



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA

Captação de vapor de água em sílica gel para sistema de refrigeração a vácuo

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Cláudio dos Santos Dinis

Orientadores

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Doutor José Manuel Baranda M. da Silva Ribeiro

Júri

Presidente

Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Engenheira Cátia Vanessa de Matos Augusto
Aluna de Doutoramento da Universidade de Coimbra

Coimbra, Janeiro de 2012

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento e gratidão. Na impossibilidade de agradecer a todos os que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e académico, gostaria de agradecer a algumas pessoas, em particular:

À Doutoranda Cátia Augusto, por todo o apoio e disponibilidade dispensados, no decorrer do trabalho, e aos meus Orientadores, Professor Doutor Adélio Gaspar e Professor Doutor Baranda Ribeiro, pela orientação da obra.

Ao Colega António Liberato, pela sua preciosa ajuda, disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Aos meus Pais por todos os valores que me transmitem e por todo o apoio dado durante toda a minha vida académica. Quero agradecer também à minha irmã Cristiana e sobrinho Gabriel por preencherem de alegria a minha existência.

A todos os meus amigos que depositaram a sua confiança em mim, pela preocupação, em especial ao Bruno e ao Gonçalo. Quero também agradecer à minha namorada, Catarina Amaro, por todo o carinho que me tem dedicado.

A todos, o meu sincero Obrigado!

(Cláudio dos Santos Dinis)

Resumo

A presente dissertação está inserida num trabalho de investigação, a decorrer no Departamento de Engenharia Mecânica, onde é estudada a refrigeração evaporativa a vácuo, sendo que a produção de vapor de água é o principal inconveniente do processo. Assim, a captação de vapor de água pela sílica gel é o principal objectivo deste trabalho, que se baseia na realização de ensaios experimentais, para avaliar o comportamento da sílica gel neste processo.

No presente trabalho, foi elaborado um programa de aquisição de dados, que permite visualizar a variação de todos os parâmetros medidos durante a actividade experimental. Este programa permite também a gravação desses mesmos dados, para tratamento futuro.

Para estudar e perceber o fenómeno de adsorção, e como seria possível a sua utilização neste processo, foram analisados todos os aspectos com ele relacionados, com especial incidência na adsorção de vapor de água em sílica gel. Analisaram-se diversos estudos nesta área, que permitiram obter um plano de análise da capacidade de adsorção da sílica gel. Durante a realização dos ensaios experimentais, parâmetros como a quantidade de sílica gel e o tipo de suporte utilizado foram analisados detalhadamente.

Verifica-se que quanto maior é a quantidade de sílica gel utilizada no arrefecimento de uma determinada quantidade de água, menor é a temperatura final desta e maior a quantidade de vapor adsorvido. Utilizando sílica gel do tipo A conseguiu-se obter uma percentagem de vapor adsorvido de cerca de 90 %. Uma configuração do leito de sílica gel, que possibilite uma maior área de contacto entre a sílica e o vapor de água, leva a que sejam atingidas temperaturas mais baixas, resultantes da maior quantidade de vapor adsorvido.

Tendo em conta as conclusões retiradas da análise dos resultados obtidos, foi realizada uma proposta de um novo suporte para a sílica gel.

Palavras-chave: Refrigeração evaporativa a vácuo, adsorção, sílica gel, vapor de água.

Abstract

This dissertation is part of a research work in progress at the Mechanical Engineering Department, where vacuum evaporative cooling is studied and the production of water vapor is the main inconvenience of the process. Thus, the uptake of water vapor through the silica gel is the main objective of this paper, based on experimental tests to evaluate the behavior of silica gel in this process.

In this study, a data acquisition program was formulated in order to visualize the variation of all measured parameters during the experimental activity. This program also allows the recording of data for future treatment.

In order to investigate and understand the phenomenon of adsorption and how it would be possible to use it in this process, all related aspects were studied, with particular focus on adsorption of water vapor in silica gel. Several researches on the matter were analyzed, allowing to elaborate a profile of analysis for the adsorption capacity. During the experimental tests, parameters such as the amount of silica gel and the type of container were analyzed in detail.

It was verified that, for a determined amount of water, as we increase the amount of silica gel, lower final temperatures are reached and more vapor is adsorbed. Using type A silica gel, the percentage of adsorbed vapor achieved was about 90 %. It was also observed that the usage of container configurations that enable a larger contact surface between silica and water vapor, leads to achieving lower temperatures due to the higher amount of vapor adsorbed.

Taking into account the conclusions drawn from the analysis of experimental results, a proposal was made for a new silica gel container.

Keywords Vacuum evaporative cooling; adsorption; silica gel; water vapor

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e objectivos	1
1.2. Refrigeração evaporativa a vácuo	1
1.3. Estrutura da dissertação	4
2. Sistema de aquisição de dados – LabVIEW	6
2.1. Descrição da instalação experimental	6
2.2. Descrição do sistema de aquisição de dados	7
3. Captação de vapor de água em sílica gel	11
3.1. O processo de adsorção	11
3.2. Adsorção de vapor de água em sílica gel	18
3.2.1. Planeamento da actividade experimental	24
3.2.2. Actividade experimental	28
3.2.3. Apresentação e discussão de resultados	32
4. Proposta de suporte para a sílica gel	44
5. Conclusões	48
6. Referências bibliográficas	50
7. Anexo A – Sistema de Aquisição de Dados	54
8. Anexo B – O Processo de Adsorção	56

Índice de Figuras

Figura 1. Evolução da pressão de saturação da água com a temperatura.....	3
Figura 2. Esquema da instalação experimental utilizada neste trabalho.	6
Figura 3. Painel frontal do programa elaborado para a temperatura.	9
Figura 4. Representação de um sistema de adsorção de dois elementos adsortivos.....	12
Figura 5. Representação dos três tipos de curvas de equilíbrio de adsorção.....	15
Figura 6. Representação dos seis tipos principais de isotérmicas de adsorção.....	16
Figura 7. Representação dos três tipos de grupos silanóis presentes na sílica gel.....	19
Figura 8. Representação da estrutura da sílica gel evidenciando um possível poro da partícula.	19
Figura 9. Representação dos grupos silanóis contendo moléculas de água adsorvidas fisicamente através de ligações de hidrogénio.....	20
Figura 10. Representação das várias isotérmicas obtidas para a adsorção de vapor de água em sílica gel do tipo A.	23
Figura 11. Isotérmicas de adsorção de vapor de água em sílica gel do tipo A.....	23
Figura 12. Suporte construído para colocar a sílica gel no interior da câmara de vácuo. ...	28
Figura 13. Suporte construído em forma de cilindro.....	30
Figura 14. Parte móvel do suporte construída a uma altura inferior, em relação aos restantes.	31
Figura 15. Evolução da temperatura da água verificada nos ensaios 1, 3 e 4.	33
Figura 16. Evolução da temperatura da água verificada nos ensaios 5, 6 e 7.	35
Figura 17. Percentagem de vapor adsorvido dos ensaios 3, 4, 6, e 7.....	36
Figura 18. Evolução da temperatura da água dos ensaios 1, 2 e 3.....	38
Figura 19. Evolução da temperatura dos ensaios 1, 4 e 7.....	39
Figura 20. Evolução da temperatura dos ensaios 5, 3 e 8.....	41
Figura 21. Temperatura final dos ensaios realizados.....	42
Figura 22. Percentagem de vapor adsorvido nos ensaios realizados.....	42
Figura 23. Representação da câmara de vácuo e das furações para os parafusos de apoio do suporte.....	44
Figura 24. Representação do parafuso para apoio do suporte.	45

Figura 25. Representação do suporte para colocar sílica gel.....	46
Figura 26. Representação do conjunto câmara e suporte.....	46
Figura 27. Vista, em corte, do conjunto, simulando uma garrafa no interior da câmara....	47
Figura 28. Interface gráfica da evolução da temperatura.....	54
Figura 29. Painel frontal da medição da massa.	55
Figura 30. Painel frontal da medição da pressão.	55
Figura 31. Tipos de histerese de adsorção.	56
Figura 32. Representação do fenómeno de histerese num poro cilíndrico.	57

Índice de Tabelas

Tabela 1. Algumas propriedades da sílica gel do tipo A.	21
Tabela 2. Valores de pressão e capacidade de adsorção obtidos nos estudos analisados. ...	26
Tabela 3. Valores de massa de vapor gerado e de sílica gel necessária para a realização dos ensaios experimentais.	27
Tabela 4. Resumo das condições de realização dos ensaios.	31
Tabela 5. Resultados obtidos variando a quantidade de sílica gel, utilizando o suporte 2.	32
Tabela 6. Resultados obtidos variando a quantidade de sílica gel, utilizando o suporte 3.	34
Tabela 7. Resultados obtidos para diferentes configurações de suporte ($m_{SG} = 150,2$ g). .	37
Tabela 8. Resultados obtidos para diferentes configurações de suporte ($m_{SG} = 247,3$ g). .	39
Tabela 9. Resultados obtidos com a utilização de meio absorvente.	40

Simbologia e Siglas

Simbologia

ΔT – diferença de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

ρ_a – massa volúmica da água (kg/m^3)

c_p – calor específico a pressão constante ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

h_{lv} – calor latente de evaporação (J/kg)

m_a – massa de água (kg)

m_{SG} – massa de sílica gel (kg)

m_v – massa de vapor de água gerado (kg)

q – quantidade adsorvida de uma determinada substância (kg)

P – pressão de equilíbrio (Pa)

T – temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$)

T_i – temperatura inicial da água ($^{\circ}\text{C}$)

T_f – temperatura final da água ($^{\circ}\text{C}$)

V_a – volume de água (m^3)

x – capacidade de adsorção (kg/kg)

Siglas

AQS – Água Quente Sanitária

DAQ – *data acquisition*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

IAS – *International Adsorption Society*

IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

NI – *National Instruments*

SG – Sílica Gel

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e objectivos

A presente dissertação resulta de um trabalho de investigação, que se encontra a decorrer no DEM, cuja finalidade é estudar a refrigeração de vários produtos.

Com a evolução dos tempos, verifica-se que o Homem, na sua vida pessoal, tende a executar qualquer tarefa doméstica de forma mais rápida possível, pelo que os equipamentos associados a essas tarefas têm de estar projectados de modo a que cumpram a sua função, no mais curto espaço de tempo. A refrigeração de produtos alimentares, incluindo as bebidas que maioritariamente são consumidas bem frescas, é actualmente caracterizada por ser um processo longo, que não satisfaz o consumidor. Deste modo, a refrigeração evaporativa a vácuo surge como uma técnica que se pode tornar vantajosa, relativamente aos sistemas convencionais de refrigeração, já que permite uma redução do tempo de operação.

O vapor de água gerado no processo de refrigeração evaporativa a vácuo é um dos seus maiores inconvenientes. Nesse sentido, este trabalho tem como principal objectivo avaliar a capacidade da sílica gel na captação de vapor de água, sob as condições do processo de refrigeração evaporativa a vácuo. Assim, o presente trabalho visa a realização de ensaios experimentais para averiguar a capacidade da sílica gel em reter vapor de água e avaliar a melhor configuração do respectivo leito.

Paralelamente a este trabalho, pretende-se realizar um programa, em *LabView*, para a aquisição de sinal do conjunto de sensores existentes na instalação experimental, bem como a elaboração de uma proposta para um novo suporte de sílica gel.

1.2. Refrigeração evaporativa a vácuo

A refrigeração evaporativa a vácuo é uma técnica que permite uma redução rápida da temperatura dos mais diversos produtos alimentares, através da evaporação da água contida nestes, sob condições de pressão reduzida. Cheng e Lin (2007) referem que a principal característica deste tipo de refrigeração é a rápida evaporação da água contida nos produtos a refrigerar levando, deste modo, a uma remoção rápida do calor contido nesses

mesmos produtos. Os mesmos autores referem, também, que a água é o principal interveniente no processo. Já Sun e Zheng (2006) afirmam que a água funciona como fluido “refrigerante”. Esta técnica tem vindo a ser aplicada essencialmente na indústria alimentar, para a refrigeração e conservação de alimentos como a fruta, vegetais, carne fresca e cozida, peixe e em produtos de panificação (McDonald e Sun, 2000).

A refrigeração evaporativa a vácuo é uma técnica frequentemente utilizada, quando se pretende um rápido decréscimo da temperatura dos produtos, impedindo assim a formação e crescimento de microrganismos prejudiciais para os produtos alimentares, principalmente de carnes cozidas (Dostal e Petera, 2004; McDonald e Sun, 2000, etc.).

Segundo McDonald e Sun (2000), o curto tempo para um determinado produto atingir a temperatura de refrigeração desejada é a grande vantagem da refrigeração a vácuo, comparativamente com os processos de refrigeração convencionais. Estes autores acrescentam ainda que, como consequência da redução do tempo de operação, verifica-se uma diminuição do consumo de energia e que os produtos refrigerados a vácuo apresentam um aumento da sua vida útil e são de melhor qualidade. Zheng e Sun (2004) referem que a refrigeração evaporativa a vácuo tem demonstrado bastantes benefícios para a indústria alimentar, pois os produtos refrigerados a vácuo têm uma distribuição de temperatura interna mais uniforme em comparação com os produtos refrigerados pelos métodos convencionais de refrigeração. Além disso, verifica-se que a refrigeração a vácuo torna-se vantajosa quando se pretende diminuir a temperatura de produtos de elevado tamanho.

Como se mostra na Figura 1, a temperatura à qual a água evapora é directamente dependente da pressão de vapor da envolvente. À pressão de 101325 Pa, a água entra em ebulição a 100 °C. Contudo, o mesmo processo verifica-se a uma temperatura mais baixa, quando a pressão é inferior à referida. Por este motivo, Sun e Zheng (2006) afirmam que a refrigeração a vácuo é o processo oposto da típica panela de pressão, em que os alimentos são cozidos a temperaturas acima do ponto de ebulição da água à pressão ambiente, reduzindo assim o tempo de cozedura.

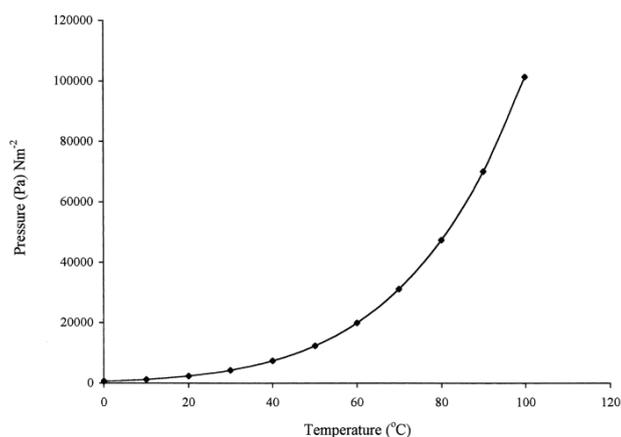


Figura 1. Evolução da pressão de saturação da água com a temperatura; Fonte: McDonald e Sun (2000).

Os produtos a refrigerar são colocados no interior de uma câmara de vácuo e o processo de refrigeração inicia-se à pressão atmosférica. Uma vez iniciado o processo de evacuação, a pressão total no interior da câmara diminui rapidamente. Quando esta se aproxima da pressão de saturação da água, o processo de evaporação inicia-se e faz com que a água arrefeça, pois o calor é retirado desta. Ao evaporar, a água vai absorver calor, de modo a manter um elevado nível de energia do movimento das moléculas no estado gasoso. A quantidade de calor requerida para manter a água no estado gasoso é o denominado calor latente. Desde que o produto submetido à redução de pressão se encontre apenas em contacto com o ar e não com outro meio, o calor latente requerido é obtido por conversão do próprio calor latente do produto.

O processo de refrigeração a vácuo apresenta, contudo, algumas desvantagens em relação aos métodos de refrigeração convencional. Sun e Zheng (2006) referem que, ao contrário dos métodos de refrigeração convencionais, em que o arrefecimento atinge apenas a superfície dos produtos, na refrigeração a vácuo, a evaporação estende-se ao interior dos produtos. Devido ao princípio de funcionamento da refrigeração a vácuo, apenas os produtos que possuem água livre podem ser refrigerados através deste método.

O vapor de água gerado no processo de evaporação, no interior da câmara, é um dos maiores inconvenientes da refrigeração a vácuo, motivo pelo qual este tipo de refrigeração não é muito utilizado em aparelhos domésticos. Segundo McDonald e Sun (2000), o vapor de água produzido durante a evaporação deve ser retirado do interior da câmara, caso contrário, o processo de evaporação abrande e a eficiência da refrigeração fica comprometida. Já Berman (1996), refere que a principal fonte de vapor de água são as superfícies interiores da câmara de vácuo, que retêm vapor de água quando a câmara é

aberta. O sistema de refrigeração ao ser exposto ao ar atmosférico, é contaminado pelo vapor de água contido neste. O nível de contaminação depende das características e tratamento das paredes da câmara, da humidade relativa e turbulência do ar e do intervalo de tempo de exposição do sistema ao ar atmosférico.

Cheng e Lin (2007) apresentam um estudo que vem comprovar o efeito negativo da presença de vapor de água no interior da câmara de vácuo. Para tal, analisam a variação da pressão durante o processo de evacuação para duas situações diferentes, sem e com recipiente contendo água, inserido no interior da câmara. Verifica-se que quando o recipiente não se encontra colocado no interior da câmara de refrigeração, a pressão mais baixa é atingida num menor intervalo de tempo do que na presença do recipiente. No mesmo estudo, verifica-se também que desde o início do processo de evacuação até ao instante em que se atinge a pressão de saturação da água, a temperatura desta mantém-se sensivelmente constante, já que o processo de evaporação que ocorre é irrelevante.

O vapor de água gerado no processo de refrigeração evaporativa a vácuo terá de ser removido de modo a não comprometer a eficiência da refrigeração.

1.3. Estrutura da dissertação

Depois de uma breve descrição do processo de refrigeração evaporativa a vácuo (capítulo 1), nomeadamente do seu princípio de funcionamento, das suas aplicações, vantagens, bem como do problema da produção de vapor de água, este trabalho surge dividido em 4 capítulos fundamentais.

O capítulo 2, consiste na descrição da instalação experimental, bem como do sistema de aquisição de dados que foi implementado e que permite visualizar, em tempo real, as variações de todos os sinais medidos.

O capítulo 3, denominado de “Captação de vapor de água em sílica gel” é separado em duas secções. A primeira onde se expõe o processo de adsorção e, em particular, a adsorção de vapor de água em sílica gel. Na segunda secção, é feita a descrição pormenorizada da actividade experimental, bem como a discussão dos resultados obtidos.

O capítulo 4, surge na sequência das conclusões dos resultados experimentais, onde se propõe uma nova configuração do suporte para a sílica gel.

No capítulo 5 do trabalho, as conclusões referem as principais constatações verificadas ao longo deste trabalho. Serão também apresentadas algumas notas para trabalho futuro.

2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS – *LABVIEW*

Neste capítulo é feita uma descrição da instalação experimental utilizada neste trabalho. São descritos todos os seus constituintes, sendo feita referência às principais características de alguns deles. Posteriormente, é descrito o funcionamento do programa de aquisição e gravação de dados medidos na câmara de vácuo.

2.1. Descrição da instalação experimental

Como referido anteriormente, a refrigeração evaporativa a vácuo é obtida mediante a diminuição da pressão num determinado recipiente fechado ou numa câmara apropriada. Sun e Zheng (2006) referem que uma instalação de refrigeração a vácuo varia de tamanho e forma de acordo com aplicação para que é utilizada. Contudo, dizem que os constituintes básicos de um sistema de refrigeração a vácuo são idênticos e consistem numa câmara de vácuo, numa bomba de vácuo e num condensador de vapor. De facto, os constituintes da instalação experimental deste trabalho são os mesmos dos referidos por aqueles autores, à excepção do condensador de vapor.

A instalação experimental utilizada neste trabalho tem, assim, dois constituintes principais: a bomba e a câmara de vácuo. Associados a estes, existem outros constituintes também importantes, para que o sistema funcione na perfeição. Na Figura 2 é visível um esquema da instalação experimental.

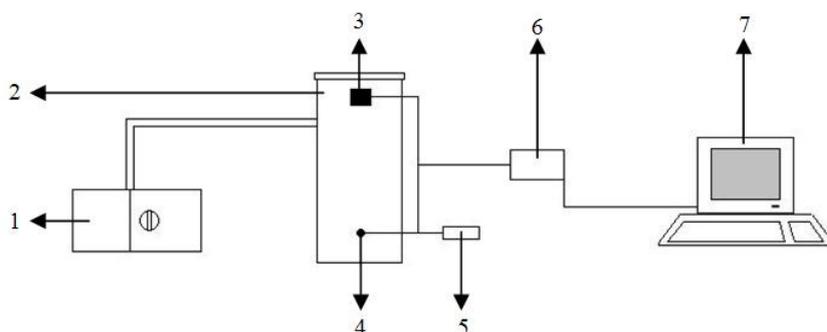


Figura 2. Esquema da instalação experimental utilizada neste trabalho.

- | | |
|----------------------------|---------------------------------|
| 1 – Bomba de vácuo | 5 – Fonte de tensão |
| 2 – Câmara de vácuo | 6 – Placa de aquisição de dados |
| 3 – Conjunto de termopares | 7 – Computador |
| 4 – Sensor de pressão | |

Na instalação experimental é utilizada uma bomba rotativa de palhetas RV 12, da marca Edwards. A pressão mínima que esta bomba consegue atingir são os 0,2 Pa e um caudal de extracção de 12 m³/h. À entrada e saída da bomba são utilizados dois filtros. Um filtro de entrada, que evita o retorno de vapor de óleo da bomba para o interior da câmara e um filtro de saída, cuja função é reter gotículas de óleo e outros odores, evitando que sejam lançados para a atmosfera. Para isolar a bomba da câmara é utilizada uma válvula de diafragma, de accionamento manual.

A câmara de vácuo foi construída em aço inoxidável, tem 0,5m de altura e 0,21m de diâmetro. Acoplados à câmara estão cinco termopares do tipo K, que medem a temperatura no seu interior. Para permitir a entrada de ar na câmara é utilizada uma válvula de admissão de ar de controlo manual. Para que a instalação experimental funcione correctamente, é necessário que a válvula de isolamento esteja totalmente aberta e a de admissão de ar totalmente fechada. O sensor de pressão da Edwards, modelo APG100-XM NW16 é utilizado para medir a pressão no interior da câmara, podendo ser utilizado para uma gama de pressões entre 0,01 Pa e 10⁵ Pa. Este sensor é alimentado por uma fonte de tensão.

Uma placa de terminais da National Instruments (NI), modelo NI SCC – 68 é utilizada para definir as ligações de todos os transdutores presentes na instalação experimental. Recorrendo a um computador, com uma placa de aquisição de dados adequada e respectivo software, é possível efectuar uma leitura, em tempo real, de todos os parâmetros medidos na instalação experimental. Todos os elementos montados na câmara e na bomba de vácuo têm de ser devidamente fixos e vedados, de modo a impedir a entrada de ar quando o sistema se encontra em funcionamento.

É importante referir que durante a preparação da parte experimental, deste trabalho, todos os constituintes foram manuseados muito cuidadosamente, pois alguns deles são bastante sensíveis e frágeis. Um simples risco na superfície de contacto entre os componentes poderá dificultar a vedação completa da câmara, comprometendo assim a produção de vácuo.

2.2. Descrição do sistema de aquisição de dados

Para cada ensaio experimental são medidos parâmetros, como a temperatura e pressão no interior da câmara, a massa do produto a refrigerar e também a temperatura da

placa de aquisição de dados. No processo de refrigeração a vácuo é necessário conhecer quais os valores dos parâmetros atrás referidos, para que se possa verificar a evolução destes e, deste modo, controlar a temperatura final do produto. Para tal, foi realizado um programa de aquisição de dados provenientes da instalação experimental, que podem também ser gravados para posterior análise. A aquisição dos dados é feita pela placa e recorrendo a um software adequado é possível transformar os dados adquiridos e visualizar a sua evolução, em tempo real.

O software utilizado para a elaboração do programa de aquisição de dados foi LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), versão 8.6, desenvolvido pela NI. O LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica, que utiliza ícones, em vez de linhas de texto, para criar aplicações. Deste modo, o programador não necessita de escrever qualquer linha de código e a apresentação gráfica dos processos aumenta a facilidade de leitura e de utilização. Os programas em LabVIEW são conhecidos como instrumentos virtuais e têm dois componentes principais, o painel frontal e o diagrama de blocos. A interface com o utilizador tem o nome de painel frontal, que corresponde ao executável do programa e é construído através de representações gráficas de funções, utilizando um conjunto de ferramentas e objectos. Deverá ser um ambiente de fácil acesso, simples de operar, permitindo a qualquer utilizador uma fácil interacção. Depois da construção do painel frontal é elaborado o diagrama de blocos que é a parte que fica omissa pelo painel frontal. O diagrama de blocos, que pode ser associado a um fluxograma, consiste na programação das operações que se pretendam e é onde se ligam todos os terminais de entrada e saída do instrumento virtual, de modo a definir correctamente o código que comanda os objectos do painel frontal.

O programa construído está dividido em duas partes distintas. Uma primeira, em que se elaborou o sistema de aquisição de dados e uma segunda, em que se definiu o processo de gravação desses mesmos dados para uso posterior. O painel frontal foi desenvolvido de acordo com os parâmetros medidos, que se pretende visualizar, de forma a obter uma interface simples e intuitiva para o utilizador. A interface é constituída por um subgrupo de 3 painéis, em que cada um corresponde a uma grandeza medida, como se pode ver na Figura 3.

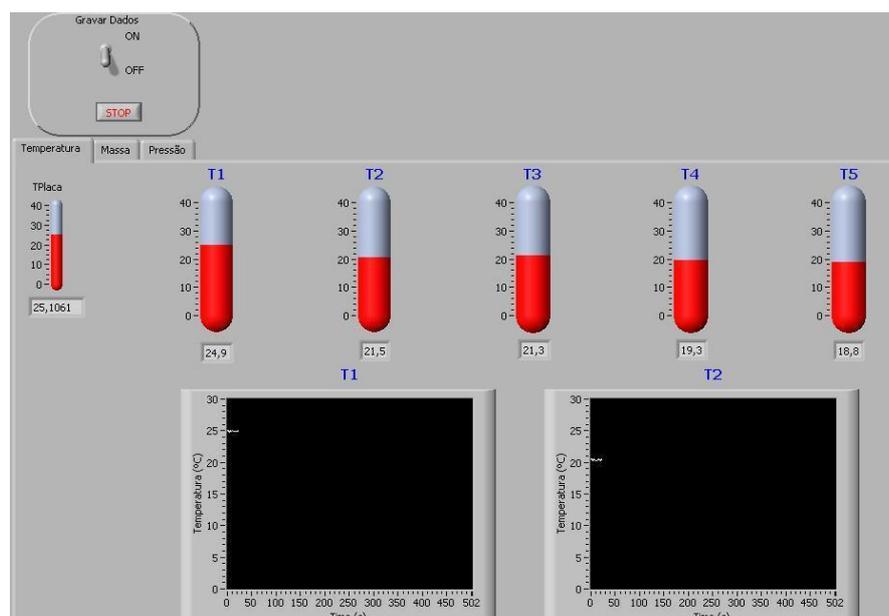


Figura 3. Painel frontal do programa elaborado para a temperatura.

A Figura 3 diz respeito à interface da medição da temperatura pelos 5 termopares. A temperatura é apresentada em forma de termómetro com a indicação, abaixo deste, do valor da temperatura, em graus Celsius. Esta é também apresentada sob a forma de gráfico, de modo a visualizar, em tempo real, a evolução da temperatura de cada termopar. Existe também um indicador da temperatura da placa de aquisição de dados, para que seja possível verificar, em tempo real, qual o seu valor e parar o processo, caso se verifique alguma anomalia. O painel frontal apresenta dois comandos visíveis em todos os subgrupos. Um deles, o botão “STOP”, permite parar o processo de aquisição de dados, sempre que necessário e o outro é utilizado para o processo de gravação de dados, descrito adiante. Na Figura 3 apenas é visível a indicação da temperatura graficamente para dois dos termopares. No Anexo A encontram-se as restantes interfaces gráficas das temperaturas medidas, bem como a interface da medição da massa e da pressão.

Os sinais de grandeza física, medidos na instalação experimental, são convertidos para sinais eléctricos (tensões ou correntes) pelos respectivos sensores ou transdutores. O sinal eléctrico produzido é proporcional à quantidade física que se pretende medir de acordo com uma relação previamente estabelecida. Deste modo, para a construção do diagrama de blocos, recorre-se a uma função do LabVIEW, o “DAQ Assistant”, que programa os parâmetros adquiridos pela placa de aquisição. Esta função permite definir as entradas e saídas analógicas e digitais, o modo de aquisição dos sinais, entre outros parâmetros. Os valores medidos são sujeitos a um filtro, que permite eliminar

ruídos que não foram atenuados pelos aparelhos de medida e também rejeitar possíveis oscilações indesejadas. Posteriormente, é calculada a média dos sinais e, finalmente, os valores das grandezas físicas são enviados para as representações gráficas do painel frontal, com intervalos de tempo de 1 segundo.

Como já foi referido, o programa foi construído para que o utilizador possa gravar os dados sempre que desejar. Como se pode ver na Figura 3, o botão que controla a gravação de dados tem duas posições possíveis, uma para iniciar a gravação de dados (“ON”) e outra para desligar a gravação de dados (“OFF”). De referir que, numa situação em que o programa esteja a gravar dados e o utilizador prima o botão de paragem de processo, o processo de gravação de dados é automaticamente interrompido, sem ser necessário desligar, em primeiro lugar, o botão de gravação de dados. A construção da parte do diagrama de blocos, para o processo de gravação de dados, poderia ser realizada através de uma função do LabVIEW, que cria um ficheiro pré-definido com os dados medidos. No entanto, o programa foi construído de forma a criar uma folha de gravação de dados personalizada, em formato Excel do Microsoft Office, com extensão xls. O nome da folha é composto pelo nome do programa e pela data e hora a que se realizou o ensaio. A folha regista os dados, em intervalos de tempo de 1 segundo, da temperatura medida pelos termopares, bem como da pressão, da massa e da temperatura da placa de aquisição de dados.

3. CAPTAÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA EM SÍLICA GEL

Como foi referido no capítulo 1, a produção de vapor de água surge como o grande inconveniente do processo de refrigeração evaporativa a vácuo. A presença de vapor de água, no interior da câmara de um sistema de refrigeração a vácuo, pode comprometer a eficiência desse mesmo processo, já que a pressão atingida depende da quantidade de vapor de água existente no interior da câmara. Para um mesmo intervalo de tempo, quanto menor for a quantidade de vapor de água presente no interior da câmara, mais baixa é a pressão atingida (Cheng e Lin, 2007). Segundo Danielson (2000), a presença de vapor de água no interior da câmara afecta também o funcionamento da bomba de vácuo, já que o vapor de água ao ser bombeado, vai ficar retido sob a forma líquida no interior da própria bomba, o que reduz a eficiência desta.

É essencial captar o vapor de água produzido durante o processo de refrigeração a vácuo de modo a não prejudicar a sua performance e eficácia. Santos (2010) analisou três métodos de captação de vapor de água. O autor verificou que dois desses métodos de captação de vapor de água, através da condensação por arrefecimento a etanol e por módulos termoeléctricos não são tecnicamente viáveis para a aplicação na instalação experimental utilizada neste trabalho. O terceiro método analisado e também aquele que é objecto de estudo deste trabalho é a adsorção de vapor de água em sílica gel. Assim, numa primeira fase deste capítulo, irá ser analisado o processo de adsorção, apresentando todos os aspectos a ele associados e com especial atenção à adsorção em sílica gel. Numa segunda fase, será descrita a actividade experimental, assim como a discussão dos resultados obtidos, de modo a avaliar a capacidade de adsorção de vapor de água em sílica gel para sistemas de refrigeração a vácuo.

3.1. O processo de adsorção

O fenómeno de adsorção é conhecido desde o século XVIII, quando se verificou que uma determinada espécie de carvão retinha, no seu interior, grandes quantidades de água, sendo então a base de processos como a purificação da água, vinho e óleos (Dechow, 1989). Nas últimas décadas, com o avanço das pesquisas e dos

conhecimentos na área, a adsorção passou a ser utilizada como operação unitária, principalmente em processos de separação e filtração industriais (Cavalcante, 2000).

O processo de adsorção surge então como um fenómeno no qual as moléculas de um determinado fluido (gás ou vapor) se fixam na superfície de um sólido de poros muito finos. Na Figura 4 é apresentado um esquema molecular de um sistema de adsorção. O processo de adsorção é encarado como um método de separar misturas de dois ou mais fluxos, em que a mudança de concentração da substância a adsorver (fluxo adsortivo) se verifica, quando esta é colocada em contacto com o adsorvente, normalmente poroso (Keller e Staud, 2005). O material já adsorvido tem o nome de adsorvato.

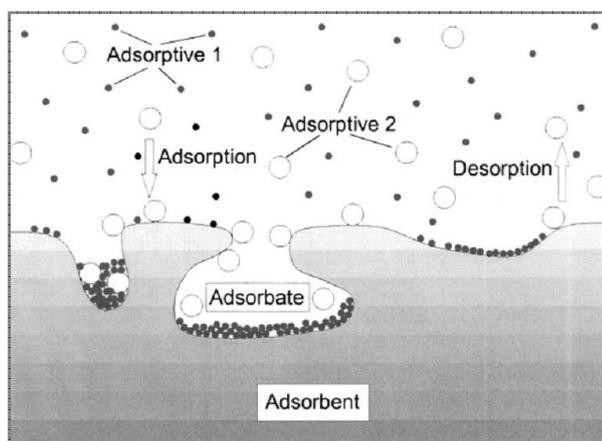


Figura 4. Representação de um sistema de adsorção de dois elementos adsortivos; Fonte: Keller e Staud (2005).

O preenchimento dos poros no processo de adsorção pode ocorrer segundo três etapas distintas: adsorção em monocamada, multicamada e condensação por capilaridade. Na adsorção em monocamada, as moléculas adsorvidas estão em contacto com a camada superficial do adsorvente. Na adsorção em multicamada, o preenchimento dos poros dá-se em mais do que uma camada, pelo que nem todas as moléculas de adsorvato estão em contacto directo com a superfície do adsorvente. Relativamente à condensação por capilaridade, o espaço de poro residual que permanece livre após a adsorção em multicamada ter ocorrido, é preenchido por condensação do adsorvato (Sing et al., 1985). De acordo com Dechow (1989) a adsorção é um processo que se desenvolve principalmente na superfície do adsorvente e que deve ser distinguida do processo de absorção, já que este implica a penetração de um determinado componente na estrutura de outro.

Segundo Brites et al. (2009), na maioria dos casos, a adsorção é um processo reversível, pois, como se verá adiante, existem processos de adsorção que podem ser irreversíveis. Deste modo, o processo inverso da adsorção, em que o adsorvato se liberta do material adsorvente, tem o nome de dessorção ou regeneração. Jiayou (2003) refere que o processo de regeneração do adsorvente tem duas grandes vantagens. A primeira é que a regeneração permite ao adsorvente restaurar a sua capacidade de adsorção e a segunda é que se pode recuperar o material que foi adsorvido e que, muitas das vezes, é bastante valioso. O processo de regeneração é conseguido normalmente quando se submete o material adsorvente a um aumento de temperatura. Regenerando o adsorvente utilizado, o processo baseado na adsorção, torna-se num processo cíclico de adsorção/dessorção, que recorre sempre ao mesmo adsorvente, sem que se alterem significativamente as suas propriedades (Santos, 2010). De acordo com Brites et al. (2009), os adsorventes sólidos podem alterar a sua estrutura com o número de ciclos de adsorção/dessorção, já que existem reacções químicas na superfície interna do adsorvente. Estas reacções resultam num bloqueio dos poros, influenciando a rapidez com que se dá a adsorção, levando a uma diminuição da capacidade de adsorção.

Segundo Ruthven (1984), uma das aplicações, a nível industrial mais utilizada deste processo é o uso de uma coluna adsorvente, preenchido com um adsorvente hidrofílico apropriado, de modo a remover humidade de um determinado fluxo de gás ou líquido, funcionando assim como uma espécie de secador. Dabrowski (2001) refere que existem imensos processos industriais, que utilizam a adsorção como base para os seus processos, contudo são três as aplicações práticas fundamentais deste processo. A separação e purificação de líquidos (da água principalmente), a secagem de gases e líquidos antes de serem utilizados em sistemas industriais e, finalmente, remoção e recuperação de produtos químicos de gases industriais e de ventilação.

O fenómeno de adsorção pode ser dividido em duas classes, conforme o tipo de interacção entre as moléculas do fluxo e as do sólido adsorvente, baseando-se na natureza das forças que as unem (Guelfi e Scheer, 2007). Na adsorção física, a interacção entre as moléculas do fluxo e as do sólido é fraca, com ligações intermoleculares baseadas em forças de Van de Waals (Jiayou, 2003; Guelfi e Scheer, 2007). Dabrowski (2001) refere que as forças intermoleculares envolvidas são semelhantes às do processo de condensação de vapores. Assim, este tipo de adsorção é caracterizado por uma diminuição da energia

livre e da entropia do sistema de adsorção, tratando-se assim de um processo exotérmico, ou seja, liberta calor. Normalmente, a adsorção física é reversível e ocorre a uma temperatura inferior ou próxima da temperatura crítica da substância adsorvida (Sing et al., 1985). Por outro lado, a adsorção química é causada pela reacção entre as moléculas do adsorvente e as do material adsorvido. Neste tipo de adsorção ocorre transferência de electrões e rearranjo molecular, através de ligações iónicas ou covalentes. Essas ligações provocam mudanças na composição química das espécies adsorvidas, de tal forma que o processo é, na maioria das vezes, irreversível (Ruthven, 1984). Segundo Dabrowski (2001), a adsorção química ocorre a temperaturas elevadas, superiores à temperatura crítica da substância adsorvida e, contrariamente à adsorção física, é um processo que ocorre apenas em adsorventes específicos para um determinado gás. De referir que este trabalho é focado apenas no processo de adsorção física.

Dabrowski (2001) refere que grande parte dos adsorventes sólidos, utilizados em aplicações industriais, têm uma complexa estrutura porosa que consiste em poros de diferentes dimensões e formas. Caso os poros tenham a forma de um cilindro é usual falar em “diâmetro do poro” e se os poros tiverem a forma de uma fenda recorre-se, frequentemente, ao conceito de “largura do poro” (Santos, 2010). O tipo e tamanho de poro são bastante importantes no processo de adsorção, já que o preenchimento dos poros depende da sua forma, juntamente com as propriedades do fluido adsortivo e do adsorvente utilizado (Sing et al., 1985). A dimensão dos poros de um adsorvente é classificada, segundo a IUPAC, em três grupos diferentes: microporos, mesoporos e macroporos. Os microporos apresentam uma largura não superior a 2 nm, os mesoporos têm uma largura de poro entre os 2 e 50 nm e poros com largura acima dos 50 nm são designados de macroporos.

Como referido anteriormente, as moléculas de um fluxo adsortivo vão-se depositar na superfície de um adsorvente sólido. A quantidade adsorvida (adsorvato) irá aumentar com o decorrer do tempo, podendo, eventualmente, atingir um máximo e saturar (Jiayou, 2003). Para um determinado fenómeno de adsorção envolvendo um par adsorvato-adsorvente, o equilíbrio de adsorção pode ser definido pela equação (1) (Brites et al., 2009).

$$f(q, P, T) = 0 \tag{1}$$

Na equação (1), q é a quantidade adsorvida de uma determinada substância, P é a pressão de equilíbrio e T a temperatura absoluta. O equilíbrio de adsorção pode ser expresso de três modos possíveis (Jiayou, 2003; Brites et al., 2009). O primeiro em que se mantém a pressão constante e, medindo experimentalmente a variação da quantidade adsorvida em função da temperatura, obtêm-se as curvas isobáricas, de acordo com a equação (2) (Jiayou, 2003).

$$q = f(T) \text{ a } P = \text{constante} \quad (2)$$

De um modo semelhante, mas mantendo constante a temperatura, em vez da pressão, obtêm-se as curvas isotérmicas, segundo a equação (3).

$$q = f(P) \text{ a } T = \text{constante} \quad (3)$$

Finalmente, uma outra forma de representar o equilíbrio de adsorção é através de curvas de equilíbrio, em que se mantém a quantidade adsorvida constante e medindo a pressão em função da temperatura, de acordo com a equação (4).

$$P = f(T) \text{ a } q = \text{constante} \quad (4)$$

Exemplos típicos das curvas atrás referidas encontram-se representados na Figura 5.

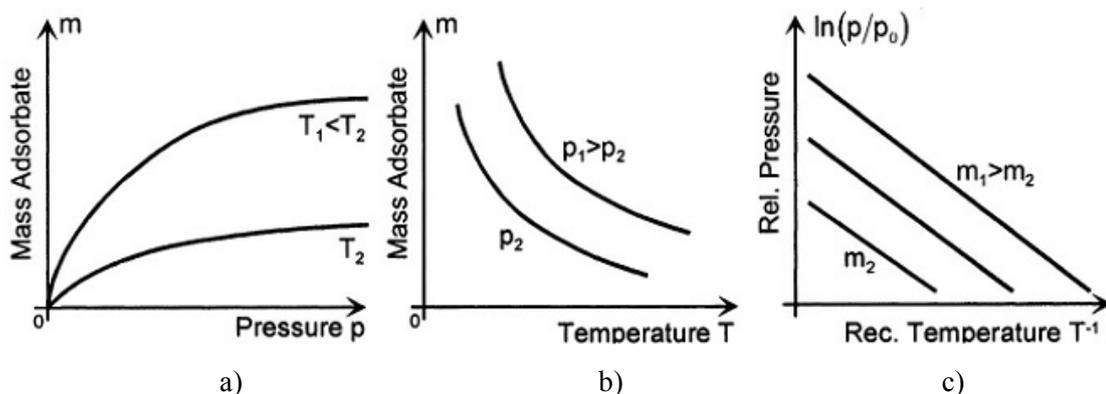


Figura 5. Representação dos três tipos de curvas de equilíbrio de adsorção. a) Curva isotérmica; b) Curva isobárica; c) Curva de equilíbrio; Fonte: Keller e Staud (2005).

A isotérmica de adsorção, também conhecida por isoterma de adsorção, é uma ferramenta importante na descrição do processo de adsorção. Esta consiste na relação entre a quantidade de material adsorvido e a pressão de equilíbrio (no caso de um gás), concentração (no caso de um líquido) ou outro parâmetro que influencie esta capacidade (Guelfi e Scheer, 2007). Segundo Dabrowski (2001), a isotérmica de adsorção é o ponto de partida para a análise de um processo de adsorção. Através de dados experimentais, podem ser obtidos diversos tipos de isotérmicas, devido ao facto de no processo de adsorção existirem vários tipos de pares adsorvato-adsorvente. Contudo, a maioria das isotérmicas de adsorção são agrupadas em seis tipos distintos segundo a IUPAC, como se pode ver na Figura 6.

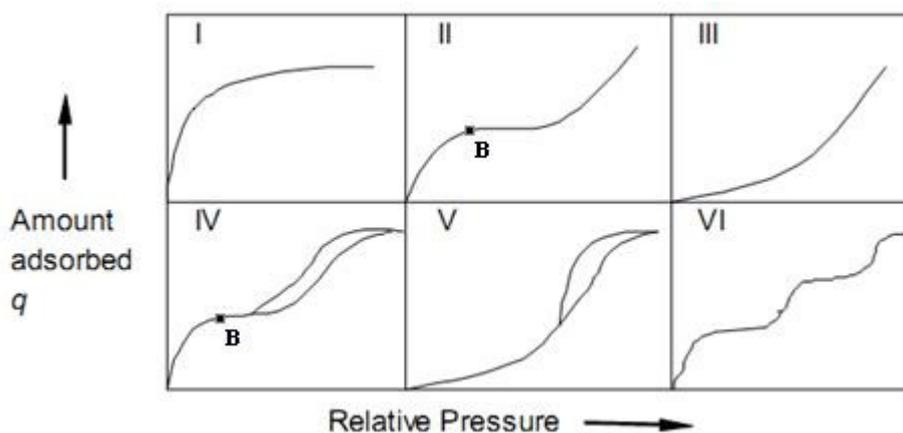


Figura 6. Representação dos seis tipos principais de isotérmicas de adsorção; Fonte: Jiayou (2003).

A isotérmica do tipo I é típica de adsorventes microporosos, em que o tamanho do poro não é muito maior do que o tamanho das moléculas do adsorvato. Neste tipo de isotérmica, a adsorção é em monocamada e é caracterizada por um máximo de quantidade adsorvida que se mantém constante, mesmo para pressões elevadas (Ruthven, 1984; Keller e Staud, 2005). A isotérmica do tipo II, descreve tipicamente a adsorção em materiais macroporosos, evidenciando a adsorção em monocamada e multicamada. A adsorção em monocamada, verifica-se para baixas pressões e a multicamada para altas pressões, próximas da saturação, ocorrendo, eventualmente, condensação por capilaridade, mas sem a ocorrência de histerese de adsorção. A isotérmica do tipo III não é muito comum e ocorre em processos de adsorção, em que a interação adsorvato-adsorvente é muito fraca. O *loop* de histerese, descrito adiante, é típico da isotérmica do tipo IV. Este tipo de isotérmica é idêntica à do tipo II, caracterizada pela adsorção em monocamada e multicamada e pela

ocorrência de histerese, para altas pressões, associada à condensação capilar em materiais mesoporosos. O ponto B indicado nas isotérmicas do tipo II e IV da Figura 6 indica o momento em que a adsorção em monocamada termina e dá lugar à ocorrência da adsorção em multicamada (Sing et al., 1985). A isotérmica do tipo V é pouco comum e está relacionada com a do tipo III, já que tem o mesmo tipo de comportamento a baixas pressões. Finalmente, a isotérmica do tipo VI ocorre para sólidos não porosos e é causada por uma adsorção em multicamadas. Segundo Santos (2010), verifica-se que normalmente a isotérmica de tipo I é típica da sílica gel microporosa e a do tipo IV característica da sílica gel mesoporosa.

O fenómeno de histerese de adsorção ocorre, quando a isotérmica de adsorção não coincide com a isotérmica de dessorção e não ocorre para poros de tamanho inferior a 2 nm. Assim, a histerese de adsorção é normalmente observada para sólidos mesoporosos e geralmente associada à adsorção em multicamadas, com ocorrência de condensação por capilaridade (Myers, 2004; Dabrowski, 2001). Segundo a IUPAC existem quatro tipos de *loops* de histerese, que são classificados e explicados no Anexo B.

A performance de qualquer processo adsortivo é bastante influenciada pela qualidade do adsorvente e a sua escolha é, normalmente, o primeiro aspecto a analisar em qualquer processo de adsorção. Assim, a escolha do adsorvente é um processo em que é necessário conhecer quais as características do fluxo adsortivo e, principalmente, saber qual o seu comportamento perante a presença do fluxo. Existem vários atributos de um adsorvente que têm de ser devidamente analisados, contudo todos eles variam de adsorvente para adsorvente e raramente um único é considerado ideal em todos esses atributos. Segundo Albright (2009), a capacidade de adsorção é a característica mais importante de um adsorvente. De um modo simplificado, a capacidade de adsorção é a fracção mássica máxima de adsorvato retido pelo adsorvente, sendo implícito que se refere ao instante em que é atingido o equilíbrio de adsorção. Este parâmetro depende da temperatura e concentração do fluido adsortivo, entre outros aspectos. A capacidade de adsorção será designada pela letra x e expressa em $\text{kg}_{\text{adsorvato}}/\text{kg}_{\text{adsorvente}}$. A capacidade de adsorção de um determinado adsorvente é bastante importante no custo final do processo de adsorção, já que esta característica determina a quantidade de adsorvente requerida (Ruthven, 1984). Segundo Albright, (2009), a porosidade e a área superficial de um adsorvente são duas características também importantes na escolha do mesmo, pois

influenciam a sua capacidade de adsorção. A área superficial de um adsorvente, muitas vezes conhecida por superfície de adsorção, é obtida estimando a área coberta do adsorvente, em monocamada, por uma substância em que são conhecidas a densidade e as dimensões moleculares. A área superficial é dada, normalmente, em m^2/g . A presença de uma elevada quantidade de poros num adsorvente leva a que este tenha uma elevada área superficial. Segundo a IAS, este aspecto faz com que o adsorvente tenha uma elevada capacidade de adsorção. Contudo, a escolha de um adsorvente, para um determinado processo adsortivo, não pode ser decidida apenas pela análise do valor da área superficial

De acordo com Yang (2003), os adsorventes mais utilizados em processos industriais são a sílica gel, o carbono e a alumina activados e a zeolite. A sílica gel e a alumina activada apresentam características polares, que lhes concedem altas afinidades à água e a elevadas humidades, sendo, por isso, denominados por adsorventes hidrofílicos, assim como as zeolites (Suzuki, 1990). Existem vários tipos de zeolites, devido às diferentes estruturas cristalinas que cada tipo apresenta, contudo a maioria delas são consideradas um bom adsorvente para condições de baixas humidades relativas. O carbono activado apresenta uma estrutura química não polar, o que leva a que este tipo de adsorvente seja hidrofóbico e tenha pouca afinidade à humidade, motivo pelo qual tem uma maior afinidade com o óleo, do que com a água (Suzuki, 1990). De uma vasta gama de adsorventes existentes, será utilizada, neste trabalho, a sílica gel para a captação de vapor de água. As suas características, propriedades hidrofílicas e aplicações serão analisadas na secção seguinte.

3.2. Adsorção de vapor de água em sílica gel

Após uma análise do processo de adsorção e de todos os aspectos a ele associados, é analisado, de seguida, a adsorção de vapor de água em sílica gel. Como referido anteriormente, a sílica gel é um dos adsorventes mais utilizados nos processos industriais, envolvendo o fenómeno de adsorção. A sílica gel consiste numa forma parcialmente desidratada do ácido silícico coloidal polimérico, sendo a composição química expressa por $SiO_2.nH_2O$. Segundo Yang (2003), a sílica gel comercial é preparada pela mistura de uma solução de silicato de sódio com um ácido mineral, como o ácido sulfúrico ou clorídrico. A reacção produz uma concentração de pequenas partículas de dióxido de silício (SiO_2) hidratado, que, após uma série de tratamentos, resulta na sílica

gel. De acordo com Yang (2003), vários tipos de sílica gel com uma vasta gama de propriedades, tais como a área superficial e o volume de poros, podem ser obtidos através da variação da concentração dos reagentes, da temperatura e pH da reacção. Desta forma, é possível obter uma gama de valores de área superficial de 300 a 900 m²/g (Albright, 2009).

A superfície química da sílica gel é dominada pela presença de grupos hidroxilos ou grupos silanóis (Si-OH). De acordo com Yang (2003), estes grupos podem ser classificados em três tipos, conforme se pode ver na Figura 7. Os três grupos distintos são os silanóis livres, ou isolados (a), em ligação de hidrogénio (b) e os silanóis geminais (c).

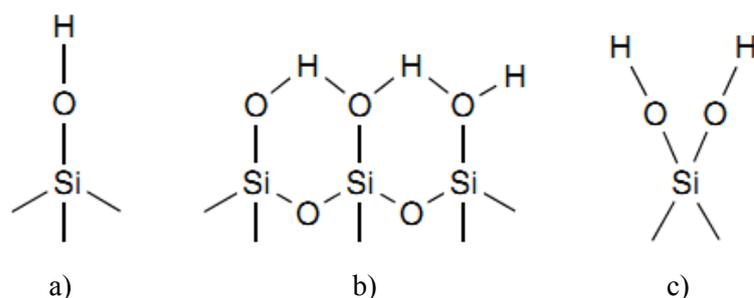


Figura 7. Representação dos três tipos de grupos silanóis presentes na sílica gel. a) Silanóis livres; b) Silanóis em ligação de hidrogénio; c) Silanóis geminais; Fonte: Adaptado de Yang (2003).

Além dos três tipos de grupos silanóis referidos, um outro tipo pode ser encontrado na estrutura da sílica gel, que é o silanol vicinal (Yang, 2003; Costa, 2007). Este forma-se quando se encontra, na superfície de sílica gel, um silanol livre muito próximo de um outro. Na Figura 8 encontra-se representada a estrutura da sílica gel mostrando um possível poro da partícula da sílica (a) bem como dos restantes grupos hidroxilos.

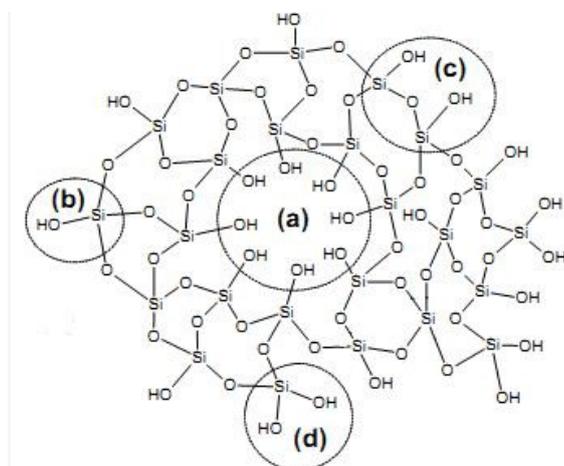


Figura 8. Representação da estrutura da sílica gel evidenciando um possível poro da partícula (a), um silanol livre (b), um silanol vicinal (c) e um silanol geminal (d); Fonte: Adaptado de Costa (2007).

A presença dos grupos silanóis referidos confere uma elevada polaridade à estrutura da sílica gel. Deste modo, moléculas como água, álcoois, fenóis, aminas e hidrocarbonetos não saturados são adsorvidas preferencialmente, quando comparadas com moléculas não polares (Rutvhen, 1984). Segundo Yang (2003), os grupos silanóis em ligação de hidrogénio, presentes na estrutura da sílica gel, são o tipo de ligação mais importante para a adsorção de água. Deste modo, a sílica gel é um dos adsorventes mais utilizados para processos de secagem podendo atingir capacidades de adsorção a rondar os 40 % (Jiayou, 2003).

Para além dos grupos silanóis presentes na estrutura da sílica gel, pode-se encontrar também moléculas de água adsorvidas fisicamente, estando estas unidas através de ligações de hidrogénio, como se pode ver na Figura 9. Estas moléculas presentes na estrutura da sílica gel vão prejudicar reactividade da sua superfície, pois as moléculas de água vão ocupar os grupos silanóis. Deste modo, vai estar disponível uma menor quantidade desses mesmos grupos, para a adsorção de outras substâncias, reduzindo a capacidade de adsorção da sílica gel.

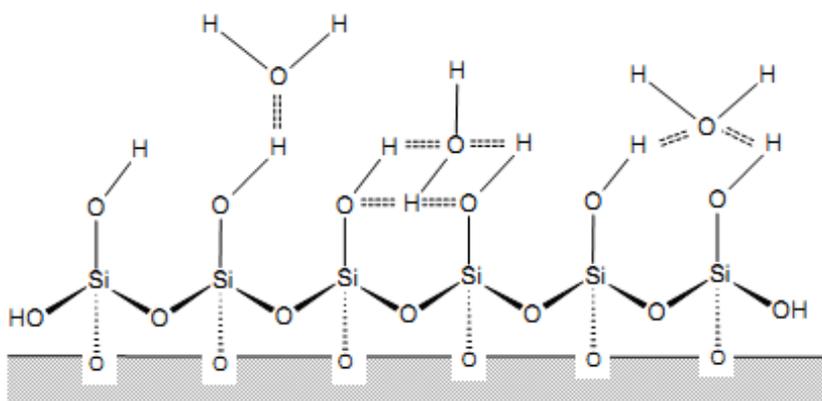


Figura 9. Representação dos grupos silanóis contendo moléculas de água adsorvidas fisicamente através de ligações de hidrogénio; Fonte: Costa (2007).

Segundo Wang et al. (2009), existe cerca de 4 a 6 % de massa de água ligada a um só grupo hidroxilo na superfície de um átomo de sílica gel, o que significa que existe entre 0,04 a 0,06 g de água por cada grama de sílica gel. Esta quantidade de água faz parte da estrutura química da sílica gel e não pode ser removida. Isto porque, para além da temperatura de fusão da sílica gel ser aproximadamente 1600 °C, se esta for sujeita a uma temperatura acima de 300 °C são quebradas as ligações químicas com a água. Deste modo, a sílica gel perde a sua capacidade de adsorção, deixando de ser um adsorvente hidrofílico (Suzuki, 1990). De acordo com Wang et al. (2009), a temperatura de regeneração da sílica

gel não pode ser superior a 120 °C e normalmente é menor do que 90 °C. O efeito da temperatura de regeneração, na alteração da capacidade de adsorção é tanto mais importante, quanto mais elevada for a temperatura de dessorção, já que as altas temperaturas favorecem as reacções químicas (Brites et al., 2009).

Existem vários tipos de sílica gel, sendo que cada tipo apresenta um só tipo de poro. Contudo, existem dois tipos que são bastante usados comercialmente, o tipo A e B. Segundo Suzuki (1990), estes dois tipos de sílica gel apresentam diferentes formas de isotérmica de adsorção, já que têm diferentes dimensões de poro. Durante a formação da sílica gel, o tipo A é controlado para ter poros de dimensões 2/3 nm e o tipo B tem dimensões de poro superiores, de cerca de 7 nm. De acordo com Yang (2003), a sílica gel é bastante utilizada como dessecante, isto é, utilizada para retirar humidade de misturas gasosas, sendo que a sílica gel do tipo A pode ser utilizada para todas as condições de dessecação e o tipo B só pode ser usado para humidades relativas superiores a 50 % (Wang et al., 2009).

As propriedades da sílica gel do tipo A, utilizada neste trabalho, encontram-se resumidas na Tabela 1. Segundo Afonso e Silveira (2005), é um adsorvente barato, não corrosivo, abundante e bastante usado devido à boa capacidade de adsorção e estabilidade química. A título de curiosidade, os mesmos autores referem que 1 m³ de sílica gel contem um número de poros tal, que as suas superfícies somadas representariam uma área de 2,8×10⁷ m²! Segundo Brites et al. (2009) a capacidade máxima de adsorção da sílica gel do tipo A é superior a 38 %, ou seja, apresenta uma capacidade de adsorção $x > 0,38 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{sílica gel seca}}$.

Tabela 1. Algumas propriedades da sílica gel do tipo A. Adaptado de: Brites et al. (2009); Ng et al. (2001).

Sílica gel do tipo A	
Massa volúmica (aparente)	750 kg/m ³
Área superficial	650-800 m ² /g
Diâmetro de poros	2-3 nm
Volume de poros	0,36 ml/g
Conteúdo em água	< 2 %
Calor específico	0,92 kJ/(kg.K)
Condutibilidade térmica	0,175 W/(m.K)

Para avaliar a capacidade da sílica gel para a captação de vapor de água sob as condições do processo refrigerativo a vácuo, em que se varia a pressão e temperatura, foram analisados alguns estudos relativos às isotérmicas de adsorção de vapor de água, em sílica gel. Estes estudos originam diversos tipos de isotérmicas, contendo vários dados experimentais, sendo que os de maior importância, para este trabalho, são os valores de pressão, temperatura e da capacidade de adsorção. Os estudos analisados têm diferentes gamas de pressão e temperatura de equilíbrio. Os valores de pressão apresentados dizem respeito ao gás que é adsorvido. Por sua vez, os valores de temperatura foram obtidos tendo em conta a temperatura das partículas de sílica gel e do fluxo adsortivo.

Ng et al. (2001) estudaram o comportamento e características da sílica gel para a adsorção de vapor de água, como parâmetro essencial no dimensionamento de *chillers* de adsorção. Os autores obtiveram isotérmicas de adsorção para dois tipos diferentes de sílica gel, com gamas de temperatura a variar de 30 a 65 °C e pressões a variarem entre os 500 e 6500 Pa. Neste estudo, foram analisadas as isotérmicas da sílica gel do tipo RD, cujas propriedades são bastante idênticas às do tipo A (Chua et al., 2002). Deste modo, para uma pressão de aproximadamente 3000 Pa verifica-se uma capacidade de adsorção de 0,05, 0,21 e 0,33 kg/kg, para temperaturas de 65, 40 e 30 °C, respectivamente. Considerando uma pressão de 2000 Pa constata-se uma capacidade de adsorção de 0,03, 0,13 e 0,23 kg/kg, para valores de temperatura de 65, 40 e 30 °C, respectivamente.

Chua et al. (2002) realizaram um estudo com o objectivo de investigar experimentalmente as isotérmicas de adsorção de vapor de água, para dois tipos de sílica gel, sendo apenas analisados os resultados para a sílica gel do tipo A. As isotérmicas de adsorção foram obtidas para temperaturas entre os 25 e 65 °C e pressões entre os 500 e 7000 Pa. Deste modo, na Figura 10 encontram-se representadas as várias isotérmicas obtidas. Chua et al. (2002) consideram que a capacidade máxima de adsorção deste tipo de sílica gel é de cerca de 0,4 kg/kg. De facto, a isotérmica de adsorção de 30 °C exhibe níveis de saturação, para as pressões mais elevadas, próximo da capacidade de adsorção referida.

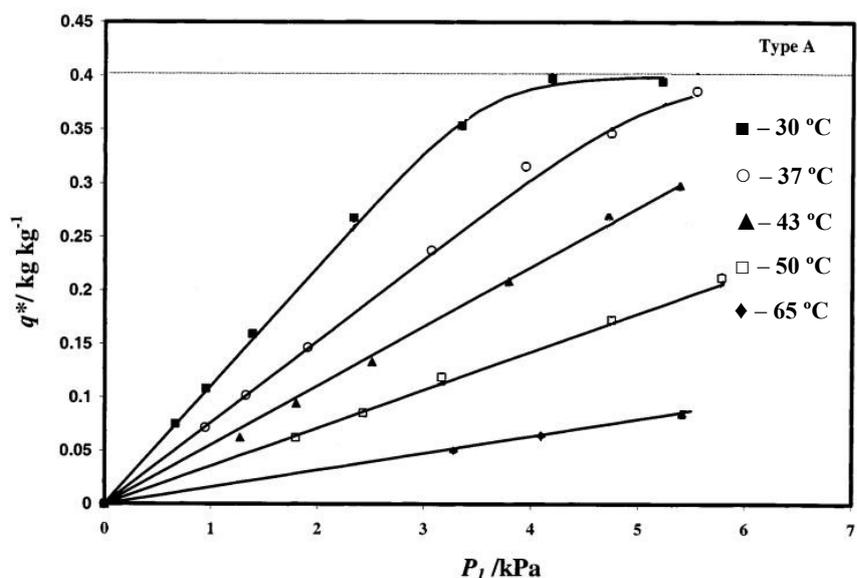


Figura 10. Representação das várias isotérmicas obtidas para a adsorção de vapor de água em sílica gel do tipo A; Fonte: Chua et al. (2002).

Jiayou (2003) realizou um estudo bastante parecido com o anterior, com o objectivo de testar experimentalmente a adsorção de vapor de água em sílica gel, para condições de pressão e temperatura semelhantes às de um ciclo de refrigeração por adsorção. Como se pode ver na Figura 11, foram obtidas isotérmicas da sílica gel do tipo A, para intervalos de pressão de 800 a 8000 Pa e temperaturas a variarem entre os 30 e os 85 °C.

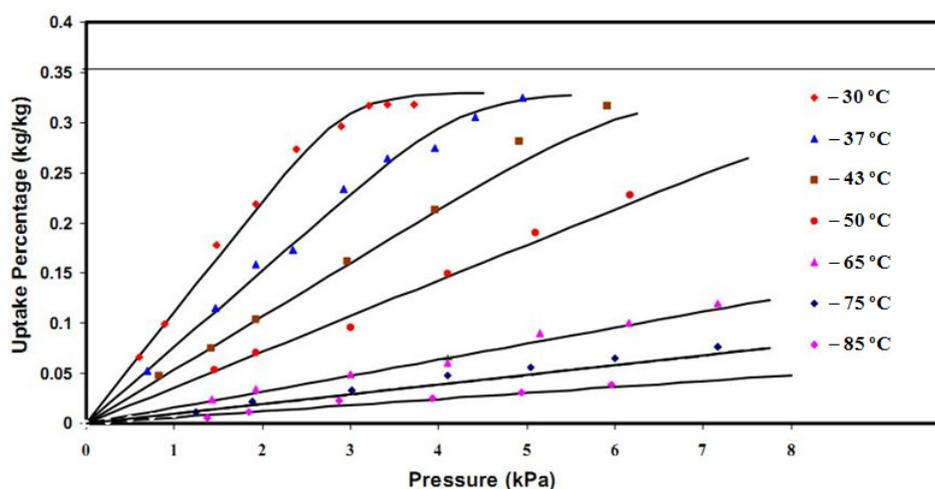


Figura 11. Isotérmicas de adsorção de vapor de água em sílica gel do tipo A; Fonte: Jiayou (2003).

Este estudo revela que a capacidade máxima de adsorção da sílica gel do tipo A é de 0,35 kg/kg, um valor inferior ao do estudo realizado por Chua et al. (2002).

Da análise dos estudos apresentados verifica-se que, para a mesma temperatura, a quantidade de vapor adsorvido diminui com a diminuição da pressão. Este facto é constatado pela variação da capacidade de adsorção da sílica gel, das isotérmicas presentes na Figura 10 e na Figura 11. Verifica-se também que para a mesma pressão, quanto menor for a temperatura, maior a capacidade de adsorção da sílica gel. Esta relação é fundamentada pelo facto de as moléculas presentes na superfície do adsorvente deixarem essa superfície mais facilmente para temperaturas elevadas do que para temperaturas mais baixas, considerando uma mesma densidade molecular (Jiayou, 2003). Nos estudos apresentados obtiveram-se capacidades de adsorção máximas entre os 0,3 e os 0,4 kg/kg. Dos estudos referidos, verifica-se ainda que abaixo de uma determinada pressão (aproximadamente dos 1000/1500 Pa), o efeito da diminuição da temperatura não é significativa, uma vez que a capacidade de adsorção da sílica gel diminui linearmente com a diminuição da pressão (Jiayou, 2003).

3.2.1. Planeamento da actividade experimental

Com base nos estudos apresentados e visando o objectivo deste trabalho serão efectuados testes para a avaliar o comportamento da sílica gel, do tipo A, na adsorção de vapor de água, sob as condições de refrigeração evaporativa a vácuo. Para tal, serão realizados ensaios experimentais utilizando a instalação experimental descrita no capítulo 2. Para iniciar os estudos e de forma a calcular a quantidade de sílica gel a utilizar, será assumido que as pressões no interior da câmara variam entre a pressão atmosférica e os 600/700 Pa e que a temperatura final da água será aproximadamente os 8 °C. Pretende-se determinar qual a quantidade de vapor de água gerado no arrefecimento. Como foi referido no capítulo 1, o processo de evaporação da água tem início, quando a pressão do interior da câmara se aproxima da pressão de saturação da água. O calor absorvido pela água, durante a mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso, é denominado calor latente de evaporação.

Recorrendo à definição de calor específico e de calor latente de evaporação, a equação para a determinação da quantidade de vapor originada no processo de arrefecimento de água é dada pela expressão (5):

$$m_a \cdot c_p \cdot \Delta T = m_v \cdot h_{lv} \quad (5)$$

Na equação (5) m_a é a massa de água (kg), c_p o calor específico a pressão constante da água (J/(kg.K)), ΔT a variação de temperatura, m_v a massa de vapor gerado (kg), valor que interessa calcular e, finalmente, h_{lv} o calor latente de evaporação (J/kg). Como inicialmente é utilizado um determinado volume de água, a sua massa será dada pelo produto do volume de água, V_a (m³), pela massa volúmica da água, ρ_a (kg/m³). A variação de temperatura corresponde à diferença entre a temperatura inicial e final da água, T_i e T_f , respectivamente. Reescrevendo a equação (5) substituindo as variáveis descritas, a quantidade de vapor gerado no arrefecimento da água é dada pela equação (6):

$$m_v = \frac{V_a \cdot \rho_a \cdot c_p \cdot (T_i - T_f)}{h_{lv}} \quad (6)$$

Na equação (6), o valor da massa volúmica da água é determinado considerando as condições iniciais da água, isto é, a massa volúmica é dada à temperatura inicial da água. Os valores do calor específico a pressão constante e do calor latente de evaporação são retirados das tabelas das propriedades da água. Para tal, é necessário conhecer a temperatura à qual se encontra a água, no final dos ensaios, para encontrar esses valores. Conhecendo a temperatura inicial e final da água, o valor do calor específico e latente a utilizar deveria ser obtido ponderando todos os pontos de temperatura, em intervalos iguais, desde a temperatura inicial até à final. Como este aspecto não é significativo, já que o objectivo é determinar aproximadamente qual a quantidade do vapor gerado, deverá ser usado um valor do c_p e do h_{lv} médio, isto é, referido a uma temperatura média do processo.

Considerando, a título de exemplo, uma temperatura inicial da água de 20 °C e a final de 8 °C, a temperatura de referência para a determinação do c_p e h_{lv} seria de 14 °C. Posto isto, os valores a considerar para o cálculo da massa de vapor gerado no arrefecimento de 100 ml de água seriam:

$$V_a = 100 \text{ ml} = 0,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$T_i = 20 \text{ °C}$$

$$T_f = 8 \text{ °C}$$

$$\rho_{a@20^\circ\text{C}} = 997,6 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p@14^\circ\text{C}} = 4,198 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

$$h_{lv@14^\circ\text{C}} = 2467,8 \text{ kJ/kg}$$

De acordo com a equação (6), a massa de vapor gerado é igual a:

$$m_v = \frac{0,1 \times 10^{-3} \cdot 997,6 \cdot 4,198 \cdot (20 - 8)}{2467,6} = 2,04 \times 10^{-3} \text{ kg} = 2,04 \text{ g}$$

Dos cálculos anteriores obtêm-se 2,04 g de vapor de água, gerados no arrefecimento de 100 ml de água à temperatura inicial de 20 °C até a uma temperatura final de 8 °C.

Estando teoricamente definido o método para calcular o valor aproximado da quantidade de vapor de água gerado, é necessário estimar qual a capacidade de adsorção da sílica gel usada neste trabalho, para as condições de refrigeração evaporativa a vácuo. Conhecido esse valor, é possível saber qual a quantidade inicial de sílica gel a utilizar para adsorver a quantidade de vapor de água gerado, através da equação(7):

$$m_{SG} = \frac{m_v}{x} \quad (7)$$

Na equação (7), m_{SG} é a massa de sílica gel a utilizar (kg) e x a capacidade de adsorção de sílica gel (kg/kg). Durante a adsorção de vapor de água, a quantidade de vapor adsorvido vai aumentando ao longo do tempo até ser atingido o equilíbrio. Esta quantidade depende da temperatura e concentração do fluxo adsortivo, da pressão do gás, da configuração do leito de sílica gel, entre outros aspectos, como referido anteriormente.

Na refrigeração de produtos alimentares, a temperatura mais elevada a que se encontram esses produtos é a temperatura ambiente. Assim, é conveniente estimar uma capacidade de adsorção da sílica gel para uma temperatura o mais próxima possível da temperatura ambiente. Dos estudos realizados anteriormente, verifica-se que a temperatura mais baixa, comum a todos os estudos, que foi utilizada para avaliar a capacidade de adsorção da sílica gel, foi os 30 °C. Resumindo os valores da pressão e da respectiva capacidade de adsorção de alguns dos estudos acima referidos, para a temperatura em questão, obtêm-se os resultados presentes Tabela 2.

Tabela 2. Valores de pressão e capacidade de adsorção obtidos nos estudos analisados.

$T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$				
Pressão [Pa]	1000	2000	3000	4000
Capacidade de adsorção [kg _{água} /kg _{sílica gel}]	0,13	0,23	0,33	0,38

Segundo a Tabela 2, onde se verifica uma diminuição da capacidade de adsorção em função da diminuição da pressão e assumindo que a câmara atinge uma pressão aproximadamente de 600/700 Pa, deveria ser considerada uma capacidade de adsorção de 0,1 kg/kg, um valor obtido por extrapolação. No entanto, de uma forma conservadora, e uma vez que se pretendia obter uma capacidade de adsorção para a realização de um ensaio preliminar, foi considerada uma capacidade de adsorção de 0,05 kg/kg. Utilizando este valor, é possível determinar a quantidade de sílica gel a colocar no interior da câmara de refrigeração. Com base na equação (7), e tendo em conta os resultados obtidos anteriormente, para o arrefecimento de água dos 20 °C até aos 8 °C, serão necessários cerca de 40,8 g de sílica gel, para adsorver o vapor de água gerado.

De acordo com as equações (6) e (7), foi construído um plano de testes apresentado na Tabela 3. Neste plano, foi calculada a massa de vapor de água gerado no arrefecimento de 100 ml de água e a massa de sílica gel necessária para adsorver esse vapor.

Tabela 3. Valores de massa de vapor gerado e de sílica gel necessária para a realização dos ensaios experimentais.

Capacidade de adsorção [kg _{água} /kg _{sílica gel}]	ΔT [°C]					
	[25-8]		[22-8]		[20-8]	
	m_v [g]	m_{SG} [g]	m_v [g]	m_{SG} [g]	m_v [g]	m_{SG} [g]
$x = 0,2$	2,89	14,45	2,38	11,90	2,04	10,20
$x = 0,1$	2,89	28,90	2,38	23,80	2,04	20,40
$x = 0,05$	2,89	57,80	2,38	47,60	2,04	40,80

Para a construção da Tabela 3, consideraram-se três temperaturas iniciais diferentes, 25, 22 e 20 °C, que pretendem representar diversas temperaturas do ambiente. Para a realização de um ensaio preliminar, foram consideradas três capacidades de adsorção diferentes, uma vez que o valor estimado de 0,05 kg/kg foi obtido de uma forma conservadora e, deste modo, poderia não ser o correcto. Assim, foram ponderadas duas capacidades de adsorção superiores ao valor estimado.

Na secção seguinte serão descritos os materiais utilizados, bem como da metodologia seguida para a realização dos ensaios experimentais.

3.2.2. Actividade experimental

Para a realização dos ensaios experimentais, foi utilizado um conjunto de materiais que são enumerados de seguida, bem como a descrição do procedimento experimental. De acordo com o capítulo 2, a instalação experimental e o sistema de aquisição de dados já foram devidamente analisados, de modo que, neste ponto não irá ser feita qualquer referência ao seu modo de funcionamento.

Materiais

Foram necessários vários recipientes, com capacidade suficiente para manusear a sílica gel, antes e depois, da realização dos ensaios. Foram utilizados dois recipientes para colocar a água no interior da câmara de vácuo e para a medição do volume de água foi necessário um copo medidor. A temperatura inicial da água, foi medida utilizando um termómetro de mercúrio e para a pesagem da sílica gel e de outros utensílios foram utilizadas duas balanças de precisão de diferentes capacidades. Uma com capacidade para 6000 g e uma segunda balança com capacidade para 200 g. Para controlar a temperatura inicial da água, foi necessária água quente para misturar com a água proveniente da rede de abastecimento, já que esta não se encontrava à temperatura necessária. A água quente foi directamente obtida da rede de AQS.

Para colocar a sílica gel no interior da câmara de vácuo foi inicialmente construído um suporte. A sua construção foi baseada numa armação principal constituída por fio de arame com diâmetro de 2mm, na qual se adapta uma parte móvel conforme se pode ver na Figura 12.



Figura 12. Suporte construído para colocar a sílica gel no interior da câmara de vácuo.

A parte móvel do suporte, da Figura 12, tem a forma de meia esfera, cujo molde foi feito em rede mosquiteira. Este é um suporte bastante simples, contudo o objectivo da construção deste, utilizando a rede, foi possibilitar um maior contacto entre o vapor de água e a sílica gel. Durante a realização dos ensaios foram construídas outras partes móveis do suporte, que concedem outra configuração ao leito de sílica gel e que serão analisadas de seguida.

Descrição da actividade experimental

Sabendo previamente qual seria o ensaio a realizar, isto é, qual a temperatura inicial da água, foi pesada a massa de sílica gel indicada pela Tabela 3. Com o intuito de obter a temperatura inicial, foi necessário misturar água a diferentes temperaturas. Mediuse 100 ml de água, e colocou-se esta quantidade num recipiente no interior da câmara. Este recipiente foi posicionado no centro da câmara, com um sensor de temperatura mergulhado. Este sensor foi fixado para que não se desloque e, deste modo, garantir que se encontra sempre em contacto com a água e na mesma posição. A quantidade de sílica gel, pesada anteriormente, é colocada na parte móvel do suporte, cuja armação principal foi previamente colocada no interior da câmara de vácuo. A sílica gel foi distribuída de modo a garantir que fique espalhada em todo o suporte.

Com a água e a sílica gel colocada no interior da câmara de vácuo, esta é devidamente fechada e é ligada a bomba de vácuo, registando todos os dados através do sistema de gravação de dados. A bomba é desligada após ter decorrido um determinado intervalo de tempo, sendo a câmara aberta o mais rápido possível. O suporte móvel é retirado e a sílica gel é pesada. Na realização dos ensaios experimentais foram utilizados vários suportes, sendo a configuração da parte móvel a principal diferença entre eles.

Para cada condição inicial foram realizados dois ensaios, um sem sílica gel no interior da câmara de vácuo, que se pode considerar um ensaio de referência, e um segundo com a presença de sílica gel. Estes dois ensaios tiveram uma duração de tempo igual.

Foi elaborado um ensaio, com o suporte provisório (Figura 12), com o objectivo de verificar se o valor da capacidade de adsorção inicialmente estimado, $x = 0,05$ kg/kg, é um valor que pode ser considerado aceitável e planear assim os seguintes ensaios. Para a realização deste estudo considerou-se o arrefecimento de 100 ml de água a uma temperatura inicial de 22 °C. Recorrendo à Tabela 3, foram utilizados 47,9 g de sílica

gel. O ensaio teve uma duração de aproximadamente 260 segundos, um valor relativamente elevado em comparação com os próximos ensaios, motivo pelo qual este primeiro ensaio não é incluído na tabela de resultados obtidos, apresentada adiante. Contudo, a capacidade de adsorção da sílica gel, que se verificou no final deste ensaio, foi bastante inferior ao valor inicial estimado, sendo de aproximadamente $x = 0,017$ kg/kg. Assim, com este valor de capacidade de adsorção, seria necessária uma maior quantidade de sílica gel do que era prevista, para arrefecer a água dentro dos intervalos de temperatura indicados na Tabela 3. Esta quantidade de sílica gel é cerca de três vezes superior aos valores de massa de sílica gel indicados nessa mesma tabela.

Com base nos resultados obtidos, foram construídas duas partes móveis do suporte de sílica gel. Estas foram feitas sob a forma de cilindro e com um maior diâmetro relativamente ao suporte provisório, como se pode ver na Figura 13 e na Figura 14. A diferença entre eles é a sua altura. O suporte da Figura 13 tem a mesma altura do provisório, cerca de 24cm.



Figura 13. Suporte construído em forma de cilindro.

O suporte da Figura 14 tem uma altura inferior (13cm) e para a sua utilização foi necessário um novo recipiente para colocar a água no interior da câmara.



Figura 14. Parte móvel do suporte construída a uma altura inferior, em relação aos restantes.

De referir, que estes suportes foram construídos de modo a que a base da parte móvel fique o mais próximo possível do topo do recipiente de água. O suporte provisório (Figura 12) será referido como “suporte 1”. O suporte em forma de cilindro, de maior diâmetro e colocado numa parte superior da câmara de vácuo (Figura 13) será designado como “suporte 2”. O suporte com a mesma configuração do anterior, mas com uma altura menor (Figura 14) será referido como “suporte 3”.

Todos os ensaios têm uma duração de, aproximadamente, 190 segundos. Na Tabela 4, encontram-se apresentadas as condições para cada ensaio, nomeadamente a presença, ou não, de sílica gel, o tipo de suporte utilizado em cada ensaio e a sua duração.

Tabela 4. Resumo das condições de realização dos ensaios.

Ensaio	Sílica Gel [S/N]	Suporte Utilizado	Duração Total [s]
1	N	-	190
2	S	1	187
3	S	2	190
4	S	2	190
5	N	-	190
6	S	3	190
7	S	3	190
8	S	3	190

Na Tabela 4, as letras S (Sim) e N (Não) referem-se à utilização, ou não, de sílica gel e a temperatura inicial da água é de aproximadamente 25 °C para todos os ensaios. As condições de realização dos ensaios estão relacionadas entre si. Deste modo, as

circunstâncias de realização do ensaio 4 foram definidas tendo em conta o ensaio 3. Já as condições dos ensaios 6 e 7 foram estabelecidas mediante os ensaios 3 e 4, respectivamente.

Durante a realização dos ensaios houve a necessidade de regenerar a sílica gel, para tal, foi colocada numa estufa a 90 °C, durante cerca de três horas e meia.

3.2.3. Apresentação e discussão de resultados

Na presente secção serão apresentados os resultados experimentais, baseados na influência de determinados parâmetros na captação de vapor de água, pela sílica gel. Assim, será apresentada a influência, que a quantidade de sílica gel utilizada e o tipo de suporte utilizado, têm na variação da temperatura da água, na quantidade de vapor adsorvido e na capacidade de adsorção da sílica gel.

Influência da quantidade de sílica gel utilizada

Neste tópico, será analisada a influência da quantidade de sílica gel no arrefecimento de água. Esta análise será feita de acordo com o tipo de suporte de sílica gel. Como existem três configurações do suporte de sílica gel, existem também três tipos de leito de sílica gel.

A capacidade máxima do suporte 1 é 150 g, sendo esta a quantidade mínima de sílica gel utilizada em todos os testes. Deste modo, esta análise não se realiza para o suporte 1. Para avaliar a influência da quantidade de sílica gel, foram arrefecidos 100 ml de água a uma temperatura inicial de 25 °C. Na Tabela 5 encontram-se os resultados obtidos para os ensaios 3 e 4, de acordo com o plano descrito na Tabela 4.

Tabela 5. Resultados obtidos variando a quantidade de sílica gel utilizada, utilizando o suporte 2.

Ensaio	T _{inicial} [°C]	T _{final} [°C]	T _{média} [°C]	<i>m_v</i> libertado [g]	<i>m_{SG}</i> inicial [g]	<i>m_{SG}</i> final [g]	<i>m_v</i> adsorvido [g]
1	25,20	5,17	-	-	-	-	-
3	24,66	3,27	13,97	3,63	150,20	152,41	2,21
4	24,66	1,86	13,26	3,87	247,30	250,70	3,40

A sigla SG refere-se à sílica gel. Na Tabela 5, são apresentadas a temperatura inicial, final e média obtidas em cada ensaio, bem como a quantidade de sílica gel inicial. No ensaio 1 obteve-se uma temperatura final próxima dos 5 °C. O ensaio 3 apresenta um

valor inferior, cerca de 3 °C. Neste ensaio foram utilizados 150,2 g de sílica gel e gerados 3,63 g de vapor de água. Com esta quantidade de sílica gel foram adsorvidos 2,21 g de vapor de água, o que corresponde a uma percentagem de 61 % de vapor adsorvido, em relação ao vapor gerado. Verifica-se, então, que a presença da sílica gel, no interior da câmara, aquando do arrefecimento da água, faz com que esta atinja temperaturas finais mais baixas do que em ensaios sem a presença de sílica gel. Nas condições deste ensaio e com os resultados obtidos, verifica-se uma capacidade de adsorção próxima dos 0,015 kg/kg. Assim, considerando o vapor gerado no ensaio 3 e a capacidade de adsorção atrás referida (0,015 kg/kg), a quantidade de sílica gel que se utilizou no ensaio 4 foi de 247 g.

No ensaio 4, são gerados 3,87 g de vapor de água, um valor próximo do vapor gerado no ensaio 3. Com a utilização de 247,3 g de sílica gel, obteve-se uma temperatura final de 1,86 °C, significativamente mais baixa do que o ensaio de referência (ensaio 1) e inferior à temperatura final do ensaio 3 (3,27 °C). Neste ensaio, a quantidade de vapor de água adsorvido foi de 3,40 g, restando apenas 0,47 g de vapor que não foi adsorvido, o que corresponde a uma percentagem de vapor adsorvido de 88 %. Assim, conseguiu-se uma capacidade de adsorção da sílica gel de 0,014 kg/kg. O vapor gerado nos ensaios 3 e 4 foi relativamente idêntico, mas o facto de se utilizar uma maior quantidade de sílica gel no, ensaio 4, levou a que fosse adsorvido cerca de 1,40 g de vapor de água, a mais, em relação ao ensaio 3. Na Figura 15, é possível verificar a evolução da temperatura da água para os três ensaios.

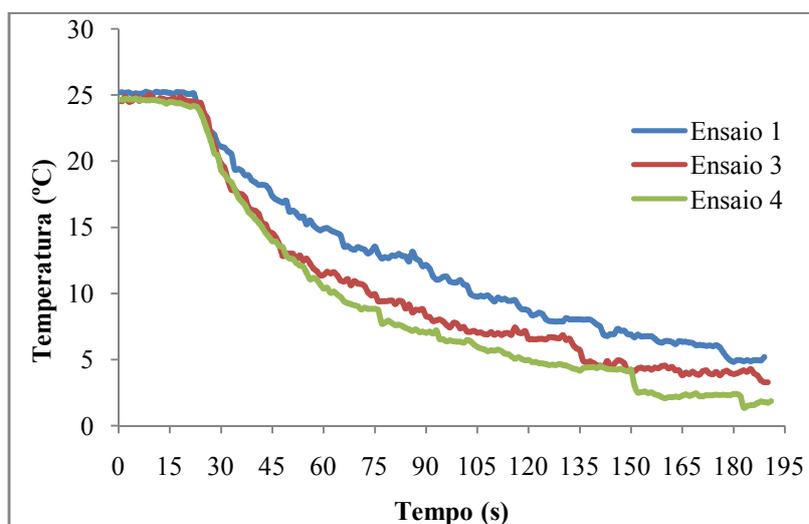


Figura 15. Evolução da temperatura da água verificada nos ensaios 1, 3 e 4.

Como é visível, na Figura 15, a partir de um determinado tempo, os ensaios 3 e 4 apresentam uma temperatura da água inferior ao ensaio de referência. Verifica-se que após os 30 segundos a temperatura desses dois ensaios diminui mais rapidamente em comparação com o ensaio 1. O mesmo se verifica com a variação da temperatura do ensaio 4, em comparação com o ensaio 3. A partir dos 45 segundos a temperatura do ensaio 4 diminui de uma forma ligeiramente mais rápida do que a temperatura do ensaio 3.

Na Tabela 6, são apresentados os resultados da variação da quantidade de sílica gel, utilizando o suporte 3.

Tabela 6. Resultados obtidos variando a quantidade de sílica gel, utilizando o suporte 3.

Ensaio	T _{inicial} [°C]	T _{final} [°C]	T _{média} [°C]	<i>m_v</i> libertado [g]	<i>m_{SG}</i> inicial [g]	<i>m_{SG}</i> final [g]	<i>m_v</i> adsorvido [g]
5	25,31	4,79	-	-	-	-	-
6	24,95	5,20	15,08	3,36	150,20	152,60	2,40
7	25,15	2,02	13,59	3,93	247,30	250,87	3,57

Do conjunto de ensaios de referência realizados, os ensaios 1 e 5, são os que melhores resultados apresentam. Nestes ensaios, registou-se, em ambos, uma temperatura final e uma evolução de temperatura da água muito idêntica. Este é um aspecto importante, já que, como foi utilizado um recipiente de altura diferente para colocar a água, poderiam existir diferenças na variação da temperatura, o que não aconteceu. Deste modo, o ensaio 1 serve de referência para os ensaios realizados com os suportes 1 e 2 e o ensaio 5 para comparar com os ensaios realizados com o suporte 3.

Nos ensaios em que se utilizou o suporte 3 (ensaios 6 e 7), foram usadas as mesmas quantidades de sílica gel dos ensaios anteriores (3 e 4). Assim, numa fase posterior, é possível analisar e avaliar a influência do uso de diferentes configurações do leito de sílica gel. No ensaio 6 foi utilizada uma quantidade de sílica gel de 150,2 g e, de acordo com as temperaturas inicial e final registadas, foram gerados cerca de 3,36 g de vapor de água. Contudo, a temperatura final da água é relativamente igual à do ensaio de referência (5 °C). Neste ensaio, foi registada uma diferença de massa da sílica gel antes e depois de realizado o ensaio de 2,4 g, correspondendo, em princípio, à massa de vapor de água adsorvido pela sílica gel. De acordo com os resultados obtidos, apesar da sílica gel ter

adsorvido vapor de água, a temperatura final é sensivelmente igual à do ensaio de referência.

No ensaio 7 foram utilizados 247,3 g de sílica gel para arrefecer a água à temperatura inicial de 25 °C aproximadamente. Como se pode verificar na Tabela 6, a temperatura final registada, neste ensaio, é bastante mais baixa, do que a registada no ensaio de referência e no ensaio 6. Neste ensaio foram gerados 3,93 g e adsorvidos 3,57 g de vapor de água. Esta quantidade de vapor adsorvido corresponde a cerca de 90 % do vapor gerado. Deste modo, é possível afirmar que a presença da sílica gel levou a que a temperatura final da água fosse inferior à do ensaio de referência. Verifica-se também que o ensaio 7 apresenta uma temperatura final inferior à do ensaio 6, em virtude de se utilizar uma maior quantidade de sílica gel. De acordo com os resultados registados no ensaio 7, a sílica gel apresenta uma capacidade de adsorção de aproximadamente 0,014 kg/kg. Na Figura 16, encontra-se a evolução da temperatura da água dos três ensaios, utilizando o suporte 3.

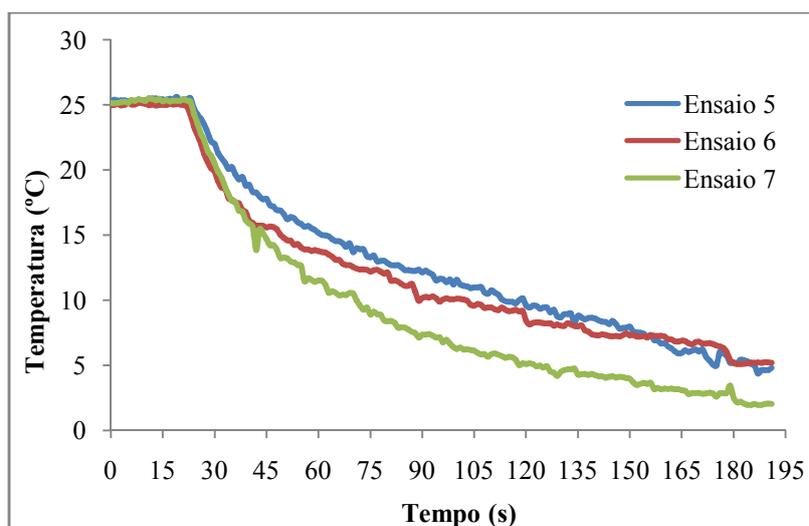


Figura 16. Evolução da temperatura da água verificada nos ensaios 5, 6 e 7.

Como se pode verificar na Figura 16, o ensaio 7 apresenta uma temperatura final mais baixa do que os outros dois ensaios. A temperatura da água dos ensaios 6 e 7 permanece praticamente igual, até atingir os 45 segundos. A partir desse momento, a temperatura do ensaio 7 diminui mais rapidamente. Relativamente à evolução da temperatura do ensaio 6, é visível que a sua temperatura diminui de uma forma mais rápida do que a do ensaio de referência, mas apenas até aos 140 segundos. A partir deste momento a temperatura não evolui como esperado, permanecendo sensivelmente constante

até ao fim do ensaio. Tal pode ficar a dever-se ao facto do sensor de temperatura se ter deslocado, isto é, com o movimento da água decorrente do processo de evaporação, o sensor pode ter deixado de estar totalmente em contacto com a água. Desta forma, podem ter sido registados valores de temperatura que não correspondem à realidade já que, de acordo com os resultados obtidos, a sílica gel adsorveu alguma quantidade de vapor de água.

No estudo apresentado é possível avaliar a influência da quantidade de sílica gel na adsorção de vapor de água no processo de refrigeração evaporativa. Verifica-se que são atingidas temperaturas mais baixas na presença de sílica gel. É observado que uma maior quantidade de sílica gel leva a que seja adsorvida uma maior quantidade de vapor de água, o que resulta numa temperatura final da água mais baixa, do que a que se verificaria se utilizada uma menor quantidade de sílica gel.

Na Figura 17, são apresentados os valores da percentagem de vapor adsorvido, em relação ao vapor gerado, para os quatro ensaios.

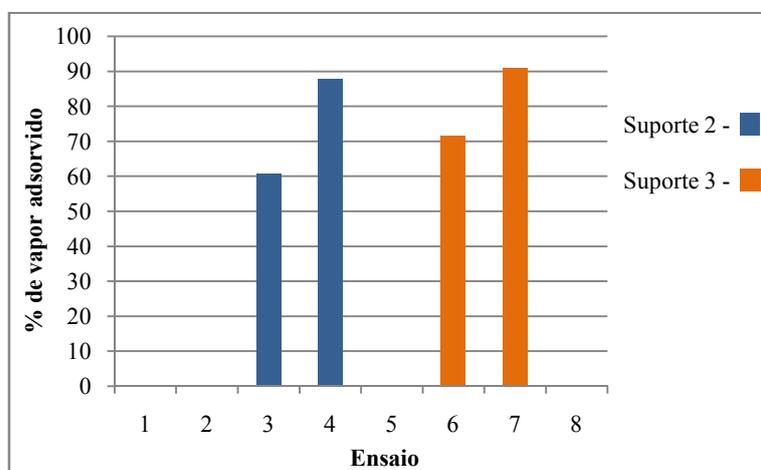


Figura 17. Percentagem de vapor adsorvido dos ensaios 3, 4, 6, e 7.

Como se pode ver na Figura 17, nos ensaios 4 e 7 é onde ocorre maior adsorção de vapor de água. Apesar de ser um ensaio com resultados duvidosos, o ensaio 6 apresenta uma percentagem superior ao ensaio 3.

Influência de diferentes configurações de suporte

Neste ponto serão analisadas as influências de diferentes configurações dos suportes e conseqüentemente diferentes configurações de leito de sílica gel, na temperatura final da água. À partida, a utilização dos suportes 2 e 3 vai permitir a existência de uma maior área de contacto entre a sílica gel e o vapor de água. Assim, é expectável que seja adsorvida uma maior quantidade de vapor. Serão analisados os resultados tendo em conta o uso de diferentes suportes para a mesma quantidade de sílica gel. Os ensaios que servem de base para analisar este aspecto já foram analisados anteriormente, contudo serão novamente referidos tendo em conta o objectivo desta análise.

Na Tabela 7 é apresentado o grupo de ensaios (2, 3 e 6), uma vez que apresentam a mesma massa de sílica (150,2 g), realizados com suportes diferentes.

Tabela 7. Resultados obtidos para diferentes configurações de suporte ($m_{SG} = 150,2$ g).

Ensaio	Suporte utilizado	T _{inicial} [°C]	T _{final} [°C]	T _{média} [°C]	m_v libertado [g]	m_{SG} inicial [g]	m_{SG} final [g]	m_v adsorvido [g]
1	-	25,20	5,17	-	-	-	-	-
2	1	24,76	4,28	14,52	3,47	150,20	151,78	1,58
3	2	24,66	3,27	13,97	3,63	150,20	152,41	2,21
6	3	24,95	5,20	15,08	3,36	150,20	152,60	2,40

O ensaio 1 serve de referência à análise dos restantes, uma vez que os seus resultados são semelhantes ao ensaio 5. No ensaio 2, onde se utiliza o suporte 1, obteve-se uma temperatura final de 4,28 °C, mais baixa do que a registada no ensaio de referência (5,17 °C). De acordo com as temperaturas do ensaio 2, foram libertados 3,47 g de vapor de água, dos quais apenas 1,58 g foram adsorvidos pela sílica gel. Estes valores correspondem a uma percentagem de 45 % de vapor adsorvido. Com os valores registados neste ensaio, a sílica gel apresenta uma capacidade de adsorção de 0,011 kg/kg, um valor mais baixo quando comparado com os restantes ensaios.

Nos ensaios 3 e 6 foram utilizados os suportes 2 e 3, respectivamente. O ensaio 3 apresenta uma temperatura final de 3,27 °C e, por sua vez, o ensaio 6 apresenta uma temperatura de 5,20 °C, igual à do ensaio de referência. Verifica-se que o vapor gerado nos três ensaios é sensivelmente o mesmo. Contudo, nos ensaios 3 e 6 a quantidade de vapor adsorvido é superior à do ensaio 2. Esta diferença pode ser explicada pela maior área de contacto existente entre o vapor de água e a sílica gel proporcionada pelos suportes 2 e 3.

Relembrando as configurações dos suportes, verificamos que existe uma maior área da base nos suportes 2 e 3, comparativamente ao suporte 1. Deste modo, no suporte 1, a sílica fica aglomerada, resultando numa diminuição da área de contacto entre o vapor de água e a superfície da sílica gel, provocando uma maior dificuldade na adsorção de moléculas de vapor de água. Já os suportes 2 e 3 apresentam uma configuração da parte móvel que permite uma melhor distribuição da sílica, promovendo uma maior área de contacto entre o adsorvente e o vapor de água.

Na Figura 18, encontra-se a evolução da temperatura da água registada nos ensaios 2 e 3 e no de referência.

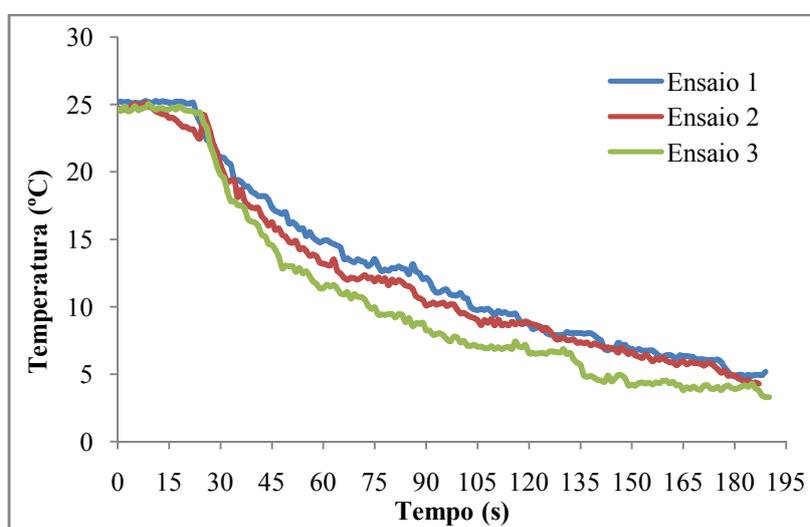


Figura 18. Evolução da temperatura da água dos ensaios 1, 2 e 3.

Assim, é visível que a temperatura do ensaio 2 praticamente acompanha a evolução da temperatura do ensaio de referência. A temperatura do ensaio 2 diminui mais rapidamente, do que no ensaio de referência, mas apenas entre os 30 e os 120 segundos. O ensaio 3 é o que apresenta melhores resultados face aos restantes. Como é visível na Figura 18, a sua temperatura diminui mais rapidamente, comparando com os ensaios 1 e 2.

Do mesmo modo que a análise anterior, será feita uma comparação dos ensaios 4 e 7, onde se utilizou a mesma massa inicial de sílica gel (247,3 g) com suportes diferentes. De referir que nesta análise não se utiliza o suporte 1, já que este não permite a utilização da quantidade de sílica gel referida. Os resultados são apresentados na Tabela 8 para mais fácil comparação.

Tabela 8. Resultados obtidos para diferentes configurações de suporte ($m_{SG} = 247,3$ g).

Ensaio	Suporte utilizado	$T_{inicial}$ [°C]	T_{final} [°C]	$T_{média}$ [°C]	m_v libertado [g]	m_{SG} inicial [g]	m_{SG} final [g]	m_v adsorvido [g]
1	-	25,20	5,17	-	-	-	-	-
4	2	24,66	1,86	13,26	3,87	247,30	250,70	3,40
7	3	25,15	2,02	13,59	3,93	247,30	250,87	3,57

Como se verifica na Tabela 8, serão analisados os ensaios 4 e 7, nos quais foram utilizados os suportes 2 e 3, respectivamente. Foi atingida uma temperatura final de 1,86 °C, no ensaio 4, e de 2,02 °C, no ensaio 7, que se verificaram inferiores à do ensaio de referência. Relativamente à massa de vapor gerada, verifica-se que é sensivelmente igual nos dois ensaios (3,90 g). O mesmo acontece com a massa de vapor adsorvido, uma vez que ambos os ensaios registaram quantidades quase iguais. Estes dois ensaios apresentam uma percentagem de vapor adsorvido em relação ao vapor gerado de cerca de 90 %.

No Figura 19, é apresentada a evolução da temperatura dos ensaios 4 e 7, assim como a do ensaio de referência.

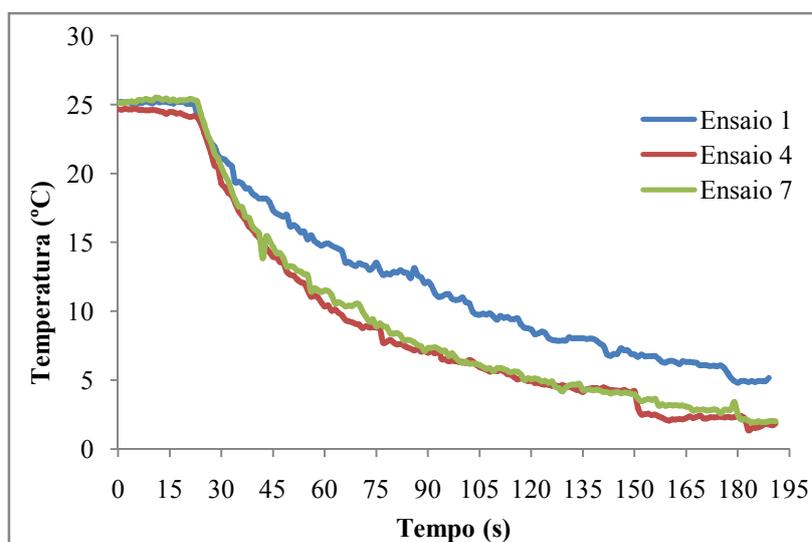


Figura 19. Evolução da temperatura dos ensaios 1, 4 e 7.

Pela Figura 19, é possível constatar que a temperatura final dos ensaios 4 e 7 é inferior à do ensaio de referência. Verifica-se que a evolução de temperatura destes dois ensaios, ao longo do tempo, é semelhante. Este aspecto, juntamente com o facto de ter sido adsorvida uma quantidade de vapor de água muito idêntica, pode ser explicado pela semelhança da parte móvel dos suportes utilizados. A utilização da mesma configuração,

manifesta-se numa área de contacto entre o vapor de água e a superfície da sílica gel idêntica em ambos os ensaios.

Comparando as análises efectuadas para avaliar o desempenho de diferentes suportes, para duas massas iniciais de sílica, verifica-se que o suporte 1 é aquele que apresenta piores resultados. Este facto é comprovado pela baixa quantidade de vapor de água adsorvido pela sílica gel. A configuração deste suporte possibilita a existência de uma baixa área de contacto entre a superfície de sílica gel e o vapor de água, quando comparado com os restantes. Os suportes 2 e 3 permitem obter comportamentos muito idênticos, no que toca às temperaturas atingidas e à quantidade de vapor adsorvido. Como seria de esperar, a utilização de diferentes quantidades de sílica gel em ambos os suportes, leva a que a temperatura final da água atinja valores inferiores, quando se utiliza uma maior quantidade de sílica gel.

Nos ensaios realizados verificou-se, visualmente, que a evaporação da água é acompanhada pela formação de bolhas. Deste modo, a água está em constante movimento e confirmou-se que esta, ao borbulhar, salpicava as paredes do recipiente. Com o uso do suporte 3 existe a possibilidade destes salpicos atingirem a sua parte móvel e, desta forma, atingirem também a sílica gel.

Assim foi realizado um ensaio com objectivo de averiguar se os salpicos atingiam, ou não, o suporte de sílica gel. Este ensaio, o ensaio 8, não foi realizado com água livre, mas sim recorrendo a um pano absorvente que retivesse a água, eliminando a superfície livre da mesma. Deste modo, com a utilização deste meio absorvente, pretendeu-se evitar a criação de agitação à superfície, impedindo assim a formação de bolhas e os consequentes salpicos. Foi utilizada a mesma quantidade de água, a uma temperatura de aproximadamente 25 °C e o suporte 3. Neste ensaio, foram utilizadas 150,2 g de sílica gel e os resultados obtidos, comparados com o ensaio 3. Na Tabela 9, são apresentados os resultados do ensaio 8, do ensaio 3 e do ensaio de referência.

Tabela 9. Resultados obtidos com a utilização de meio absorvente.

Ensaio	Suporte utilizado	T _{inicial} [°C]	T _{final} [°C]	T _{média} [°C]	<i>m_v</i> libertado [g]	<i>m_{SG}</i> inicial [g]	<i>m_{SG}</i> final [g]	<i>m_v</i> adsorvido [g]
5	-	25,31	4,79	-	-	-	-	-
3	2	24,66	3,27	13,97	3,63	150,20	152,41	2,21
8	3	25,75	0,72	13,24	4,25	150,20	152,72	2,52

Como se verifica na Tabela 9, a temperatura final do ensaio 8 é 0,72 °C, sendo esta a temperatura mais baixa registada em todos os ensaios realizados. No ensaio 8, foram gerados 4,25 g de vapor de água, um valor superior aos 3,63 g gerados no ensaio 3. Neste ensaio foram adsorvidos 2,52 g de vapor de água, um valor próximo do vapor adsorvido no ensaio 3, em que se utilizou a mesma quantidade de sílica gel. A quantidade de vapor adsorvido pelo ensaio 8 corresponde a uma percentagem de 59 % de vapor adsorvido em relação ao vapor gerado. Na Figura 20 é possível verificar a evolução da temperatura dos 3 ensaios.

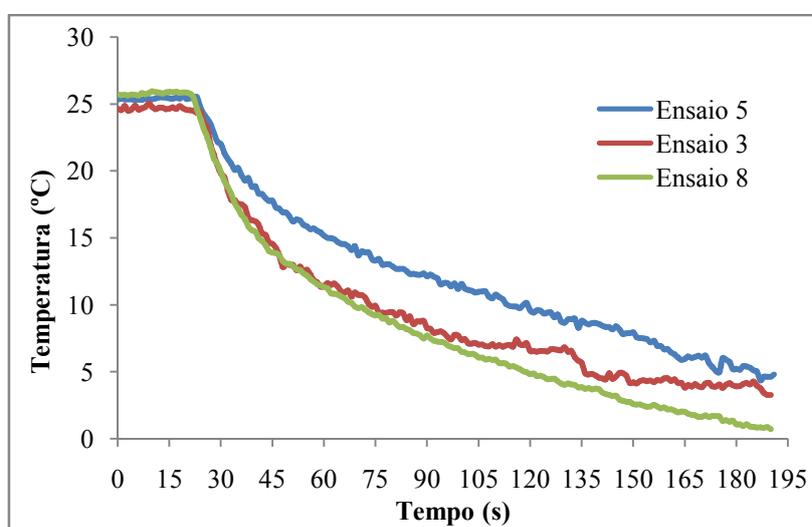


Figura 20. Evolução da temperatura dos ensaios 5, 3 e 8.

Como se pode ver na Figura 20, a temperatura final do ensaio 8 é inferior à dos restantes ensaios. Como era de esperar, a temperatura deste ensaio diminui mais rapidamente em comparação com o ensaio de referência. No ensaio 8, a temperatura da água evolui de uma forma regular, uma vez que não se observam oscilações de temperatura, ao contrário dos restantes ensaios. Verifica-se que no ensaio 3 a diminuição da temperatura apresentou oscilações, o que não acontece no ensaio 8. Este facto pode estar relacionado com a posição do termopar, visto que este está praticamente imóvel, devido à presença do meio absorvente.

Com esta análise é possível concluir que, ao utilizar o pano absorvente, não se verifica a existência de salpicos. Visto que, neste ensaio, a quantidade de vapor adsorvido pela sílica gel é sensivelmente igual aos ensaios realizados com a mesma quantidade de sílica, é possível afirmar que os referidos salpicos não atingiram o suporte. Deste modo, os

resultados obtidos, nos ensaios realizados sem a utilização de qualquer meio absorvente, são fiáveis. De igual forma se conclui que impedindo que a água entre em ebulição, a temperatura desta diminui de uma forma constante, uma vez que o termopar não acompanha o movimento criado pela agitação da água e as temperaturas registadas são mais regulares.

Na Figura 21 e Figura 22, encontram-se as temperaturas finais e a percentagem de vapor adsorvido para cada ensaio, respectivamente.

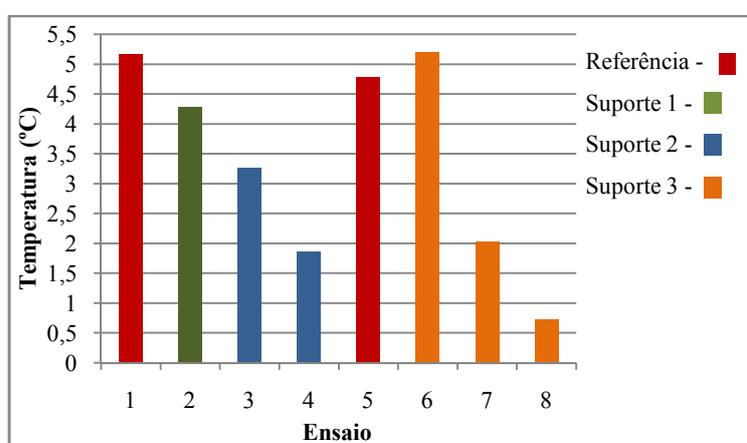


Figura 21. Temperatura final dos ensaios realizados.

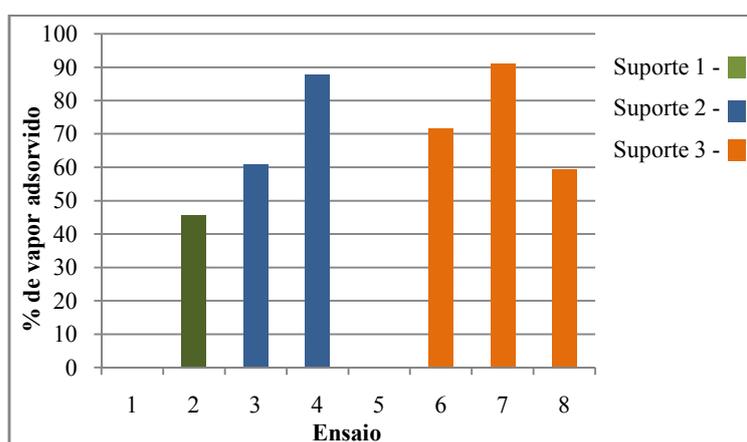


Figura 22. Percentagem de vapor adsorvido nos ensaios realizados.

Como se pode verificar na Figura 21, a temperatura mais baixa atingida foi registada no ensaio 8. Tendo este ensaio sido realizado em condições diferentes, os ensaios 4 e 7 são os que apresentam melhores resultados, tendo em conta a temperatura atingida e a quantidade de vapor de água adsorvido. Utilizando suportes diferentes e quantidades de sílica gel iguais, estes ensaios atingiram temperaturas finais de 2 °C e cerca de 90 % de

vapor adsorvido. Da análise da Figura 22, é possível verificar que, utilizando os suportes 2 e 3, os ensaios em que se utiliza uma massa de sílica gel de 150,2 g, apresentam percentagens de vapor adsorvido de cerca de 60/70 % e os ensaios que utilizam uma quantidade superior, apresentam valores próximos de 90 % de vapor adsorvido.

A regeneração da sílica gel, ao longo da actividade experimental, pode ter afectado a sua capacidade de adsorção, uma vez que os adsorventes sólidos alteram a sua estrutura com o número de ciclos de adsorção/dessorção. Esta alteração é resultante de reacções químicas existentes na superfície interna do adsorvente, que provocam um bloqueio dos poros e uma diminuição da superfície específica, que levam a uma diminuição da capacidade de adsorção (Brites et al., 2009).

Tendo em conta os resultados obtidos, segue-se o capítulo em que se realiza uma proposta para um novo suporte para a sílica gel.

4. PROPOSTA DE SUPORTE PARA A SÍLICA GEL

Após a análise dos resultados obtidos, foi possível averiguar qual o suporte que melhores resultados obteve. Deste modo, é agora proposto um desenho de um possível suporte para colocar a sílica gel, no interior da câmara de vácuo. Como foi constatado, o suporte 1 não obteve resultados que se possam considerar aceitáveis. Já os suportes 2 e 3 apresentam bons resultados. Assim, tendo em conta a configuração das suas partes móveis, o suporte que aqui se sugere é projectado de forma a permitir uma maior área de contacto, entre a sílica gel e o vapor de água.

O referido suporte foi construído recorrendo ao *software* Inventor, desenvolvido pela empresa *Autodesk* e permite modelar imagens a três dimensões. Para a elaboração desta proposta, é simulada a câmara de vácuo, a parte móvel do suporte e os respectivos apoios. No final do capítulo, apresenta-se uma vista, em corte, da câmara e do suporte, simulando a utilização de uma garrafa colocada no interior da câmara. Propõe-se que o material de que é feito o suporte e os apoios seja o mesmo da câmara, isto é, aço inoxidável. Segue-se uma breve descrição das peças criadas no software, com a apresentação das respectivas imagens.

Conforme o capítulo 2, a câmara de vácuo tem uma altura de 50cm e um diâmetro de 21cm. Considera-se que a espessura das paredes da câmara é de 1cm. Para o apoio do suporte, são utilizados três parafusos, adiante descritos. Na Figura 23 é visível a câmara com a furação no interior desta, para os parafusos de apoio do suporte.



Figura 23. Representação da câmara de vácuo e das furações para os parafusos de apoio do suporte.

Como é visível na Figura 23, as furações dos parafusos de apoio encontram-se a diferentes alturas. Assim, é possível colocar, no interior da câmara, garrafas de bebidas de diferentes tamanhos e, por sua vez, colocar o suporte o mais próximo possível da garrafa. Como são utilizados três parafusos para suportar a sua parte móvel, existe um conjunto de três furações situadas a três alturas diferentes. As furações têm uma profundidade de 8mm, com uma rosca M5x1 e estão uniformemente distribuídas pelo diâmetro da câmara.

Os parafusos que sustentam o suporte foram projectados de modo a facilitar o seu manuseamento, isto é, para que seja possível colocar e remover o suporte no interior da câmara, de uma forma relativamente rápida e fácil. Assim, os parafusos têm a forma de meia argola e apresentam uma rosca de 8mm de profundidade, do tipo M5x1, como é visível na Figura 24. Na mesma figura, constata-se que uma das extremidades do parafuso tem a forma de cone, arredondado no vértice.

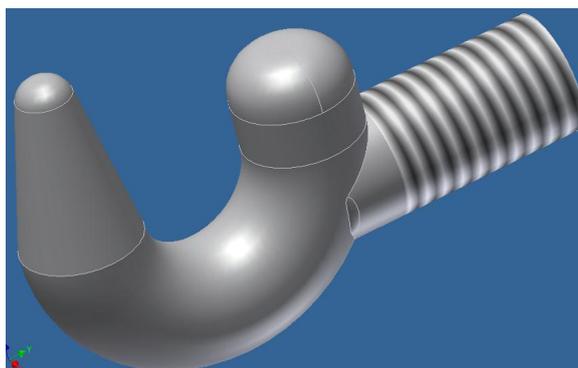


Figura 24. Representação do parafuso para apoio do suporte.

De acordo com a configuração dos suportes 2 e 3, cuja parte móvel tem a forma de cilindro e foi construída recorrendo a rede mosquiteira, a proposta que ora se apresenta é bastante similar. Assim, nesta proposta, a parte móvel é constituída por um anel, contendo três argolas, que encaixam nos parafusos de apoio e por uma rede cilíndrica. Para movimentar o suporte foi construída, no anel, uma pega, conforme se pode ver na Figura 25.

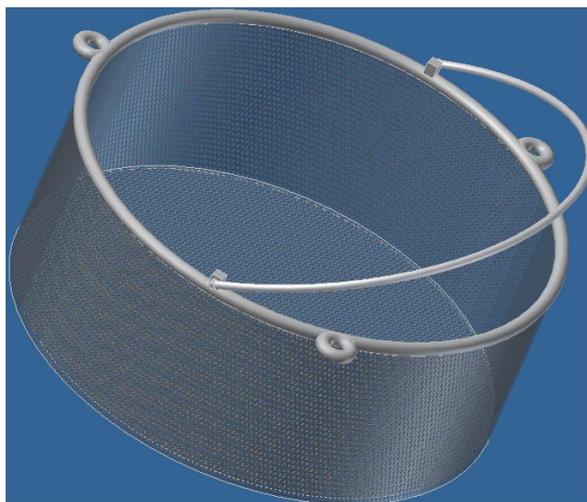


Figura 25. Representação do suporte para colocar sílica gel.

O suporte apresentado Figura 25 tem uma altura de 7cm e um diâmetro de 175cm. Com estas dimensões e recorrendo ao valor da massa volúmica aparente da sílica gel do tipo A, é possível colocar no interior do suporte até cerca de 1,2 kg de sílica.

Na Figura 26, encontra-se a representação do suporte colocado no interior da câmara e, na Figura 27, é apresentada uma vista, em corte, do conjunto, simulando a existência de uma garrafa no interior da câmara.

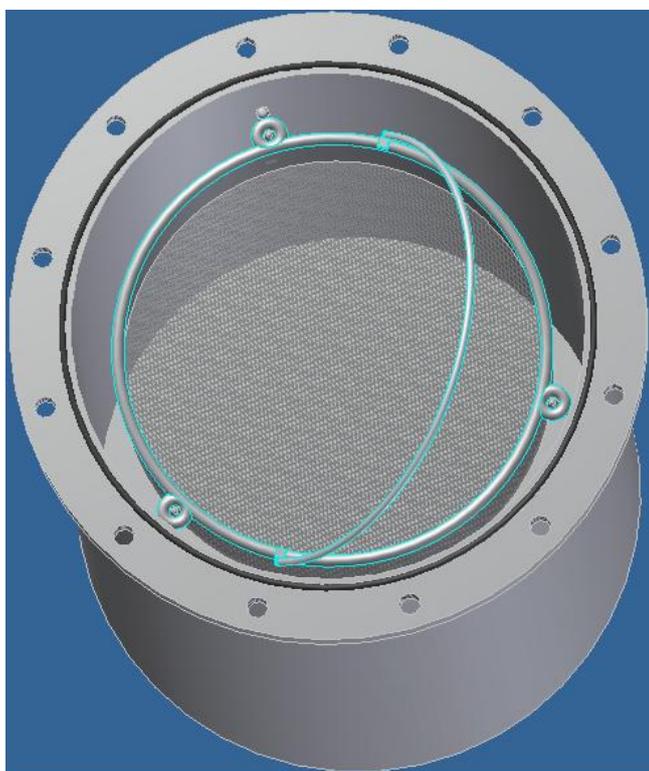


Figura 26. Representação do conjunto câmara e suporte.

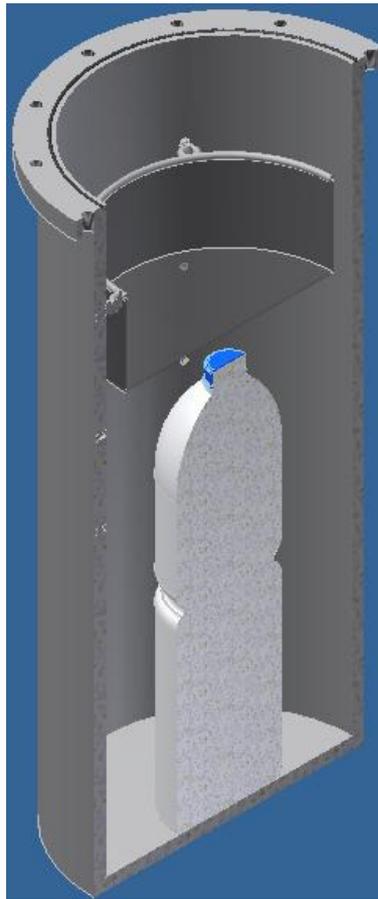


Figura 27. Vista, em corte, do conjunto, simulando uma garrafa no interior da câmara.

5. CONCLUSÕES

A refrigeração evaporativa a vácuo é o processo base de funcionamento da instalação experimental de que é alvo o presente trabalho. A produção de vapor de água é o principal inconveniente do processo de refrigeração evaporativa. É fundamental capturá-lo, de modo a garantir a menor quantidade possível daquele, no interior da câmara, tornando a refrigeração a vácuo um processo eficiente e vantajoso, em relação ao processo de refrigeração tradicional. Assim, o objectivo deste trabalho é o estudo da captação de vapor de água em sílica gel, sob as condições da refrigeração evaporativa a vácuo. Deste modo, foi planeada e realizada a actividade experimental, para avaliar o comportamento da sílica gel na adsorção de vapor de água e para averiguar qual a melhor configuração do respectivo leito.

A realização de um programa de aquisição e gravação de dados tornou-se numa mais-valia para a utilização da instalação e realização dos testes experimentais. Em tempo real, todos os dados medidos nos ensaios experimentais são adquiridos e apresentados numa interface gráfica, possibilitando um maior controlo sobre a instalação experimental. A aquisição de dados permite uma melhor compreensão da evolução de certos parâmetros, tais como a temperatura e pressão do processo de refrigeração evaporativa a vácuo.

O fenómeno de adsorção surge como um processo vantajoso para a refrigeração evaporativa a vácuo. Recorrendo à adsorção, é possível retirar o vapor de água do interior da câmara, ou pelo menos minimizá-lo. De uma vasta gama de adsorventes existentes, a sílica gel surge como um bom adsorvente, para captar vapor de água. De acordo com os principais estudos de literatura nesta área, é possível concluir que para a mesma pressão, quanto menor for a temperatura, maior a capacidade de adsorção da sílica gel. Por sua vez, para a mesma temperatura, a quantidade de vapor adsorvido diminui com a diminuição da pressão. É igualmente verificável, que abaixo de pressões de 1000 Pa, o efeito da diminuição da temperatura não é significativo, isto é, a capacidade de adsorção da sílica gel diminui linearmente com a diminuição da pressão.

Como seria de esperar, a temperatura da água decresce mais rapidamente, quando é utilizada sílica gel. No arrefecimento de uma mesma quantidade de água, constata-se que quanto maior é a quantidade de sílica gel, menor é a temperatura final da água e maior a quantidade de vapor adsorvido, uma vez que a sílica satura mais tarde.

Utilizando a sílica gel do tipo A, verifica-se que a capacidade de adsorção desta, sob as condições de refrigeração evaporativa a vácuo, é inferior ao valor previamente estimado (0,05 kg/kg). Obteve-se uma capacidade de adsorção de cerca de 0,01 kg/kg. Numa análise mais cuidada, é possível aferir que este valor é de cerca de 0,014 kg/kg, nas situações em que se atingem cerca de 90 % de vapor adsorvido.

Utilizando uma configuração do leito de sílica gel, que permita uma maior área de contacto entre a sílica gel e o vapor de água, é adsorvida uma maior quantidade deste e, em consequência, são obtidas temperaturas finais da água mais baixas. Por outro lado, conclui-se que praticamente não existem diferenças, quando se utilizam diferentes posições do leito de sílica gel. Igualmente se conclui que impedindo a agitação da água, provocada pela ebulição desta, a sua temperatura evolui de uma forma uniforme.

Para trabalho futuro, sugere-se que seja avaliada a captação de vapor de água, em situações que a água não se encontra em livre movimento, para averiguar as diferenças existentes na variação da temperatura. O suporte de sílica gel proposto, neste estudo, poderá servir de base à criação e aperfeiçoamento de um suporte, que melhor salvaguarde as necessidades impostas pela instalação experimental. Sugere-se ainda, no âmbito experimental, que sejam avaliadas as condições de regeneração da sílica gel minuciosamente, analisando todos os parâmetros envolvidos neste processo, de modo a obter a temperatura ideal de dessorção e a respectiva duração deste processo. Finalmente, sugere-se que seja avaliada a adsorção de vapor de água em sílica gel, para as condições de refrigeração evaporativa a vácuo, com partículas de sílica de diferentes dimensões e consequentemente diferentes tamanhos de poro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afonso, M. R. A., Silveira, Jr. V. (2005), “*Characterization of equilibrium conditions of adsorbed silica-gel/water bed according to Dubinin-Astakhov and Freudlinch*” – *Jornal de Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*. Departamento da Engenharia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, SP Brasil, Volume 4, pp. 3-7.

Albright, Lyle F. (2009), “*Albright’s Chemical Engineering Handbook*” – CRC Press-Taylor & Francis Group, Capítulo 14, pp. 1119-1170, New York.

AND Everest Compact Balance EK/EW Series – A&D Weighing. And Online.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:

http://www.andonline.com/weighing/products/details.php?catname=Balances&product_num=EK/EW-i_Series.

Automação Industrial Prática – Livro de Instrumentação Online. Referência Online.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:

<http://www.automacaoindustrial.com/instrumentacao/>.

Berman, A. (1996), “*Water vapor in vacuum systems*” – *Vacuum*, 47, pp. 327-322.

Brand Thermometers – Premium Instruments for measuring temperature. BRAND GMBH + CO KG Online.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:

<http://www.brand.de/en/products/densitytemperature-measurement/thermometers/cH/8a87489ab4d892c12c61faf38a0b59ee/>.

Brites, Gonçalo J. V. N.; Costa, José J. e Costa, Vítor A. F. (2009), “*Construção e estudo de um sistema de refrigeração com energia solar*” – III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia. MEFTE, Bragança.

Butt, Hans-Jürgen; Graf, Karlheinz e Kappl, Michael (2003), “*Physics and Chemistry of Interfaces*” – WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA. Weinheim, Germany.

Cavalcante, Jr. C. L. (2000), “*Industrial Adsorption Separation Processes: Fundamentals, Modeling and Applications*” – *Latin American Applied Research*, 30, pp. 357-364.

Çengel, Yunus A. e Boles, Michael A. (2007), “*Termodinâmica*” – McGraw-Hill Hiteramericana do Brasil, Ltda. Quinta Edição, São Paulo, Brasil.

Cheng, H.-P e Lin C.-T. (2007), “*The morphological visualization of the water in vacuum cooling and freezing process*” – *Journal of Food Engineering*, 78, pp. 569-576.

Chua, Hui T.; Ng, Kim C.; Chakraborty, Anutosh; Oo, Nay M. e Othman, Mohamed A. (2002), “*Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems*” – *J. Chem. Eng., Singapura*, 47, pp. 1117-1181.

Costa, José Ricardo da (2007), “Novos Agentes Sililantes Contendo Nitrogénio e Enxofre Como Precursores Para a Síntese de Sílica Gel e de Sílicas Mesoporosas Modificadas” – Tese de Mestrado em Química, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba.

Dabrowski, A. (2001), “*Adsorption – from theory to practice*” – Advances in Colloid and Interface Science, 93, pp. 135-224.

Danielson, Phil (2000), “*Sources of water vapor in vacuum systems*” – A journal of Practical and Useful Vacuum Technology. (Uma pequena versão saiu na R&D Magazine em Setembro de 2000).

DAQ Assistant – National Instruments Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/5467>

Dechow, Frederick J. (1989), “*Separation and Purification Techniques in Biotechnology*” – Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.

Dostal, M. e Petera, K. (2004), “*Vacuum cooling of liquids: mathematical model*” – Journal of Food Engineering, 61, pp. 533-539.

Edwards APG100-XM NW16 Pirani Vacuum Gauge – Edwards Vacuum Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/D0260100C/View.aspx>.

Edwards AV10K Air Admittance Valve – Edwards Vacuum Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/C35103000/View.aspx>.

Edwards FL20K Foreline Trap – Edwards Vacuum Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/A13305000/View.aspx>.

Edwards Model EMF20 Mist Filter – Edwards Vacuum Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/A46229000/View.aspx>.

Edwards RV12 Rotary Vane Pump – Edwards Vacuum Online. Manual de Instruções.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=A65501903>.

Edwards SP25K Fluoroelastomer Diaphragm – Edwards Vacuum Online.
Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=C33355000>.

Freitas, Manuel J. S. M. (2004), “Sistema de Aquisição e Controlo com Computador Pessoal”, em “Implementação de um Filtro Activo de Potência para Optimização da Interface entre a Rede e outros Sistemas Eléctricos”. Tese submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrónica Industrial, Guimarães, Capítulo 4, pp. 91-129.

Guelfi, Luciano R. e Scheer, Agnes P. (2007), “Estudo de Adsorção Para Purificação de Misturas na Indústria Petrolífera”, Curitiba.

International Adsorption Society – Referência Online. “*What is adsorption? | Adsorbents | Applications*”.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:

<http://ias.vub.ac.be/What%20is%20adsorption.html>.

Jiayou, Qiu (2003), “*Characterization of Silica Gel-Water Vapor Adsorption and Its Measuring Facility*” – Tese para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Nacional de Singapura, Singapura.

Keller, Jürgen U. e Staud, Reiner (2005), “*Gas Adsorption Equilibria – Experimental Methods and Adsorptive Isotherms*” – Springer, USA.

Knaebel, Kent S., “*Adsorbent Selection*” – Adsorption Research Inc., Dublin, Ohio. Referência Online.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2010:

<http://www.adsorption.com/publications/AdsorbentSel1B.pdf>.

LabView – National Instruments Online.

Acedido pela última vez em 17 de Janeiro de 2012:

<http://www.ni.com/labview/whatis/>

Marczewski, Adam W. (2002), “AWM’s Adsorption Glossary” – Referência Online.

Acedido pela última vez em 17 de Janeiro de 2012:

<http://adsorption.org/glossary/index.htm>.

McDonald, Karl e Sun, Da-Wen (2000), “*Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review*” – Journal of Food Engineering, 45, pp. 55-65.

Myers, Alan L. (2004), “*Thermodynamics of Adsorption*”, Chapter 21, in Letcher, T.M. (ed.), *Chemical Thermodynamics for Industry* – Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.

National Instruments NI SCC-68 Connector Block – Referência Online.

Acedido pela última vez em 18 de Janeiro de 2012:

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/202603>.

Ng K. C.; Chua, H. T.; Chung, C. Y.; Loke, C.H.; Kashiwaki, T.; Akisawa, A. e Saha, B. B. (2001), “*Experimental investigation of silica gel-water adsorption isotherms characteristics*” – Applied Thermal Engineering, 21, pp. 1631-1642.

Ruthven, Douglas M. (1984), “*Principles of Adsorption and Adsorption Processes*” – John Wiley & Sons, Inc., USA.

Santos, Rui (2010), “Estudo comparativo de técnicas de captação de vapor para sistemas de refrigeração a vácuo” – Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Sing, K. S. W.; Everett, D. H.; Haul, R. A. W.; Moscou, L.; Pierotti, R. A.; Rouquerol, J. e Siemieniewska, T. (1985), “*Reporting physisorption data for gas/solid systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity*” – Pure & Appl. Chem., 57, IUPAC, pp. 603-619.

Sun, Da-Wen e Zheng, Liyun (2006), “*Vacuum cooling technology for the agri-food industry: Past, present and future*” – Journal of Food Engineering, 77, pp. 203-214.

Suzuki, Motoyuki (1990), “*Adsorption Engineering*” – Kodansha, Ltd., Japão.

Wang, L. W.; Wang, R. Z. e Oliveira, R. G. (2009), “*A review on adsorption pairs for refrigeration*” – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, pp. 518-534.

Wang, Lijun e Sun, Da-Wen (2002), “*Modelling vacuum cooling process of cooked meat-part 1: analysis of vacuum cooling system*” – International Journal of Refrigeration, 25, pp. 854-86.

Xia, Zai Z.; Chen, Chuan J.; Kiplagat, Jeremiah K.; Wang, Ru Z. e Hu, Jin H. (2008), “*Adsorption Equilibrium of Water on Silica Gel*” – J. Chem. Eng.. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shangai Jiao Tong University, Shangai, China, 53, pp. 2462-2465.

Yang, Ralph T. (2003), “*Adsorbents: Fundamentals and Applications*” – John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Zheng, Liyun e Sun, Da-Wen (2004), “*Vacuum cooling for the food industry – a review of recent research advances*” – Trends in food Science & Technology, 15, pp. 555-568.

7. ANEXO A – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A interface do sistema de aquisição de dados é dividida em 3 subgrupos. A evolução da temperatura, apenas sob a forma de gráficos, é visível na Figura 28.

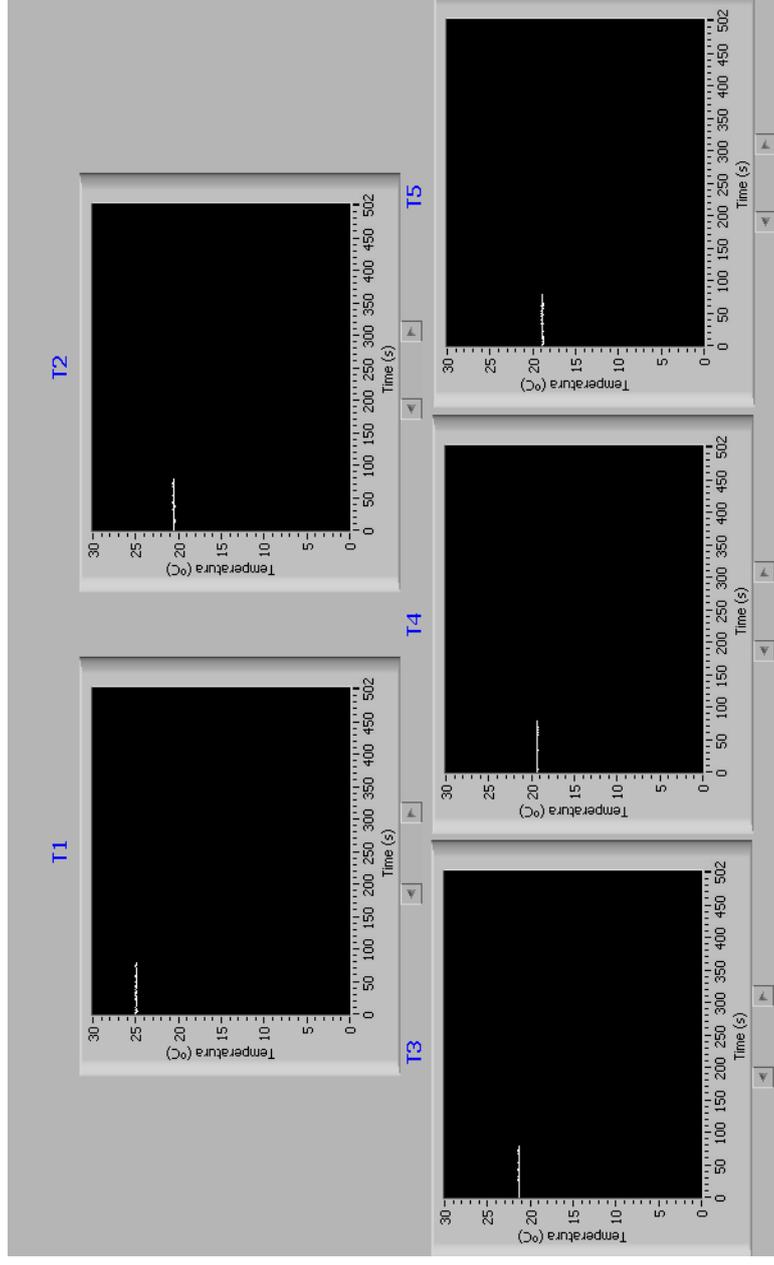


Figura 28. Interface gráfica da evolução da temperatura.

O painel frontal da medição da massa encontra-se na Figura 29.

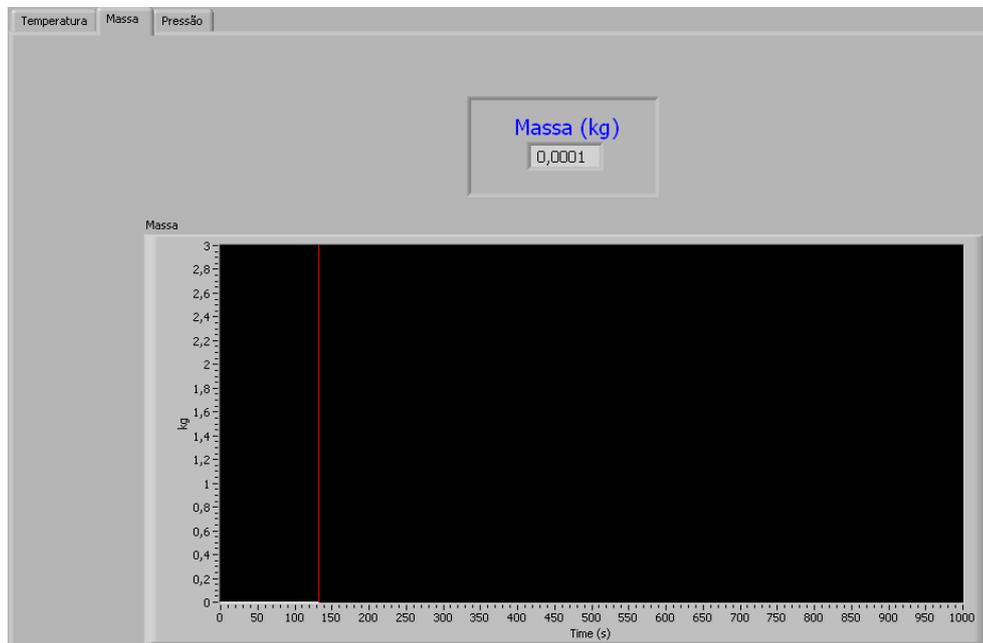


Figura 29. Painel frontal da medição da massa.

A interface da medição da pressão encontra-se na Figura 30.

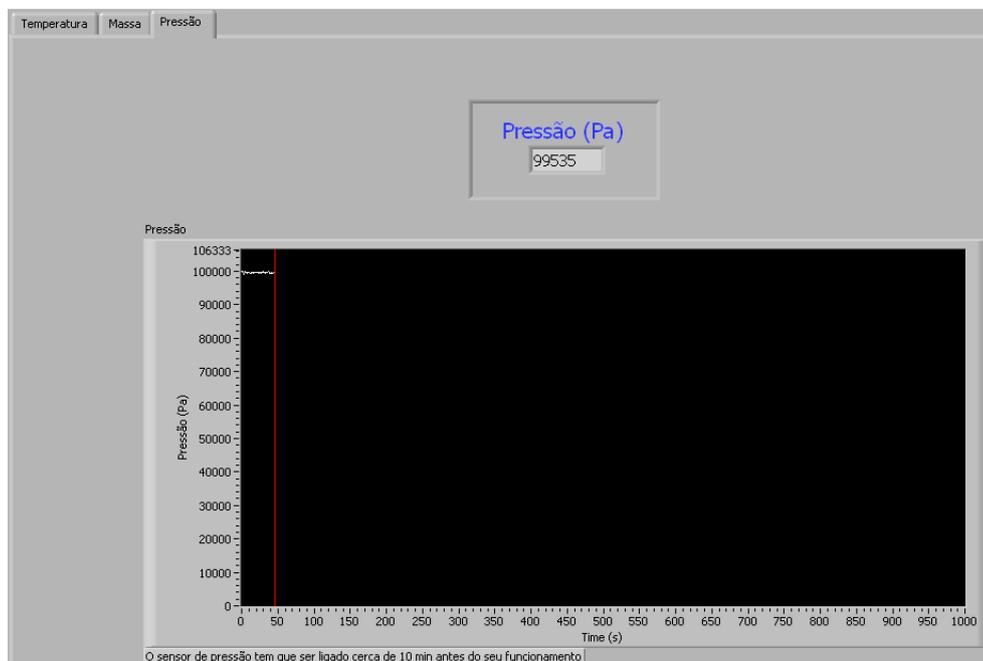


Figura 30. Painel frontal da medição da pressão.

8. ANEXO B – O PROCESSO DE ADSORÇÃO

➤ HISTERESE DE ADSORÇÃO

A histerese de adsorção verifica-se quando a isotérmica de adsorção não coincide com a de dessorção. Segundo Dabrowski (2001), neste caso a isotérmica possui um ciclo de histerese, o chamado *loop* de histerese. Este varia de forma, consoante o tipo de adsorção e ocorre maioritariamente nos adsorventes mesoporosos, onde se verifica o fenómeno de condensação capilar. Segundo Sing et al. (1985), existem 4 tipos diferentes de histerese de adsorção, como se constata na Figura 31.

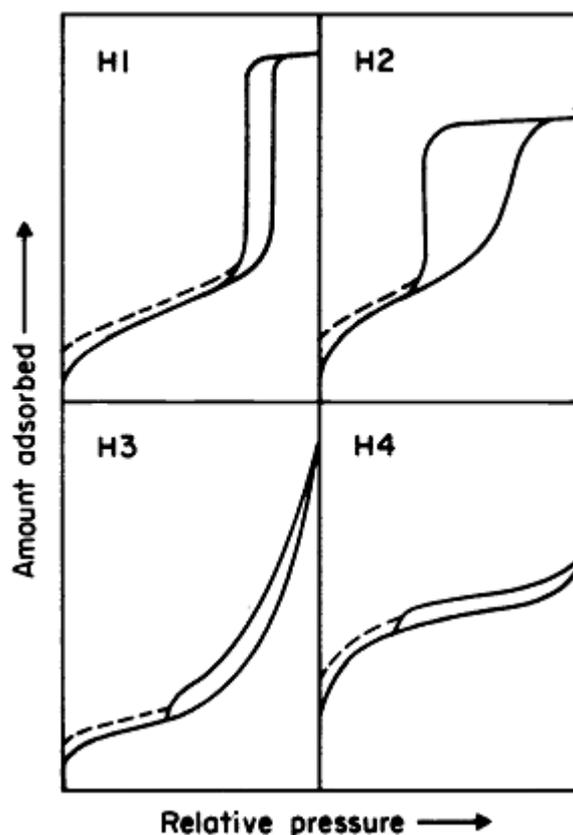


Figura 31. Tipos de histerese de adsorção; Fonte: Sing et al. (1985).

Sing et al. (1985) referem que os tipos H1 e H4 são considerados os extremos da histerese de adsorção e os outros dois podem ser vistos como intermédios entre os extremos. De acordo a Figura 32, onde se encontram representadas as fases do fenómeno de histerese, no interior de um poro cilíndrico, a adsorção em monocamadas tem lugar a baixas pressões, formando uma pequena camada de adsorvato nas paredes do poro (fase 1). Com o aumento da pressão, ocorre a adsorção em multicamadas, aumentando assim a

quantidade de adsorvato nas paredes do poro, até ao preenchimento completo deste, devido à possível ocorrência de condensação capilar (fase 2 e 3, respectivamente). Quando se diminui a pressão, iniciando o processo de dessorção, a interface geométrica adsorvato-adsorvente tem a forma de um menisco (fase 4). A diferença de pressões de evaporação do menisco e de saturação do vapor leva à ocorrência do fenómeno de histerese.

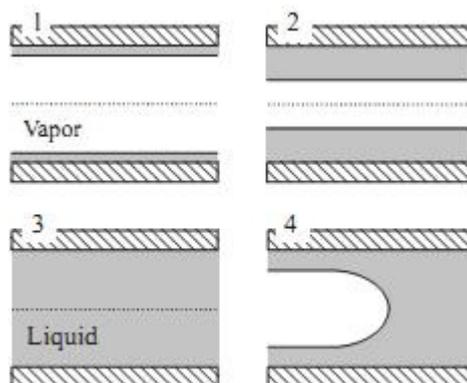


Figura 32. Representação do fenómeno de histerese num poro cilíndrico; Fonte: Butt et al. (2003).

Normalmente, o fenómeno de histerese não se verifica na sílica gel microporosa, ao contrário da mesoporosa. Nesta, é frequente a ocorrência de histerese, uma vez que a condensação por capilaridade é vulgar neste tipo de adsorventes.