1.1310	892.03	-0.040903	512.03	0.096005	0.020568	liquid
8.0000	0.39973	1266.2	0.00078976	53.415	53.446	0.20824	0.79302	1.1332	884.42	-0.040561	499.46	0.095434	0.020315	liquid
10.0000	0.43496	1262.4	0.00079212	55.682	55.716	0.21628	0.79447	1.1354	876.83	-0.040211	487.32	0.094864	0.020064	liquid
12.0000	0.47263	1258.7	0.00079450	57.954	57.991	0.22427	0.79595	1.1377	869.27	-0.039850	475.60	0.094295	0.019813	liquid
14.0000	0.51287	1254.9	0.00079690	60.230	60.271	0.23223	0.79745	1.1400	861.73	-0.039481	464.27	0.093727	0.019562	liquid
16.0000	0.55580	1251.1	0.00079932	62.511	62.555	0.24014	0.79897	1.1424	854.21	-0.039101	453.32	0.093160	0.019312	liquid
18.0000	0.60154	1247.3	0.00080176	64.796	64.844	0.24802	0.80052	1.1449	846.71	-0.038711	442.73	0.092594	0.019063	liquid
20.0000	0.65023	1243.4	0.00080423	67.087	67.139	0.25586	0.80208	1.1474	839.24	-0.038311	432.48	0.092030	0.018814	liquid
22.0000	0.70198	1239.6	0.00080673	69.382	69.438	0.26366	0.80367	1.1499	831.78	-0.037900	422.56	0.091467	0.018566	liquid
24.0000	0.75694	1235.7	0.00080924	71.682	71.743	0.27143	0.80527	1.1526	824.34	-0.037478	412.95	0.090906	0.018319	liquid
26.0000	0.81525	1231.8	0.00081179	73.987	74.054	0.27916	0.80690	1.1552	816.91	-0.037046	403.63	0.090347	0.018072	liquid
28.0000	0.87704	1228.0	0.00081436	76.298	76.369	0.28686	0.80854	1.1580	809.51	-0.036602	394.61	0.089789	0.017825	liquid
30.0000	0.94245	1224.1	0.00081696	78.614	78.691	0.29453	0.81020	1.1607	802.12	-0.036147	385.85	0.089232	0.017580	liquid
32.0000	1.0116	1220.1	0.00081958	80.935	81.018	0.30216	0.81188	1.1636	794.75	-0.035679	377.36	0.088678	0.017335	liquid
34.0000	1.0847	1216.2	0.00082224	83.262	83.351	0.30976	0.81357	1.1665	787.40	-0.035200	369.11	0.088126	0.017090	liquid
36.0000	1.1619	1212.2	0.00082492	85.594	85.690	0.31733	0.81528	1.1694	780.06	-0.034707	361.11	0.087575	0.016846	liquid
38.0000	1.2433	1208.3	0.00082763	87.932	88.035	0.32487	0.81700	1.1724	772.73	-0.034202	353.33	0.087027	0.016603	liquid
40.0000	1.3290	1204.3	0.00083038	90.276	90.386	0.33238	0.81874	1.1754	765.42	-0.033684	345.78	0.086480	0.016361	liquid
42.0000	1.4193	1200.3	0.00083315	92.626	92.744	0.33986	0.82049	1.1786	758.13	-0.033152	338.44	0.085936	0.016119	liquid
44.0000	1.5142	1196.2	0.00083596	94.981	95.108	0.34731	0.82225	1.1817	750.85	-0.032605	331.30	0.085394	0.015878	liquid
46.0000	1.6140	1192.2	0.00083880	97.343	97.478	0.35474	0.82403	1.1849	743.57	-0.032044	324.35	0.084854	0.015637	liquid
48.0000	1.7188	1188.1	0.00084168	99.711	99.855	0.36214	0.82582	1.1882	736.32	-0.031468	317.60	0.084316	0.015397	liquid
50.0000	1.8288	1184.0	0.00084459	102.08	102.24	0.36951	0.82762	1.1916	729.07	-0.030876	311.02	0.083781	0.015158	liquid

Fonte: webbook.nist.gov

Figura B2 – Tabela de saturação do R141b na fase gasosa

Vapor Phase Data

Data on Saturation Curve

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (kg/m ³)	Volume (m ³ /kg)	Internal Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (J/g*K)	Cv (J/g*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)	Joule-Thomson (K/bar)	Viscosity (uPa*s)	Therm. Cond. (W/m*K)	Phase
0.0000	0.28098	1.4709	0.67984	262.91	282.01	1.0455	0.65894	0.73836	145.05	6.8951	8.4178	0.0082465	vapor
2.0000	0.30756	1.6001	0.62496	264.14	283.36	1.0441	0.66272	0.74264	145.42	6.6866	8.4796	0.0083697	vapor
4.0000	0.33614	1.7381	0.57535	265.37	284.71	1.0428	0.66651	0.74696	145.79	6.4875	8.5413	0.0084940	vapor
6.0000	0.36683	1.8853	0.53041	266.60	286.06	1.0416	0.67031	0.75130	146.15	6.2971	8.6031	0.0086195	vapor
8.0000	0.39973	2.0423	0.48965	267.84	287.41	1.0404	0.67412	0.75567	146.50	6.1151	8.6648	0.0087462	vapor
10.000	0.43496	2.2093	0.45262	269.08	288.77	1.0393	0.67793	0.76008	146.84	5.9409	8.7265	0.0088741	vapor
12.000	0.47263	2.3870	0.41894	270.32	290.12	1.0383	0.68176	0.76452	147.17	5.7743	8.7881	0.0090031	vapor
14.000	0.51287	2.5757	0.38825	271.57	291.48	1.0374	0.68559	0.76898	147.49	5.6147	8.8498	0.0091334	vapor
16.000	0.55580	2.7759	0.36025	272.82	292.84	1.0366	0.68942	0.77348	147.80	5.4618	8.9115	0.0092649	vapor
18.000	0.60154	2.9881	0.33466	274.07	294.20	1.0358	0.69326	0.77802	148.11	5.3153	8.9731	0.0093977	vapor
20.000	0.65023	3.2128	0.31126	275.32	295.56	1.0351	0.69711	0.78258	148.40	5.1748	9.0348	0.0095317	vapor
22.000	0.70198	3.4505	0.28981	276.58	296.92	1.0344	0.70096	0.78717	148.68	5.0401	9.0965	0.0096669	vapor
24.000	0.75694	3.7017	0.27015	277.84	298.29	1.0338	0.70482	0.79180	148.96	4.9109	9.1582	0.0098035	vapor
26.000	0.81525	3.9669	0.25209	279.10	299.65	1.0333	0.70868	0.79646	149.22	4.7869	9.2199	0.0099413	vapor
28.000	0.87704	4.2467	0.23548	280.36	301.02	1.0328	0.71255	0.80116	149.47	4.6679	9.2816	0.010081	vapor
30.000	0.94245	4.5416	0.22019	281.63	302.38	1.0324	0.71642	0.80588	149.72	4.5536	9.3434	0.010221	vapor
32.000	1.0116	4.8522	0.20609	282.90	303.74	1.0321	0.72029	0.81064	149.95	4.4438	9.4053	0.010363	vapor
34.000	1.0847	5.1790	0.19309	284.17	305.11	1.0318	0.72416	0.81544	150.17	4.3383	9.4672	0.010506	vapor
36.000	1.1619	5.5226	0.18107	285.44	306.48	1.0315	0.72803	0.82027	150.38	4.2370	9.5292	0.010651	vapor
38.000	1.2433	5.8837	0.16996	286.71	307.84	1.0313	0.73191	0.82513	150.57	4.1396	9.5912	0.010797	vapor
40.000	1.3290	6.2628	0.15967	287.98	309.20	1.0311	0.73578	0.83003	150.76	4.0459	9.6534	0.010944	vapor
42.000	1.4193	6.6605	0.15014	289.26	310.57	1.0310	0.73965	0.83496	150.93	3.9558	9.7156	0.011094	vapor
44.000	1.5142	7.0774	0.14129	290.54	311.93	1.0310	0.74353	0.83993	151.09	3.8692	9.7780	0.011244	vapor
46.000	1.6140	7.5143	0.13308	291.82	313.30	1.0310	0.74740	0.84494	151.24	3.7859	9.8406	0.011396	vapor
48.000	1.7188	7.9717	0.12544	293.10	314.66	1.0310	0.75127	0.84999	151.38	3.7057	9.9032	0.011550	vapor
50.000	1.8288	8.4504	0.11834	294.38	316.02	1.0311	0.75514	0.85507	151.51	3.6286	9.9661	0.011705	vapor

Auxiliary Data

Reference States, ASHRAE Convention

Enthalpy	H = 0 at -40°C for saturated liquid.
Entropy	S = 0 at -40°C for saturated liquid.

Fonte: webbook.nist.gov