

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA

RENAN RODRIGUES KALIKOSKI

**AEROGÉIS HÍBRIDOS DE SÍLICA E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES PARA  
ISOLAMENTO TÉRMICO – UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Porto Alegre

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA

RENAN RODRIGUES KALIKOSKI

**AEROGÉIS HÍBRIDOS DE SÍLICA E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES PARA  
ISOLAMENTO TÉRMICO – UMA REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de conclusão apresentado junto à  
atividade de ensino “Projeto Tecnológico - QUI”  
do Curso de Química Industrial, como requisito  
parcial para a obtenção do grau em Química  
Industrial

Prof. Dr. João Henrique Zimnoch dos Santos  
Orientador

Porto Alegre

2020

## RESUMO

Os aerogéis de sílica são materiais nanoestruturados que possuem propriedades interessantes, como baixa densidade, alta área específica, alta porosidade e baixa condutividade térmica (propriedade de isolamento térmico), características que os tornam materiais bastante promissores e cada vez mais estudados. Algumas aplicações comerciais para os aerogéis já foram propostas, como barreiras acústicas, supercapacitores, suportes catalíticos e isolamento térmico. Contudo, eles ainda são pouco explorados em aplicações do cotidiano, já que em geral são materiais frágeis, de síntese complexa e economicamente desfavoráveis (alto custo). Este trabalho é uma revisão da literatura acerca dos aerogéis híbridos de sílica, abordando os seguintes tópicos relacionados à síntese e à aplicação destes materiais: (i) síntese de aerogéis híbridos de sílica e aerogéis convencionais de sílica (não híbridos); (ii) tipos de tratamentos (modificações estruturais) e reagentes empregados na síntese dos aerogéis híbridos e (iii) e aplicação de aerogéis híbridos de sílica, com foco principalmente na aplicação como isolantes térmicos.

Palavras Chaves:

Aerogéis, Aerogéis Híbridos, Hibridizações, Agentes Modificadores, Agentes Precursores, Aplicações, Isolamento Térmico.

## **ABSTRACT**

Silica aerogels are nanostructured materials that have interesting properties, such as low density, high specific area, high porosity and low thermal conductivity (thermal insulation property), characteristics that make them very promising and increasingly studied materials. Some commercial applications for aerogels have already been proposed, such as noise barriers, supercapacitors, catalytic supports and thermal insulation. However, they are still little explored in everyday applications, since in general they are fragile materials, of complex synthesis and economically unfavorable (high cost). This work is a literature review on hybrid silica aerogels, covering the following topics related to the synthesis and application of these materials: (i) synthesis of hybrid silica aerogels and conventional silica aerogels (non-hybrids); (ii) types of treatments (structural modifications) and reagents used in the synthesis of hybrid aerogels and (iii) and application of hybrid silica aerogels, focusing mainly on the application as thermal insulators.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
<b>2. METODOLOGIA</b>	<b>12</b>
<b>3. AEROGÉIS DE SÍLICA</b>	<b>12</b>
3.1. CLASSIFICAÇÃO E SÍNTESE	12
3.2. SÍNTESE DE AEROGÉIS HÍBRIDOS	14
3.3. SECAGEM x CUSTO DE PRODUÇÃO	23
<b>4. APLICAÇÕES RECENTES</b>	<b>24</b>
4.1. APLICAÇÕES EM GERAL	25
4.2. APLICAÇÕES EM ISOLAMENTO	27
<b>5. MERCADO DOS AEROGÉIS DE SÍLICA</b>	<b>29</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>30</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Aspecto visual dos aerogéis de sílica.....	10
<b>Figura 2.</b> Gráfico do número de publicações x ano para as buscas por “Aerogel” e “Hybrid aerogel” no site do Scopus.....	11
<b>Figura 3.</b> Número de publicações por ano, nós últimos 5 anos, referente às aplicações dos aerogéis híbridos.....	13
<b>Figura 4.</b> Número de publicações por ano, nós últimos 5 anos, referente às aplicações dos aerogéis híbridos de sílica.....	13
<b>Figura 5.</b> Representação do processo de síntese para produção de aerogéis de alumina-sílica, com Sec-butóxido de Alumínio (ABS) como agente modificador.....	19
<b>Figura 6.</b> Representação do processo de síntese do aerogel híbrido de Cério-Sílica utilizado pelo grupo de pesquisa de L. F. Posada, método de impregnação.....	22
<b>Figura 7.</b> Representação dos aerogéis de sílica sintetizados na pesquisa de Ecem Tiryaki et. al.....	24
<b>Figura 8.</b> Célula de alumínio preenchida com aerogel de sílica:equipamento utilizado para capturar a poeira da cauda de um cometa na missão Stardust, da NASA, em 1999.....	28

## LISTA DE TABELAS

**Tabela I.** Exemplos de estudos realizados nos últimos anos referente aos aerogéis de sílica. Informações dos tipos de aerogéis sintetizados, os materiais precursores e modificadores utilizados, rotas de síntese e aplicações destes aerogéis.....17

## LISTA DE ABREVIATURAS

**IUPAC:** União Internacional de Química Pura e Aplicada.

**TEOS:** Tetraetoxissilano.

**TMOS:** Tetrametoxissilano.

**NASA:** Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (Agência Federal dos Estados Unidos).

**ASB:** Sec-butóxido de Alumínio.

**GPTMS:** (3-Glicidiloxipropil)trimetoxissilano.

**PGPTMS:** Poli-(3-Glicidiloxipropil)trimetoxissilano - Poliéter formado pela polimerização do GPTMS.

**PE:** Polietileno.

**PGPTMS-PE:** Aerogel híbrido de PGPTMS, modificado com aerogéis de Polietileno.

**TPS:** Trietoxi(1-feniletênil)silano.

**PTPES:** Poli-trietoxi(1-feniletênil)silano - Polímero formado pela polimerização do TPS

**PFR:** Resina composta por fenol-formaldeído.

**APTES:** 3-(aminopropil)trietoxissilano.

**DTBP:** Di-terc-butilperóxido.

**RSCE:** Extração Supercrítica Rápida (método de secagem de aerogéis).

**LTSCD:** Secagem Supercrítica a Baixa Temperatura.

**HTSCD:** Secagem Supercrítica a Alta Temperatura.

**APD:** Secagem a Pressão Ambiente.

**TBA:** Terc-butanol.

**HCl:** Ácido Clorídrico.

**NaOH:** Hidróxido de sódio.

**EtOH:** Etanol.

**MeOH:** Metanol.

**NaHCO<sub>3</sub>:** Bicarbonato de sódio.

## 1. INTRODUÇÃO

Os aerogéis são materiais sólidos e leves, com densidades baixíssimas, em torno de 0,003 e 0,5 g/cm<sup>3</sup>. São sintetizados a partir de reações sol-gel e podem ser produzidos a partir de diversas matrizes, como óxidos de metais de transição por exemplo, sendo mais comum e estudado os aerogéis a base de dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>). Por este motivo, o termo “aerogel” quando utilizado sozinho, normalmente se refere à aerogéis de sílica. São materiais derivados de géis, sendo a fração líquida do material substituída por ar, formando estruturas sólidas interconectadas, com alta porosidade e com poros de escala nanométrica. Segundo a IUPAC, aerogéis são “Géis compostos por um sólido microporoso em que a fase dispersa é um gás”. Estruturalmente, as nanopartículas presentes no aerogel estão aglomeradas em uma estrutura de rede aberta e apresentam ligações do tipo Si-OH e Si-O-Si, provenientes de reações de hidrólise e condensação dos reagentes precursores, geralmente TEOS (Tetraetoxisilano) ou TMOS (Tetrametoxisilano). A porosidade dos aerogéis de sílica é explicada pelo processo de secagem supercrítica a qual são submetidos. Neste processo, que deve ocorrer acima da pressão crítica e temperatura crítica do solvente utilizado, é possível minimizar as tensões superficiais presentes no processo de secagem, de modo que a estrutura original do gel é mantida pelo aerogel. A baixa densidade e a baixa condutividade térmica são explicadas exatamente pela alta porosidade dos aerogéis de sílica, uma vez que nestes poros são aprisionadas moléculas de ar, que apresentam baixa densidade e baixa condutividade térmica, conferindo estas propriedades também ao aerogel. Outra característica marcante dos aerogéis de sílica é o fato de serem transparentes e levemente azulados. Este comportamento é explicado pela teoria do Espelhamento de Rayleigh, a mesma teoria que explica o fato do céu ser azul. No céu, as minúsculas moléculas presentes na atmosfera difundem melhor as ondas com os menores comprimentos de onda, tais como o azul e o violeta. O que acontece no aerogel é semelhante ao que ocorre no céu: a microestrutura do aerogel, neste caso, faz o mesmo papel da atmosfera. A microestrutura do aerogel tem uma escala pequena em comparação com o comprimento de onda da luz,

fazendo com que ocorra um pequeno espelhamento isotrópico da luz incidente, resultando na coloração azul.

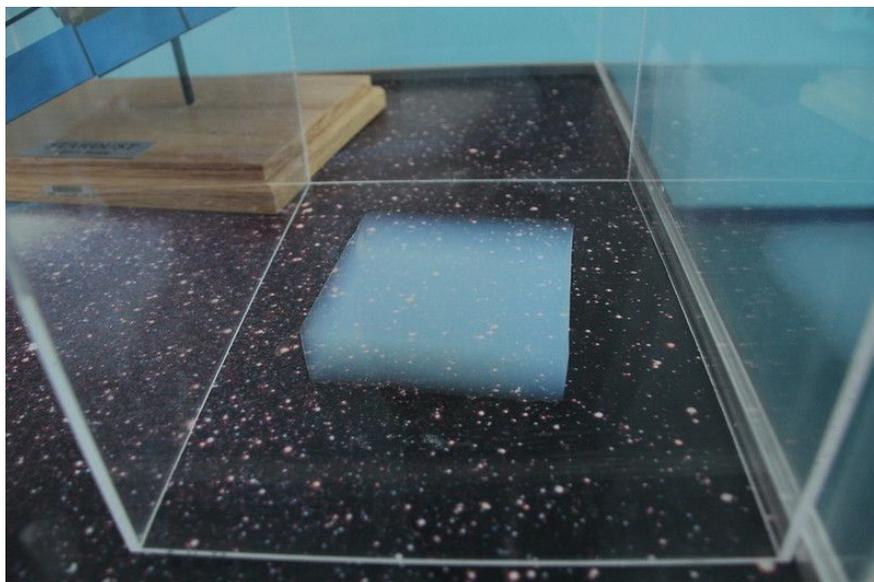


Figura 1. Aspecto visual dos aerogéis de sílica

Fonte: <https://www.flickr.com/photos/sergiooaf/3086812722/in/photostream/>, acessado em 15/09/2020.

O aerogel não é um material novo, tendo sido sintetizado pela primeira vez em 1930 e o primeiro estudo publicado em 1931, na revista Nature, pelo autor Steven Kistler. Diz-se que o aerogel surgiu através de uma brincadeira entre amigos ao tentar fazer a remoção da fração líquida de gelatinas e substituir por gás. Ainda que conhecidos, poucos estudos foram feitos sobre os aerogéis nas primeiras décadas após o seu descobrimento. Os estudos com reações sol-gel só ganharam força realmente em meados da década de 80, onde começaram a surgir diversas propostas de síntese e aplicações para os aerogéis.

O objetivo desta monografia é mapear trabalhos da literatura que tratam sobre aerogéis de sílica em termos de síntese, modificação estrutural e aplicação, principalmente aplicações de isolamento térmico. Tal estudo é importante para evidenciar que as fragilidades do aerogéis de sílica podem ser superadas através de hibridizações, ou até mesmo de adicionar novas propriedades à estes materiais promissores, permitindo as suas aplicações no cotidiano. Além disso, o estudo ainda

é importante pelo fato de expor as dificuldades do processo de síntese, em especial, se tratando da questão econômica (preço e custo de produção).

O número de patentes e artigos sobre aerogéis e aerogéis híbridos aumentaram continuamente até os dias de hoje, indicando a sua importância e capacidade como material em diversas aplicações. O gráfico a seguir (Figura 2) foi gerado através de dados obtidos em uma pesquisa no site do Scopus, onde procurou-se pelos termos “aerogel” e “hybrid aerogel” nos últimos 20 anos, ou seja, a partir dos anos 2000.

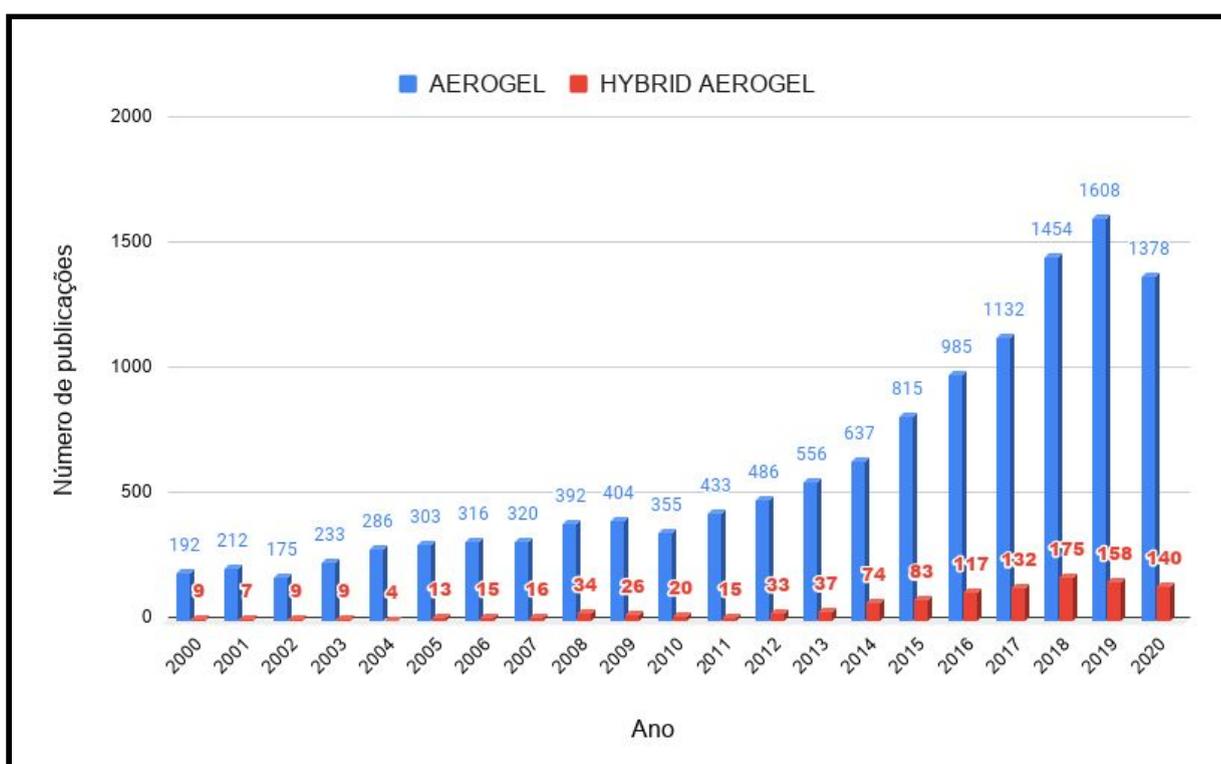


Figura 2. Número de publicações x ano para as buscas por “Aerogel” e “Hybrid aerogel” no site do Scopus. As pesquisas que compõem os números apresentados estão disponíveis em: <https://www.scopus.com/>. Acessado no dia 15/09/2020.

Pode-se perceber que o número de publicações para cada um dos termos pesquisados cresceu bastante ao longo dos últimos 21 anos, em especial a partir do ano de 2013. O número de publicações para aerogéis híbridos ainda é baixo em comparação com o número de publicações que tratam apenas de aerogéis. Ainda

assim, foram publicados 175 trabalhos sobre aerogéis híbridos no ano de 2018, 158 trabalhos no ano de 2019, e 140 trabalhos até setembro de 2020, quando a pesquisa em questão foi realizada. Tais valores são consideráveis e mostram que a ciência dos aerogéis híbridos tem grande potencial para suprir as carências dos aerogéis de sílica.

## **2. METODOLOGIA**

Os estudos, pesquisas e informes apresentados neste estudo foram realizados de maneira sistemática, ou seja, foram feitas buscas por estudos semelhantes, publicados ou não, os quais foram avaliados criticamente e expostos neste trabalho de conclusão de curso.

As primeiras buscas foram realizadas no site do Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)), maior base de dados da literatura, buscando-se pelos termos “aerogel” e “hybrid aerogels”, obtendo-se o gráfico da Figura 2. Nesta pesquisa inicial verificou-se que as aplicações mais citadas envolviam isolamento térmico, catalisadores, adsorção, captura de CO<sub>2</sub> e liberação controlada de fármacos. Por isso, posteriormente, as pesquisas foram filtradas de acordo com os anos, as aplicações e o tipo de aerogel (aerogel híbrido ou aerogel híbrido de sílica). A fim de se encontrar pesquisas mais recentes, o filtro “ano” foi delimitado entre os anos de 2016 e 2020. Já para o filtro “aplicação”, foram inseridos, um por um, os seguintes termos: “thermal insulation”, “drug delivery”, “catalysts” e “adsorption”, referentes às aplicações encontradas para as primeiras buscas. A Figura 3. contém um gráfico de colunas de número de publicações por ano, realizando-se tais filtrações, englobando aerogéis híbridos, não necessariamente de sílica.

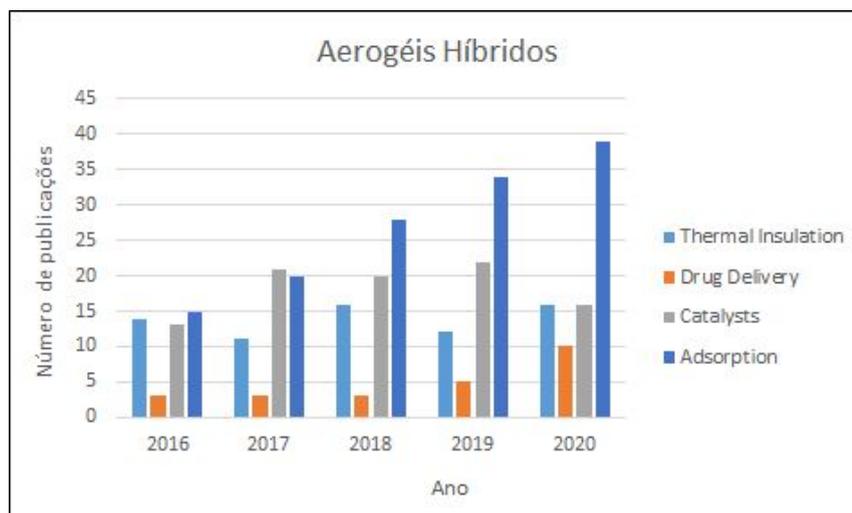


Figura 3. Número de publicações por ano, nos últimos 5 anos, referente às aplicações dos aerogéis híbridos.

É possível notar que as aplicações dos aerogéis híbridos é mais comum em catalisadores e adsorventes, ficando apenas em terceiro lugar as aplicações de isolamento térmico. Porém, nesta pesquisa percebeu-se que muitas destas aplicações, principalmente as de catalisadores, não estavam relacionadas com aerogéis híbridos de sílica, e sim com outros tipos de aerogéis. Portanto, foi realizada uma nova filtragem, adicionando-se o termo “sílica aerogel” no campo de busca. A Figura 4 contém o gráfico obtido para esta nova filtragem.

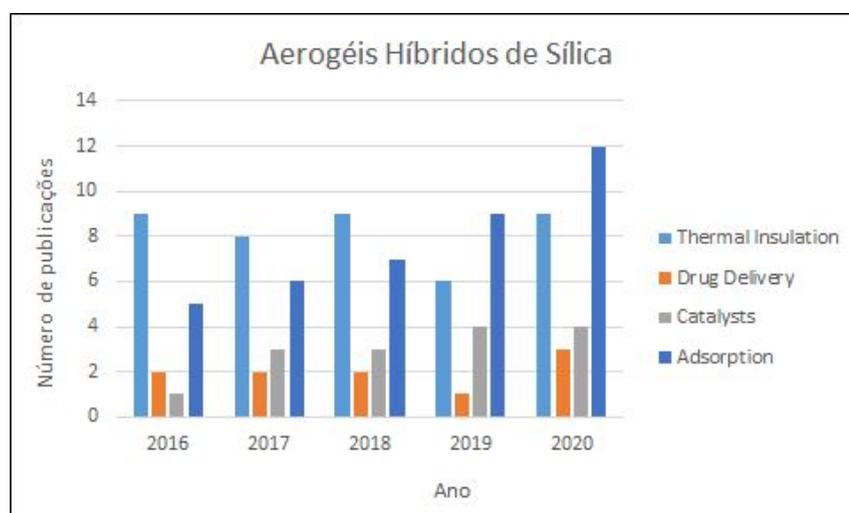


Figura 4. Número de publicações por ano, nos últimos 5 anos, referente às aplicações dos aerogéis híbridos de sílica.

Nesta nova pesquisa, as aplicações de isolamento térmico foram as mais frequentes, ou seja, apresentaram maior número de publicações nos últimos 5 anos. As publicações referentes à isolamento térmico tratam principalmente de aerogéis para revestimento, em especial revestimento de paredes. Outra aplicação frequente encontrada nesta pesquisa foi a aplicação dos aerogéis híbridos de sílica como adsorventes, apresentando aumento neste período. Neste tipo de aplicação se destacam as publicações envolvendo a remoção de íons, a adsorção de óleo e remoção de poluentes, como o CO<sub>2</sub>.

Ainda que o isolamento térmico e a adsorção sejam as aplicações mais frequentes para os aerogéis híbridos de sílica, os números de publicações tratando-se destes assuntos ainda são bem baixos. Com base no gráfico da Figura 2, onde se tem uma média de 140 publicações de aerogéis híbridos (não necessariamente de sílica) nos últimos 5 anos, o número de publicações referentes às aplicações em isolamento térmico dos aerogéis híbridos de sílica (em torno de 8 por ano) representa uma fração muito pequena deste total. Isso ocorre porque a maioria das publicações tratam apenas da síntese dos aerogéis híbridos (modificações, diferentes agentes precursores, diferentes processos, diferentes solventes, etc.) e não, de fato, da aplicação dos mesmos, limitando-se apenas à sugestões de aplicação.

Após todas estas pesquisas no site do Scopus, partiu-se ainda para a pesquisa na internet, buscando-se qualquer tipo de informação, notícia, curiosidade em relação aos aerogéis de sílica.

### **3. AEROGÉIS DE SÍLICA**

#### **3.1. CLASSIFICAÇÃO E SÍNTESE**

A síntese dos aerogéis é dividida em três grandes partes: a preparação do gel, o envelhecimento do gel e a secagem do gel. Na preparação do gel ocorre o

processo sol-gel, onde temos a gelificação em consequência da reação chamada de sol, em que uma solução precursora, fonte de sílica, é tratada com um solvente específico e catalisador. Este processo pode ser realizado tanto por catálise ácida quanto por catálise básica, promovendo reações de hidrólise e condensação. Em geral, catálises ácidas, favorecem as reações de hidrólise e formam géis com textura semelhantes a géis poliméricos, enquanto que catálises básicas favorecem as reações de condensação e foram géis coloidais. Esta etapa é muito importante para a classificação do material, pois depende diretamente do solvente de trabalho, ou seja, do meio de dispersão da solução precursora. A classificação dos aerogéis também leva em consideração a origem do precursor, a morfologia resultante no final do processo e a condição de processamento. Hidrogéis ou aquagéis são materiais em que o processo de gelificação ocorre utilizando-se água como meio de dispersão. Para os alcogéis o meio de dispersão utilizado na síntese é um álcool, geralmente metanol ou etanol. Já para os aerogéis é um pouco diferente. A reação sol-gel necessita de um meio de dispersão líquido, capaz de formar o gel, não sendo possível fazer a gelificação utilizando diretamente o ar. O que acontece nos aerogéis é que primeiro temos a formação do gel, a partir de um álcool (formando um alcogel), que posteriormente é seco, substituindo-se a fração alcoólica por ar. O processo de envelhecimento é uma parte importantíssima da síntese, uma vez que esta é a etapa onde se confere a rigidez e a resistência do, ainda, alcogel. Fatores como tempo de envelhecimento, pH e temperatura, bem como o solvente utilizado, podem alterar as propriedades citadas anteriormente. Já o processo de secagem é a etapa onde ocorre de fato a formação do aerogel, através da remoção da fração líquida do gel, substituída por CO<sub>2</sub>. Diz-se que esta é uma etapa crítica do processo de síntese visto que pequenas variações podem acarretar no colapso da estrutura do aerogel.

A fase gasosa dos aerogéis é formada basicamente de ar, que não é um bom condutor de calor, conferindo aos aerogéis propriedades de isolamento térmico, com baixas condutividades térmicas, constante dielétrica extremamente baixa e baixo índice de refração. Além disso apresentam ainda alta área de superfície interna e alta área de superfície específica. Ainda que possuam propriedades muito atraentes

de condutividade térmica e densidade, os aerogéis de sílica não apresentam somente qualidades. As propriedades mecânicas destes materiais em geral não são boas, apresentando fragilidade e higroscopia, o que dificulta a sua utilização em muitas aplicações. Inclusive, muitos estudos realizados hoje em dia tem como objetivo encontrar novos métodos de obtenção dos aerogéis ou até mesmo realizar modificações estruturais, buscando propriedades mecânicas mais satisfatórias. Uma técnica bastante utilizada para reforçar a estrutura dos aerogéis é o tempo prolongado de envelhecimento. Esta técnica pode favorecer as propriedades mecânicas do aerogel, uma vez que aumenta o número de ligações Si-O-Si, porém, em contrapartida, aumenta a densidade, o tamanho dos poros e, conseqüentemente, a condutividade térmica do material. Outra opção são os chamados aerogéis híbridos. Essa metodologia já é bastante estudada e utiliza a adição de moléculas que contenham grupos funcionais embutidos na estrutura do aerogel, como uma fase secundária (orgânica/inorgânica). Muitos estudos utilizam como fase secundária cadeias poliméricas, por exemplo. [1]

### **3.2. SÍNTESE DE AEROGÉIS HÍBRIDOS**

A síntese de aerogéis híbridos é semelhante à síntese dos aerogéis convencionais, porém envolve um processo a mais, além da reação sol-gel, do envelhecimento e da secagem. Esse processo consiste na adição de grupo funcional na estrutura do aerogel ou em uma reação de inserção de compostos com propriedades específicas (metais, ligas, óxidos, etc.) e pode acontecer de várias formas, em geral, em um processo de modificação do material precursor, pré reação sol-gel, ou posterior à todo o processo de síntese, ou seja, uma reação entre o composto modificador e o próprio aerogel. [2]

A Tabela 1 contém informações referentes a estudos realizados nos últimos anos sobre aerogéis híbridos de sílica e está organizada conforme o tipo de aplicação proposta pelos respectivos autores. Tais estudos serão melhor detalhados posteriormente.

Tabela 1. Exemplos de estudos realizados nos últimos anos referente aos aerogéis híbridos de sílica. Informações dos tipos de aerogéis sintetizados, os materiais precursores e modificadores utilizados, rotas de síntese e aplicações destes aerogéis.

Aerogel	Precursor	Modificador	Rota	Aplicação	Referência
Alumina-sílica	TEOS	ASB	Ácida	Isolamento térmico e catalisadores de alta temperatura	[4]
PGPTMS-PE	GPTMS	Aerogéis de PE	Básica	Isolamento térmicos, adsorvente, nanogeradores, sensores de pressão, eletrólitos	[5]
Sílica-PTPES	TEOS	PTPES	Ácida	Isolamento térmico	[6]
Sílica-fibras de vidro	TEOS	Fibras de vidro	Ácido	Isolamento térmico	[7]
Sílica-PFR	TEOS	PFR	não citado	Isolamento térmico e retardante de chama	[9]
Cério-sílica	TMOS	Cloreto de Cério Heptahidratado	Básica	Catalisadores	[10]
Celulose-sílica	TEOS	Celulose	Básica-Ácida	Captura de CO <sub>2</sub>	[11]
Sílica-APTES-glutaraldéido-dextran	Silicato de sódio e TEOS	APTES, glutaraldeído e dextran	Ácido	Liberção controlada de fármacos	[12]
Sílica-gelatina	TMOS	Gelatina	Básico	Liberção controlada de fármacos	[16]

Para aplicações em isolamento térmico é interessante que o aerogel seja hidrofóbico, uma vez que a captura de água pode acarretar em danos ou rompimento da estrutura do material, além do aumento da condutividade térmica, o que afetaria a propriedade de isolamento. Para isso, durante a síntese, modificações na superfície do aerogel devem ser realizadas a fim de que os grupos hidroxilas, hidrofílicos, sejam substituídos por grupos hidrofóbicos. Estas substituições podem ser feitas usando as técnicas de metoxilação, sililação ou modificação orgânica. Na

metoxilação temos a conversão dos grupos Si – OH em grupos Si – OCH<sub>3</sub> através do aquecimento do aerogel hidrofóbico com vapor de metanol; na sililação temos a modificação da estrutura do gel usando-se agentes sililantes através de uma sequência de troca de reagentes após o processo sol-gel (pré secagem); e a modificação orgânica, que se baseia no uso de co-precusores que contenham pelo menos um grupo não polar ligado ao átomo de silício central. [1]

Polímeros em geral são boas opções para promover reforço estrutural aos aerogéis de sílica, ao mesmo tempo que conseguem inserir características de flexibilidade ao material. Mary Ann Meador e Haiquan Guo, cientistas e pesquisadoras do Centro de Pesquisas Glenn, da NASA, fizeram uma modificação na estrutura de aerogéis de sílica com polímeros e conseguiram suprir a questão da fragilidade dos aerogéis de sílica, obtendo aerogéis bastante resistentes e flexíveis. Segundo as autoras, os novos aerogéis são até 500 vezes mais fortes do que seus equivalentes de sílica. Para demonstrar a força do aerogel híbrido de sílica sintetizado a pesquisadora colocou uma das rodas do seu carro em cima do material, que não sofreu alteração.[3]

Na pesquisa de Fei Peng e colaboradores foram sintetizados aerogéis híbridos de alumina-sílica. A ideia da hibridização dos aerogéis de sílica com a alumina vem do fato que aerogéis de alumina apresentam alta resistência ao calor e podem ser aplicados como suportes catalíticos ou catalisadores sob alta temperatura, mantendo as propriedades de alta porosidade e alta área superficial. A hibridização neste caso, teve como propósito avaliar se a alumina promoveria o mesmo efeito também em aerogéis de sílica. Os aerogéis foram sintetizados a partir de duas soluções sol diferentes, uma com precursor de Sec-butóxido de Alumínio (ASB), reagido com EtOH e água, e outra com precursor TEOS, reagido com ácido nítrico, anilina e acetona. As duas soluções sol foram misturadas, obtendo-se um único gel, que após 72 horas foi seco com nitrogênio, obtendo-se o aerogel em questão, que apresentou boa propriedade mecânica e resistência ao calor, uma vez que os íons de silício podem penetrar nos sítios tetraédricos ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) formados pela rede de alumina. Os aerogéis sintetizados são bons candidatos para utilização como isolantes térmicos e catalisadores de alta temperatura. [4]

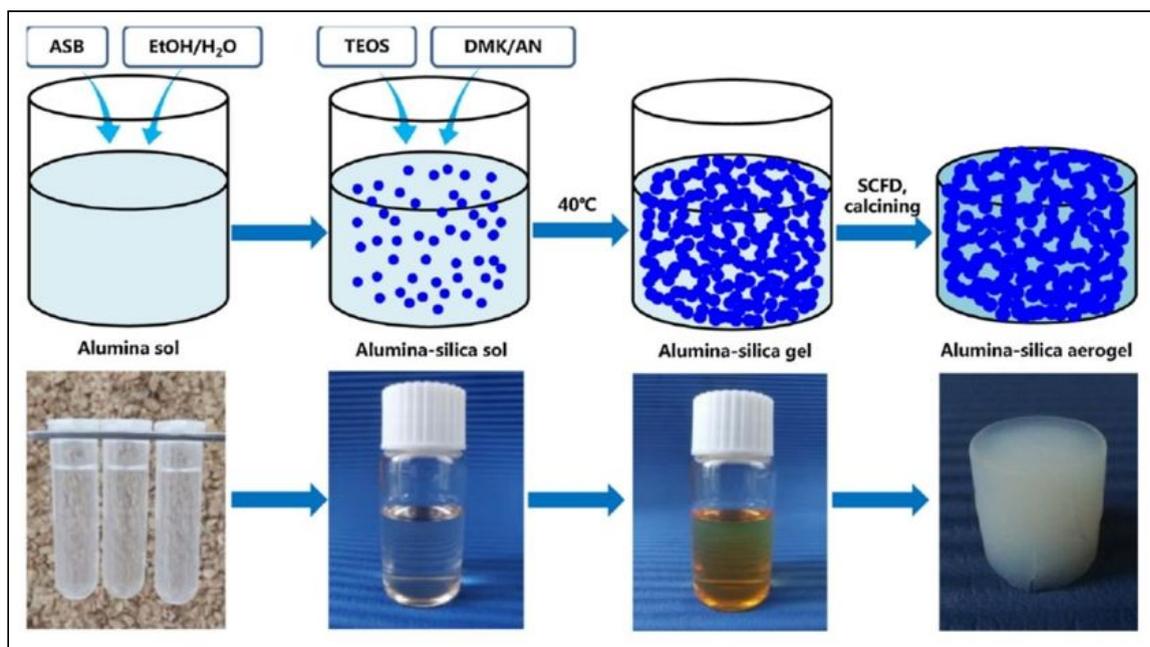


Figura 5. Representação do processo de síntese para produção de aerogéis de alumina-sílica, com Sec-butóxido de Alumínio (ABS) como agente modificador. Esquema de síntese retirado do artigo publicado por Fei Peng et al. [4]

S. Rezaei et. al. sintetizaram aerogéis híbridos a partir de dois tratamentos, pré-síntese e pós-síntese do aerogel. Inicialmente foi feita a modificação do reagente precursor, fonte de sílica. A modificação realizada foi a polimerização do (3-Glicidiloxipropil)trimetoxisilano (GPTMS), utilizando dietil éter como solvente e complexo de trifluoreto de boro-éter dietílico como catalisador. Esta reação resultou em dois produtos, denominados PGPTMS1 e PGPTMS2, que são poliéteres e se diferenciam apenas pela temperatura utilizada na etapa de polimerização. Ambos foram utilizados como precursores da reação sol-gel, que é feita com EtOH e uma solução de hidróxido de amônia. Os alcogéis formados foram secos com CO<sub>2</sub> pelo método de secagem supercrítica, inicialmente à temperatura ambiente e 10MPa de pressão, e posteriormente elevando a temperatura até 40°C, com a mesma pressão, durante 2 horas. Uma segunda modificação estrutural ainda foi realizada após a obtenção dos aerogéis, com aerogéis de polietileno como agente modificador. Para preparar os aerogéis de poliéter estruturalmente modificados utilizou-se diferentes razões molares do agente modificador. Os aerogéis obtidos apresentaram boas propriedades de condutividade térmica, bem como flexibilidade e alta porosidade. Os

autores sugerem que estes materiais possam ser utilizados em aplicações de isolamento térmico, adsorção, nanogeradores, eletrólitos e sensores de pressão [5]

O trabalho de Haryeong Choi e seu grupo de pesquisa relatou o projeto de aerogéis hibridizados orgânico-inorgânicos, que foram sintetizados pela adição do polímero poli-trietoxi(1-feniletênil)silano (PTPES) em TEOS. O PTPES foi inicialmente formado a partir de uma modificação realizada no composto precursor de sílica, o trietoxi(1-feniletênil)silano (TPS), por polimerização radicalar com fenilacetileno, catalisador de Karstedt<sup>1</sup> e di-tercbutilperóxido (DTBP) como iniciador de radical térmico. Após a reação de polimerização, TEOS + PTPES foram misturados. A hidrólise foi feita com HCl na presença de catalisadores ácidos e básicos e, em seguida, foi adicionado o DTBP, em sol. O gel foi envelhecido em metanol e foi realizada a técnica de troca de solventes. Foi realizada secagem supercrítica com CO<sub>2</sub> a uma temperatura de 60°C, obtendo-se os aerogéis em questão. Os grupos fenil e vinil presentes no TPS favorecem as propriedades mecânicas e físicas do aerogel, além de promover hidrofobicidade.[6]

Jiaqui Tian et. al. utilizaram um precursor de sílica polimerizada para formar aerogéis híbridos contendo fibras de vidro. As fibras de vidro foram adicionadas após a síntese do aerogel convencional, que foi realizada a partir de TEOS, EtOH e água, além de HCl e amônia para fazer o controle do pH do meio. [7] Assim como eles, Sandeep. P. Patil et. al. também utilizaram fibras de vidro para alterar a estrutura dos aerogéis de sílica, além de grafeno e nanotubos de carbono, fazendo isso através do método de simulações de dinâmica molecular (MD). [8]

Segundo Zhi-Long Yu e seu grupo de pesquisa, 30% do consumo mundial de energia é gasto na construção de edifícios e na tentativa de manter o interior dos apartamentos um ambiente agradável. Pensando nisso, estudaram uma forma de aumentar a eficiência energética em edifícios através da diminuição da transferência de calor pela utilização de materiais com baixas condutividades térmicas (isolantes térmicos), neste caso, um aerogel híbrido composto de uma resina fenol-formaldeído, denominada de PFR, e sílica, obtida pelo precursor inorgânico

---

<sup>1</sup> Complexo de coordenação (sólido e incolor) - [Pt<sub>n</sub>(H<sub>2</sub>C=CHSiMe<sub>2</sub>OSiMe<sub>2</sub>CH=CH<sub>2</sub>)<sub>m</sub>] - bastante utilizado, como catalisador, em reações de Hidrosililação catalítica. Em suas estrutura estão presentes ligações de Carbono-Silício e Carbono-Platina, entre outras.

TEOS. O aerogel foi sintetizado por copolimerização direta e, além de apresentar propriedade de isolamento térmico, ainda apresenta propriedade retardante de chama. Testes de chama realizados pelo grupo de pesquisa sugerem que o material contendo 70% de sílica pode resistir a uma temperatura de chama de aproximadamente 1300°C sem que ocorra desintegração, ao mesmo tempo que retarda o aquecimento do lado não exposto ao fogo e evita que ele atinja temperatura superior a 350°C. Tais características podem fornecer boa proteção quando aplicados ao reforço de estruturas de concreto, podendo ser utilizado em projetos arquitetônicos. [9] Os aerogéis desta pesquisa não passaram por aplicações no cotidiano.

L. F. Posada et. al. utilizaram dois métodos diferentes para preparar géis contendo Cério e Sílica (CeSi). O primeiro método, todo realizado antes da etapa de gelificação, foi denominado de “co-precursor” e nele ocorre a adição de Cloreto de Cério Heptahidratado ( $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) a uma mistura de TMOS, EtOH, água deionizada e óxido de propileno, mantendo-se esta mistura em contato por 24 horas. No segundo método, denominado de método de impregnação, temos primeiramente a etapa de gelificação, a partir de TMOS, MeOH, água deionizada e amônia. Esta mistura foi devidamente isolada com Parafilm® e mantida em repouso por 24 horas. Após este tempo foram realizadas três trocas de solventes utilizando-se etanol. Neste momento temos a adição do Cloreto de Cério Heptahidratado ao sistema, que é diluído no etanol da primeira troca de solvente. Após todas as trocas de solventes foi realizado o processo de secagem do gel, que neste caso, foi feito utilizando-se o método de Extração Supercrítica Rápida (RSCE), resultando no aerogel híbrido de Cério-Sílica. A Figura 3, abaixo, é uma representação do processo de síntese deste aerogel híbrido. [10]

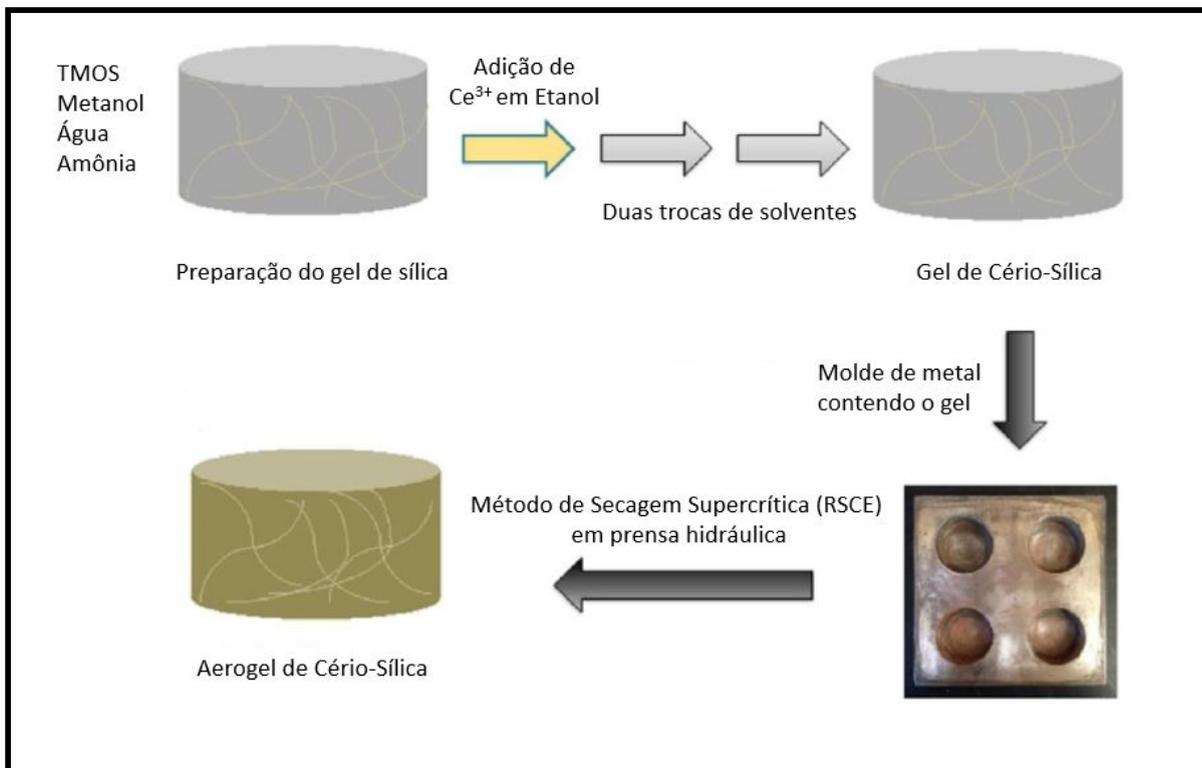


Figura 6. Representação do processo de síntese de um dos aerogéis híbridos de Cério-Silica utilizado pelo grupo de pesquisa de L. F. Posada, método de impregnação. Esquema retirado do artigo publicado por este grupo de pesquisa e adaptado para o português. [10]

Y. Miao et. al. sintetizaram aerogéis híbridos de sílica e celulose. Para isso utilizaram um processo sol gel chamado de “one step”, onde a celulose e a sílica (TEOS) foram misturadas vigorosamente em uma solução aquosa de uréia e NaOH e, posteriormente, reagidos com ácido sulfúrico e água deionizada. A troca de solventes foi realizada com EtOH e TBA, e o processo de secagem foi feito por liofilização com nitrogênio líquido. A aplicação destes aerogéis está relacionada à captura de  $CO_2$  do ambiente.[11]

O uso de aerogéis para aplicações em liberação controlada de fármacos está se tornando cada vez mais usual. Isso ocorre porque os aerogéis de sílica apresentam alta área específica e alta porosidade, demonstrando ótima capacidade de adsorção, além de serem biodegradáveis e não tóxicos. Neste contexto, a pesquisa de Ecem Tiryaki et. al. realizou a síntese de aerogéis híbridos provenientes

de duas modificações estruturais. A primeira modificação trata-se da adição de grupos aminos na estrutura do aerogel, feita com 3-(aminopropil)trietóxisilano (APTES) e tolueno. Neste processo os três reagentes foram mantidos em reação direta por 24h com agitação magnética. A segunda modificação estrutural ocorreu no produto da primeira modificação estrutural, ou seja, no aerogel contendo os grupos aminos. Foram incorporados, desta vez, grupos aldeídos à estrutura do aerogel, a partir do glutaraldeído e do dextran. Assim como na primeira reação, a segunda modificação também aconteceu por contato direto, porém, por apenas 3h e utilizando-se  $\text{NaHCO}_3$ . A funcionalização da superfície do aerogel com APTES é uma estratégia para aumentar a capacidade de carregamento do droga pelo aerogel, além de ser necessária para que o revestimento com dextran seja realizado posteriormente. O dextran é um polímero natural bastante utilizado em aplicações biomédicas, pois tem ampla distribuição de peso molecular, não apresenta toxicidade para o corpo humano e pode ser eliminado facilmente. Os aerogéis híbridos sintetizados nesta pesquisa são aplicáveis à liberação controlada de fármacos, principalmente para medicamentos de tratamento da região do cólon, no corpo humano.[12]

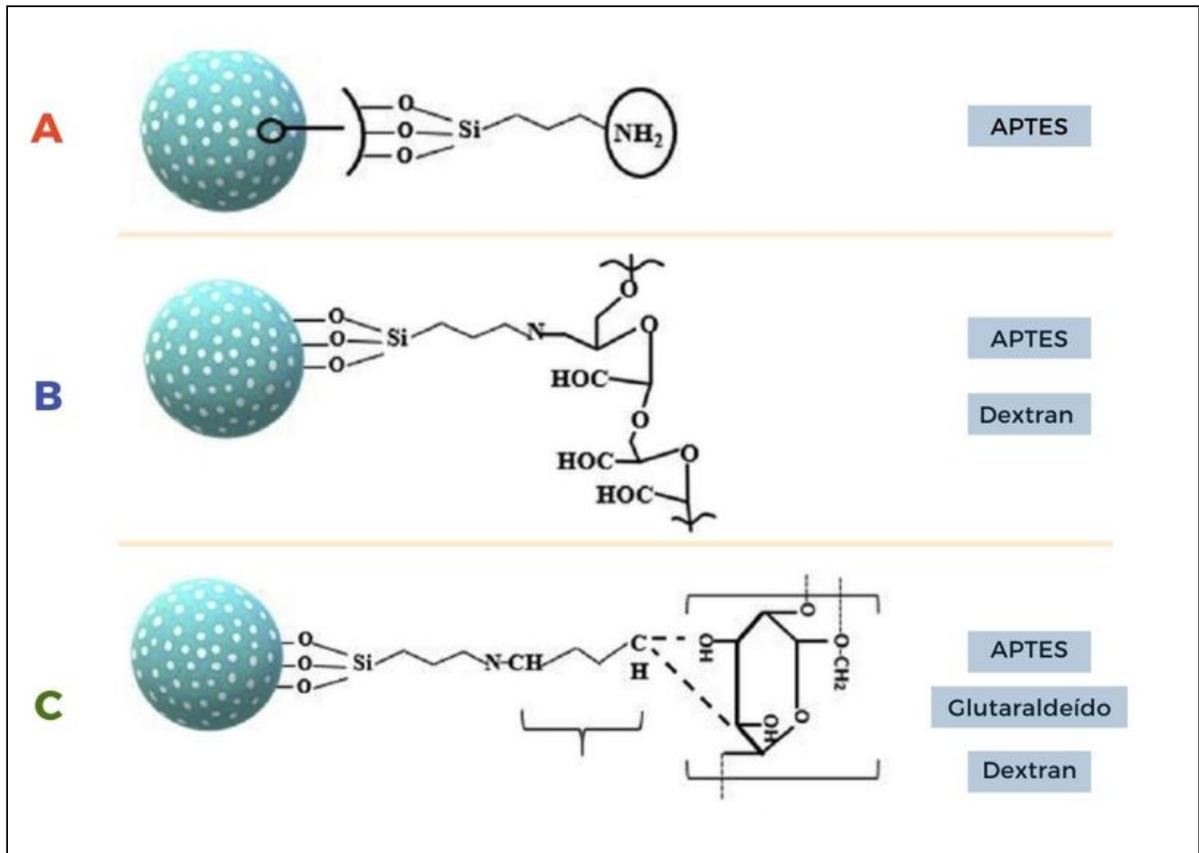


Figura 7. Representação dos aerogéis de sílica sintetizados na pesquisa de Ecem Tiryaki et. al. Foram sintetizados três aerogéis, A, B e C. Os aerogéis A são modificados com APTES; os aerogéis B são modificados com APTES e Dextran; e os aerogéis C são modificados com APTES, Glutaraldeído e Dextran. [12]

Outra pesquisa envolvendo aerogéis de sílica e liberação controlada de fármacos foi desenvolvida por Mónica Kéri e seu grupo de pesquisa, que sintetizaram aerogéis híbridos de sílica-gelatina. Este mesmo grupo possui diversos estudos já publicados referentes à liberação controlada de fármacos utilizando-se aerogéis híbridos [13]-[15] e, segundo eles, aerogéis híbridos de sílica-gelatina de proporções variáveis de sílica-gelatina são sistemas versáteis de liberação de drogas. Neste estudo, em especial, foi investigada e comparada a proporção de gelatina nos aerogéis híbridos em questão, que foram produzidos pela co-gelificação de gelatina e TMOS. Ainda no processo de síntese, foram realizadas trocas de solventes, utilizando acetona pura no final e, posteriormente, os géis foram secos com CO<sub>2</sub> supercrítico a 14 MPa e 80°C. Os aerogéis híbridos de sílica e gelatina

formados são hidrofílicos e a taxa de liberação das drogas ocorre mais rapidamente neles do que nos aerogéis de sílica convencionais, fato este que foi atribuído à maior hidratação da estrutura de aerogel híbrido.[16]

### **3.3. SECAGEM x CUSTO DE PRODUÇÃO**

A etapa de secagem do processo de síntese é a responsável por tornar a produção dos aerogéis bastante cara. Visto que o fator custo tem relação direta com a aplicabilidade dos aerogéis a etapa de secagem será melhor descrita nesta seção.

Existem diversos tipos de secagem, alguns deles são chamados de secagem supercrítica, que são os métodos de Secagem supercrítica a baixa temperatura (LTSCD), Secagem supercrítica de alta temperatura (HTSCD) e Extração supercrítica rápida (RSCE), além dos métodos de secagem a pressão ambiente (APD) e de Liofilização. Como os próprios nomes já sugerem, na etapa de secagem, independente do método escolhido, são de extrema importância os controles de temperatura e de pressão utilizados. Esta etapa do processo de síntese é realizada tanto para os aerogéis convencionais de sílica como para os aerogéis híbridos de sílica. Em geral, esta é a etapa crítica do processo, pois é nela que ocorre a solidificação do material, ou seja, a transformação do gel em aerogel, e pequenas variações podem influenciar na qualidade do produto obtido. [17] Cada método de secagem possui suas peculiaridades e, em geral, ainda que existam métodos que envolvam o uso de pressão atmosférica, os métodos mais utilizados são os métodos que envolvem controle de temperatura e pressão, os chamados métodos secagem supercrítica, sendo o método HTSCD o mais utilizado pela indústria. Estes métodos são caros, pois envolvem o uso de equipamentos como autoclaves ou prensas hidráulicas, bem como o uso de CO<sub>2</sub> ou Nitrogênio Líquido. Uma grande dificuldade encontrada no processo de síntese é que os aerogéis adotam o formato do molde utilizado na etapa de secagem, ou seja, para a confecção de uma placa grande de aerogel é necessário que o molde utilizado seja grande também e, conseqüentemente, a máquina utilizada seja maior ainda, aumentando o custo do

processo. O método de secagem à pressão ambiente (APD), é uma tentativa de baratear o processo de síntese, porém exige muito mais tempo para que a fração líquida do gel seja removida por completo, além de ser dependente da adição de Aditivos Químicos de Controle de Secagem (DCCA), como polietilenoglicol, glicerol e surfactantes, por exemplo. Em geral, o método de APD, bem como método de secagem por Liofilização, não conseguem entregar aerogéis com a mesma qualidade do que aerogéis obtidos através dos métodos de secagem supercrítica, gerando aerogéis com rachaduras ou fragmentados, não monolíticos.[18]

Atualmente as empresas *Aspen Aerogels*, *Cabot Corporation*, *Aerogel Technologies*, *Nano High-Tech*, *Active Aerogels*, *Dow Corning Corporation*, *BASF*, *Guangdong Alison Hi-Tech*, *Enersens*, *Jios Airgel*, *Svenska Airgel* and *American Aerogel Corporation* são empresas produtoras de aerogéis de sílica. Existem algumas variações em seus produtos, em geral, baseado nas diferentes condições de síntese ou proporção de reagentes, diferentes precursores, uso de corantes, etc. Em uma busca na internet foram encontrados diferentes tipos de aerogéis à venda, de hidrofílicos à hidrofóbicos, e de tamanhos variados, aplicados à outros materiais ou não. Em uma busca no site “[www.buyaerogel.com](http://www.buyaerogel.com)”, responsável pela venda dos aerogéis de sílica das empresa *Cabot Corporation*, uma placa de dimensões 30cm x 30cm x 0,5cm, do produto denominado *Airloy X103*, tem custo de R\$490,00. Neste mesmo site foram encontrados discos coloridos de aerogéis de sílica, com 2,3cm de diâmetro e 1cm de espessura custando R\$60,00. Ambos exemplos demonstram o alto custo destes materiais.

#### **4. APLICAÇÕES RECENTES**

As propriedades dos aerogéis de sílica, principalmente densidade, porosidade e isolamento térmico, são fatores positivos para as possíveis aplicações dos aerogéis em diversas áreas do conhecimento. Em contrapartida, o alto valor para síntese desses materiais e as frágeis propriedades mecânicas são fatores que limitam tais aplicabilidades. [19] Os aerogéis híbridos de sílica são uma estratégia de

atribuir reforço estrutural ou até mesmo adicionar novas propriedades ao aerogéis de sílica convencionais, embora também precisem de um alto valor para serem sintetizados, já que a etapa de secagem continua ocorrendo da mesma forma. Por este motivo, hoje em dia a aplicação dos aerogéis de sílica de fato não é muito comum.

#### **4.1 APLICAÇÕES EM GERAL**

Ainda que existam diversas pesquisas referentes aos aerogéis híbridos de sílica, a grande maioria delas não apresenta uma aplicação real para estes materiais, apresentando apenas possibilidades de aplicações. No cotidiano, mesmo que muito promissores, os aerogéis híbridos de sílica ainda são pouco utilizados.

Uma grande interessada no avanço da tecnologia de síntese dos aerogéis híbridos de sílica com certeza é a NASA (National Aeronautics and Space Administration). A agência já fez o uso de aerogéis de sílica convencionais em suas viagens espaciais, por exemplo, na missão Stardust, em 1999, onde uma grande célula de alumínio contendo aerogéis de sílica foi utilizada com o intuito de capturar a poeira da cauda de um cometa e retornar ao planeta terra [20].

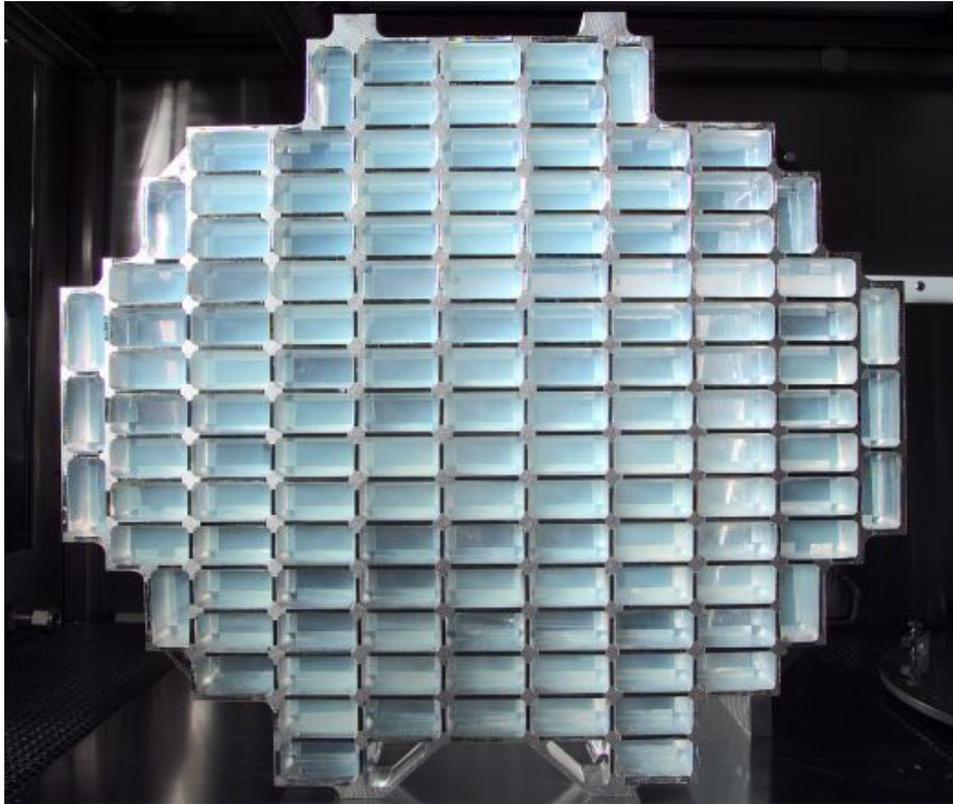


Figura 8. Célula de alumínio preenchida com aerogel de sílica: equipamento utilizado para capturar a poeira da cauda de um cometa na missão Stardust, da NASA, em 1999.

Fonte: <https://apod.nasa.gov/apod/ap990218.html>, acesso em 10/10/2020.

Atualmente a empresa estuda o envio de um helicóptero contendo, entre outros materiais, aerogel de sílica em sua estrutura. O objetivo desta missão é avaliar a viabilidade de voo motorizado por Marte, cuja atmosfera contém 1% da densidade da Terra, sendo controlado por grandes distâncias interplanetárias. O uso do aerogel de sílica, neste caso, ocorre em função da baixa densidade do mesmo [21]

Aerogéis de sílica também são bastante estudados e utilizados nos chamados detectores de Cherenkov<sup>2</sup>, na área da física [22][23]; em catalisadores [24][25]; e na remoção de íons [26][27].

---

<sup>2</sup> Detectores de Cherenkov: Detectores de Cherenkov são detectores de partículas, ou também, detectores da radiação Cherenkov. O efeito Cherenkov ocorre na presença de partículas carregadas, como os elétrons, que propagam-se em um determinado meio com velocidade maior que a velocidade da luz.

## 4.2 APLICAÇÕES EM ISOLAMENTO

Atualmente as aplicações mais realizadas para aerogéis de sílica envolvem a propriedade de isolamento térmico. A maior aplicação refere-se à utilização dos aerogéis de sílica em mantas de isolamento de dutos submarinos na indústria de petróleo e gás, onde altos volumes de petróleo e gás são transportados do mar ao porto por meio de dutos. Uma das dificuldades encontradas nesta atividade é fazer com que o petróleo e o gás natural resistam às condições climáticas do ambiente marinho. O petróleo bruto sai do poço submarino a uma temperatura mais alta do que a da água do mar, porém não pode resfriar, para se manter operacionável. De forma semelhante, o gás natural precisa estar na forma líquida até chegar aos terminais de regaseificação em terra. Antigamente se utilizavam para isolamento destes dutos vidro celular ou espuma de poliuretano, que possuem baixa resistência térmica em comparação ao aerogel de sílica, que por sua vez, ainda pode apresentar hidrofobicidade e resistência à chama. [28]

Outra grande aplicação dos aerogéis de sílica envolve o seu uso como isolante térmico de edifícios e construções. Em 2012, Conselho do Código Internacional responsável por construir padrões de eficiência energética nos EUA atualizou o Código Internacional de Conservação de Energia (IECC) e uma dessas alterações contém especificações mais rigorosas para isolamento em novos edifícios, visto que, existe um alto consumo de energia gastos na tentativa de manter o interior dos apartamentos um ambiente agradável, bem como para a construção dos mesmos. Tais alterações sugerem aumento do uso de aerogéis de sílica para este fim, uma vez que os materiais de isolamento tradicionais, como espuma de poliuretano, lã mineral, lã de rocha e lã de pedra, apresentam desvantagens, principalmente se tratando do espaço ocupado por elas. Para se atingir um bom isolamento térmico, são necessárias camadas espessas desses materiais, o que não acontece com os aerogéis de sílica. Devido à sua baixa condutividade térmica e menor espessura, os os aerogéis sílica são substitutos ideais para estes casos, reduzindo utilização da energia que, em certos momentos, teria sido usada para fins de aquecimento e resfriamento, gerando economia. [28] Seguindo na área da

construção civil, uma possível aplicação dos aerogéis de sílica, ainda não explorada, envolve o seu uso na composição de tijolos, mais especificamente, o preenchimento do interior dos tijolos com o material isolante.[29] A empresa Edilteco lançou recentemente o produto denominado Ecap Nano, um isolante térmico hidrofóbico em forma de painel para ser utilizado em ambientes internos e externos. O corpo do material é constituído de aerogel de sílica e fibra de vidro e possui condutividade térmica de 0,015 W / mK, com apenas 6 cm de espessura. Para se atingir o mesmo isolamento térmico com os materiais utilizados hoje em dia seria necessário entre 9 e 15 cm de espessura dos mesmos. [30] Um concorrente do Ecap Nano é a manta de aerogel de sílica e fibra de vidro da marca Joda, que assim como o anterior também é hidrofóbico, além de ter baixíssimo valor de condutividade térmica, 0,016 W / mK, apresentar resistência à chama e ter apenas 3mm de espessura. [31]

Outras aplicações dos aerogéis de sílica como isolantes térmicos, em menor proporção, envolvem o uso destes materiais na indústria automobilística e aeroespacial, bem como em roupas, como sapatos, jaquetas e roupas de proteção de bombeiros. [28] Também são utilizados em janelas super isolantes, clarabóias, coberturas de coletores solares e janelas especiais.[32]

Já citada anteriormente, a NASA também já realizou aplicações dos aerogéis de sílica convencionais voltadas às propriedades de isolamento térmico. Os corpos dos veículos Spirit e Opportunity, responsáveis por coletar informações da superfície de Marte, na missão Mars Exploration Rover, continham aerogéis de sílica. As propriedades de isolamento térmico dos aerogéis possibilitaram que os equipamentos suportassem as bruscas condições climáticas do planeta vermelho.[33] Atualmente a empresa estuda a criação de estufas de aerogéis de sílica na superfície marciana, uma vez que a isolamento térmico e a translucidez promovidos pelo material promoveriam uma condição adequada para o crescimento e cultivo de os alimentos, permitindo a passagem da luz visível e bloqueio da luz Ultravioleta do sol, sem que haja grandes alterações de temperatura. [34]

## 5. MERCADO DOS AEROGÉIS DE SÍLICA

Em uma busca no site da Allied Market Research foi encontrado um relatório sobre o mercado dos aerogéis, neste caso envolvendo também aerogéis de carbono, alumina e outros. Tal relatório foi desenvolvido com base em dados fornecidos por empresas fabricantes, tais como Armacell International SA, Active Aerogels, Airgel Technologies, Aspen Airgel, BASF, Cabot Corporation, Dow Inc., JIOS Airgel, Svenska Airgel e Thermablok Aerogels Limited. Segundo este relatório, o mercado global dos aerogéis gerou \$701,00 milhões em 2019 e a previsão é que em 2027 o valor gerado seja de \$1,39 bilhão, registrando um CAGR de 9,3% neste intervalo. Ainda neste mesmo relatório, foram inseridas informações importantes sobre a produção mundial de aerogéis no ano de 2019: os aerogéis com maior produção são os aerogéis de sílica, com 69% da produção total de aerogéis, seguida pelos aerogéis de carbono, em proporção bem menor; o formato de manta foi o mais comercializado entre os aerogéis, com mais de dois terços das vendas totais (ainda são vendidos em formatos de partículas/pó, blocos ou painéis); em relação às regiões de comércio, a América do Norte foi quem teve maior participação, com 39,1% do mercado, muito pelo fato de que grande parte das empresas fabricantes de aerogéis pertencem à esta região; e por fim, sobre os compradores, o setor de óleo e gás foi o maior gerador de receita, correspondendo a 56% das compras realizadas. [28]

Com a pandemia do Covid-19, muitas atividades foram afetadas e para o mercado de aerogéis não foi diferente. Em razão da interrupção do fornecimento de matérias primas (sílica, carbono, alumina, entre outras) muitos fabricantes interromperam suas produções. Associado a isso, o mercado de automóveis e as atividades de exploração de petróleo e gás, os principais compradores de aerogéis de sílica, também foram afetados. O mercado de automóveis teve queda de produção e o mercado de petróleo e gás foi interrompido por certo momento, o que diminuiu a demanda por aerogéis. [35]

## **6. CONCLUSÕES**

Considerando as propriedades promissoras dos aerogéis híbridos de sílica, bem como os benefícios de sua utilização, pode se afirmar que estes materiais tem grande potencial para serem aplicados como isolantes térmicos nas mais diversas áreas. Em contrapartida, o alto preço do produto ainda é um empecilho para os compradores, sendo pouco aplicados de fato. Visto que o alto valor cobrado por estes materiais é explicado pelo processo de secagem supercrítica, pesquisas nesta área são importantíssimas. A melhoria dos processos de secagem ou até mesmo o desenvolvimento de novos métodos são fundamentais para que futuramente aerogéis de sílica sejam aplicados de forma ampla em diversas áreas do cotidiano.

## REFERÊNCIAS

- [1] AEGERTER, M.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, M. Aerogels handbook. Advances in sol–gel derived materials and technologies. **Springer**, New York, p 21-24, 2011.
- [2] FIDALGO, A. *et al.* Nanohybrid silica/polymer aerogels: The combined influence of polymer nanoparticle size and content. **Materials and Design**, v.189, p.108521, 2020.
- [3] Redação do Site Inovação Tecnológica. Aerogel flexível: fumaça sólida suporta peso de um carro. Agosto. 2012. Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=aerogel-flexivel-fumaça-solida-suporta-peso-carro&id=010160120821#.X5rr2VhKi73>>. Acesso em 29/10/2020.
- [4] PENG, F. *et al.* A facile method to fabricate monolithic alumina–silica aerogels with high surface areas and good mechanical properties. **Journal of the European Ceramic society**, v.40, p.2480-2488, 2020.
- [5] REZAEI, S. *et al.* Novel and simple design of nanostructured, super-insulative and flexible hybrid silica aerogel with a new macromolecular polyether-based precursor. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.561, p.890-901, 2020.
- [6] CHOI, H. *et al.* Structural and mechanical properties of hybrid silica aerogel formed using triethoxy(1-phenylethenyl)silane. **Microporous and Mesoporous Materials**, v.298, p.110092, 2020.
- [7] TIAN, J. *et al.* Mechanical and thermal-insulating performance of silica aerogel enhanced jointly with glass fiber and fumed silica by a facile compressing technique. **Chemical Physics Letters**, v.739, p.136950, 2020.
- [8]. PATIL, S. P.; SHENDYE, P.; MARKERT, B. Molecular dynamics simulations of silica aerogel nanocomposites reinforced by glass fibers, graphene sheets and carbon nanotubes: A comparison study on mechanical properties. **Composites Part B**, v.190, p.107884, 2020.
- [9] YU, Z. L. *et al.* Fire-Retardant and Thermally Insulating Phenolic-Silica Aerogels. **Angew. Chem.**, v.57, p. 4538 –4542, 2018.
- [10] POSADA, L. F. *et al.* Inclusion of Ceria in Alumina- and Silica-Based Aerogels for Catalytic Applications. **The Journal of Supercritical Fluids**, v.12, p.10436, 2019.

- [11] MIAO, Y. *et al.* A facile method for in situ fabrication of silica/cellulose aerogels and their application in CO<sub>2</sub> capture. **Carbohydrate Polymers**, v.236, p.116079, 2020.
- [12] TIRYAKI, E. *et al.* Novel organic/inorganic hybrid nanoparticles as enzyme-triggered drug delivery systems: Dextran and Dextran aldehyde coated silica aerogels. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, v.56, p.101517, 2020.
- [13] VERES, P. *et al.* Biocompatible silica-gelatin hybrid aerogels covalently labeled with fluorescein. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v.473, P.17-25, 2017
- [14] VERES, P. *et al.* Mechanism of drug release from silica-gelatin aerogel—Relationship between matrix structure and release kinetics. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. v.152, p.229-237, 2017.
- [15] VERES, P. *et al.* Hybrid aerogel preparations as drug delivery matrices for low water-solubility drugs. **International Journal of Pharmaceutics**. v.496, p.360-370, 2015.
- [16] MÓNICA. K. *et al.* Gelatin content governs hydration induced structural changes in silica-gelatin hybrid aerogels - Implications in drug delivery. **Acta Biomaterialia**, v. 105, p. 131-145, 2020.
- [17]. DORCHEH, A. S.; ABBASI, M. H. Silica aerogel; synthesis, properties and characterization. **Journal of Materials Processing Technology**. v.99, p.10-26, 2008.
- [18] AEGERTER, M.; LEVENTIS, N.; KOEBEL, M. Aerogels handbook. Advances in sol-gel derived materials and technologies. **Springer**, New York, p 25-28, 2011.
- [19].KARAMIMKAR, S. *et al.* Advances in precursor system for silica-based aerogel production toward improved mechanical properties, customized morphology, and multifunctionality: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 276, p. 102101, 2020.
- [20] NEMIROFF, R.; BONNELL, J. Aerogel para STARDUST. fev,2019. Disponível em: <<https://apod.nasa.gov/apod/ap990218.html>>, acesso em 26/10/2020.
- [21] ALANA JOHNSON. Os testes de helicóptero da NASA entram na fase final. junho,2019. Disponível em <<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7417>>

acesso em 26/10/2020.

[22] TABATA, M. *et al.* Developing a silica aerogel radiator for the HELIX ring-imaging Cherenkov system. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**; v.952, p.161879, 2020.

[23] BARNYAKOV, A. Y. *et al.* The production of the large scale aerogel radiators for use in the Ring-imaging Cherenkov detectors. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**; v.952, p.162035, 2020.

[24] WANG, L. *et al.* High catalytic activity and stability quasi homogeneous alkali metal promoted Ni/SiO<sub>2</sub> aerogel catalysts for catalytic cracking of n-decane. **Fuel**, v.268, p.117384, 2020.

[25] ZHAO, Z. *et al.* Thermally stable Pd/reduced graphene oxide aerogel catalysts for solvent-free oxidation of benzyl alcohol. **Chemical Physics Letters**; v.746, p.137306, 2020.

[26] LIM, Z. E. *et al.* Functionalized pineapple aerogels for ethylene gas adsorption and nickel (II) ion removal applications. **Journal of Environmental Chemical Engineering**; v.8, p.104524, 2020.

[27] HASANPOUR, M.; HATAMI, M.. Application of three dimensional porous aerogels as adsorbent for removal of heavy metal ions from water/wastewater: A review study. **Advances in Colloid and Interface Science**; v.284, p.102247, 2020

[28] CHOUDHARY, A.; PRASAD, E. Aerogel market. **Allied Market Research**. Julho, 2020. Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/aerogel-market>>, acesso em: 29/10/2020.

[29] ZAFFAGNI, M. Isolamento Térmico: Tijolos com aerogéis quebram recorde. **Futura Maison**. jan, 2018. Disponível em: <<https://www.futura-sciences.com/maison/actualites/batiment-isolation-thermique-ces-briques-emplies-aerogel-battent-record-69894/>>, acesso em 29/10/2020.

[30] PIC, M. Edilteco apresenta um novo painel isolante à base de aerogel. **Le Moniteur des Artisans**. set, 2019. Disponível em: <<https://www.lemoniteur.fr/article/edilteco-presente-un-nouveau-panneau-isolant-a-b>

ase-d-aerogel.2045675>, acessado em 26/10/2020.

[31] JODA TECHNOLOGY. Manta de Isolamento de Aerogel de Fibra De Vidro. Disponível em: <[https://www.joda-tech.com/aerogel-material/aerogel-insulation-blanket.html?g=g&keyword=aerogel&matchtype=b&creative=284316730311&device=c&1485714120=1485714120&target=&placement=&gclid=Cj0KCQjwlvT8BRDeARIsAACRFiVKXGExJdo kmVkVBzSqZv\\_K6Q1dyRGflI41FjG\\_gsGzmNkvYX3M1wYaAk1aEALw\\_wcB](https://www.joda-tech.com/aerogel-material/aerogel-insulation-blanket.html?g=g&keyword=aerogel&matchtype=b&creative=284316730311&device=c&1485714120=1485714120&target=&placement=&gclid=Cj0KCQjwlvT8BRDeARIsAACRFiVKXGExJdo kmVkVBzSqZv_K6Q1dyRGflI41FjG_gsGzmNkvYX3M1wYaAk1aEALw_wcB)>, acesso em 26/10/2020.

[32] GRAND VIEW RESEARCH. Tamanho e análise do mercado global de aerogel, relatório de previsão da indústria, 2025. Jul, 2018. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/aerogel-market>>, acesso em 29/10/2020.

[33] MARS EXPLORATION ROVERS. Controles de temperatura do rover. Disponível em: <<https://mars.nasa.gov/mer/mission/rover/temperature/>>, acesso em 26/10/2020.

[34] ALANA JOHNSON. Quer colonizar Marte? Aerogel pode ajudar. **Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology.** Disponível em: <<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=7456>>, acesso em 26/10/20.

[35] DAVID CORREA. Espera-se que o mercado de aerogel atinja US \$ 1,39 bilhão até 2027, afirma pesquisa de mercado aliada. **Allied Market Research.** jul, 2020. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2020/07/29/2069563/0/en/Aerogel-Market-Expected-to-Reach-1-39-Billion-by-2027-Says-Allied-Market-Research.html>>, acesso em 26/10/20.

## ANEXOS:



Captura de tela obtida no final da apresentação do TCC