



*Mens Agitat* 18 (2023) 1-4



ISSN 1809-4791

1

## Síntese da amônia: breve histórico

Robson Fernandes de Farias

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Cx. Postal 1524, 59078-970 Natal-RN, Brasil

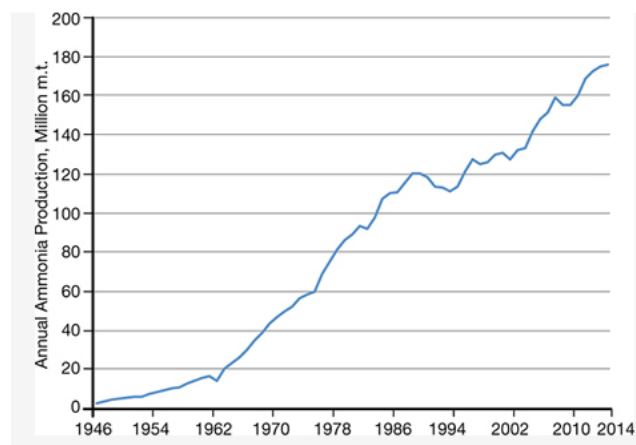
**Abstract** A historical summary of the ammonia synthesis is presented.

**Keywords:** Ammonia, Haber-Bosch process, Chemistry history.

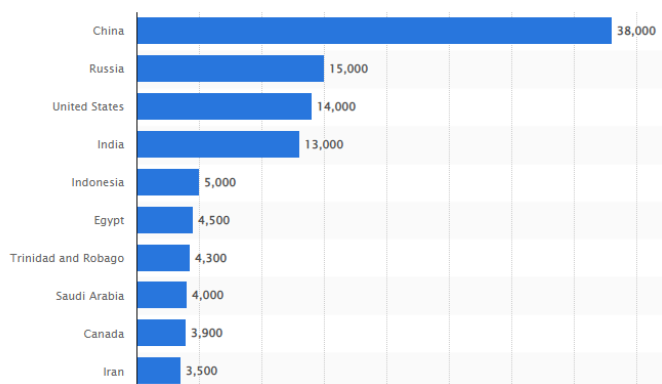
### INTRODUÇÃO

Insumo fundamental para as indústrias de fertilizantes e explosivos, e um dos produtos químicos mais empregados no mundo, a amônia ( $\text{NH}_3$ ) teve sua produção progressivamente aumentada (Fig. 1), desde o fim da segunda guerra mundial (atrelada, assim, em boa medida, à produção de alimentos em larga escala, globalmente, agricultura mecanizada, etc.).

Como outros insumos químicos de base (ácido sulfúrico, por exemplo), a produção anual de amônia também é um bom indicativo da pujança econômica de um país (Fig. 2).



**Fig. 1. Produção mundial de amônia, em milhões de toneladas, de 1946 a 2014 (fonte: <https://www.aiche.org/>).**



**Fig. 2. Dez maiores produtores mundiais de amônia em 2020 (em 1.000 toneladas métricas).**

(fonte: <https://www.statista.com/statistics/1266244/global-ammonia-production-by-country/>).

## BREVE HISTÓRIA DA SÍNTESE DA AMÔNIA

Priestley (Joseph Priestley, 1733-1804) a isolou, em 1774. Berthollet (Claude Louis Berthollet, 1748-1822) estabeleceu sua composição química, em 1785.

Ao longo do tempo, foram empregados, como fonte de nitratos, insumos diversos, como estrume, guano<sup>1</sup>, salitre do Chile (nitrato de sódio, NaNO<sub>3</sub>).

Contudo, essas fontes naturais tinham, por óbvio, suas limitações, além do que, impedimentos ou dificuldades de ordem legal ou política, poderiam tornar-lhe difícil o acesso.

Na década de 1840, a maior parte do guano que chegava aos Estados Unidos vinha do Peru.

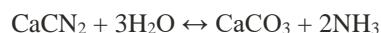
Em 1856, o chamado “Guano Islands Act”, nos Estados Unidos, promoveu a proteção para as reservas de guano descobertas no pacífico e no Caribe<sup>2</sup>, sendo observada uma progressiva queda na conversão de guano em nitrogênio, entre 1860-1870 (12%) e 1910-1913 (2%).

Em 1901, desenvolveu-se um processo para fixação de nitrogênio: no “electric arc process” uma corrente elétrica era empregada para combinar o nitrogênio e o oxigênio presentes no ar, produzindo óxido nítrico (NO) e, a partir desse, ácido nítrico. A partir desse último, produziam-se, então, nitratos de sódio e cálcio.

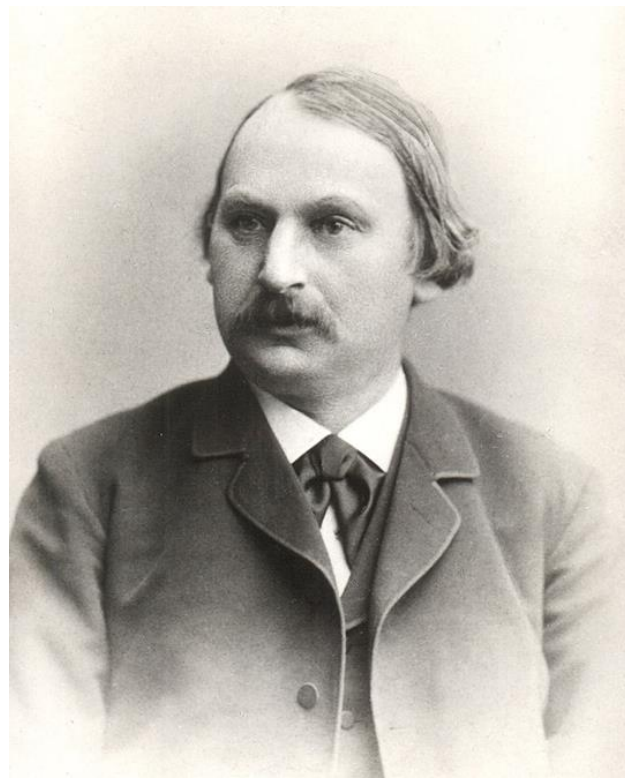
<sup>1</sup>Guano é um material orgânico produzido através das fezes de diferentes animais, como as aves, coelhos e morcegos. Ele é rico em nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio.

<sup>2</sup> Em verdade, “proteção” (ao guano) não é a melhor palavra, visto que o “Guano Islands Act” (48 U.S.C. cap.8 §§ 1411-1419) procurava, de fato, proteger interesses econômicos, permitindo a cidadãos dos Estados Unidos tomarem posse de

Em 1898, Adolph Frank (1834-1916), Fig. 3, e Nikodem Caro (1871-1935), Fig. 4, descobriram que o N<sub>2</sub> poderia ser fixado por carboneto de cálcio para formar cianamida de cálcio, a qual, por sua vez, poderia ser hidrolisada com água, produzindo amônia (processo cianamida, 1907):



Contudo, o processo cianamida tinha um ponto fraco: elevado consumo de energia (reduzir a quantidade de energia consumida passou a ser, por óbvio, uma meta no aperfeiçoamento do processo). Não obstante, o processo cianamida permitia a produção de amônia em quantidades industriais.



**Fig. 3. Frank**

ilhas contendo depósitos de guano: “Sempre que qualquer cidadão dos Estados Unidos descobrir um depósito de guano em qualquer ilha, rocha, ou recife, fora da jurisdição legal de qualquer outro governo, e não ocupadas por cidadãos de qualquer outro governo, e tomar posse pacífica dela, e ocupar a mesma, tal ilha, rocha, ou recife pode, com a discrição do Presidente, ser consideradas como pertencentes aos Estados Unidos”.



**Fig. 4. Caro**

Tendo em vista que 71% da nossa atmosfera é composta por nitrogênio ( $N_2$ ) e que o hidrogênio ( $H_2$ ) é um gás de obtenção relativamente fácil (sendo apenas uma questão de conveniência tecnológica e econômica escolher-se um método mais apropriado), não seria “natural” buscar-se uma maneira de obter amônia a partir de sus elementos constituintes? A resposta, evidentemente, é sim. Porém, como tornar viável (factível) uma tal rota de síntese?

No início do século 20, houve uma escassez de fertilizantes naturais ricos em nitrogênio (como o salitre do Chile). A essa altura, a termodinâmica química já estava avançada o bastante para permitir calcular-se sob quais condições a síntese da amônia, a partir de  $N_2$  e  $H_2$ , seria possível (seria espontânea, termodinamicamente falando).

Em 1909, Fritz Haber (1868-1934), Fig. 5, estabeleceu as condições sob as quais nitrogênio,  $N_2$  (g), e hidrogênio,  $H_2$  (g) formariam amônia: trabalhando com um aluno da Universidade de Karlsruhe, Haber sintetizou amônia em laboratório a partir de  $N_2$  e  $H_2$ .

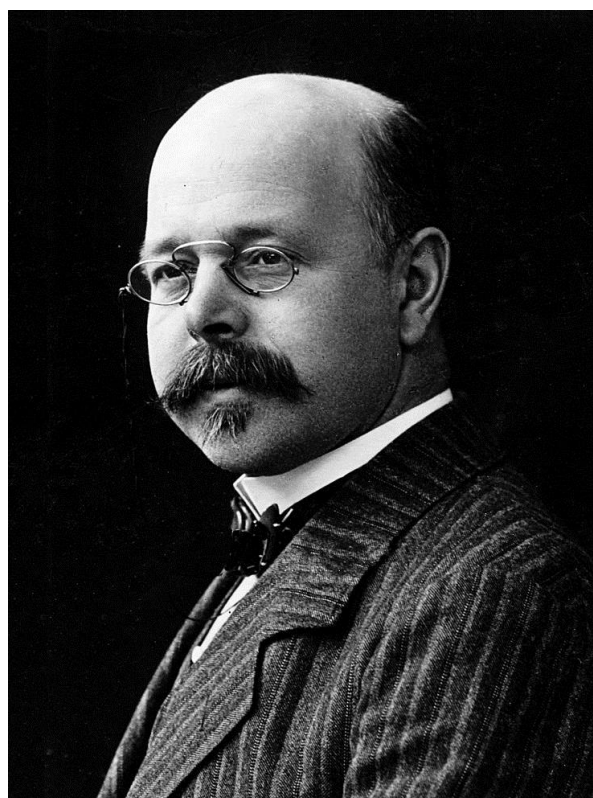
Contudo, seria Walther Nernst (1864-1941), quem também desenvolveria um processo similar: passando-se uma mistura de  $N_2$  e  $H_2$  por um catalisador de ferro a  $1.000^\circ C$  e 75 bar (1 bar = 0.986923 atmosfera) de pressão, produzia-se amônia. Nessas condições, Nernst produziu mais amônia do que Haber (que trabalhara sob pressão atmosférica).

Contudo, Nernst (Fig. 6) entendeu que seu processo não teria viabilidade técnica, visto operar, em escala industrial, com valores tão elevados de pressão, seria inviável (uma dificuldade, naquele momento, verdadeira, mas que seria tecnologicamente superada).

Haber e Nernst, paralelamente, exploraram, em escala de laboratório, a rota das altas pressões. Em 1906, conseguiu-se atingir uma concentração de 6% de amônia em um reator carregado com um catalisador de ósmio.



**Fig. 5. Haber**



**Fig. 6. Nernst**

A fim de aumentar a quantidade de amônia produzida, Haber elaboraria um “sistema de reciclagem”, patenteando-o (em vez do rendimento simples em um

processo de passagem única, o rendimento era aumentado, em um sistema com reciclagem).

Por esse feito, Haber ganharia o Nobel de química de 1918: "pela síntese de amônia a partir de seus elementos"<sup>3</sup>: a) temperatura média (~ 500 °C); b) elevada pressão (~ 250 atmosferas, ~ 351kPa) e c) emprego de um catalisador (ferro poroso preparado pela redução da magnetita, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; o ósmio é um catalisador mais eficiente para a reação, mas de custo proibitivo). À 25°C: N<sub>2</sub> (g) + 3H<sub>2</sub> (g) (calor, pressão, catalisador) = 2NH<sub>3</sub> (g); ΔH = -92,4 kJ mol<sup>-1</sup>.

Via o processo Haber, produz-se amônia com rendimento de reação da ordem 10-20%.

A BASF, Badische Anilin & Soda Fabrik (Fábrica de Anilina e Soda de Baden) comprou as patentes de Haber e iniciou o desenvolvimento de um processo comercial.

Contudo, uma coisa é ter-se algo que "funciona" em escala de laboratório. Outra, é colocar-se o processo em escala industrial, etc. Essa tarefa coube a Carl Bosch (1874-1940).

Bosch (Fig. 7) também ganharia o Prêmio Nobel: em 1931, "em reconhecimento às suas contribuições para a invenção e desenvolvimento de métodos químicos de alta pressão"<sup>4</sup>. Seria também o fundador da famosa IG Farben, que chegou a ser a maior companhia química do mundo.

Depois de testar mais de 2.500 catalisadores diferentes, Carl Bosch, Alvin Mittasch e outros químicos da BASF, desenvolveram um catalisador de ferro para a produção de amônia (1910).

Naquele que viria a ser chamado processo Haber-Bosch, o hidrogênio necessário para a síntese de amônia era produzido pelo processo "água-gás" (invenção de Carl Bosch)<sup>5</sup>. O nitrogênio, por sua vez, era obtido por destilação de ar líquido, obtido, por sua vez, mediante resfriamento e compressão do ar.

Em 1913, a planta comercial da BASF para a síntese da amônia, operando na localidade alemã de Oppau, já produzia 30 toneladas/dia.

Longe de ter apenas interesse histórico, o processo Haber-Bosch permanece atual. Resumiu assim sua importância, em 2021<sup>6</sup>:

*Devido ao seu uso essencial como fertilizante, a síntese de amônia a partir do nitrogênio e do hidrogênio é considerada um dos processos químicos mais importantes dos últimos 100 anos. Desde então, um enorme trabalho foi realizado para investigar e desenvolver catalisadores eficazes para esse processo. Embora a síntese catalítica de amônia tenha sido amplamente estudada no último século, muitos novos catalisadores ainda estão sendo desenvolvidos para reduzir a temperatura de operação e a pressão do processo e para melhorar a conversão de reagentes em*

*amônia. Novos catalisadores para o processo Haber-Bosch são a chave para alcançar a produção de amônia verde em um futuro previsível (...). (grifos nossos).*

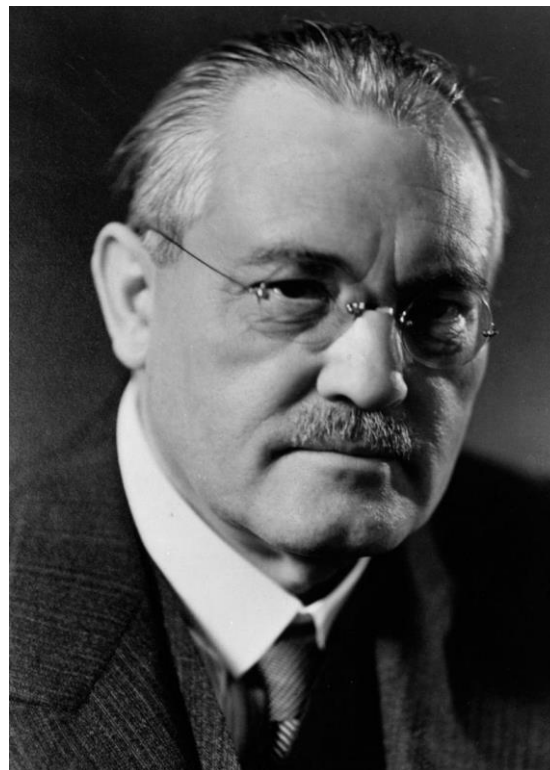


Fig. 7. Bosch

<sup>3</sup> <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/>

<sup>4</sup> <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/>

<sup>5</sup> Hoje em dia, o hidrogênio é produzido reformando as frações de petróleo leve ou gás natural (metano, CH<sub>4</sub>) pela adição de vapor.

<sup>6</sup>J. Humphreys, R. Lan, S. Tao, *Development and Recent Progress on Ammonia Synthesis Catalysts for Haber-Bosch Process*, Adv. Energy Sustainability Res.2021, 2, 200004. DOI: 10.1002/aesr.202000043.



## Um olhar sobre o Aprendizado Baseado em Problemas PBL

### A look at PBL Problem Based Learning

**Ramão Luciano Nogueira Hayd<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Doutor em Ciências, Professor Adjunto IV da Universidade Federal de Roraima – UFRR, Boa Vista-RR, Brasil*

*\*Autor correspondente: Ramão Luciano Nogueira Hayd*

*e-mail: lucianohayd@gmail.com*

#### **Resumo**

A aprendizagem baseada em problemas mostra-se como possibilidade inovadora para dar alavancada à educação no Brasil, pois o método é centrado no estudante mas segue um protocolo através dos 7 passos do tutorial. Concluiu-se que a metodologia ativa desenvolvida durante o ERE causou boas experiências e possibilitou aos discentes a construção da responsabilidade pelo próprio conhecimento tornando-os mais ativos nesse processo..

Palavras-chave: Ensino. Método ativo, Brasil, educação,

#### **Abstract**

Problem-based learning is an innovative possibility to leverage education in Brazil, as the method is student-centered but follows a protocol through the 7 steps of the tutorial. It was concluded that the active methodology developed during the ERE caused good experiences and enabled students to build responsibility for their own knowledge, making them more active in this process.

Keywords: Teaching. Active method, Brazil, education,

#### **1. INTRODUÇÃO**

As metodologias ativas proporcionam formas de ensino que utilizam experiências reais ou fictícias objetivando resolver as adversidades provenientes das atividades essenciais das práticas sociais em diversas situações e, além disso, estimula a curiosidade e contribuem para o

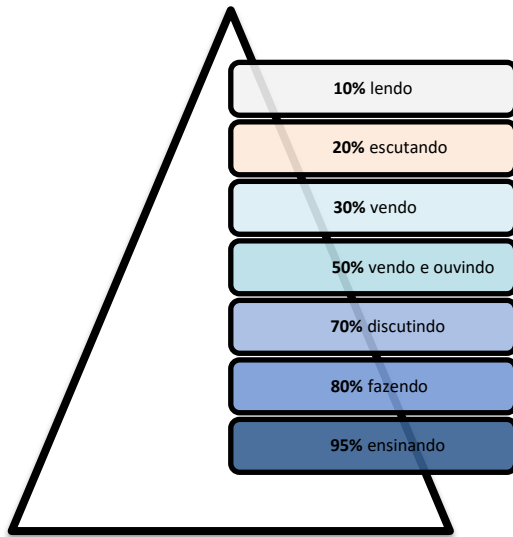
engajamento dos alunos [1], que se transformam em protagonistas de seu ensino-aprendizagem apresentando o envolvimento participativo, direto e reflexivo nesse processo [2].

A aprendizagem ativa acontece ao passo que o aluno é instigado a interagir com o conteúdo seja escutando, falando, perguntando, discutindo, praticando ou ensinando e assim constrói o seu conhecimento sem recebê-lo do professor que,

inserido em uma metodologia ativa, passa a ter um papel de orientador ou facilitador do processo de aprendizado [3, 4].

Isso corrobora com o pensamento do psiquiatra William Glasser no qual propõe que o professor é um guia, não um chefe e apresenta uma Pirâmide de Aprendizagem representando como aprendemos (FIGURA 1) [5].

**Figura 1 – Pirâmide de Aprendizagem de William Glasser.**



Fonte: Adaptado de LIMA E SANTOS (2020)

Pesquisas afirmam que a aprendizagem através da transmissão é importante, porém quando aprendemos através da experimentação e por questionamento, torna-se mais significativa devido a uma melhor compreensão [2].

Estudos consideram importante a escolha de metodologias que possibilitem discussões, questionamentos e práticas durante a jornada acadêmica, garantindo uma melhor aprendizagem pelo estudante [4].

As metodologias ativas no processo de formação dos profissionais de enfermagem possibilitam com êxito a construção do perfil proposto pela DCN's na qual almeja a humanização, capacidade de pensamento crítico, resolução problemas da sociedade e habilidades na comunicação [7].

### O Aprendizado Baseado em Problemas (Problem-based learning PBL)

A Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) ou Problem Based Learning (PBL) desenvolveu-se nos anos 60 na McMaster University, situada no Canadá, e na Maastricht University, na Holanda adotado especialmente em escolas de medicina [7].

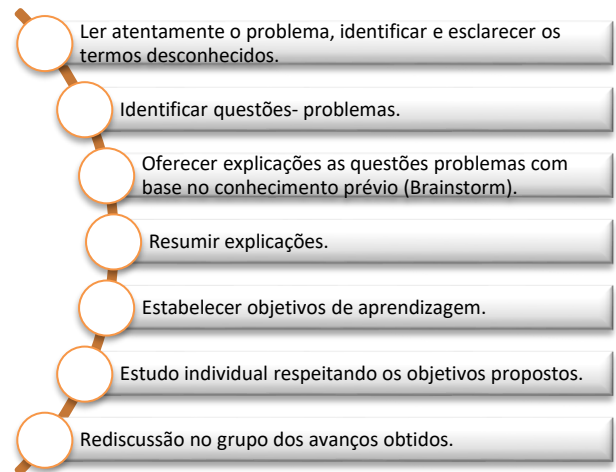
Essa metodologia ativa tem como premissa a utilização de um problema ou situações-problemas com o objetivo de estimular processos cognitivos que são necessários no processo de aprendizagem [8].

A APB tem a essência da escola ativa, do método científico, de um ensino integrado e integrador dos conteúdos, dos ciclos de estudo e das diferentes áreas vinculadas e assim, os discentes aprendem de fato como estudar e absorver os tópicos propostos e se capacitam para solucionar qualquer questão relativa à sua futura profissão [9] ou seja, a APB garante que o discente realmente aprenda a resolver situações reais de sua profissão ao estimular a aprendizagem ativa e consequentemente torna-lo capaz de ser crítico, reflexivo e tomar decisões [10].

Essa metodologia ativa objetiva a promoção de habilidades nos discentes de responsabilidade pelo próprio conhecimento, agregar os conhecimentos e identificar e descobrir novos saberes tendo em vista que é um método voltado a aprendizagem autodirigida. [11].

Sendo assim, o docente apresenta-se como um suporte no qual acompanha o aluno no processo de ensino-aprendizagem criando uma ponte entre os conhecimentos já existentes e os novos fazendo com que o estudante se desafie a pensar criticamente [10] seguindo os passos do tutorial (figura 2).

**Figura 2: Os 7 Passos do ensino tutorial.**



Fonte: Hayd et al., (2022)

A problema no método PBL é um gênero textual que permite desenvolver as habilidades de análise, interpretação e resolução, exigindo compreensão além do cálculo e elaboração de estratégias para a solução. A discussão e desenvolvimento dos problemas permite muitos avanços aos discentes, mas precisa ser realizado a partir de um bom planejamento e focado na contextualização e interdisciplinaridade [12].

Na figura 3 podemos observar a dinâmica de um grupo tutorial seguindo os 7 passos para resolução de um problema proposto.

Figura 3: Grupo tutorial em momento de abertura de problema.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na figura 2 observamos que a discussão ocorre inter-pares, onde o estudante tem a oportunidade de expor o assunto a ser discutido e apresentar hipóteses para esclarecer a pergunta norteadora. Os estudantes escutam atentamente o que o outro para que possa dar continuidade a discussão sem interromper ou mudar de assunto que está sendo pautado.

Abaixo podemos visualizar um problema de PBL que foi extraído da Cartilha de Hayd et al., 2022 disponível no site da [www.ufrr.br/editora](http://www.ufrr.br/editora) [12](quadro 1).

Quadro 1: Problema em formato Aprendizado baseado em problemas proposto:

Título “Uma dúvida acerca da imunidade humana”  
 “Marta, acadêmica de Enfermagem da UFRR se deparou com a seguinte imagem (figura abaixo) em uma publicação científica. Quando ela visualizou a figura ela percebeu que tinha algumas dúvidas acerca da imunidade no ser humano. No texto ela achou estranho a afirmação da autora eu dizia: “a função fisiológica mais importante do sistema imunológico é prevenir as infecções e erradicar infecções estabelecidas.” Ainda em sua leitura se deparou com outras afirmações que diziam que a imunidade inata era responsável pelo resposta inicial e mediada por células, e aí ela não lembrava que células estavam envolvidas nesse processo. E para finalizar ela se questionou se ainda existe outro tipo de imunidade. Como podemos ajudar Marta a solucionar esse problema?”

O problema acima (Quadro 1) tem como objetivos propostos: Conhecer o mecanismo de imunidade inata e

adaptativa; Descrever as células envolvidas na imunidade bem como a função específica de cada.

Para alcançar esses objetivos os estudantes precisam seguir o protocolo de 7 passos do tutorial (figura 2).

No passo 1 eles precisam ler atentamente o problema e identificar termos desconhecidos: isso significa que é necessário uma leitura detalhada do problema e identificar palavras que desconhecem ou que não tem certeza do significado dela. Após eles identificarem essas palavras eles precisarão esclarecer esses termos. É um momento relevante para o avanço das discussões posteriores.

A figura 04 evidencia um tutorial onde a estudante está ao quadro organizando as ideias do grupo e resumindo as explicações de forma organizada e seguindo os 7 passos do tutorial.

Figura 04: Atividade de grupo em andamento durante aplicação do método de Aprendizado Baseado em Problemas seguindo os 7 passos do tutorial.



Arquivo pessoal

Ressaltamos nesse momento em que o aluno consegue discutir e seguir um protocolo proposto nos 7 passos do grupo tutorial onde eles estão construindo a resolução do problema. Podemos ressaltar que este momento é de abertura de um problema.

No segundo passo eles identificam as questões-problemas propostas pelo enunciado. A figura 05 pode mostrar uma atividade de discussão onde ocorre um ‘storm’ entre os estudantes e estes trocam as experiências através da discussão inter-pares.

Figura 05: Momento de elaboração de questões problemas propostas pelo enunciado.



Arquivo pessoal

Neste ponto é importante analisar os resultados obtidos com um olhar bastante atento, que permite a condução do nosso tutorial visando a evolução de todos os integrantes. A situação-problema é um gênero textual que permite desenvolver as habilidades de leitura atenta, análise, interpretação e resolução, exigindo compreensão do assunto e contextualização.

Na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), há a proposição de problemas para os Anos Iniciais do Fundamental “envolvendo diferentes significados sobre o assunto, esperando-se que os alunos argumentem e justifiquem os procedimentos utilizados para a resolução e avaliem a plausibilidade dos resultados encontrados. O trabalho envolvendo as situações-problemas permite muitos avanços a cada um dos estudantes, mas precisa ser realizado a partir de um bom planejamento e focado na dinâmica dos 7 passos do tutorial.

Após os esclarecimentos através de um conhecimento prévio sobre o assunto, passo esse importante a ser seguido por se tratar de conceitos previamente alicerçados pelo estudante e que precisam ser evidenciados.

No próximo passo os estudantes resumem as explicações das discussões geradas para uniformizar a leitura e interpretação dos fatos.

Após essa revisão e explanação, o grupo tutorial estabelece objetivos de aprendizagem e vão para o próximo passo que é o estudo individual.

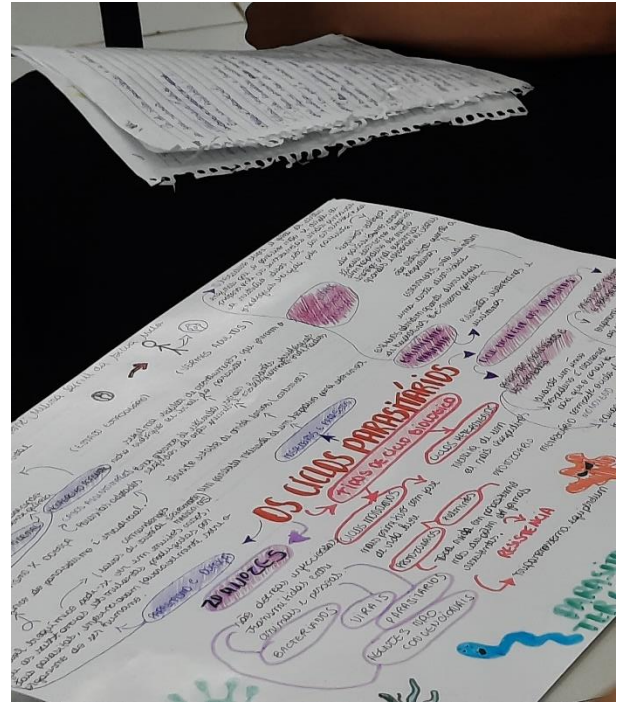
Estudos reconhecem a importância da descrição dos objetivos de aprendizagem em termos de conhecimento, habilidades intelectuais e psicomotoras, atitudes e valores que devem ser desenvolvidos pelos estudantes [13].

O estudo individual é a principal parte do protocolo dos 7 passos, pois nesse momento o estudante pode pesquisar em artigos científicos, livros, consultar um profissional

(comunicação pessoal) e construir o seu aprendizado acerca dos objetivos propostos pelo grupo.

Alguns estudantes utilizam o mapa mental para organizar sua linha de raciocínio (figura 6).

Figura 6: Mapa mental desenvolvido por um estudante.



Arquivo pessoal

Após o estudo individual temos a rediscussão em grupo tutorial dos avanços obtidos durante estudo. Nesse momento os estudantes podem utilizar figuras de artigos ou livros, mapas mentais, ou até mesmo um material produzido em cartolina ou folha A4 para explicar o assunto que está em discussão.

Na figura 07 podemos identificar como os estudantes realizam esse debate e como utilizam seus materiais propiciando um momento singular de aprendizado.



Figura 07: Momento de rediscussão no grupo tutorial.



Arquivo pessoal

Na figura 07 os estudantes preferiram sentar no chão e espalhar seus materiais ao centro, e cada estudante apresentava por meio dessas ilustrações as explicações e debatiam o assunto com naturalidade e liderança. Um fato interessante é que neste momento eles assumem o papel de “ensino centrado no aluno” e através do seu ensinamento complementam as discussões que se tornam atraentes ao aprendizado individual.

No Brasil, Neusi Berbel, educadora, doutora em educação atuava desde 1972 na formação pedagógica de professores da Universidade Estadual de Londrina (UEL) no Paraná e vem descrevendo, analisando e investigando os aspectos gerais e históricos do PBL e por se tratar de uma metodologia de problematização que vem sendo conectada com princípios de Paulo Freire [9, 14].

O PBL de acordo com a perspectiva construtivista enfatiza o desenvolvimento das habilidades de pensamento crítico, reflexivo, do aprender a aprender e do trabalho em grupo no sentido cooperativo onde os estudantes precisam desenvolver uma abordagem sistemática para a solução de problemas do cotidiano de vida utilizando habilidades mentais à tomada de decisões e consideram que o objetivo de aprendizagem deve ser incorporado a uma perspectiva humanística, profissional e comunitária para o desenvolvimento cognitivo integralizado do estudante [13, 14].

Estudos consideravam a educação um instrumento imprescindível de transformação, intervenção e mudança social. E mesmo depois de ter sido considerada uma metodologia liberal e integralizada, pois incentivava o pensamento crítico e reflexivo, o PBL tornou-se rapidamente conectada às tentativas mundiais de melhorar a relevância da educação, principalmente as relacionadas à saúde. Posteriormente as Universidades de McMaster e Maastricht tornaram-se referências para a reforma educacional nos currículos [7, 15].

## CONCLUSÃO

O aprendizado baseado em problemas PBL é uma metodologia de ensino eficaz e garante um aprendizado eficiente e inovador, além de despertar o interesse do estudante para o estudo individual, garantindo dessa forma um maior aprendizado.

Portanto, o PBL busca desenvolver uma abordagem sistemática para a solução de problemas da vida real utilizando habilidades mentais superiores, como as relacionadas à resolução de problemas, ao pensamento crítico, reflexivo e à tomada de decisões.

O PBL propicia a formação de uma base ampla de conhecimentos integrados, que possam ser acessados e aplicados a diferentes situações do dia a dia, ou seja, desenvolve uma habilidade de aprendizagem autodirigida que auxilia na resolução do problema proposto.

Por fim, o PBL ajuda o estudante a desenvolver atitudes necessárias para o trabalho em equipe, através de hábitos de autoreflexão e autoavaliação, o que permite realizar uma análise de SWOT pessoal.

### Conflito de interesse

Os autores declaram nenhum conflito de interesse

## REFERENCIAS

- [1] BERBEL, N.A.N. As metodologias ativas e a promoção da autonomia de estudantes. **Semina: Ciências Sociais e Humanas**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 25-40, jan./jun. 2011.
- [2] MORAN, J. Metodologias ativas para uma aprendizagem profunda. In: BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática**. – Porto Alegre: **Penso**, 2018.
- [3] BARBOSA, E.F; MOURA, D.C. **Metodologias ativas de aprendizagem na Educação Profissional e Tecnológica**. B. Tec. Senac, Rio de Janeiro, v. 39, n.2, p.48-67, maio/ago. 2013.
- [4] HAYD, et al. **O quarteto fantástico: metodologias ativas de ensino**. 1 ed. Boa Vista, RR: Ed. dos Autores, 2021.
- [5] LIMA, L.K.O.S.; SANTOS, E, M. **Metodologias ativas e suas contribuições para os processos de ensino e aprendizagem**. Conedu, 2020.
- [6] SANTOS, et al. Aprendizagem baseada em problemas no ensino da enfermagem. **Revista Contexto & Saúde**, vol. 17, n. 32, 2017 – ISSN 2176-7114 – p. 55.
- [7] BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias Ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática**. Porto Alegre: **Penso**, 2018.
- [8] MARQUES, L.M.N.S.R. **As metodologias ativas como estratégias para desenvolver a educação em valores na graduação em enfermagem**. Esc. Anna Nery. v. 22, n. 3, p. 01-06, 2018.
- [9] BERBEL, N.A.N. A problematização e a aprendizagem baseada em problemas: diferentes termos ou diferentes caminhos?. **Interface — Comunicação, Saúde, Educação**, v.2, n.2, 1998.

- [10] BOROCHOVICIUS, E.; TORTELLA, J.C.B. Aprendizagem Baseada em Problemas: um método de ensino-aprendizagem e suas práticas educativas. **Aval. pol. públ. Educ.**, Rio de Janeiro, v.22, n. 83, p. 263-294, abr./jun. 2014.
- [11] RODRIGUES, M.L.V; FIGUEIREDO, J.F.C. Aprendizado centrado em problemas. *Medicina*, Ribeirão Preto, 29:396-402, out./dez. 1996.
- [12] HAYD et al., 2022 Aspectos biológicos do ser humano I : situações problemas formulados para trabalhar metodologias ativas de ensino : aprendizado baseado em problemas (PBL), sala de aula invertida, World Café e FishBowl / Ramão Luciano Nogueira Hayd... [et al.]. – Boa Vista : Editora da UFRR, 2022. 33 p. :
- [13] BORDENAVE, J. PEREIRA, A.M. Estratégias de Ensino-aprendizagem. 28. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2007.
- [14] BATISTA et al., 2005. O enfoque problematizador na formação de profissionais de saúde. *Revista de Saúde Pública*, v.39, n.2, p.231-237, 2005.
- [15] BARBOSA, K.K el al. Metodologias ativas na Aprendizagem significativa de enfermagem. **Revista Humanidades e Inovação** v.8, n.44, 2021.



# **PROGRAMA RESIDÊNCIA PEDAGÓGICA NO ENSINO REMOTO EMERGENCIAL: DESAFIOS E DIFICULDADES ENCONTRADOS PELOS RESIDENTES QUE VIVENCIARAM O PERÍODO DE PANDEMIA**

Larissa Silva Costa<sup>1</sup>, Cícero Wellington Brito Bezerra<sup>1</sup>, Hildo Antonio dos Santos Silva<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>*Departamento de Química, Universidade Federal do Maranhão, Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga - CEP 65080-805, São Luís – MA. hildo.silva@ufma.br*

**Abstract** The Pedagogical Residency Program has as one of its main objectives the immersion of undergraduate students in schools for the exercise of teaching practice. In the face of the pandemic, the residents witnessed the various adaptations made by the government agencies and the Schools for the continuity of the schooling process. During the period of remote teaching, much has been discussed about the limitations and weaknesses of this model, as well as some of the features of traditional face-to-face teaching that are already outdated and, therefore, would need to be revised and updated. This paper presents some of these discussions.

**Keywords:** Pedagogical Residence, Pandemic, Face-to-face Teaching, Remote Learning, Learning, Evaluation.

## **1. INTRODUÇÃO**

Em 2020 uma pandemia causada pelo vírus COVID-19 (SARS-CoV-2) atingiu o mundo inteiro. No Brasil, assim como em outros países, foi instaurado o isolamento social a fim de minimizar o contágio pelo vírus [1]. Essa medida trouxe uma série de consequências no âmbito econômico, social, cultural e também educacionais. No mês de março do mesmo ano, o MEC publicou a portaria nº 343 [2] que autorizava, em caráter emergencial, a substituição das aulas presenciais pelo formato remoto. Esse modelo de ensino tem o uso da tecnologia digital como principal recurso mediador das interações entre estudantes e docentes [3]. Tal medida claramente repercutiu por todo o processo de escolarização alcançado as universidades e, conseqüentemente, os Programas vinculados a elas, a exemplo do Programa Residência Pedagógica (PRP). Este Programa tem como

destaque a imersão dos estudantes no espaço e tempo pedagógicos escolares. Os residentes passam a vivenciar, de forma sistemática e dinâmica, a realidade profissional, podendo mais facilmente conciliar os aspectos teóricos e práticos da docência. Acompanhados por uma preceptoria, o Programa oportuniza aos estudantes uma riqueza de experiências que contribuem para que, ainda durante a graduação, construam uma identidade docente compatível com as exigências e necessidades contemporâneas [4].

Considerando que o PRP segue o modelo de ensino aplicado nas Escolas, foi necessário que os residentes se adequassem à modalidade remota emergencial, também. O ensino remoto, ou a aula remota, configura-se em uma realidade em que os atores ou sujeitos do processo estão separados geograficamente mas, no entanto, dialogam e interagem virtualmente [5].

Ressalta-se que o ensino remoto e a Educação a Distância (EaD) diferem em conceitos e em propostas. A EaD, prevista na Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB) [6], possui o currículo e o planejamento pedagógico pensados para essa finalidade, as aulas acontecem remotamente, em ambientes virtuais determinados, com vários recursos (inclusive de interação) e, em geral, com flexibilidade para o aluno realizar tarefas e avançar em seu ritmo, contando com o auxílio de docentes e de tutores previamente preparados para esta modalidade, além de materiais didáticos específicos para esta forma de ensino. Já o ensino remoto foi uma solução de caráter geral, temporária e estratégica que permitiu, no contexto da pandemia de Covid-19, a continuidade do processo de escolarização. Foi uma adaptação do modelo presencial para o virtual em que cada instituição precisou elaborar estratégias para dar continuidade ao ensino, com aulas síncronas (em tempo real), assíncronas (gravações), ou de forma híbrida [7].

Os docentes precisaram desenvolver recursos, métodos de trabalhos e maneiras de organização didática para o melhor atendimento às demandas impostas pela crise sanitária e pelo isolamento social. Dentre os inúmeros desafios encontrados, destacaram-se mais diretamente: o curto período de tempo para a implementação da modalidade emergencial, a ausência de estudos que direcionassem as práticas pedagógicas, a falta de experiência dos sujeitos, e a imensa diversidade de realidades econômicas, sociais e educacionais no Brasil [8].

Diante deste cenário, a utilização da tecnologia digital no ensino remoto tornou-se importante aliada para a continuidade das atividades educacionais em diferentes níveis e etapas de ensino, e requereu dos professores a adaptação das formas de trabalhar os conteúdos e de desenvolver as habilidades previstas no currículo[8].

Baldes [8] afirma que a pandemia tornou a conjuntura educacional ainda mais desafiadora tendo em vista que evidenciou as disparidades de acesso aos recursos didáticos e tecnológicos os quais contribuem com a aprendizagem. Em face do exposto, as possibilidades de ensino e, conseqüentemente, a avaliação da aprendizagem, necessitaram ser compreendidas de forma profunda, para agregar novos conhecimentos e delinear possibilidades que favorecessem o aprendizado do estudante no ensino remoto. Dessa forma, esta pesquisa visou coletar experiências dos residentes (Licenciatura em Química da UFMA) que vivenciaram os períodos presencial e remoto, este último durante o período da pandemia, destacando os desafios e as **soluções** encontradas.

## 2. METODOLOGIA

A presente pesquisa experimental traz uma análise comparativa das experiências do ensino presencial e remoto no Programa Residência Pedagógica através da aplicação de um questionário com 10 residentes que vivenciaram estas

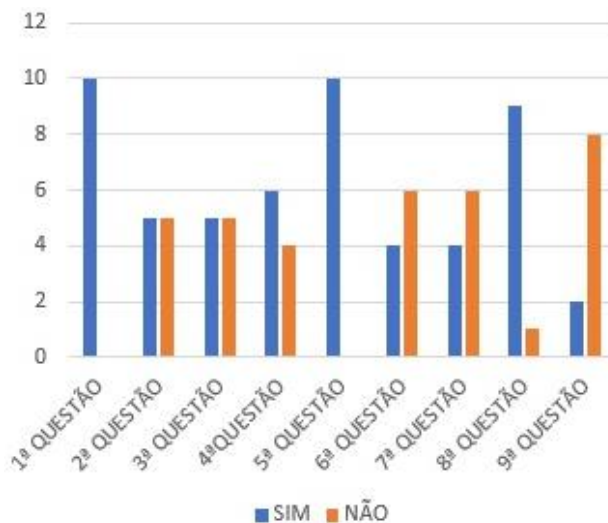
modalidades de ensino, sendo estes do curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) que estavam distribuídos em duas escolas de ensino público.

O questionário foi elaborado com perguntas sobre os pontos mais pertinentes no período na pandemia, tais como: adaptação às tecnologias que dão suporte as aulas remotas, concentração dos alunos durante as aulas, preparação das aulas, capacitação em tecnologias de ensino, acesso à internet, busca por inovação, avaliação remota, rendimento de aprendizado e avaliação da aprendizagem; visando entender quais as dificuldades e desafios encontrados neste período em comparação ao período de ensino presencial. O documento foi enviado online para cada entrevistado.

A material continha 10 perguntas e suas respostas foram analisadas cautelosamente. Foi feito um gráfico quantitativo (figura 1) sobre as respostas obtidas nas questões de 1 a 9. A décima questão foi subjetiva por isso não fez parte do gráfico.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Figura 1: Respostas do questionário aplicado aos residentes.



Fonte: Autores.

De acordo com o gráfico, na primeira questão, todos os residentes afirmaram no questionário que conseguiram se adaptar com facilidade às tecnologias que dão suporte às aulas remotas. Em contrapartida, na segunda questão, no que diz respeito a manter a atenção dos alunos durante toda a aula, apenas metade deles responderam que tiveram sucesso. A outra metade relatou que por não terem o contato visual, se tornou muito difícil saber se os alunos estavam realmente com a atenção voltada para a aula pois suas câmeras e microfones estavam sempre desligados. Um deles relatou que ao final da aula alguns não saíam da sala, o que se pode concluir que só deixavam a aula aberta em seus aparelhos eletrônicos e se ocupavam com outra tarefa. Outros afirmaram que ao fazer

\*Address correspondence to this author at the Department, Faculty, University, P.O. Box: 0000-000, City, Country; Tel/Fax: ++0-000-000-0000, +0-000-000-0000; E-mail: Institutional email.

perguntas, poucos respondiam ou até mesmo ninguém, não havia participação na aula. Ou seja, o aluno está com um dispositivo móvel em mãos, com uma série de distrações prontas para competir por atenção. Isso tudo dificulta muito ao professor saber como está de fato a situação dos alunos com relação a compreensão do conteúdo. Comparadas com as aulas presenciais apesar do aprendizado continuar a ser oferecido através de telas de computador, tal tecnologia não permite que os professores compreendam, de maneira abrangente, as emoções, expressões não verbais e comportamentos dos alunos, podendo gerar um sentimento desconexão. [9]

Na terceira pergunta, quando questionados se a modalidade de ensino remoto facilitou ou dificultou a preparação das aulas, metade respondeu que facilitou e a outra metade que dificultou. No caso das respostas negativas, as justificativas foram que, ao preparar aulas para o ensino remoto se requer muito mais tempo, pois além do que já é requisitado como elaborar planos de aula, os residentes precisam dedicar do seu tempo para aprender a utilizar as plataformas e buscar mais recursos para aula. Hodges et al. [10] ressaltam que é impossível que, de um dia para o outro, todos os professores se tornem especialistas em ensino remoto, o qual, na situação atual, tem que ser organizado em semanas ou dias. Consequentemente, há uma alta probabilidade de que as experiências de aprendizado, entregues aos alunos, estejam abaixo do nível ideal. Alguns professores tentaram oferecer o essencial, outros enfrentaram recurso mínimo e pouco tempo.

Uma das causas que dificulta o ensino remoto é a falta de formação dos professores na área das tecnologias de informação, situação que exige, desses profissionais, um tempo maior para a organização das aulas e materiais [11]. Ainda que a presença mais intensa das TICs (Tecnologia de Informação e Comunicação) no cotidiano das pessoas seja uma realidade, professores continuam despreparados para ensinar na modalidade remota. O uso dessas ferramentas tem provocado mudanças na docência, nos modos de ensinar e na própria concepção e organização dos sistemas educativos, visto que, neste cenário, o professor deve exercer um papel muito mais orientador, mediador e colaborativo, ajustado às novas demandas [12].

O ideal, quando se fala em desenvolver a educação em ambientes virtuais e interativos de aprendizagem, deveria envolver um trabalho interdisciplinar, entre educadores, profissionais de design e programação, visando não só a criação desses ambientes, mas também seu gerenciamento [13]. Entretanto, a situação atual tem mostrado que as barreiras encontradas pelos professores que se viram envolvidos no ensino remoto envolvem a falta de treinamento e desenvolvimento, dada a exigência, inesperada, da utilização dessa modalidade educacional.

Ainda que repentino, e em pouco tempo, falando sobre plataformas digitais de ensino na questão 4, a maior parte dos residentes afirmou que teve um período de capacitação adequado para manuseio dessas tecnologias, porém alguns não tiveram essa oportunidade.

Na questão 5, todos eles responderam que têm um bom acesso à internet, porém a maioria afirmou na questão 6 que seus alunos não tinham, e na questão 7, disseram que a maioria

das escolas não dava o suporte necessário para os alunos no período remoto. No que se trata dessas tecnologias, um dos desafios do ensino remoto foi justamente esse: a falta de condições como é o caso de computador, tablet ou tele móvel, internet com capacidades de suportar uma aula on-line, sem contar com as capacidades pessoais em manusear as novas tecnologias.

Na oitava pergunta, a grande maioria dos residentes afirmou que busca aprender e se capacitar através de minicursos, da utilização de novas ferramentas, e que estão sempre à procura de novas abordagens metodológicas para despertar motivação e concentração dos alunos. Alguns citaram utilizar sites com jogos de quiz sobre o assunto trabalhado em sala de aula.

Na nona pergunta, em comparação ao ensino presencial, a maior parte dos residentes afirmou que o momento de avaliação remota obteve um retorno de aprendizado abaixo do esperado. No ensino presencial ou no ensino remoto emergencial, a avaliação empregada nas instituições de ensino constitui-se uma ferramenta que busca investigar a qualidade do desempenho dos estudantes em relação aos conteúdos e habilidades trabalhados pelo educador. Este é um dos pontos mais pertinentes na área da educação para o período que estamos vivendo. Para o professor e especialista em Gestão Escolar, Baldes [8], existe uma grande diferença entre o ato de avaliar e o ato de examinar onde, este último, é aplicado erroneamente nas escolas há mais de séculos como forma de verificar a aprendizagem do aluno.

*“Hoje sabemos que existem múltiplas inteligências e que as competências ultrapassam a mera memorização conceitual. As exigências do mundo do trabalho e da sociedade são outras e a escola precisa acompanhar a locomotiva do progresso. O processo de avaliar tem implicações cognitivas, socioemocionais e ideológicas que nem sempre são compreendidas pelos educadores. Agimos, muitas vezes, sem saber, de modo tradicional ou convencional, da maneira que aprendemos na faculdade. Isso é um equívoco. Repensar as práticas avaliativas é essencial para alcançar melhores resultados na educação”.*[8]

Sobre a avaliação remota, os residentes frisaram que o fato de os alunos estarem em casa e sem monitoramento do professor, resulta em facilidade ao acesso a consultas em livros, internet e até mesmo interação com os colegas para responder provas e atividades. Eles não desenvolveram a responsabilidade de aprender. Os residentes explicaram que em termos de nota elas foram mais altas, porém não significava dizer que os alunos estavam tendo um aprendizado real, ao que eles nomearam este fato de falso aprendizado. Sobre isso, Baldes [8] afirma que ao invés de avaliar, estamos examinando e não devemos acreditar fielmente nos testes aplicados. Porém, numa realidade de pandemia é difícil falar em avaliar pois não foram dadas condições adequadas para que ela se efetivasse.

Quando questionados, na última pergunta, em qual modalidade de ensino o aprendizado foi melhor, todos, sem exceção, responderam que foi bem melhor no presencial. Começando pelo contato entre professor e aluno, a cobrança

que consequentemente é maior, a distração se torna menor em sala de aula pois o ambiente com o professor presente exige mais concentração por parte dos alunos. Além disso, o professor tem um controle muito melhor para identificar quando o aluno está com alguma dificuldade e há também uma facilidade maior para a participação do aluno na aula e na resolução de exercícios.

O processo de avaliação da aprendizagem é um assunto abordado pela Filosofia, Pedagogia, Psicologia e Neurociência. Eles afirmam em conjunto que, para entender o processo de aprendizagem é necessário considerar o perfil do aprendiz, a qualidade de ensino e o contexto sociocultural, além disso, concordam que o professor tem um papel extremamente importante: é um mediador da aprendizagem.

Como mediador, o professor deve entender que o processo da avaliação tem vários instrumentos, considera a aprendizagem como um processo construtivo e visa promover, ao invés de excluir os aprendizes. É importante ressaltar que o caráter autoritário e controlador imposto em sala de aula e estendido aos exames aplicados aos alunos, prejudica o desempenho deles. Adquirir essa consciência dos limites e possibilidades do ato de avaliar é um passo decisivo para alcançar os objetivos de aprendizagem. Sobre isso, o professor Cipriano Carlos Luckesi [14] em seu livro *Avaliação da Aprendizagem Escolar* diz:

*“O ato de examinar tem como função a classificação do educando minimamente em “aprovado ou reprovado”; no máximo, em uma escala mais ampla de graus, tais como as notas [...]. Ao ato de examinar não importa que todos os estudantes aprendam com qualidade, mas somente a demonstração e classificação dos que aprenderam e dos que não aprenderam [...]; o ato de avaliar tem como função investigar a qualidade do desempenho dos estudantes, tendo em vista proceder a uma intervenção para a melhoria dos resultados”.*

Para Baldes [8], criar um sentido de obrigação ou de dever nos alunos através do medo da prova difere de responsabilidade. Estudar por medo de ser reprovado é diferente de estudar voluntariamente para aprender. A ideia é usar o instrumento de modo consciente, compreendendo as limitações, procurando ajustar e entender que existem outras maneiras de avaliar. A pesquisadora Jussara Hoffmann [15] tem uma visão sobre avaliação que segue o mesmo pensamento de Cipriano Luckesi, encontrado no trecho de sua obra *Avaliação: mitos e desafios*:

*“Configura-se a avaliação educacional, a meu ver, em mito e desafio. O mito é decorrente de sua história que vem perpetuando os fantasmas do controle e do autoritarismo há muitas gerações. O desafio, por outro lado, é superar essa história e aprofundar-se nos pressupostos teóricos que fundamentam a avaliação na concepção mediadora”.*

Uma avaliação adequada é a que estimula no educando o pensamento crítico, a criatividade e o raciocínio mais elaborados. Sendo assim, o professor não é apenas um

transmissor de informações e conhecimentos; na verdade ele é um transformador, é aquele que faz com que o aluno pense crítica e sistematicamente. É um facilitador ou mediador da aprendizagem, um investigador da curiosidade, da reflexão, da investigação e da desconfiança, um provocador ou questionador [8].

Algumas formas de avaliação que façam o aluno pensar, refletir, expondo-os a desafios diários para que possam demonstrar suas capacidades são: seminários, trabalhos em campo, dramatizações, debates, rodas de conversa, observações, textos para interpretação, entrevistas, pesquisas etc. As maneiras de avaliar devem incluir as múltiplas inteligências, os diferentes conteúdos apresentados e as dimensões cognitiva, psicológica e crítico-social.

No contexto da pandemia, para avaliar, além de levar tudo que foi falado em consideração, é preciso estar atento a outros fatores que também influenciam no processo de aprendizagem do aluno. Essa situação de calamidade exige da escola uma postura diferente e é preciso dar mais atenção e suporte à educação emocional dos alunos. Se antes da pandemia, já aumentavam os números de jovens com depressão e outros transtornos psiquiátricos, a tendência é essa quantidade elevar consideravelmente. Para o psiquiatra e pesquisador Augusto Cury [16], a sociedade adoce as pessoas, sobretudo os jovens:

*“Uma das consequências da hiper construção de pensamentos é a simulação de sintomas tais quais as pessoas hiperativas apresentam, como déficit de concentração, inquietação, conversas paralelas, teimosia, dificuldade de se colocar no lugar dos outros e de elaborar experiências de dor, perdas e frustrações [...]. É provável que entre 1% e 2% dos jovens hiperativos tenham um viés genético. Mas por que, então, entre 70% e 80% estão apresentando os mesmos sintomas? São vítimas de um vírus contagiante como nos filmes hollywoodianos? Não! São vítimas do nosso sistema social contagiante, que produz coletivamente a Síndrome do Pensamento Acelerado [...]. Essa sociedade insana e frenética tornou-se algoz da mente dos nossos filhos e alunos”.*

Muitos alunos estão abalados, perderam pessoas próximas, estão desorientados e com medo, até mesmo os adultos estão. O mais urgente é acolher os alunos, dar novas oportunidades e “esticar” ao máximo o tempo para que eles tenham chances de estudar os conteúdos e serem adequadamente avaliados. E ao fazer isso o professor não deve ter o sentimento de culpa ou o pensamento de que o aluno está em “vantagem”.

O resultado das respostas acerca do momento avaliativo remoto foi negativo por que nem os residentes, nem os professores e muito menos os alunos estavam preparados para uma essa realidade. O que é compreensível visto que essa prática antiga de avaliar é exercida até hoje. Mas é necessário rever e mudar isso. Já que avaliar é focar na pessoa, é hora de repensar as práticas avaliativas.

#### 4. CONCLUSÃO

O programa Residência Pedagógica traz uma oportunidade de vivência em sala de aula bem mais profunda e completa que o estágio curricular, e assim os residentes puderam ver de perto a realidade de um ensino presencial e experimentaram também o ensino remoto. Assim, diante de todas as situações pelas quais os residentes passaram, fica evidente que o período de pandemia causou um prejuízo imensurável na área da educação. Porém, a pandemia apenas evidenciou que os métodos de educar, e avaliar já estão ultrapassados e precisam ser modificados. Compreender isto já é um começo. A escola tem muitos desafios, e só conseguirá alcançar os objetivos com o devido suporte de governos e com disposição para mudar de atitude. Outro fator que precisa ser investido é na capacitação dos professores para manuseio e uso das novas tecnologias para ensino tanto nas aulas presenciais quanto para aulas remotas, caso haja uma possível reincidência da pandemia, pois frente a outro lockdown os docentes já estariam bem mais preparados.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos que se dispuseram a responder e a participar da pesquisa deste trabalho, e a CAPES através do Programa Residência Pedagógica (UFMA) que concedeu bolsa a um dos autores (LSC).

#### REFERENCIAS

- [1] ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. Histórico da pandemia de COVID-19. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/covid19/historico-da-pandemia-covid-19>. Página acessada em: 10 de novembro de 2022.
- [2] BRASIL. Portaria nº 343, de 17 de março de 2020a. Dispõe sobre a substituição das aulas presenciais por aulas em meios digitais enquanto durar a situação de pandemia do Novo Corona vírus - COVID-19. Disponível em: <http://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-343-de-17-de-marco-de-2020248564376>. Página acessada em: 21 de novembro de 2022.
- [3] BRASIL. Portaria nº 544, de 16 de junho de 2020b. Dispõe sobre a substituição das aulas presenciais por aulas em meios digitais, enquanto durar a situação de pandemia do novo corona vírus - Covid-19, e revoga as Portarias MEC nº 343, de 17 de março de 2020, nº 345, de 19 de março de 2020, e nº 473, de 12 de maio de 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-544-de-16-de-junho-de-2020261924872>. Página acessada em: 21 de novembro de 2022.
- [4] CAPES. Residência Pedagógica, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/capes/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/educacao-basica/programa-residencia-pedagogica>. Acessado em: 10 de novembro de 2022.
- [5] MOREIRA, José Antônio Marques; SCHLEMMER, Eliane. Por um novo conceito e paradigma de educação digital online. Revista UFG, v. 20, 2020. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/revistaufg/article/view/63438>. Página acessada em 21 de novembro de 2022.
- [6] BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as Diretrizes e Bases da Educação Nacional. Brasília, 1996. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19394.htm). Página acessada em 21 de novembro de 2022.
- [7] BLOG YOU BILÍNGUE. A LDB e Educação a Distância, 2020. Disponível em: <https://www.youbilingue.com.br/blog/a-ldb-e-educacao-a-distancia/>. Página acessada em: 21 de novembro de 2021.
- [8] BALDES, Márcio Andrade Lyrio. A pandemia da covid-19 e os desafios de avaliar a aprendizagem. Revista Educação Pública, v. 21, nº 10, 23 de março de 2021. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/21/10/a-pandemia-da-covid-19-e-os-desafios-de-avaliar-a-aprendizagem>. Página acessada em 8 de novembro de 2022.
- [9] LIU, Ruo-Lan; LI, Yu-Chi. Action Research to Enrich Learning in e-Tutoring for Remote Schools. Systemic Practice and Action Research, v. 33, p. 95–110, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11213-019-09517-5>. Página acessada em 23 de setembro de 2022.
- [10] HODGES, Charles et al. Diferenças entre o aprendizado online e o ensino remoto de emergência. Revista da Escola, Professor, Educação e Tecnologia, Recife, v.2, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://escribo.com/revista/index.php/escola/article/view/17>. Página acessada em 23 de setembro de 2022.
- [11] SHIMAZAKI, Elza Midori; MENEGASSI, Renilson José; FELLINI, Dinéia Guizzo Neto. Ensino remoto para alunos surdos em tempos de pandemia. Práxis Educativa, Ponta Grossa, v.15, e2015476, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5212/PraxEduc.v.15.15476.071>. Página acessada em 23 de setembro de 2022.
- [12] VELOSO, Braian Garrito.; MILL, Daniel.; MONTEIRO, Maria Iolanda. Docência, educação a distância e tecnologias digitais: um estudo bibliométrico. Revista Eletrônica de Educação, São Carlos, v. 13, n. 1, p. 319-335, 2019. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.14244/198271992167>. Página acessada em 15 de setembro de 2022.
- [13] MARTINS, Thaís Yamasaki de Campos; RIBEIRO, Rita de Cássia; PRADO, Cláudia. Transdisciplinaridade na educação à distância: um novo paradigma no ensino de Enfermagem. Revista Brasileira de Enfermagem, Brasília, v. 64, n. 4, p. 779-782, ago.2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-71672011000400023>. Página acessada em 23 de setembro de 2022.
- [14] LUCKESI, Cipriano Carlos. Avaliação da aprendizagem escolar: estudos e proposições. 22ª ed. São Paulo: Cortez, p.62, 2011.
- [15] HOFFMANN, Jussara. Avaliação: mito & desafio. Uma perspectiva construtivista. 45ª ed. Porto Alegre: Mediação, p.35, 2017.
- [16] CURY, Augusto. 20 regras de ouro para educar filhos e alunos. São Paulo: Planeta, p.13-14, 2017.



*Mens Agitat 18 (2023) 16-24*

*ISSN 1809-4791*

## **DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA RUPTURA DE MEMBRANAS POR DIFERENÇA DE PRESSÃO**

Giovanni Miro Pessoa Leite<sup>1</sup>, Giovani Pozza Azoni<sup>2</sup>, George Santos Marinho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal-RN-Brasil. giovannimiropl@hotmail.com

<sup>2</sup>Programa de pós-graduação em Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal-RN-Brasil. giovaniazioni@gmail.com

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal-RN-Brasil. gmarinho@ct.ufrn.br

### **RESUMO**

*Foi projetado, construído e testado um dispositivo para demonstrações experimentais sobre compressão de gases e ruptura de amostras de materiais que apresentem comportamento plástico. O dispositivo é composto de dois tubos, sendo um para compressão e o outro para evacuação de gás. A compressão do gás é obtida por meio do deslocamento de um êmbolo acoplado a um fusão solidário a uma caixa de engrenagens acionada por um motor elétrico com avanço controlável. Na extremidade do tubo de alta pressão há uma parede dotada de um furo, onde se instala a membrana (amostra de material) a ser testada. O acionamento do motor movimenta o fusão que desloca o êmbolo no interior do tubo, comprimindo e aumentando a pressão do gás, que, por sua vez, deforma a membrana, podendo levá-la ao rompimento. No caso de se atingir a pressão máxima nominal do dispositivo (maior avanço do êmbolo) sem que a membrana atinja seu limite de resistência, o tubo de baixa pressão pode ser conectado ao de alta pressão e, em seguida, acoplado a uma bomba de vácuo. Desse modo, é possível aumentar a diferença de pressão, aumentando a chance de rompimento da membrana. Com base em fundamentos e critérios de falha, realizou-se uma análise estrutural do dispositivo visando determinar sua segurança operacional. Assim, foi possível estabelecer uma relação entre a pressão e o avanço do êmbolo no interior do tubo. Isso permitiu calcular a pressão máxima teórica de operação do dispositivo. Após testes preliminares e ajustes do projeto, foram realizados três experimentos, nos quais utilizaram-se membranas de plástico PP aluminizado. Com base nos dados obtidos, construíram-se curvas de pressão em função do volume. A partir da análise das curvas experimentais constatou-se a concordância com a previsão teórica. Concluiu-se que o dispositivo construído está apto a operar com segurança, podendo ser empregado para fins didáticos (e.g., experimento de Boyle - Mariotte), com possibilidade de uso em pesquisa sobre resistência dos materiais.*

**Palavras-chave:** Vaso de Pressão; Pistão; Resistência dos materiais.

### **ABSTRACT**

*A device was designed, built and tested for experimental demonstrations on gas compression and rupture of samples of materials that present plastic behavior. The device consists of two tubes, one for compression and the other for gas evacuation. Gas compression is obtained through the displacement of a piston coupled to a spindle attached to a gearbox driven by an electric motor with controllable advance. At the end of the high pressure tube there is a wall with a hole, where the membrane (sample of material) to be tested is installed. When the motor is activated, the spindle moves the plunger inside the tube, compressing and increasing the gas pressure, which, in turn, deforms the membrane, which can lead to rupture. In case the maximum nominal pressure of the device is reached (greater advance of the plunger) without the membrane reaching its resistance limit, the low pressure tube can be connected to the high pressure one and then coupled to a vacuum pump. In this way, it is possible to increase the pressure difference, increasing the chance of rupture of the membrane. Based on fundamentals and failure criteria, a structural analysis of the device was carried out in order to determine its operational safety. Thus, it was possible to establish a relationship between the pressure and the advance of the piston inside the tube. This allowed calculating the maximum theoretical operating pressure of the device. After preliminary tests and project adjustments, three experiments were carried out, in which aluminized PP plastic membranes were used. Based on the data obtained, pressure curves were constructed as a function of volume. From the analysis of the experimental curves, agreement with the theoretical prediction was verified. It was concluded that the constructed device is able to operate safely, and can be used for didactic purposes (e.g., Boyle - Mariotte experiment), with the possibility of use in research on the resistance of materials.*

**Keywords:** Pressure vessel; Piston; Material resistance.



## 1. INTRODUÇÃO

A análise de ruptura de materiais é parte indissociável do trabalho do engenheiro. Nas engenharias Mecânica e Civil, por exemplo, são utilizados diversos dispositivos para testes de resistência de materiais que serão aplicados em situações onde há grandes variações de pressão.

Segundo Hertzberg [1], a fim de evitar possíveis defeitos em um componente de um projeto de engenharia, deve-se analisar o comportamento do material quando submetido a altas tensões concentradas. Hibbeler [2], por sua vez, ressalta que compreender o comportamento dos materiais é crucial para desenvolver equações descritivas de suas resistências. Portanto, dispor de equipamentos que proporcionem dados experimentais e possibilitem observar diretamente o comportamento de materiais sob diferentes condições de pressão é imprescindível ao desenvolvimento da engenharia.

Equipamentos de baixo custo estão disponíveis no mercado e são de grande interesse às universidades, especialmente as que oferecem ensino de engenharia. Em princípio, utilizando-se apenas usinagem e tecnologias de impressão 3D, é possível construir um vaso de pressão para teste de resistência de materiais de forma rápida e econômica. Esse tipo de dispositivo, quando acoplado a um sistema de compressão de fluido e conectado a um sistema de aquisição de dados, permite estudar a influência da pressão e da temperatura na resistência mecânica de diferentes tipos de materiais, da mesma forma que permite estudar o comportamento dessas grandezas físicas no fluido que é comprimido - e.g., experimento de Boyle-Mariotte.

Neste trabalho teve-se por objetivo desenvolver um dispositivo para análise da ruptura de membranas por meio da variação da pressão de um gás. A proposta principal é disponibilizar um dispositivo para fins didáticos, que proporcione ao Aluno conhecimentos fundamentados na experiência, beneficiando o ensino de disciplinas que tratam de fenômenos atinentes às propriedades mecânicas de materiais e ao comportamento de estruturas sob carga, bem como o estudo da mecânica dos fluidos.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO

Harvey [3] definiu vaso de pressão como um recipiente projetado para armazenar, processar e gerar energia sob condições extremas de pressão e temperatura na ausência de vazamentos. Spence e Tooth [4] destacaram a importância do conhecimento do comportamento sobre vasos de pressão no desenvolvimento da energia nuclear nos EUA e na Europa, nas décadas de 1950 e 1960. Além disso, enfatizaram que, com o aumento das demandas de serviço, requisitos de qualidade e legislação de segurança, é fundamental que o engenheiro compreenda princípios, metodologias e normas firmadas nos padrões de projeto de vasos de pressão [4].

De acordo com Hibbeler [2], a pressão no interior de um vaso cilíndrico sujeita o material do qual ele é feito a cargas em todas as suas direções, conforme estabelece o Princípio de Pascal. A fim de proporcionar segurança e longevidade ao equipamento, faz-se necessário conhecer as tensões nas paredes do vaso submetido à pressão [3]. Entretanto, somente esse conhecimento não é suficiente para garantir que o equipamento funcione adequadamente e sem riscos em sua operação. Adicionalmente, é necessário estudar essa grandeza em conjunto com as propriedades do material, de modo a considerar o fator de segurança do projeto.

Em qualquer projeto de engenharia, o fator de segurança é definido como a razão entre a tensão aplicada e a resistência do material [5]. Assim, quando o fator é igual a 1, significa que a carga aplicada ao material é máxima, i.e., causará falha. De acordo com Rodrigues [6], no projeto de um vaso de pressão, considera-se como ideal o fator de segurança igual a 4.

Nos cálculos relativos ao presente projeto, idealizou-se um dispositivo composto de um tubo dotado de três camadas, respectivamente da parte externa para interna: aço, resina poliéster e plástico PVC. Para fins de análise, apenas as dimensões dos tubos de aço e de PVC são necessárias, pois, por meio destes, obtêm-se a máxima pressão de trabalho e as tensões que podem levar o componente à falha.

As dimensões de projeto do dispositivo foram (Fig. 1): tubo de aço - diâmetro externo ( $d_{e,aço}$ ) = 60,00 mm, espessura ( $t_{aço}$ ) = 3,00 mm e diâmetro interno ( $d_{i,aço}$ ) = 54,00 mm; tubo de PVC - diâmetro externo ( $d_{e,PVC}$ ) = 50,00 mm, espessura = 1,50 mm e diâmetro interno ( $d_{i,PVC}$ ) = 47,00 mm.

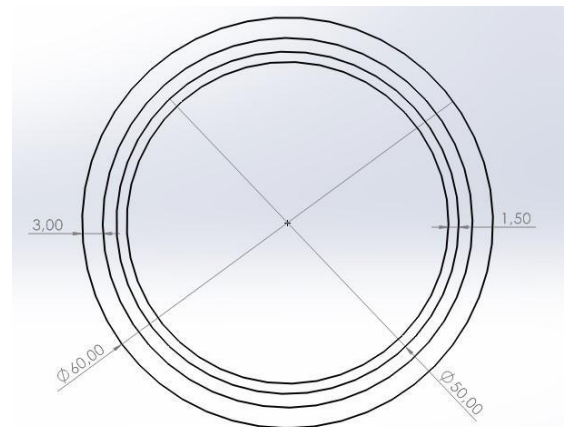


Fig. 1 - Cotas (em mm), em vista transversal, do corte das camadas que compõem o tubo de pressão.

O fator de segurança do dispositivo foi estimado a partir de valores extremos das grandezas envolvidas. Para calcular as tensões atuantes no interior do vaso de pressão utiliza-se a pressão máxima de trabalho. Considerando-se como fluido de trabalho o ar atmosférico e tratando-o como gás ideal, com propriedades termodinâmicas em estados distintos relacionadas por meio da equação de Clapeyron [7], tem-se:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

Admitindo-se desprezível a variação de temperatura devido à compressão do ar no interior do vaso, i.e., compressão isotérmica, tem-se na Eq. (1) que  $T_1$  é igual a  $T_2$ . Então, a pressão máxima no interior do cilindro, correspondente ao avanço máximo do êmbolo, pode ser estimada por:

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

sendo  $P_1$  a pressão inicial, relativa ao estado em que o êmbolo se encontra no ponto de volume máximo do cilindro - i.e., ar sob pressão atmosférica;  $V_1$  o volume inicial (máximo); e  $V_2$  o volume final (mínimo), resultante do máximo avanço do êmbolo no interior do cilindro, conforme ilustrado nas figuras 2 e 3.

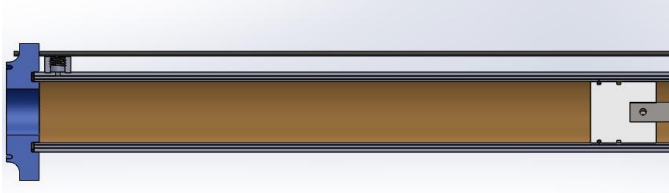


Fig. 2 - Posição do êmbolo no ponto inicial,  $V_1 = V_{máx.}$

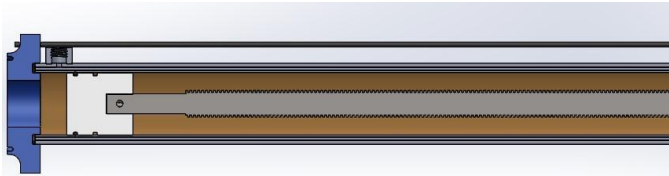


Fig. 3 - Posição do êmbolo no máximo avanço,  $V_2 = V_{mín.}$

Para cálculo dos volumes de ar nos dois estados consideraram-se não somente o volume disponível no interior do tubo, mas, também, o volume da cavidade do flange. O dispositivo foi projetado de modo que as distâncias máxima e mínima entre as faces do êmbolo e do flange fossem, respectivamente, de 395 mm e 21 mm, e o diâmetro interno do tubo de PVC com 47 mm.

A cavidade do flange foi projetada com dimensões de 18 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro. De posse destas informações, os volumes inicial e final foram calculados somando-se o volume da cavidade do flange ao volume interno do tubo, considerando-se as posições mínima e máxima de avanço do êmbolo, nessa ordem, resultando nos seguintes valores: volume inicial ( $V_1$ ) = 688000 mm<sup>3</sup> e volume final ( $V_2$ ) = 40000 mm<sup>3</sup>. Substituindo-se esses valores na Eq. (2) chegou-se à pressão máxima de projeto de cerca de 1761000 Pa (17,38 atm).

A partir dos valores teóricos estimou-se a variação da pressão sobre a membrana durante o avanço do êmbolo através do vaso de pressão, conforme ilustrado na Fig. 4.

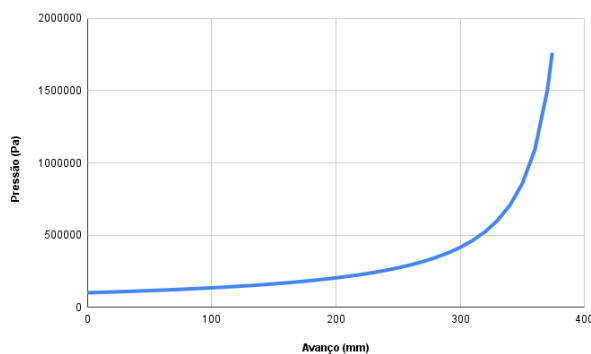


Fig. 4 - Variação teórica da pressão do ar no interior do cilindro em função do avanço do êmbolo.

Hibbeler [2] informa que a variação da pressão em função

da espessura da parede do cilindro é insignificante. Porém, acrescenta que, para ser considerada “fina”, a parede deve satisfazer ao seguinte critério:

$$t \leq \frac{r_i}{10} \quad (3)$$

sendo  $t$  a espessura da parede do vaso e  $r_i$  seu raio interno (em milímetros).

Nos cálculos das tensões foram consideradas as especificações relativas ao tubo mais externo (de aço), uma vez que este sustentará as cargas de trabalho e, desse modo, a pressão interna anteriormente calculada. Posto isto, tem-se que  $t = t_{aço} = 3,00$  mm e  $r_i = d_{i,aço}/2 = 27,00$  mm; logo,  $r_i/10 = 2,70$  mm. Assim, de acordo com o critério de Hibbeler [3] - Eq. (3), o vaso projetado neste trabalho pode ser considerado com parede “grossa”. Entretanto, como será visto adiante, de acordo com o método demonstrado por Rodrigues [6], pode-se considerar o dispositivo como dotado de parede “fina”. Nos cálculos apresentados a seguir, o dispositivo foi classificado como dotado de parede fina.

Hibbeler [2] especifica: um determinado elemento de volume da parede cilíndrica do vaso de pressão estará sujeito a tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , respectivamente correspondentes às tensões circunferencial (direção  $z$ ) e longitudinal (direção  $y$ ), conforme se vê na Fig. 5, ambas exercendo tração no material, onde a magnitude da primeira vale o dobro da segunda. Enfatiza-se que a especificação da tensão crítica é determinante na construção do dispositivo.

Concomitante às tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , existe uma tensão radial ( $\sigma_3$ ), que atua ao longo da parede do vaso. Porém, ainda de acordo com Hibbeler [2], em se tratando de um vaso de paredes finas,  $\sigma_3$  pode ser ignorada, pois sua hipótese limitante (Eq. 3) resulta em  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  com valores consideravelmente maiores que  $\sigma_3$  máxima.

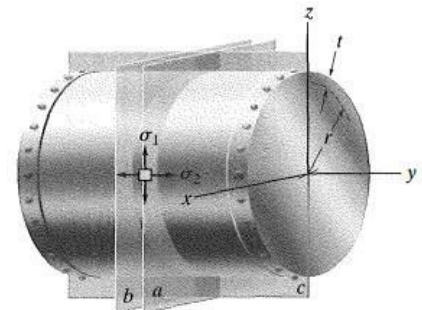


Fig. 5 - Tensões atuantes em um elemento de um vaso de pressão com geometria cilíndrica.

Fonte: Hibbeler [2].

Rodrigues [6], utilizando a norma ASME / Seção VIII / Divisão 1, para vasos de pressão com casco cilíndrico sujeito a pressão interna, informa que as tensões circunferencial e longitudinal são dadas respectivamente por [8]:

$$E\sigma_c = \frac{Pr}{t} + 0,6P \quad (4)$$

$$E\sigma_L = \frac{Pr}{2t} - 0,4P \quad (5)$$

sendo:

E = eficiência de junta adequada para cascos cilíndricos

$\square_c$  = tensão circunferencial ou tensão máxima (MPa)

$\square_L$  = tensão longitudinal (MPa)

P = pressão interna de projeto (Pa)

r = raio interno do cilindro (m)

t = espessura mínima requerida para o cilindro (m)

Fazendo-se a eficiência de junta igual a 1, tem-se que a tensão circunferencial em um dado elemento da parede do vaso de pressão será [6]:

$$\sigma_c = \frac{Pr}{t} + 0,6P$$

$$\sigma_c = \frac{1761000 \times 0,027}{0,003} + 0,6 \times 1761000$$

$$\sigma_c = 16,91 \text{ MPa}$$

Ainda segundo a Norma ASME / Seção VIII / Divisão 1 [8], a tensão longitudinal no elemento de volume será [6]:

$$\sigma_L = \frac{Pr}{2t} - 0,4P$$

$$\sigma_L = \frac{1761000 \times 0,027}{2 \times 0,003} - 0,4 \times 1761000$$

$$\sigma_L = 7,22 \text{ MPa}$$

Para fundamentar a decisão de classificar as paredes do dispositivo como finas e ignorar o critério de Hibbeler (Eq.3), recorreu-se a Rodrigues [6], que comparou o resultado da tensão circunferencial  $\square_c$  (crítica), com base na Norma ASME, ao resultado obtido por meio da fórmula para máxima tensão na parede do vaso cilíndricos, proposta por Villaça e Garcia [9]. A máxima tensão ocorre em R, ao longo da parede do vaso, na distância média entre a e b (Fig. 6).

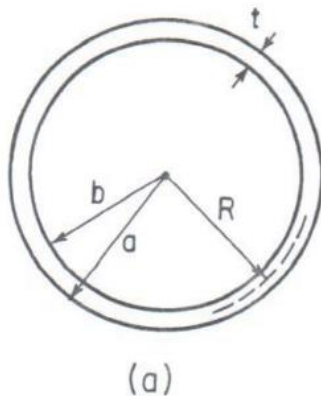


Fig. 6 - Região de máxima tensão na parede de um vaso de pressão.

Fonte: Villaça e Garcia [9].

Em um cilindro com espessura de parede muito menor que seu raio médio, ou seja, paredes finas, Villaça e Garcia [9] propõem a seguinte relação:

$$(\sigma)_{\max} = \frac{PR}{t} \quad (6)$$

Por tratar-se do raio médio,  $R = (r + t/2)$ , substituindo-se os valores conhecidos na Eq. (6), tem-se:

$$(\sigma)_{\max} = \frac{1761000 \times (0,027 + 0,003/2)}{0,003} = 16,73 \text{ MPa}$$

A tensão máxima calculada por meio da Eq. (4), com base na norma ASME [8], resultou em 16,91 MPa; com base na proposta de Villaça e Garcia [9], obteve-se 16,73 MPa. Devido à proximidade dos resultados, justificou-se a decisão de adotar a teoria de paredes finas para classificar o vaso projetado, não obstante o critério da Eq. (3).

A partir das tensões circunferencial e longitudinal, pode-se aplicar um critério de falha. Neste trabalho, para estudo analítico, adotou-se o critério de von Mises-Hencky de tensão máxima ("teoria da energia de distorção máxima"). A tensão de von Mises em um elemento tridimensional, composto por três tensões principais, será [2]:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (7)$$

Com base na classificação adotada (paredes finas), a tensão radial é nula; logo, conforme anteriormente descrito,  $\square_3 = 0$ . Então, a Eq. (7) pode ser reescrita como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (8)$$

Substituindo-se os valores  $\square_1 = \square_c = 16,91 \text{ MPa}$  e  $\square_2 = \square_L = 7,22 \text{ MPa}$  na Eq. (8), obtém-se:

$$\sigma_{VM} = 14,69 \text{ MPa}$$

Norton [5] expressou o fator de segurança FS como a relação entre o limite de escoamento do material ( $\square_e$ ) e a tensão de von Mises ( $\square_{VM}$ ):

$$FS = \frac{\sigma_e}{\sigma_{VM}} \quad (9)$$

Devido à indisponibilidade de especificações sobre o aço usado na construção do tubo, não foi possível determinar seu verdadeiro limite de escoamento. Então, para cálculo do fator de segurança, considerou-se o menor valor possível para um aço, i.e., aço SAE 1006, que apresenta limite de escoamento de aproximadamente 140 MPa. Portanto, obteve-se:

$$FS = \frac{140}{14,69} = 9,53$$

Concluiu-se que o projeto do vaso de pressão apresentou fator de segurança bem acima do ideal. Portanto, garantiu-se que a operação do dispositivo pode ser conduzida sem riscos.

### 3. O DISPOSITIVO

Dois tubos de aço foram utilizados na construção do dispositivo, sendo um vedado, fixados em suas extremidades por flanges, permitindo a inserção de uma membrana entre os tubos, e um fuso com êmbolo conectado a um motor. Entende-se que membrana consiste de uma amostra de material que, devido a sua pequena espessura, oferece baixa resistência à flexão perpendicular à superfície [3].

Em testes preliminares e nos experimentos foram utilizadas amostras de plástico PP aluminizado - material que resiste a elevadas pressões, porém, pode ser rompido no dispositivo projetado. Na forma de membranas, as amostras tiveram espessuras estimadas no Laboratório de Metrologia da UFRN. Os valores variaram entre 0,043 mm e 0,054 mm.

O êmbolo é deslocado por um motor elétrico e avança pela extensão do tubo vedado, comprimindo o ar e, conseqüentemente, elevando a pressão interna até o ponto em que a membrana é rompida. A coleta das informações da

temperatura e pressão ocorre próxima à membrana e é efetuada a partir de um microcontrolador, que opera em conjunto com sensores de temperatura em ambos os tubos e de pressão somente no tubo com vedação.

#### 4. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

No projeto desenvolvido foram utilizados recursos próprios e contou-se com a infraestrutura do Laboratório de Transferência de Calor da UFRN. As peças do dispositivo foram projetadas em software CAE SolidWorks e fabricadas em impressoras 3D ou por processo de usinagem.

##### 4.1. Tubos de pressão e escoamento

A primeira etapa do projeto consistiu no corte de um tubo de aço, dividido em duas partes, respectivamente com 400 mm e 500 mm de comprimento. Para garantir confiabilidade no processo, utilizou-se um torno mecânico. O tubo destinado à pressurização do ar, de menor comprimento, foi denominado "tubo de alta pressão", enquanto o outro, que condiciona o escoamento do ar após o rompimento da membrana, foi denominado "tubo de escoamento".

Depois de cortados, os tubos passaram por limpeza interna, por meio de uma escova artesanal confeccionada a partir de um fio de arame e pedaços de cabo de aço com 1,6 mm de diâmetro, além de fluido desincrustante, eliminando resíduos que pudessem prejudicar a fixação da resina em sua parede. Nessa operação, a haste da escova foi presa ao mandril de uma furadeira, transmitindo o movimento de rotação e, ao entrar em contato com a parede interna do tubo, ocasionou a abrasão dos resíduos existentes.

##### 4.2. Êmbolo e fuso

Em um torno mecânico, foram fabricados um êmbolo de nylon (tecnil) e um fuso roscado de aço. Acopladas, essas peças formaram um pistão para pressurização do ar no interior do tubo de alta pressão (Fig. 7). A rosca externa do fuso foi usinada para se encaixar à rosca interna do motorreductor de 24 V, que, ao ser acionado, desloca o êmbolo, comprimindo o ar no interior do tubo. Para garantir a vedação entre a superfície do êmbolo e a parede mais interna do tubo, foram feitos dois rasgos para encaixe de orings no êmbolo. Esse processo foi fundamental para impedir a passagem de ar entre a superfície do êmbolo e a parede do tubo, garantindo estanqueidade ao dispositivo.



Fig. 7 - Sistema fuso e êmbolo.

##### 4.3. Encaixe para os sensores

O tubo de alta pressão (aço) foi soldado ao tubo de escoamento dos encaixes por rosca, onde se instalaram os sensores de pressão e temperatura, totalizando três encaixes:

dois para temperatura, soldados em ambos os tubos, e um para pressão - soldado apenas no tubo de alta pressão (Fig.8).

Os elementos foram soldados nas paredes externas, entre o ponto de máximo deslocamento do êmbolo e a superfície dos flanges. Depois, utilizou-se uma esmerilhadeira com disco de desbaste para melhorar o acabamento da superfície. Furadeira e brocas foram empregadas para abrir furos passantes entre os encaixes e a parede do tubo, permitindo contato entre os sensores e o fluido comprimido.



Fig. 8 - Encaixes roscados para sensores.

##### 4.4. Preenchimento do vão entre os tubos

Para conferir integridade estrutural ao vaso de pressão, o tubo de PVC foi montado coaxialmente no interior do tubo de aço (Fig. 1). O vão entre os tubos foi preenchido com resina poliéster, aumentando a resistência mecânica do conjunto, fazendo-o suportar as variações da pressão interna.

A coaxialidade entre os tubos durante o preenchimento com resina foi obtida acoplando-se dois anéis à superfície externa do tubo de PVC. Fabricar os anéis em impressora 3D foi essencial para evitar desalinhamentos e dar conformidade à união dos tubos. O PVC tem polimento superficial que reduz o atrito, resultando no deslocamento uniforme e suave do êmbolo e garante estanqueidade ao vaso de pressão.



Fig. 9 - Preenchimento do tubo de alta pressão com resina poliéster.



Fig. 10 - Vista da seção transversal do tubo de alta pressão após preenchimento com resina poliéster.

#### 4.5.Flanges

Os três flanges hexagonais foram projetados por meio de um software de CAD 3D. Considerou-se a distribuição equitativa de furos e a espessura dos tubos que seriam conectados. Cada flange foi projetado de modo exclusivo, de acordo com a localização no dispositivo. Um dos flanges centrais contém rasgos em uma de suas faces para assentar as protuberâncias se na face do outro flange central ( Fig. 13), de forma a fixar a membrana a ser testada e vedar a junção. Todos têm uma face com rasgo para o assentamento da espessura do tubo no qual é posicionado. Ademais, o flange central, conectado ao tubo de alta pressão, possui um rasgo especialmente projetado para fixação do sensor de pressão.

O flanges foram fabricados por meio de duas técnicas: impressão 3D de filamento PLA / flange localizado no fim da extensão do tubo, que não demanda resistência elevada (Fig. 11); usinagem de alumínio / flanges centrais, que devem possuir maior resistência (figuras 12 e 13).

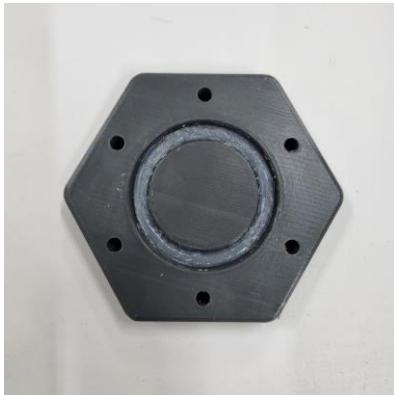


Fig. 11 - Flange produzido em PLA.



Fig. 12 - Flanges produzidos em alumínio.



Fig. 13 - Flanges produzidos em alumínio.

#### 4.6.Suporte do motor

Além de servir para fixação do motor, o flange permite centralizar o motor e o fuso com êmbolo em relação ao tubo de alta pressão, garantindo que os elementos estejam alinhados durante a operação, reduzindo riscos.

Para fabricação do suporte do motor foi utilizado um gabarito impresso em 3D, resultando em conformidade entre projeto e execução. A peça foi produzida a partir de uma chapa de alumínio com 3 mm de espessura, pensada para suportar a carga exercida pelas hastes durante os ajustes da montagem. A partir do gabarito, foram realizados os cortes e furos no material por meio de esmerilhadeira, furadeira de bancada e torno mecânico.

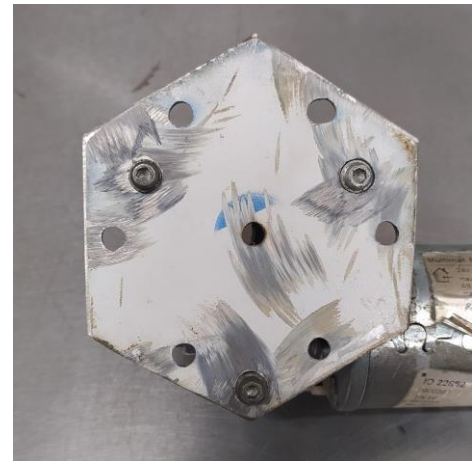


Fig. 14 - Suporte do motor.

#### 4.7.Sensores

Para medir pressão e temperatura optou-se por um sensor de pressão 5 V / 0 - 1,2 MPa e dois sensores BMP280. Um microcontrolador ESP32 realizou a transdução do sinal por meio de um conversor analógico / digital e um conversor de nível lógico, garantindo confiabilidade. O sensor de pressão foi instalado no tubo de alta pressão (Fig. 15), juntamente com um sensor de temperatura, enquanto somente o sensor de temperatura foi instalado no tubo de escoamento. A fixação dos sensores foi realizada por meio da rosca externa dos encaixes soldados nos tubos.



Fig. 15 - Ponto de instalação do sensor de pressão no tubo.

#### 4.8. Montagem

Para unir os componentes do vaso de pressão foram utilizadas seis hastes roscadas, que foram fixadas (por meio de porcas) nos furos de 6 mm dos flanges e no suporte do motor. A disposição das hastes foi planejada para permitir que três hastes fixassem o suporte do motor ao conjunto de flanges do meio, enquanto as outras três conectaram o tubo de escoamento ao resto do dispositivo, desde o conjunto até o flange de saída. Entre as porcas e as superfícies dos flanges foram utilizadas arruelas para distribuir a carga aplicada às peças. A configuração final é vista na Fig. 16.

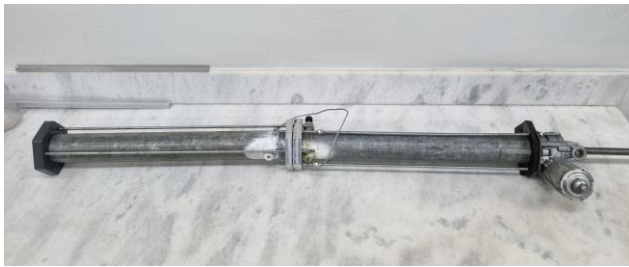


Fig. 16 - Vaso de pressão.

#### 4.9. Teste de vedação

Em sua primeira configuração, o dispositivo contava com flanges de PLA com 100 % de preenchimento, dotados de rasgos que foram preenchidos com um adesivo selante, de silicone, distribuído igualmente em todo comprimento do rasgo. Na Fig. 17 apresenta-se o resultado obtido pela combinação desses procedimentos.

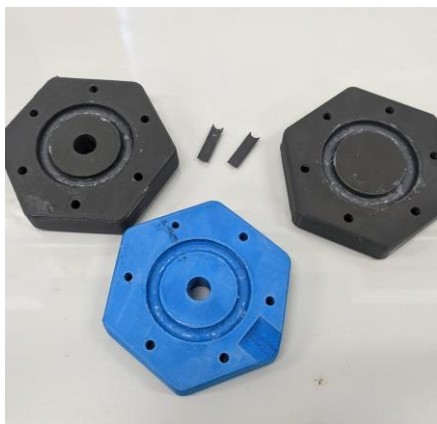


Fig. 17 - Cavidades dos flanges de PLA com silicone.

No primeiro teste houve vazamento no encontro dos

flanges de fixação da membrana e delaminação em alguns pontos de uma das peças (Fig. 18).

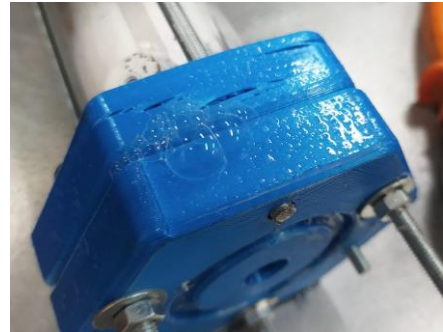


Fig. 18 - Bolhas de ar em silicone no teste de vedação.

Novos flanges (em alumínio) foram produzidos e adaptados aos novos anéis de vedação - substituindo-se o silicone de vedação da membrana por um adesivo selante composto de polímeros SMX (Fig. 19). Além disso, utilizou-se borracha para vedar a conexão entre os tubos e os flanges. As alterações asseguraram a estanqueidade desejada.



Fig. 19 - Preenchimento dos rasgos com adesivo selante.

Durante novo teste, observou-se a ocorrência de vazamento de ar entre as camadas do tubo de alta pressão, na região de contato com o suporte do motor. O vazamento foi atribuído à baixa aderência entre a resina de poliéster e a superfície interna do tubo de aço. Para resolver o problema foi incorporada uma placa de borracha, com 10 mm de espessura, cortada no mesmo formato do suporte (Fig. 20). No teste seguinte percebeu-se a eficiência da mudança.



Fig. 20 - Posição da placa de vedação, de borracha.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os testes, ocorreram falhas no sensor de temperatura, comprometendo a coleta dos dados. Decidiu-se retirar o sensor de temperatura e realizar os experimentos apenas contando com dados de pressão.

Com base nos dados obtidos nos três experimentos foi possível comparar as curvas teórica e experimental da variação da pressão em função do volume (Fig. 4).

A velocidade de avanço do êmbolo foi estimada em 0,0056 m/s. A partir das dimensões do tubo e do intervalo de tempo de registro do sensor (100 milissegundos), estimou-se a variação do volume do ar no interior do tubo. Nas Fig. 21, 22 e 23 relaciona-se a variação da pressão em função do volume em cada experimento.

No primeiro experimento, a maior pressão registrada antes do rompimento da membrana atingiu cerca de 9,46 atm (Fig. 21).

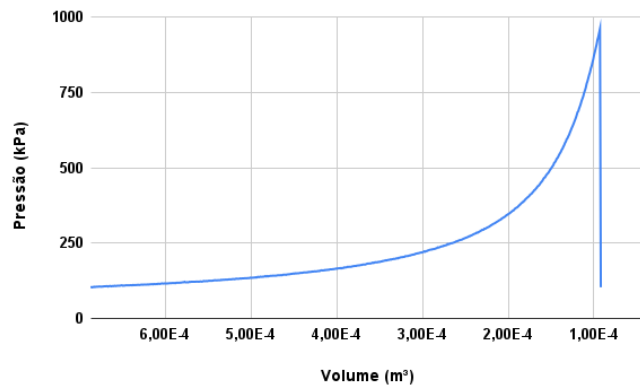


Fig. 21 - Representação gráfica da pressão no interior do tubo ao longo do tempo durante o primeiro experimento.

No segundo experimento, a pressão de ruptura foi menor, aproximadamente 8,17 atm (Fig. 22).

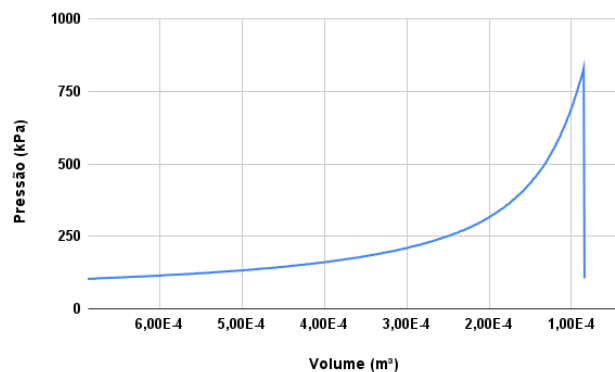


Fig. 22 - Representação gráfica da pressão no interior do tubo ao longo do tempo durante o segundo experimento.

No terceiro experimento, a pressão chegou a cerca de 6,71 atm (Fig. 23).

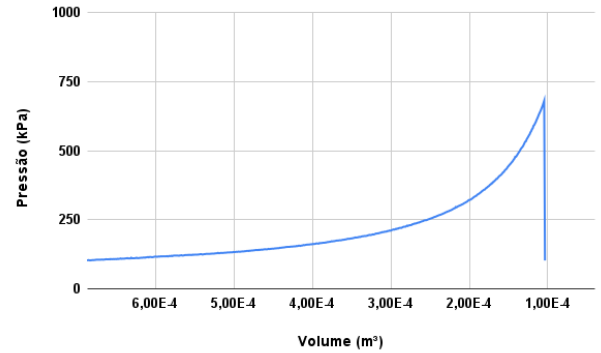


Fig. 23 - Representação gráfica da pressão no interior do tubo ao longo do tempo durante o terceiro experimento.

Na Fig. 24 apresentam-se as membranas rompidas em cada experimento.



Fig. 24 - Membrana após rompimento.

O sensor de pressão funcionou a contento, permitindo registrar rápida e seguramente variações de pressão durante os experimentos. Comparando-se dados dos experimentos à curva de pressão teórica (Fig. 4), como pode ser observado na Fig. 25, constata-se a concordância entre os valores. A diferença nas pressões de ruptura das membranas foi atribuída às diferentes espessuras de amostra e às diferentes pressões de fixação das flanges.

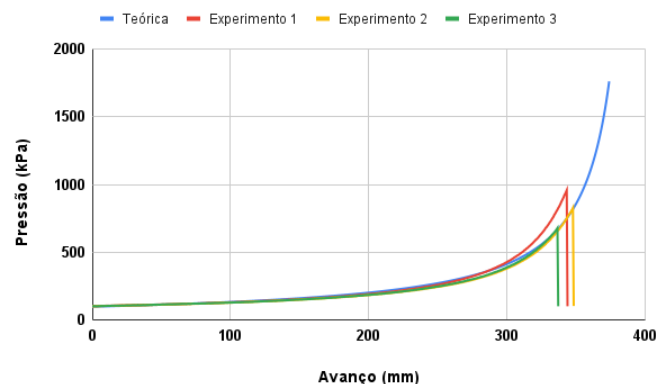


Fig. 25 - Comparação gráfica entre a pressão no interior do tubo teórica com as obtidas experimentalmente.

Nos experimentos, a ruptura da membrana ocorreu quando o êmbolo atingiu volume próximo ao mínimo teórico ( $0,00004 \text{ m}^3$ ); porém, as pressões registradas ficaram aquém da máxima teórica (17,38 atm). Ressalta-se que, próximo ao

final do curso do êmbolo, a pressão aumenta sobremaneira ao menor avanço, como se percebe na Fig. 25. Portanto, nos momentos finais da operação, essa ínfima variação no volume pode fazer a pressão se aproximar do limite teórico.

A partir da análise das membranas após os experimentos (Fig. 24), identificou-se que cada uma apresentou um pequeno rasgo na região central, indicando que a pressão obtida no experimento superou a resistência do material, resultando em sua falha estrutural, conforme planejado.

## 6. CONCLUSÃO

As curvas de pressão obtidas durante os testes, quando comparadas à curva teórica da Fig. 4, apresentaram significativa similaridade, comprovando a viabilidade da aplicação do dispositivo para análise de ruptura de membranas em vasos de pressão e em aulas práticas.

Com algumas modificações no projeto, o dispositivo pode ser utilizado para ensaios destrutivos, como por exemplo, em testes pertinentes à avaliação de estruturas aeroespaciais, como sugere Gholizadeh [10].

Os sensores de temperatura utilizados nos experimentos não foram adequados. Faz-se necessário aprimorar a confecção do suporte do motor por meio de uma chapa com maior espessura, para evitar flexão do material e conferir maior estabilidade ao dispositivo durante a operação. Os flanges podem ser redesenhados para melhorar a fixação dos sensores de pressão e temperatura no interior dos tubos, aumentando a proximidade à membrana e, assim, permitindo maior avanço do pistão, conseqüentemente, um aumento de pressão. Essas limitações podem ser facilmente contornadas mediante aporte de recursos financeiros.

Obrigatoriamente, toda e qualquer alteração no projeto deve ser precedida de novos cálculos de valores limites, necessários para determinação do novo fator de segurança.

## REFERÊNCIAS

- [1] HERTZBERG, R. W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 3rd ed. New York: Wiley, 1995.
- [2] HIBBELER, R. C. *Resistência dos Materiais*, 7ª ed. São Paulo, Pearson, 2010.
- [3] HARVEY, J. F. *Theory And Design Of Pressure Vessels*, 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1997.
- [4] SPENCE, J.; TOOTH, A. S. *Pressure vessel design: concepts and principles*. CRC Press, 2012.
- [5] NORTON, R. L. *Projetos de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*, 4ª ed. Ed. Bookman, 2013.
- [6] RODRIGUES, V. E. B. *Análise Estrutural de um Tubo de Choque Acadêmico*. BS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.
- [7] CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*, 2ª ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2013.
- [8] ASME, *Rules for Construction of Pressure Vessels*, 2002 Addenda ed., vol. Section VIII Division 1, New York: ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, 2002.
- [9] VILLAÇA, S. F.; GARCIA, L. F. T. *Introdução à Teoria*

*da Elasticidade*, 3ª ed.. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.

[10] GHOLIZADEH, S. *Impact behaviours and Non-Destructive Testing (NDT) methods in Carbon Fiber Composites in Aerospace Industry: A Review*. Authorea Preprints, 2022.





*Mens Agitat 18 (2023) 25-32*



*ISSN 1809-4791*

# EXPERIMENTAL AERODYNAMIC DRAG ANALYSIS OF A ROCKET MODEL WITH STRAIGHT AND ANGLED FINS

Luísa Mirelle Costa dos Santos<sup>1</sup>, Giovani Pozza Azoni<sup>2</sup>, George Santos Marinho<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Mechanical Engineering Department, Technology Center, Federal University of Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal/RN - Brazil. luisasantos98@hotmail.com*

<sup>2</sup> *Post-Graduate Program in Aerospace Engineering, School of Science and Technology, Federal University of Rio Grande do Norte, 59078-970, Natal/RN - Brazil. giovaniazoni@gmail.com, george.marinho@ufrn.br*

## Abstract

The drag generated by the fins attached to a model rocket was studied experimentally. Rocket models (designed for 100 meters of apogee) were tested in a didactic wind tunnel in two situations: with straight and angular fins (at 5° and 10°), under wind speeds of 3, 4, 5 and 6 m/s. The results obtained experimentally were compared to the results of the theoretical analysis, allowing a better understanding of the effect of the fins.

**Keywords:** Rocket models, didactic wind tunnel, fins, drag force.

## 1. INTRODUCTION

A rocket model is a small launch vehicle used to both educational and commercial purposes. It basically consists of an engine, frame and warhead, with or without accoupled fins (Fig. 1). In this context, a model rocket can be defined as a rocket that has no limitations on the materials used and is powered by an experimental or non-commercial engine [1].

Used for educational purposes, the rocket model allows engineering students to apply theoretical knowledge about aerodynamics, electronics, materials, propulsion and safety.

Propulsion, stability and safety are critical factors that must be considered by designers during the design stage. The ambient wind exerts a significant force on the trajectory of the model rockets, which can result in instabilities and deviation from the theoretically predicted route [2]. Small-scale rockets present specific challenges to designers, mainly regarding their stability – due to the drag generated during flight.

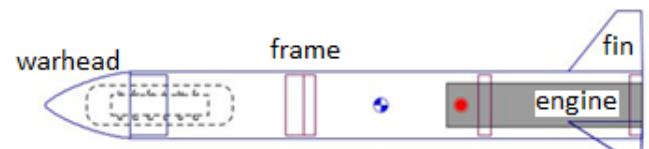


Fig. 1: Rocket model with straight fins.

### 1.1. Drag Force

Stability is essential to ensure the rocket flies safely. The stability of a rocket model refers to its ability to maintain a theoretically predictable flight path. In other words, the rocket can remain balanced and withstand external (e.g., wind) or internal (e.g., variations in propulsion) perturbations [2].

Since the flight of a rocket model is not controlled, aerodynamics is the only tool available to the designer.

Drag is an aerodynamic force acting in the opposite direction to the motion of the body - the force that a moving fluid exerts on a body in the direction of flow. The drag force can be experimentally measured using a load cell and is mathematically expressed as:

$$F_D = C_D * A * \frac{\rho V^2}{2} \quad (I)$$

Where  $F_D$  is the drag force (N),  $C_D$  is the drag coefficient (dimensionless),  $A$  is the cross-sectional area ( $m^2$ ),  $\rho$  is the specific mass ( $kg/m^3$ ) and  $V$  is the relative velocity between the body and the fluid ( $m/s$ ).

According to Eq. (I), the drag force increases proportionally to the cross-sectional area, the drag coefficient, the fluid density at 24 °C and the flow velocity [6]. The coefficient  $C_D$  depends on several physical parameters, including geometry, flow regime, angle of attack, surface roughness, and the variation of density with altitude [13].

For a rocket model, which flies for short intervals of time and at high speeds, the increase in aerodynamic drag results in instability. The use of fins can be an option to improve stability during flight.

## 1.2. Rocket Fins

A fin is a surface that extends from the body of the rocket to promote flight stability. A variety of fin shapes, sizes, materials and attachment modes are available to the designer.

Angular fins generate a rolling moment that reduces the harmful effects of wind, improving the stability of the rocket during flight. The study of the geometry and position of the fins allows quantifying the effects of aerodynamic forces and, therefore, the stability of the rocket [3,5].

As specified in Eq. (I), the area exposed to the flow increases the drag force. The cross-sectional area of a rocket model can be estimated by adding the areas of the circle (Eq. II) and the rectangle (Eq. III), corresponding to the cross-sections of the rocket and the fins, respectively, where the area of the rectangle is multiplied by the number “n” of fins.

$$A_c = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (II)$$

$$A_r = (b * h) * n \quad (III)$$

Where “d” is the rocket’s diameter (m), “b” is the fin thickness (m) and “h” is the height of the fin (m).

Eq. (III) is applicable to a straight-finned rocket. When the fin is angled, the flow cross-sectional area increases. Then, the projected area of the trapezoid must be added and the value multiplied by the number of fins, according to Eq. (IV).

$$A_t = \left( \frac{(L+l)*a}{2} \right) * n \quad (IV)$$

Where, in the area of the trapeze shaped fin (due to the angulation), “L” is the long side of the projected area of the fin (m), “l” is the short side of the projected area (m) and “a” is the height (m) between these sides of the projected area (including the “h” value).

To perform the drag force calculation, it is not necessary to consider the complete rocket area, but the frontal cross-sectional areas of the rocket with straight fins (Eq. V), 5° (Eq. VI) and 10° angled fins (Eq. VII).

$$A_{\text{straight}} = A_c + A_r \quad (V)$$

$$A_{5^\circ} = A_{\text{straight}} + A_{t5^\circ} \quad (VI)$$

$$A_{10^\circ} = A_{\text{straight}} + A_{t10^\circ} \quad (VII)$$

## 1.3. Theoretical investigation

Fin design requires reliable theoretical and experimental analyses. It is interesting to start studying the effects of fin coupling on rocket flight dynamics through computational simulations.

The *OpenRocket* software provides a fast approach to investigate rocket aerodynamic behavior [8]. However, in this case, it is important to be aware that there are limitations regarding the reproduction of real flight conditions.

## 1.4. Experimental investigation

Essential to the study of aerodynamics, the wind tunnel is a complex and expensive tool, therefore not always available. However, it is possible to obtain reasonable results through a didactic wind tunnel [10].

The didactic wind tunnel is a device used for experimental classes in Fluid Mechanics. It has some controlled conditions, such as temperature and wind speeds, and can generate air flows with characteristics relatively close to the flight environment of a rocket model.

Experiments in wind tunnels provide data on aerodynamic forces. The comparison between experimental and theoretical data (from computer simulations) allows a better understanding of the behavior of the model rocket [9,10].

## 2. MATERIAL AND PROCEDURES

Universities offering undergraduate engineering degrees must have laboratories equipped with an infrastructure that allows the eternal confrontation between theory and experiment. Unfortunately, this does not always happen, which forces the researcher to improvise. The present research was developed using low-cost instrumentation and self-built devices.

The objective of this study is to evaluate the drag generated by model rockets equipped with straight and angled fins (5° and 10°) under the influence of winds with velocities of 3, 4, 5 and 6 m/s. For this purpose, theoretical analysis was performed as well as experimental tests in a didactic wind tunnel with operating settings of minimum 3 m/s and maximum 6 m/s due to wind tunnel design limitation. These combined approaches allow a comprehensive and integrated analysis of the behavior of model rockets under different flight conditions.

## 2.1. Rocket Model

The rocket model considered in this study was designed by the Potiguar Rocket Design Members (PRD) to reach an apogee of 100 m and be operated from the Barreira do Inferno Launch Center (CLBI).

The CLBI provides a secure environment. However, high surface wind velocities (with average varying pose a challenge to the rocket stability, as they mainly influence the propelled phase of the rocket (up to 100 m), the wind average velocities are 3.5 to 4.2 m/s [4].

To provide necessary stability for the model rocket to face the wind, fins with different angles of attack were used. This option requires knowledge about the aerodynamic drag force generated by the fins.

The investigation of drag through experimental tests is done by means of a load cell, used to measure the total resulting force on the model.

The study consists of comparing theoretical data on the drag force on the model, obtained in computer simulation, with data from experiments in a wind tunnel, and observing the effects of changing the angle of attack of the fins: 5° and 10° in relation to straight fins. The rocket model and fins (Fig. 2) were built in a 3D printer.

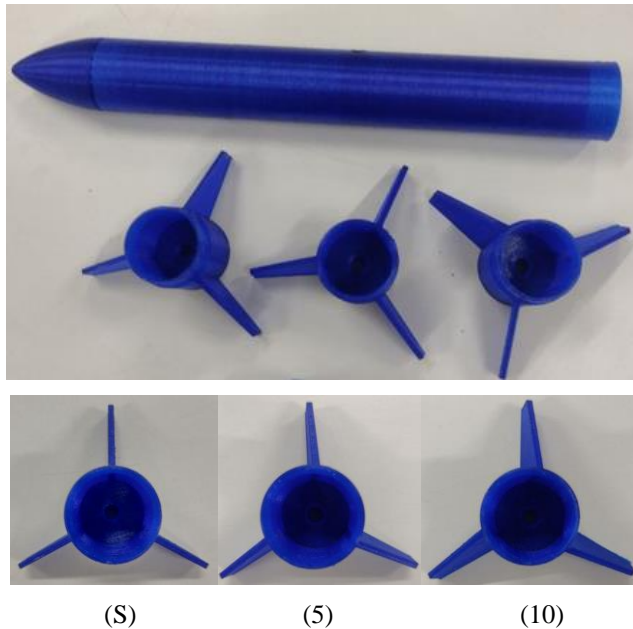


Fig. 2: 3D printed rocket model and fins.  
Angled fins: straight (S), 5° (5), and 10° (10).

The rocket model dimensions are: 0.245 m in length and 0.027 m in maximum diameter. The sketches of the rocket model and the three fins are presented in Figure 3.

The fins have equal dimensions (height = 0.025 m, root chord = 0.03 m, rope tip = 0.01 m, and thickness = 0.002 m), changing only the angle; thus, having different cross-sectional areas.

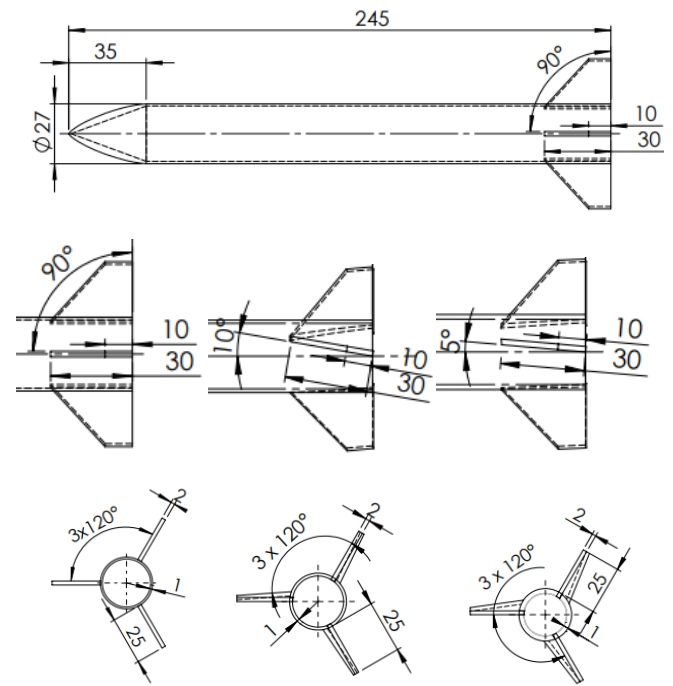


Fig. 3: Drawing of the rocket model and fins.

The masses of the rocket model and fins were measured using a digital scale, resulting in: model with straight fins = 0.051237 kg, model with 5° fins = 0.051221 kg, and model with 10° fins = 0.051208 kg, as can be seen in Figure 4. These mass differences can be a fused filament fabrication (FFF) derivation problem, due to the inaccuracy of polymer deposition.



Fig. 4: Measuring the mass of model rocket 3D printed.

The calculations of the cross-sectional areas were performed using the *SolidWorks* software. The model rocket has a diameter of 0.027 m and therefore a cross-sectional area

of approximately  $7.22 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . The cross-sectional areas of the fins are  $1.24 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  ( $5^\circ$ ) and  $1.84 \times 10^{-1} \text{ m}^2$  ( $10^\circ$ ).

## 2.2. Instrumentation

Before carrying out experiments in the didactic wind tunnel, the instrumentation and the wind tunnel itself were calibrated. Airflow was measured using a digital vane anemometer, which was previously compared to a digital hot wire anemometer.

The load cell was calibrated using a 0,5 kg steel disc, whose mass was determined at the UFRN Metrology Laboratory. This calibration was important to ensure reliability of data acquisition, as illustrated in Figure 5.

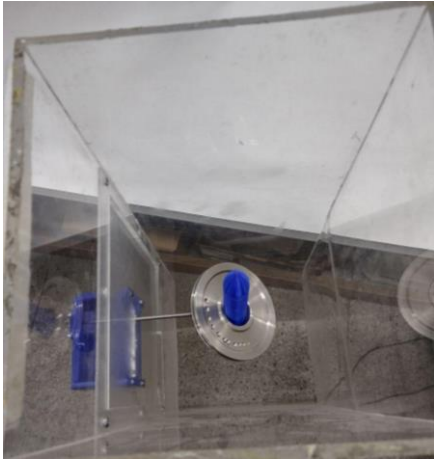


Fig. 5: Load cell during calibration procedures.

The load cell was connected to an analog-to-digital converter and the system was turned on. The fan was turned off and the wind tunnel was kept at rest. The system was then tared to establish the zero-reference point. A message was sent to request that a known mass be placed on the load cell. After 20 seconds for stabilization, the mass value was recorded and the value sent to the software, resulting in a calibration factor.

The calibration factor was stored in the instrument's memory. Data recording started after checking the load cell value through serial connection software. Logged data included date, time, minutes, seconds, and weight [10].

The model was balanced so that at the pivot point (where the fixing rod is located) there was no weight interference in the load cell - corresponding to a neutral balance.

Data were collected for one minute. The procedure was repeated four times for each fan speed considered in the experiment (3, 4, 5 and 6 m/s). During the anemometer calibration, it was observed that the speed presented a maximum variation of 0.2 m/s, as can be seen in Figure 6.

## 2.3. Preliminary Tests

The *OpenRocket* software was used to simulate the flow over the models, allowing to predict the behavior in flight under defined conditions. As input parameters, the characteristics of the engine developed by the PRD Team

were used: material density, wind at CLBI (average speed, direction, turbulence intensity), launch site coordinates, azimuth and launch angle.

The CLBI is located at latitude  $5.92^\circ \text{ S}$  and longitude  $35.16^\circ \text{ W}$  and 32 m above sea level. The average wind speed was considered to range from 6 to 7 m/s. The prevailing wind direction was  $135^\circ \text{ SE}$  [4]. The launch direction was selected to match the wind direction and thus result in maximum drag force. Atmospheric conditions and turbulence intensity were arbitrarily selected for the turbulent flow.

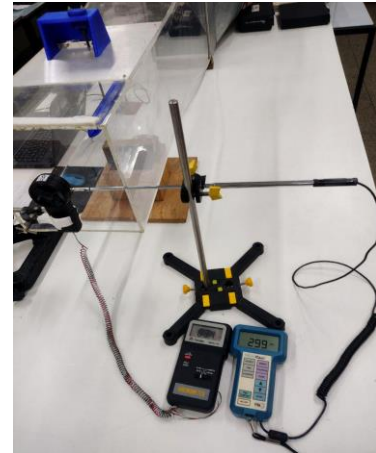


Fig. 6: Anemometer calibration set.

## 2.4. Wind tunnel tests

A set of practical experiments was carried out using a didactic wind tunnel (Fig. 7).

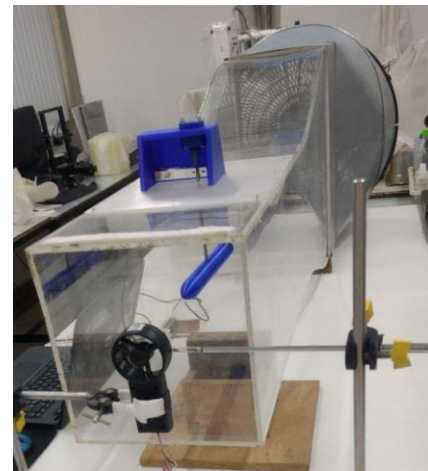


Fig. 7: The didactic wind tunnel.

The model was fixed in the test section of the wind tunnel (Fig. 8) and the drag force generated in each situation was measured and recorded. There were four experiments for each speed (3, 4, 5 and 6 m/s) and each fin angle ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$  and  $10^\circ$ ).

As the model built on a 3D printer became light (0.02887 kg), the drag values of the support rod itself were added to the total drag forces. Therefore, it was necessary to perform tests to determine the rod drag for each speed and then subtract the measured value from the total.

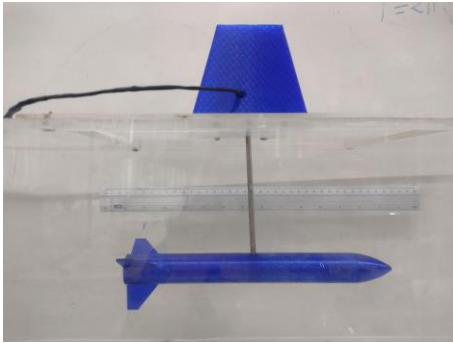


Fig. 8: Model rocket in the didactic wind tunnel.

### 2.5. Downsampling, Normalization, and Data Analysis

The data generated using the OpenRocket software corresponds to the general data of the rocket and its apogee. The collecting data in txt format (4 measurements of each fin configuration and each velocity of the wind tunnel = 600 measurements, with 1 minute each) were converted to csv., allowing processing through Excel software.

The data were normalized using the average drag force every second (10 points / second). The total average of the averages was calculated. The Weighted Moving Average (MMP) method was applied in time series analysis. In this method, a weight is assigned to each data of the second average; the sum of these data weights must be equal to one. This is because the data incorporate different weights from the previous ones. Thus, the line of force of drag is smoothed [11].

A comparison was made between the individual mean and the global mean. Then, the same procedure was applied to all global averages of the experiments, resulting in a final trend line, used to identify patterns or differences in drag force for each fin configuration and flow velocity. The drag force of the models was calculated using equations (I, II, III and IV) for each speed considered in the wind tunnel. The results obtained in the experiments and in the simulations were compared.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The values of the drag forces by the analytical and experimental methods were obtained through Eq. (I). Based on the 3D rocket model, for the straight fin ( $0^\circ$ ), the value of 0.75 was used [12]. In the case of models with angled fins ( $5^\circ$  and  $10^\circ$ ), the drag coefficients were obtained based on data from the literature, relative to the 3D cone, the short cylinder and the square, added and divided by three, resulting in 0.84. The fluid density for  $24^\circ\text{C}$  (experiment temperature) was considered equal to  $1.1839\text{ kg/m}^3$  [6].

For the areas of the frontal cross-sections of the models with straight fins (Eq. V), with an angle of  $5^\circ$  (Eq. VI) and with an angle of  $10^\circ$  (Eq. VII), the following results were obtained (calculated using the excel software):

$$A_{0^\circ} = 0.000722265\text{ m}^2 \quad (\text{V})$$

$$A_{5^\circ} = 0.000852765\text{ m}^2 \quad (\text{VI})$$

$$A_{10^\circ} = 0.000982515\text{ m}^2 \quad (\text{VII})$$

### 3.1. Drag Forces and Velocities

Analytical results for drag force as a function of speed are shown in Figure 9.

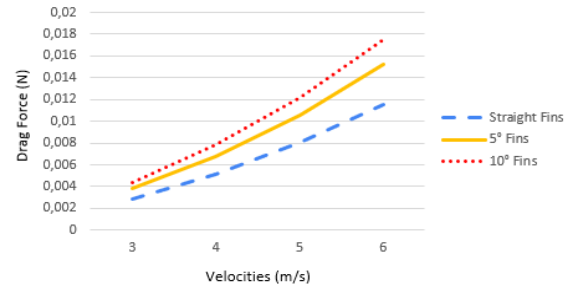


Fig. 9: Drag Force x Velocities - Analytical Results.

As observed (Fig. 9), at low velocities the variation in drag is small. As velocity increase, there is a considerable increase between the values between the configurations ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$  and  $10^\circ$ ). Experimental global averages of drag force as a function of velocity are presented in Figures 10, 11 and 12.



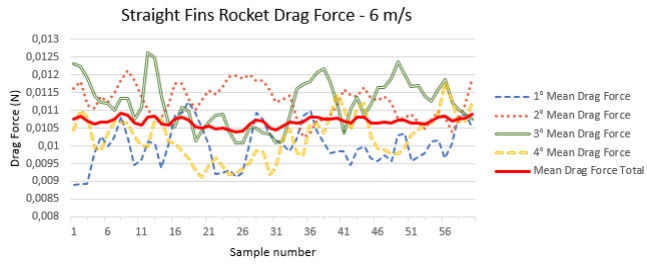


Fig. 10: 0° fins rocket drag force - experimental results.

In Figure 10, the values are approximately between 0.0025 and 0.0030; 0.0050 and 0.0055; 0.0075 and 0.0080; 0.0105 and 0.0110 for all four straight fin rocket drag experiments.

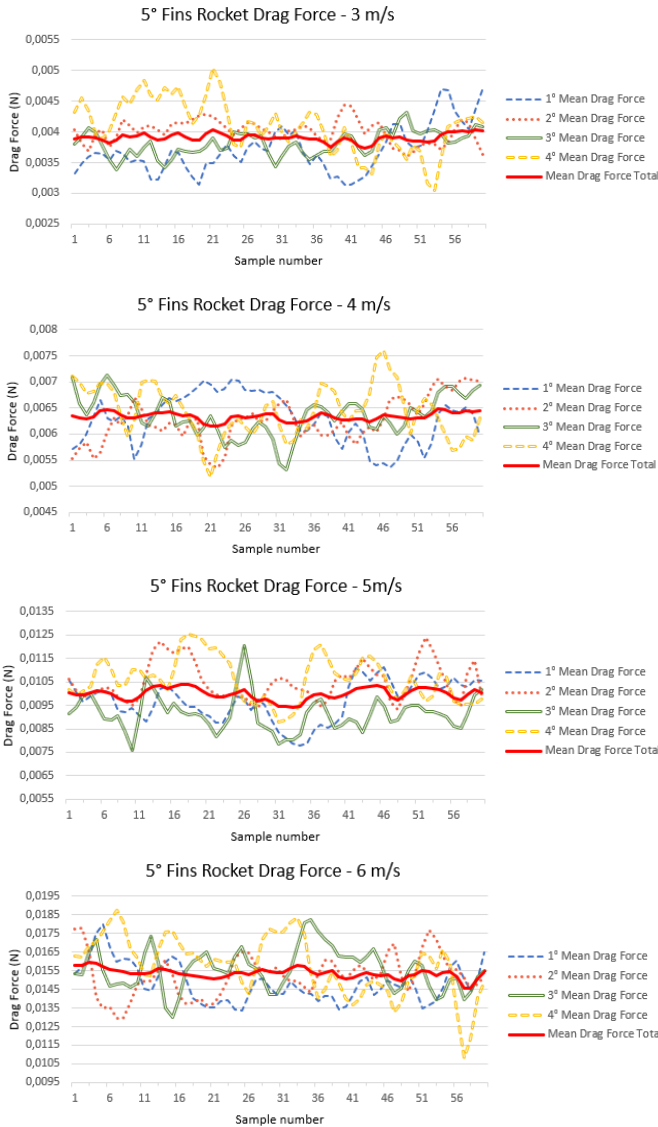


Fig. 11: 5° fins rocket drag force - experimental results.

In Figure 11, the values are approximately between 0.0035 and 0.0040; 0.0060 and 0.0065; 0.0095 and 0.0105; 0.0145 and 0.0155 for all four straight fin rockets drag experiments.

In Figure 12, the values are approximately between 0.0040 and 0.0045; 0.0075 and 0.0085; 0.0115 and 0.0125; 0.0155 and 0.0175 for all four straight fin rockets drag experiments.

Since the didactic wind tunnel is intrinsically turbulent, low wind velocities are difficult to measure. This is a consequence of the low mass of the models used in the experimental analysis. So, calibration was quite laborious, and the resulting drag force was quite low – around a tenth of a gram.

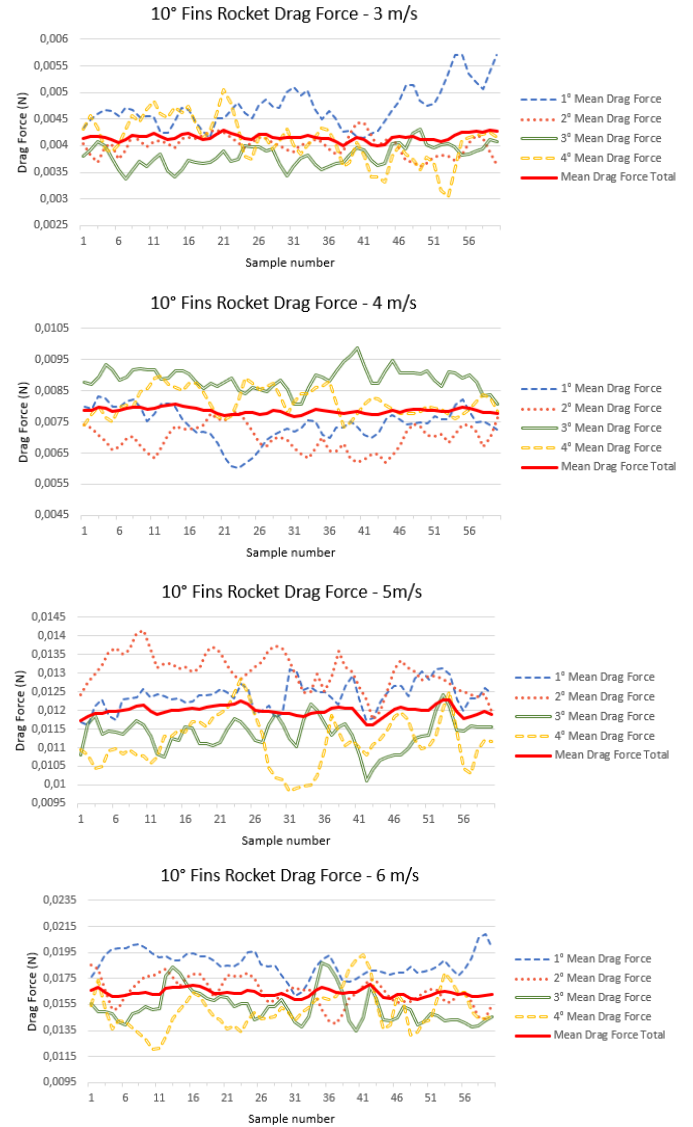


Fig. 12: 10° Fins Rocket Drag Force - Experimental Results.

Drag force versus velocity for each global average of fins configurations are presented in Figures 13, 14 and 15.

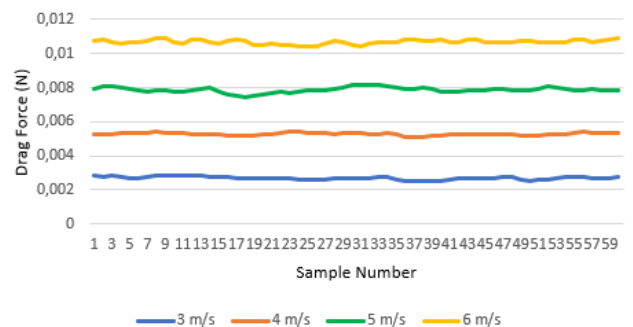


Fig. 13: 0° fins rocket drag force x total velocities (Experimental).

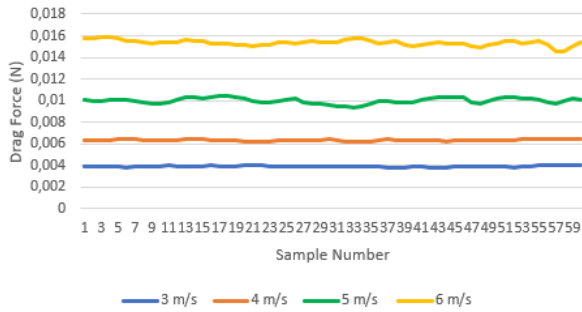


Fig. 14: 5° fins rocket drag force x total velocities (Experimental)

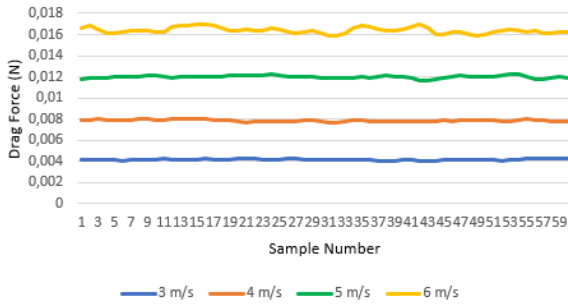


Fig. 15: 10° fins rocket drag force x total velocities (Experimental)

As observed in Figures 13, 14 and 15, with the progressive increase in the speed and angle of the fins, there is an increase in the drag forces acting on the rocket models [3,5].

**3.2. Analytical x experimental  $F_D$  x  $V$  comparison**

The comparison between the analytical and experimental results are presented in the figures 16, 17 e and 18.

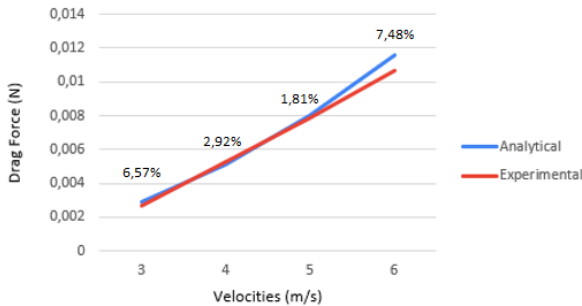


Fig. 16: 0° fins,  $F_D$  x  $V$  - Analytical x Experimental.

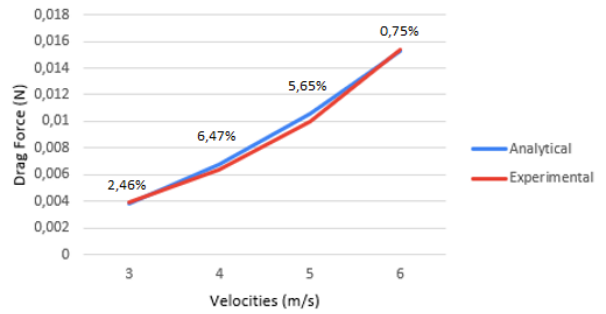


Fig. 17: 5° fins,  $F_D$  x  $V$  - Analytical x Experimental.

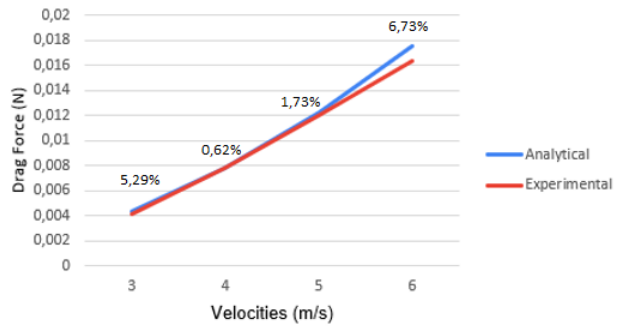


Fig. 18: 10° fins,  $F_D$  x  $V$  - Analytical x Experimental.

Observing Figures 16, 17 and 18, it appears that the discrepancies are within the expected range. Therefore, there was consistency in the deviations, reinforcing the credibility of the experiments.

Comparing the theoretical and experimental results, it can be deduced that the experiments in the didactic wind tunnel allowed the theoretical results to be reliably reproduced with a maximum error of 7.48 % (for the  $F_D$  of the model with 0° vane and at 6 m/ s).

As expected, the drag produced by the rocket models increases with increasing flow velocity and fin angle. Small differences (less than 1%) were found when comparing the values between straight and 10° fins.

The errors found were acceptable for a turbulent wind tunnel designed for didactic purposes. In any case, there is a possibility that the mass of the model is a factor causing the errors observed in the experiments. In addition, the vibration of the equipment itself must be considered. This may be associated with the oscillations found in the values.

**4. CONCLUSION**

A comprehensive analysis of the behavior of model rockets under different flight conditions was obtained through experimental tests and theoretical data.

The drag force generated by the fins of a rocket model was quantified in experiments conducted in a didactic wind tunnel.

The solution adopted by members of the PRD to improve the stability of the model rocket was the incorporation of angled fins. These fins, while generating a rolling moment,

provide a stabilizing force that counteracts the effects of wind. Thus, the fins increase the rocket's ability to maintain a predictable trajectory during flight [3,5,6].

As the objective of the work was to achieve the best stability through the angulation of the fins and thus to study the value of the drag generated by each configuration, the 10° angled fin is the most efficient, according to the results. This is because reliability is increased by improving the stability observed by the *OpenRocket* software and there is still a small increase in drag compared to straight fin, about less than 1%.

The experimental errors were low. The errors were possibly due to the constant variation generated by the vibration and also because the masses and the object of study were small. Therefore, this error in each experiment had an impact on the final results and was identified as a potential source of overall error.

Model rockets, although scaled down, share many of the same principles and technical challenges faced by commercial rockets. They provide a valuable opportunity for students to apply theoretical and practical concepts, understand how technology works, and enhance their skills in design, manufacturing, and testing, preparing them for market challenges and driving innovation in the aerospace industry [7].

## ACKNOWLEDGEMENTS

The Authors are grateful to the Mechanical Engineering Department of Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN), Brazil, for all the necessary support to the experimental tests; and to the Members of the Potiguar Rocket Design – PRD / UFRN, for the support with tools necessary for the assembly of the experimental devices.

## REFERENCES

- [1] BAR. Brazilian Association of Rocketry. Norma BAR-2/2020: Basic Nomenclature of Rocketry. São Paulo, 2020.
- [2] Centuri engineering company. Technical information report 30. Phoenix, Arizona, 1970.
- [3] Ferreira W, Ferreira J, Peixoto K, Saldanha, R, Silva J, Eds. Análise de estabilidade e força de arrasto em minifoguetes com aletas inclinadas e normais utilizando o software *OpenRocket*. Proceedings of the XX Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial; 2020 Nov 11-13; Brasília, Brazil. DOI: 10.29327/conemi.298710.
- [4] Gomes HR. Avaliação de eficiência da operação de foguetes de sondagem: uma abordagem com network DEA e teoria dos jogos. Masters dissertation. Natal (RN): Federal University of Rio Grande do Norte 2021.
- [5] Santos L, Carvalho L, Dantas J, Maia F, Marinho G, Eds. Análise numérica comparativa de rolamento e força de arrasto entre minifoguetes com aletas normais e inclinadas. Proceedings of the XX Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial; 2020 Nov 11-13; Brasília, Brazil. DOI: 10.29327/conemi.298710.
- [6] Çengel YA, Cimbala JM. Fluid mechanics: Fundamentals and applications. 1st ed. New York: McGraw-Hill 2006, pp. 490-532.
- [7] Cook J, Strehle M, Schaefer J, *et al.* (2019, June). Student activities, research, and development in high-power rocket propulsion and systems engineering. Proceedings of the 126th American Society for Engineering Education: Annual Conference & Exposition; 2019 Jun 15-19; Florida, United States of America. DOI: 10.18260/1-2--33289.
- [8] Bunkley J, Caballes M, Ajuwon M, Chen G. Design analysis of rocket tail fins aimed at higher apogee by computer simulation. Proceedings of the Spring American Society for Engineering Education: Middle Atlantic Section Conference; 2022 Apr 22-23; New Jersey, United States of America.
- [9] de Souza Junior D, Ferreira G, Leta F. Desenvolvimento de um túnel de vento compacto para simulações didáticas de projetos de engenharia mecânica. Proceedings of the VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica; 2012 Jul 31 - Aug 03; Maranhão, Brazil.
- [10] Azoni, G. Análise do arrasto aerodinâmico em carenagem de contenção de paraquedas de drone. Undergraduate thesis. Natal (RN): Federal University of Rio Grande do Norte 2022.
- [11] dos Reis Santos L, da Silva H, Novôa, N. Proposta de modelo de demanda e planejamento agregado para um frigorífico. Proceedings of the Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia; 2015 Oct 28-30; Rio de Janeiro, Brazil.
- [12] Marchi C. Capítulo 4: Aerodinâmica de foguetemodulo. Curso: Projeto e Teste de Minifoguete; January 2020 [cited: 07<sup>th</sup> July 2023]; [about 13 p.]. Available from: [http://servidor.demec.ufpr.br/foguete/apostila/Capitulo-4\\_Aerodinamica\\_de\\_foguete\\_v3b.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/foguete/apostila/Capitulo-4_Aerodinamica_de_foguete_v3b.pdf)
- [13] Cogo, M. Foguete experimental com carga-paga de tipo CanSat: metodologia e projeto. Undergraduate thesis. São João da Boa Vista (SP): Paulista State University 2022.





## **A new procedure for synthesis of copper(II) carbonate by the chemical reactions between three cupric salts and urea at elevated temperature: Microanalytical and infrared spectroscopic investigations**

Mohamed S. Hegab

*Department of Chemistry, College of Science, Taif University, P.O. Box 11099, Taif 21944, Saudi Arabia  
m.hegab@tu.edu.sa & mohamed1010@hotmail.com*

### **Abstract**

The main purpose of this article was to study the coordinated decomposition method of urea in copper-urea complexes in aqueous media at high temperature. This enables us to compare the degradation pathway of coordinated urea known as free urea. It was shown that the reaction products obtained during the reaction of urea with metal ions depend not only on the type of metal ion but also on the nature of the metal salt used in the reaction. Cupric (II) carbonate,  $\text{CuCO}_3$  was synthesized by a new simple method during the reaction of aqueous solutions of  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$  with urea at  $\sim 90^\circ\text{C}$  for about 10 hrs. The green solid reaction products were characterized by elemental analysis and infrared spectroscopy. The IR spectra clearly indicate the characteristic bands of the ionic carbonates and the absence of all band characteristics of the coordinated urea. A general mechanism describing the coordinated decomposition of urea and formation of cupric(II) carbonate at high temperature has been proposed.

**Keywords:** Cupric(II) salt;  $\text{CuCO}_3$ ; urea; aqueous media; infrared spectra; elemental analysis; new procedure.

### **1. Introduction**

Raman and infrared spectra of urea have been observed by many researchers [1-6]. The natural vibrations of the urea molecule were calculated by Kellner [7] assuming the non-planar model. However, based on the coupled measurement of the infrared band arising from the N-H stretching vibration by Waldron and Badger [8] and the proton magnetic resonance absorption measurement performed by Andrew and Hyndman [9], it was concluded that the urea molecule has a planar structure. Yamaguchi et al. [10] calculated the natural vibrations of the  $\text{C}_{2v}$  model of the urea molecule as an eight-body problem using a potential function of the Urey-Bradley force field and obtained the force constants that were refined

by the least squares method. Based on the result of these calculations, Yamaguchi [10] assigned all observed frequencies in the spectra of urea and urea-d<sub>4</sub>. For the 1686 and 1603  $\text{cm}^{-1}$  frequency vibrations, there are significant contributions of both CO stretching motions and  $\text{NH}_2$  bending motions, while Stewart [11] assigned the 1686  $\text{cm}^{-1}$  band to the CO stretching vibration and the 1603  $\text{cm}^{-1}$  band to the  $\text{NH}_2$  bending motion. Calculations studied by Yamaguchi showed that for a band with a length of 1686  $\text{cm}^{-1}$  the contribution of the bending motion of  $\text{NH}_2$  is greater than that of the extending motion of CO. The band at 1629  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the bending vibration of almost pure  $\text{NH}_2$ . The bending motion of  $\text{NH}_2$  type A<sub>1</sub> is equal to the bending motion of type

B2. The A1 band frequency should be about  $1630\text{ cm}^{-1}$  if there is no coupling between the bending motions of  $\text{NH}_2$  and the stretching of CO. On the other hand, the observed frequency of  $1610\text{ cm}^{-1}$  of urea- $d_4$  is for almost pure skeletal vibration. Therefore, the interaction between the  $1630$  and  $1610\text{ cm}^{-1}$  vibrations gives rise to the observed bands at  $1686$  and  $1603\text{ cm}^{-1}$ . The IR bands of urea- $d_4$  observed at  $1245$  and  $1154\text{ cm}^{-1}$ , respectively, were assigned to A1-type, B2-type and ND2 bending vibrations. This assignment is consistent with the degrees of depolarization observed for the Raman lines. The large frequency difference between the A1 and B2 vibrations is because in the A1 vibration, the cross term associated with the CN stretching vibration is large. The urea frequency of  $1464\text{ cm}^{-1}$  was assigned to the B2 type CN extension vibration. The corresponding frequency for urea- $d_4$  is observed at  $1490\text{ cm}^{-1}$ . The band  $1150\text{ cm}^{-1}$  was assigned to the  $\text{NH}_2$  rocking vibrations of both types A1 and B2. Calculating normal vibration results in approximately the same values for these frequencies.

Urea has two types of potential donor atoms, carbonyl oxygen and amide nitrogen. Penland et al. [12] studied the infrared spectra of urea complexes to determine whether coordination occurs through oxygen or nitrogen atoms. Coordination spectra of urea complexes with Pt(II) and Cr(III), where coordination occurs through nitrogen and oxygen atoms, respectively [12]. The way urea coordinates with metal ions appears to depend on the type and nature of the metal. Pd(II) coordinates with nitrogen, while Fe(III), Zn(II), and Cu(II) coordinate with urea oxygen [12]. IR spectra of urea complexes Zn(II) and Cu(II) [13-17],  $[\text{Cu}(\text{urea})_2\text{Cl}_2]$ ,  $[\text{Zn}(\text{urea})_2\text{Cl}_2]$  and  $[\text{Zn}(\text{urea})_2(\text{CH}_3\text{COO})_2]$  [18], very similar to the spectra of  $[\text{Cr}(\text{urea})_6]\text{Cl}_3$  and  $[\text{Fe}(\text{urea})_6]\text{Cl}_3$ . This similarity reveals the presence of O-M coordinate bonds in Cu(II) and Zn(II) urea complexes. The current research was carried out to study the effect of changing metal ion anions on the nature of the products of the reaction of urea with three copper (II) salts at a high temperature  $\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$  in aqueous media. The reaction products were characterized by elemental analysis and infrared spectra analysis.

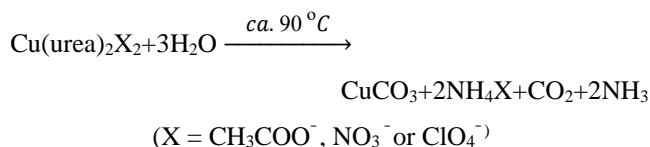
## 2. Experimental

Reagent chemicals were used throughout.  $\text{CuCO}_3$  was prepared by mixing equal amounts of aqueous solution (100 mL) of 2 mmol of copper(II) salts,  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$ , with 100 mL of aqueous solution (16 mmol) of urea. The reaction mixtures were heated to approximately  $90\text{ }^\circ\text{C}$  for 10 h in a water bath. The green precipitate products were filtered, washed several times with hot water, dried at  $90\text{ }^\circ\text{C}$  in an oven for three hours, and then in vacuo over anhydrous  $\text{CaCl}_2$ . The yield of cupric carbonate obtained is in the range of 80 to 87% depending on the type of anion bound to the cupric ion. Elemental analysis (C, H and N contents were measured using a Perkin Elmer CHN 2400 (USA)) of cupric carbonate obtained during the reaction of urea with cupric acetate, nitrate or perchlorate were almost the same and indicated the absence of nitrogen. Analysis of the obtained products:  $\text{CuCO}_3$  (123.55 g/mol) C, 9.69(9.71); Copper, 51.24 (51.44). The calculated values are shown in parentheses. The carbonate content of the  $\text{CuCO}_3$  product was

determined using a standard hydrochloric acid solution, [19] while cupric(II) was determined gravimetrically as cupric oxide which is stable after ignition. The infrared spectra of urea and chemical products in potassium bromide tablets were recorded using a Gensis II FT IR spectrophotometer. The contents of copper(II) in the compound solutions were determined using the atomic absorption technique. An atomic absorption spectrometer model PYE-UNICAM SP 1900 and corresponding lamps were used for this purpose.

## 3. Results and discussions

A green solid product is produced during the reaction of urea with copper(II) salts at a temperature of about  $90\text{ }^\circ\text{C}$  in aqueous media. The infrared spectra of the free urea and the solid product are shown in Figure 1, and their band assignments are given in Table 1. The infrared spectrum of the green solid product shows no bands due to the coordinated urea but a set of bands characteristic of the ionic carbonate,  $[\text{CO}_3]^{2-}$  present. Accordingly, to the data obtained from the elemental analysis of the products, with their IR spectrum as well as the determination of  $\text{CO}_3^{2-}$  with HCl and that the IR spectrum of commercially obtained  $\text{CuCO}_3$  is the same as that of the reaction product. The obtained product is defined as  $\text{CuCO}_3$ . The infrared assignments agree well with those generally known for carbonate ionic  $\text{CuCO}_3$ . However, in some cases [21], the same metal carbonate products,  $\text{MnCO}_3$ ,  $\text{CoCO}_3$  and  $\text{PbCO}_3$  were obtained regardless of the associated counter ions of cadmium(II), zinc(II), cobalt(II), and manganese(II) ions. In this study, we obtained the same reaction product,  $\text{CuCO}_3$ , using copper ions with different counter ions, for example  $(\text{CH}_3\text{COO}^-)$ ,  $(\text{NO}_3^-)$ ,  $(\text{ClO}_4^-)$ . The formation of this compound when heating an aqueous mixture of copper (II) acetate, nitrate and perchlorate can be understood as follows. At room temperature, the compound  $[\text{Cu}(\text{urea})_2\text{X}_2]$  [18] is formed where urea coordinates with the Cu(II) ion via its oxygen atom. At high temperatures the following reactions may occur giving the corresponding metal carbonate.

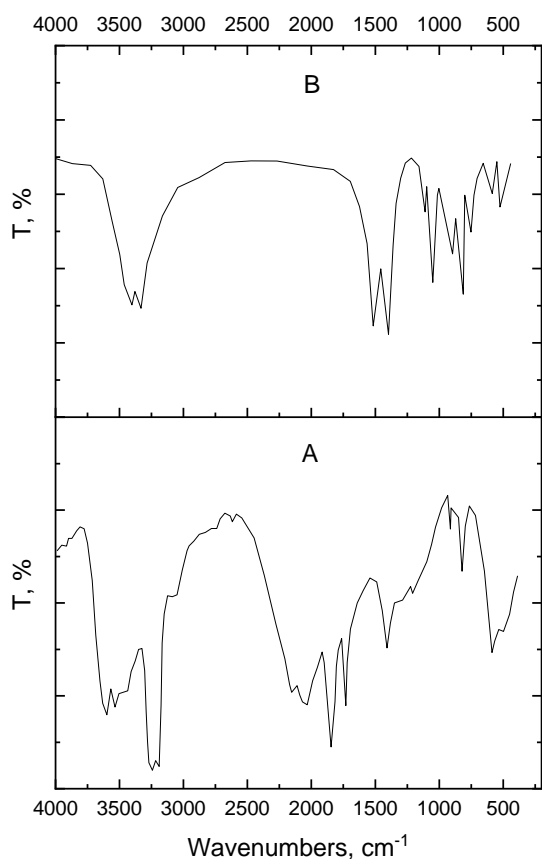


**Table 1.** Infrared frequencies<sup>a</sup> ( $\text{cm}^{-1}$ ) and assignments<sup>b</sup> for  $\text{CuCO}_3$  formed in the reaction of  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$ , with urea at  $\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ .

$\text{cm}^{-1}$ <sup>a</sup>	Assignments <sup>b</sup>
1518 vs 1398 vs 1055 s	$\nu(\text{C-O})$ ; $\text{CO}_3$
815 s 747 ms	$\delta(\text{OCO})$ ; $\text{CO}_3$
584 w 524 ms	$\nu(\text{Cu-O})$ ; $\text{CuCO}_3$

<sup>a</sup> br, broad; m, medium; sh, shoulder; s, strong; w, weak

<sup>b</sup>  $\nu$ , stretching;  $\delta$ , bending.



**Fig. 1.** Infrared spectra of A: urea free ligand; B:  $\text{CuCO}_3$  formed in the reaction of  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{Cu}(\text{ClO}_4)_2$ , with urea at  $\sim 90^\circ\text{C}$ .

## References

1. T. J. Bhoopathy, M. Baskaran and S. Mohan, *Indian J. Phys.*, 62 B (1), 47 (1988).
2. A. Yamaguchi, R. B. Penland, S. Mizushima, T. J. Lane, Columba Curran and J. V. Quagliano, *J. Amer. Chem. Soc.*, 80, 527 (1958).
3. J. L. Duncan, *Spectrochim. Acta, Part A*, 27, 1197 (1970).

4. G. B. Aitken, J. L. Duncan and G. P. Mc Quillan, *J. Chem. Soc. A*, 2695, (1971).
5. D. Hadzi, J. Kidric, Z. V. Knezevic and B. Barlic, *Spectrochim. Acta, Part A*, 32, 693 (1976).
6. Sib Sankar Bala and Pradip N. Ghosh, *J. of Molecular Structure*, 101, 69 (1983).
7. L. Kellner, *Proc. Roy. Soc., A* 177, 456 (1941).
8. R. D. Waldron and R. M. Badger, *J. Chem. Phys.*, 18, 566 (1950).
9. E. R. Andrew and D. Hyndman, *Proc. Phys. Soc., A* 66, 1187 (1953).
10. A. Yamaguchi, T. Miyazawa, T. Shimanouchi and S. Mizushima, *Spectrochim. Acta*, 10, 170 (1957).
11. J. E. Stewart, *J. Chem. Phys.*, 26, 248 (1957).
12. R. B. Penland, S. Mizushima, C. Curran and J. V. Quagliano, *J. Amer. Chem. Soc.*, 79, 1575 (1957).
13. Yu. Ya. Kharitonov and T. N. Gushchina, *Zh. Neorg. Khim.*, 33(3), 808 (1988).
14. M. Koman, E. Jona and D. Nagy, *Z. Kristallogr.*, 210(11), 873 (1995).
15. Z. Ye, H. Zhang, R. Yang, M. Cai, W. Chen and W. He, *Fuzhou Daxue Xuebao, Ziran Kexueban*, 22(5), 97 (1994).
16. K. Gyoryova and V. Balek, *J. Therm. Anal.*, 40(2), 519 (1993).
17. V. F. Resnyanskii, D. K. Sulaimankulova, V. A. Kuznetsov, K. S. Sulaimankulov and M. D. Davranov, *Kristallografiya*, 38(5), 212 (1993).
18. O. Yar and L. Lessinger, *Acta Crystallogr., Sect. C Cryst. Struct. Commun. C* 51(11), 2282 (1995).
19. Vogel, "Qualitative Inorganic Analysis", John Wiley & Sons, Inc. New York (1987).
20. K. Nakamoto, "Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds", Wiley, New York, (1978).
21. Ghaferah H. Al-Hazmi, Khuloud A. Albrahim, M.S. Refat, Omar B. Ibrahim, Abdel Majid A. Adam, Sonam Shakya, *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 36(2), 363-372 (2022).

\* Corresponding author at: *Department of Chemistry, College of Science, Taif University, P.O. Box 11099, Taif 21944, Saudi Arabia*  
*m.hegab@tu.edu.sa & mohamed1010@hotmail.com*



## Predição e Descoberta dos Buracos Negros

José Carlos Teixeira de Oliveira

*Departamento de Física, Universidade Federal de Roraima, Campus do Paricarana, Av. Cap. Ene Garcez, 2413, Bairro Aeroporto, 69310-000, Boa Vista-RR. E-mail: jose.oliveira@ufrr.br*

### Abstract

*In the present article, we show how black holes were predicted and discovered. This history starts with the birth of general relativity in 1915 and it has recent achievements, the last one being the recognition of the Nobel Prize Committee in 2020, for its discovery.*

**Keywords:** Black Holes; Theory of General Relativity; Event horizon Telescope; Sagittarius A\*.

### 1. INTRODUÇÃO

O primeiro pesquisador a propor a existência de buracos negros foi o filósofo e geólogo inglês John Michell (1724-1793), em 1784, num artigo publicado na Royal Society de Londres, quando intitulou estes objetos maciços de “estrelas escuras”. Após onze anos, o matemático, astrônomo e físico francês Pierre Simon Laplace (1749-1827) promoveu esta ideia na primeira edição de seu livro, intitulado: “Exposition du systême du Monde” [1].

Na época, tanto John Michell, quanto Pierre Laplace, usaram a física newtoniana para seus cálculos, o que exige duas condições para que eles fossem válidos: que a luz fosse corpuscular e que tivesse massa. Porém, em 1801, o médico e físico inglês Thomas Young (1773-1829) descobriu a natureza ondulatória da luz, o que fez com que os referidos

cálculos que previam a existência de estrelas escuras se tornassem obsoletos e, então, a ideia caiu por terra.

Foi apenas com o nascimento da Teoria da Relatividade Geral do físico alemão Albert Einstein (1879-1955), em 1915, que se conseguiu explicar como a gravidade afeta ondas e, portanto, como afeta a luz [2].

### 2. A TEORIA DOS BURACOS NEGROS

Em 1916, com menos de um ano após o nascimento da Teoria da Relatividade Geral, o físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) obteve a primeira solução das Equações de Einstein [3]. A *Solução de Schwarzschild* descreve o campo gravitacional de uma partícula pontual massiva (sem carga e sem rotação). Ao redor da partícula, a uma distância  $r_s = 2MG/c^2$ , onde  $c$  é a velocidade da luz e  $G$  é a constante gravitacional de Newton, apresentava uma

região problemática [2]. Associado a esta região temos o chamado *raio de Schwarzschild*, representado por  $r_s$ . Este raio parecia delimitar uma região inalcançável para quem está no exterior da esfera. Na época, acreditava-se que um observador numa trajetória radial indo em direção a tal objeto demoraria um tempo infinito para atingir este raio, nunca cruzando-o. E também, algo que estivesse dentro desta esfera nunca conseguiria sair [2, 3]. Portanto, a *Solução de Schwarzschild* apresenta em sua formulação duas singularidades (pontos ou regiões onde as leis universais não se aplicam): uma na origem do sistema de coordenadas, onde a massa se concentraria, e uma radial, o *raio de Schwarzschild*, que na época acreditava-se delimitar uma região para qual a solução não mais seria válida [3].

Ainda em 1916 e 1918, de forma independente, o matemático alemão Hans Jacob Reissner (1874-1967) e o físico teórico finlandês Gunnar Nordström (1881-1923) encontraram uma solução para uma massa pontual carregada. Esta ficou conhecida como *Solução de Reissner-Nordström*. Em 1923, o matemático americano George David Birkhoff (1884-1944) provou que o campo gravitacional de todo corpo esfericamente simétrico é descrito pela *Solução de Schwarzschild*, ou seja, não apenas os de partículas sem dimensão, mas também os de estrelas pulsando, por exemplo [2].

Na década de 1930, alguns avanços teóricos começavam a apontar para a existência de estrelas colapsadas, isto é, que cedem sob seu próprio peso e contraem-se além do *raio de Schwarzschild* devido a sua força gravitacional. Foi também nessa década que estes corpos receberam o nome de *objetos colapsados pela gravidade* [2]. Em 1933, o físico belga Georges Henri Lemaître (1894-1966) demonstrou que o *raio de Schwarzschild* não era uma barreira intransponível, isto é, ele é uma *singularidade aparente*. Considerando um observador comóvel, que se move junto com o objeto em direção ao centro, pode-se não apenas atingir o *raio de Schwarzschild*, como também ultrapassá-lo em tempo finito. Mais tarde, nesta mesma década, o matemático e físico americano Howard Percy Robertson (1903-1961) percebeu que, embora seja preciso um tempo finito para chegar ao interior desse raio, trajetórias na direção oposta, partindo de dentro, nunca cruzariam essa barreira de volta. Aquilo que adentra o *raio de Schwarzschild*, nunca escapa [3].

A percepção de que o *raio de Schwarzschild* é uma singularidade aparente não era suficiente para concluir que objetos compactos como buracos negros poderiam existir. A *Solução de Schwarzschild* fornece uma fórmula para o campo gravitacional de um objeto esfericamente simétrico, como uma estrela ou uma partícula, por exemplo. Porém, há outras forças que atuam sobre esses corpos esféricos que poderiam contrabalancear à gravitacional impedindo a existência de objetos com raios menores do que o de Schwarzschild [3].

Na tentativa de explicar a formação de tais corpos, o astrônomo inglês Arthur Stanley Eddington (1882-1944) já havia apresentado, em 1926, uma teoria detalhando a constituição interna de estrelas, que se tornou o modelo

padrão para estrelas na década seguinte, até a descoberta da fusão e fissão nucleares em 1939. Neste modelo, estrelas são formações esféricas de um gás perfeito e “a pressão elétrica, a pressão gasosa e a pressão de radiação” a manteriam em equilíbrio com a força gravitacional, onde seus raios seriam sempre maiores do que o de Schwarzschild [2, 3].

O modelo estelar de Arthur Eddington, na década de 1930, começou a ser questionado com o advento de técnicas estatísticas para estudar a constituição das estrelas. O físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), então doutorando em Cambridge, Inglaterra, e o físico e matemático soviético Lev Davidovich Landau (1908-1968) usando a Relatividade Restrita ao invés da Relatividade Geral, descobriram que havia uma densidade máxima para as estrelas anãs brancas e estrelas de nêutron, respectivamente. Isso implicaria que estrelas supermassivas colapsariam sob a influência do próprio campo gravitacional, porém, nenhum dos dois sugeriu essa conclusão. Chandrasekhar preferiu se abster de comentar sobre os destinos das estrelas com massas maiores ao limite encontrado por ele, enquanto que Landau postulou que as leis conhecidas da física não valeriam mais em tais casos, argumentando que estrelas não demonstravam essa “tendência” de se contraírem até um ponto singular [2].

Em 1934, o matemático, físico e químico americano Richard Chace Tolman (1881-1948) escreveu um importante tratado descrevendo a termodinâmica usando a relatividade geral, o que influenciou o físico teórico americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) a reanalisar o resultado de Landau usando essa descrição da termodinâmica. Oppenheimer juntamente com o físico americano Hartland Snyder (1913-1962), publicam um artigo, onde eles concluem que estrelas supermassivas, com massas superiores as das estrelas de nêutron, se contraíam indefinidamente e em tempo finito até um ponto, prevendo a existência de *objetos completamente colapsados pela gravidade* [2].

### 3. A INSISTÊNCIA DA HIPÓTESE DO EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO PERMANENTE

A existência de buracos negros era considerada absurda nas primeiras duas décadas após o nascimento da teoria da relatividade geral. Para entender o porquê, é necessário analisar também o contexto filosófico da época. A negação das evidências teóricas que apareceram no início da década de 1930 é de característica mais filosófica do que científica. As visões empiristas e instrumentalistas do final do século XIX até meados do século XX são componentes-chave para a negação do colapso estelar. A característica mais importante do empirismo é o papel dos sentidos na construção do conhecimento. Em outras palavras, além da necessidade de evidências, a percepção sensorial era parte importante para a formulação de uma teoria física. O colapso gravitacional completo desafiava essa filosofia, implicando a existência de uma região no universo fora do alcance da observação. Um domínio fechado em si mesmo, fora do escopo de possibilidades de medidas [3].

Arthur Eddington, um dos mais influentes físicos da época, foi o maior antagonista da ideia de colapso

gravitacional. Em 1929, ele escreve em seu livro, intitulado: *Estrelas e Átomos*, “Eu devo enfatizar que todo nosso conhecimento físico é baseado em medidas e que o mundo físico consiste, por assim dizer, em grupos de medidas em um fundo sombreado que reside fora da física. Portanto, ao conceber um mundo cuja existência é independente de medições, eu ultrapasso os limites do qual chamo de realidade física” [3].

A filosofia de Arthur Eddington sumariza a visão geral daquele período. Ele, como uma autoridade reconhecida da área, impôs a crença de que estrelas permaneceriam em equilíbrio hidrostático e que as forças nucleares internas de um corpo contrabalanceariam a gravitacional. Sem evidências observacionais, a comunidade científica aceitou essa *hipótese do equilíbrio*.

Por outro lado, a oposição de Albert Einstein, era de natureza mais geométrica, contra a ideia da existência de singularidades no espaço-tempo. Num artigo com o físico americano Nathan Rosen (1909-1995), publicado em 1935, ele justifica sua descrença dizendo que singularidades são tão arbitrarias que anulariam as leis da física. Einstein também publicou um artigo, poucos meses após a publicação de Oppenheimer e Snyder, com a conclusão oposta: o colapso gravitacional – e portanto o aparecimento de singularidades na *Solução de Schwarzschild* – era impossível [2].

#### 4. O RENASCIMENTO DA RELATIVIDADE GERAL PÓS SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

Durante a Segunda Guerra Mundial, pesquisas sobre o Cosmos e seus mistérios não eram prioridade. A maioria dos astrônomos, astrofísicos e cosmólogos da época dedicaram-se à investigação de uma física mais imediatamente aplicável, como a nuclear, computacional e tecnologias de rádio. Após o término da guerra, a primeira contribuição à física veio com um artigo sobre a síntese dos elementos químicos no interior dos núcleos estelares, publicado pelo astrônomo inglês Fred Hoyle (1915-2001), um dos pilares do atual Modelo Padrão da Cosmologia, o qual se baseava na Relatividade Geral, que permanecia pouco valorizada. Mas isso mudou em meados da década de 1950, quando a injeção de dinheiro, o aumento do número de pesquisadores e a tentativa explícita de criar uma forte comunidade científica causaram uma nova onda de interesse pela Relatividade Geral [2].

O renascimento da Relatividade Geral fez ressurgir o interesse pela *Solução de Schwarzschild* [3]. Uma contribuição primordial foi dada pelo físico americano David Finkelstein (1929-2016), em 1958, resolvendo de maneira definitiva o impasse que reinava desde os anos 30 sobre a possível realização física do *raio de Schwarzschild*  $r_s$ . Seu trabalho possibilita a interpretação correta da esfera de raio  $r = r_s$  como uma espécie de membrana unidirecional que só permitiria o cruzamento de trajetórias físicas, incluindo as da luz, de fora para dentro. Isso quer dizer: a esfera de raio  $r_s$  funciona com uma espécie de fronteira entre duas regiões,

sendo a região externa completamente desconectada da interior, sem qualquer possibilidade de comunicação de dentro para fora. Nascia, assim, o conceito de “*horizonte de eventos*”, que de fato é o que distingue e define um buraco negro (Figura 1) [4].

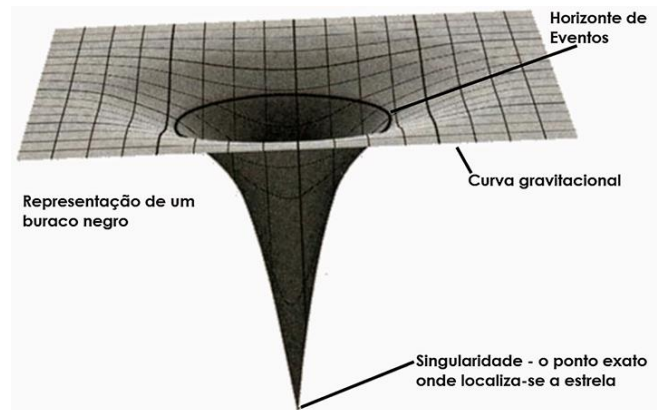


Figura 1: Representação topológica de um buraco negro, apresentando a distorção do espaço-tempo, o horizonte de eventos e a singularidade. Fonte: Ref. [2].

#### 5. AS PRIMEIRAS EVIDÊNCIAS OBSERVACIONAIS

Na década de 1960, novos avanços teóricos, simulações computacionais e a descoberta de objetos mais densos, os pulsares e os quasares, impulsionaram as pesquisas de que buracos negros existem.

Batizados de faróis do Universo, os pulsares são estrelas de nêutron em rotação que emitem pulsos eletromagnéticos a um intervalo de tempo constante. Já os quasares são fontes extragalácticas de rádio quase-estelares, isto é, que se parecem com a de estrelas, mas que indicam uma densidade bem maior. Essas detecções são os primeiros indícios observacionais de que buracos negros existem, provando que há objetos bem mais densos do que as conhecidas estrelas anãs brancas.

Uma nova geração de físicos surge a partir da década de 1960, apresentando uma nova filosofia da ciência. Em 1969, o físico teórico inglês Stephen Hawking (1942-2018) e o físico, matemático e filósofo inglês Roger Penrose (1931- ) provaram que singularidades no espaço-tempo são inevitáveis. Em 1971, o astrofísico teórico italiano Remo Ruffini (1942- ) e o físico teórico americano John Archibald Wheeler (1911-2008) publicam um artigo na revista popular *Physics Today*, intitulado: *Introdução aos Buracos Negros* [5]. Depois dessa publicação, esse nome se tornou popular e os buracos negros permearam o imaginário das pessoas [2,3].

#### 6. A DESCOBERTA DOS BURACOS NEGROS

A investigação dos quasares, na década de 1960, sugeriu que estes objetos quase-estelares fossem regiões colapsadas, sendo o microquasar Cygnus X-1 o primeiro candidato a ser

um buraco negro. Somente em meados de 1990, foi que os astrônomos assumiram que a probabilidade dele ser um buraco negro era muito alta.

Quando Roger Penrose apresentou o mecanismo de extração de energia de um buraco negro em rotação, ele fez um apelo à comunidade astronômica: procurar um buraco negro no espaço.

Em 1970, o astrônomo americano Bruce Partridge (1940-) e o astrofísico teórico italiano Remo Ruffini propuseram que um sistema binário de buracos negros produziria ondas gravitacionais distintas. Foi apenas em 2015 que a equipe do centro de pesquisa e detecção LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) conseguiu medir tais ondas, detectando assim de forma mais direta não só um, mas dois buracos negros [2].

Em 2019, depois de mais de 20 anos de pesquisa, a equipe do Telescópio Event Horizon produziu uma imagem de um buraco negro, mesclando dados astronômicos com técnicas avançadas de *machine learning* (área da ciência da computação que permite tornar a inteligência artificial real) para capturar o arco de luz distorcida ao redor de um buraco negro (Figura 2).

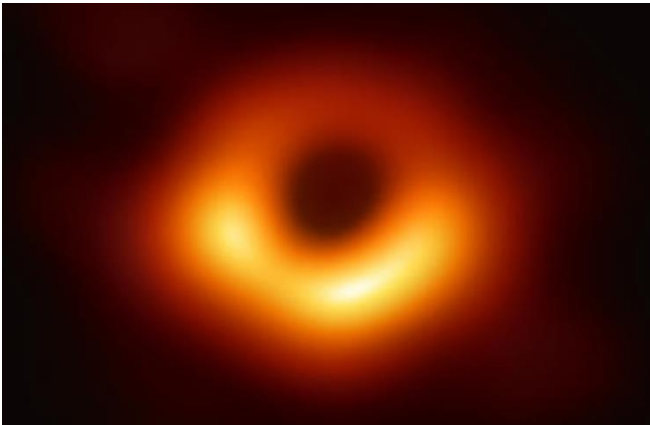


Figura 2: Imagem da sombra do buraco negro M87\* no centro da galáxia Messier 87 (aglomerado de Virgem, a uma distância de 53 milhões de anos-luz da Terra). A imagem foi construída por interferometria pela colaboração internacional Event Horizon Telescope. A sombra é a área escura, envolvida pela região avermelhada-alaranjada que indica a matéria que orbita e cai no buraco negro. Fonte: Ref. [6].

No início da década de 1990, o astrofísico alemão Reinhard Genzel (1952-) e a astrônoma americana Andrea Mia Ghez (1965-) iniciaram os trabalhos que culminariam com a primeira evidência observacional robusta da existência de buracos negros. Cada um, liderando o seu grupo de astrônomos, decidiu focar seus esforços na observação de uma região chamada de Sagitário A\* no centro de nossa galáxia (Via Láctea). Eles desenvolveram métodos para conseguir ver através de nuvens gigantes de gás interestelar e poeira, além de refinar técnicas para compensar as distorções

causadas pela nossa atmosfera terrestre. O desafio foi remover os efeitos sofridos pela luz ao viajar do centro de nossa galáxia até o telescópio na superfície da Terra para acompanhar a trajetória de estrelas. Essas trajetórias manifestam a curvatura local do espaço-tempo, e assim descobriram a existência de um objeto extremamente massivo e invisível em uma região compacta pequena, da ordem do nosso sistema solar. A única explicação cientificamente convincente para esta configuração é a presença de um buraco negro supermassivo [7].

Em 2020, o comitê da academia de ciências real da Suécia decidiu agraciar a Roger Penrose, Reinhard Genzel e Andrea Mia Ghez, com o Prêmio Nobel de Física, por suas contribuições no estudo e descoberta de Buracos Negros. Roger Penrose recebeu metade do prêmio “*pela descoberta que a formação de buracos negros é uma predição robusta da teoria da relatividade geral*”, enquanto Reinhard Genzel e Andrea Mia Ghez dividiram a outra metade do prêmio “*pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia*” [7].

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da descoberta dos buracos negros, abriu-se uma série de questões teóricas e outras observacionais quanto à física que os envolve. Estuda-se, por exemplo, se a taxa de formação desses objetos pode nos ensinar sobre a formação da estrutura em Cosmologia. A produção de ondas gravitacionais na colisão de dois buracos negros, ou entre um buraco negro e uma estrela de nêutrons, é uma das áreas promissoras para o futuro próximo com possibilidades tanto de desenvolvimento Astrofísico, quanto em Cosmologia. Além disto, devido à intensidade dos efeitos gravitacionais, os buracos negros servem de laboratório para avanços em estudos de gravitação quântica [campo da física teórica que tem como objetivo contribuir para a unificação da mecânica quântica com a relatividade geral (teoria geométrica da gravitação)] [7].

## REFERÊNCIAS

- [1] Floriano, T. C., Introdução aos buracos negros. Revista Brasileira de Física, Vol. 1, Nº 1, e202108010101 (2021).
- [2] Almeida, C. R., Buracos negros: mais de 100 anos de história. Cadernos de Astronomia, Vol. 2, Nº 1, 93-105 (2021).
- [3] Almeida, C. R., A pré-história dos buracos negros. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 42, e20200197 (2020).
- [4] Saa, A., Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 4, e4201 (2016).
- [5] Ruffini, R. e Wheeler, J. A., Introducing the black hole. Physics Today 24 (1), 30-41 (1971).

[6] Neves, J. C. S., O buraco negro e sua sombra. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 42, e20200216 (2020).

[7] Falciano, F. T., Sobre buracos negros. Cadernos de Astronomia, Vol. 4, Nº 1, 6-15 (2023).





## Breve história do Alumínio

Robson Fernandes de Farias

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Cx. Postal 1524, 59078-970 Natal-RN, Brasil [robdefarias@yahoo.com.br](mailto:robdefarias@yahoo.com.br)

**Abstract** A historical summary of the discovery/isolation of aluminium is presented.

**Keywords:** Aluminium, Charles Martin Hall, Chemistry history.

Modernamente, o alumínio é onipresente em nossas vidas (em painéis, latinhas de bebidas, na aviação, etc.). Contudo, tal largo emprego só tornar-se-ia possível no século XIX, com o desenvolvimento de metodologia capaz de tornar viável, economicamente, o isolamento do metal.

A chamada pedra-ume (alúmen, um sal duplo de potássio e alumínio,  $KAl(SO_4)_2$ ), já era conhecida na Roma e Grécia antigas. Contudo, o isolamento do alumínio dar-se-ia pelas mãos de Hans Christian Ørsted (1777-1851; Fig.1) (que obteria uma amostra impura do metal) e por Friedrich Wöhler (1800-1882), que isolaria uma amostra pura de

alumínio, sendo, em função disso, considerado o primeiro a obtê-lo, ou seja, seu descobridor<sup>1</sup>.

O nome aluminum para o novo elemento foi proposto por Humphrey Davy, em 1807 (nessa época, o elemento era um dos que ainda “faltavam” na tabela periódica)<sup>2</sup>.

Seria, então, apenas no século XIX que se conseguiria obter alumínio em escala industrial. Nessa jornada para a obtenção em larga escala do alumínio, os processos seriam continuamente aperfeiçoados ou modificados, e em 1859 Henri Sainte-Claire Deville (1818-

---

<sup>1</sup> Não obstante constituir mais de 8% da crosta terrestre, o alumínio não é normalmente encontrado na forma livre, sendo necessário isolá-lo dos minerais nos quais é encontrado. A dificuldade de seu isolamento/obtenção, tornou-o, por muito tempo, mais caro do que o ouro.

<sup>2</sup> Aluminium seria o nome/grafia posteriormente adotada para concordar com o nome dos outros elementos (sodium, potassium), etc. O dicionário Merriam-Webster, nos informa:

*Both aluminum and aluminium have a long history of use referring to the metallic element (commonly used as foil to cover food). They both date to the early 19th century, stemming from the word alumina. Aluminum became preferred in the United States and Canada, while aluminium became favored throughout the rest of the English-speaking world.*

1881; Fig. 2) daria sua contribuição (substituindo o potássio pelo sódio e o cloreto simples pelo duplo, no processo então empregado).



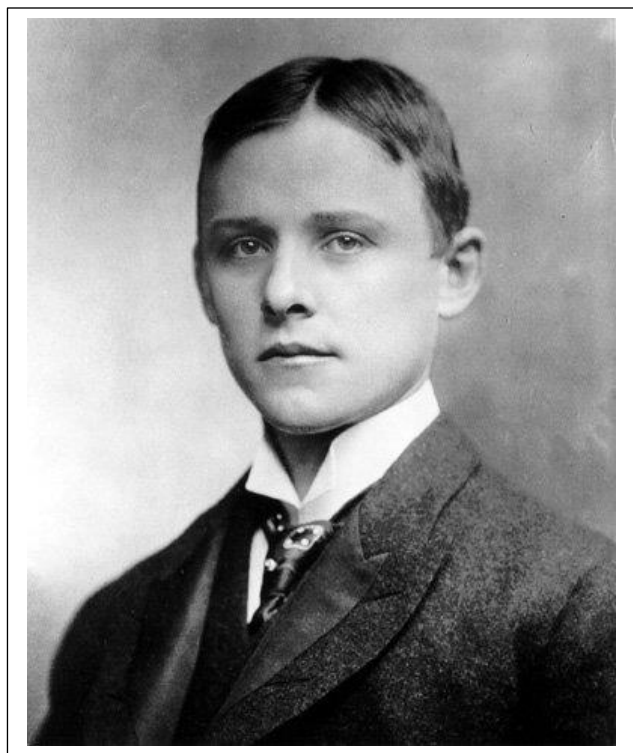
**Fig. 1. Ørsted**



**Fig.2. Sainte-Claire Deville**

Contudo, seria o chamado processo Hall-Héroult, desenvolvido em 1886 (mais simples do que os processos até então empregados) que baratearia sobremaneira a obtenção do alumínio, aumentando exponencialmente os usos e empregos desse metal.

Seriam Charles Martin Hall (1863-1914; Fig.3) e Paul Héroult (Paul Louis-Toussaint Héroult, 1863-1914; Fig.4), coincidentemente nascidos e falecidos nos mesmos anos, que, então jovens de apenas vinte e sete anos de idade, trariam esse progresso para a história da ciência e da tecnologia químicas.



**Fig. 3. Charles Martin Hall**

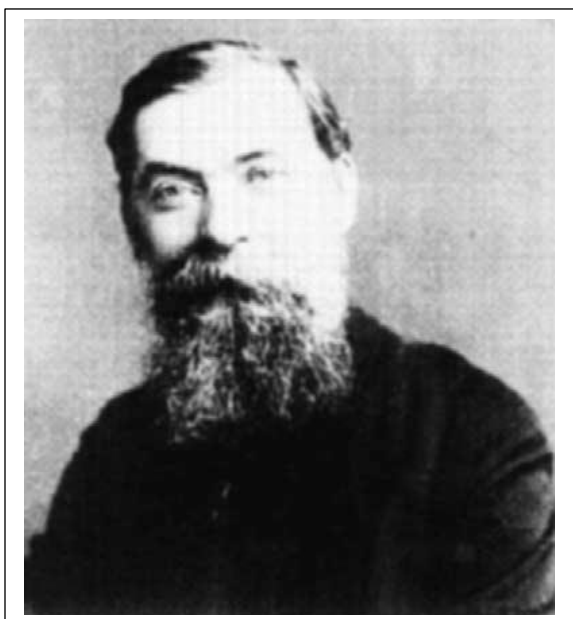
Nessa escalada tecnológica do alumínio, merece destaque ainda o chamado processo Bayer, o qual permite a obtenção do trióxido de alumínio (alumina,  $Al_2O_3$ ) a partir da bauxita (A bauxita, o mais importante minério de alumínio, contém apenas cerca de 40-60% de alumina). A partir da alumina obtém-se então o alumínio. O processo leva o nome de seu inventor, Karl Josef Bayer (1847-1904; Fig. 5)<sup>3</sup>.

O Processo Bayer baseia-se na lixiviação da bauxita (Fig. 6), sendo usado ainda hoje, praticamente sem alterações.

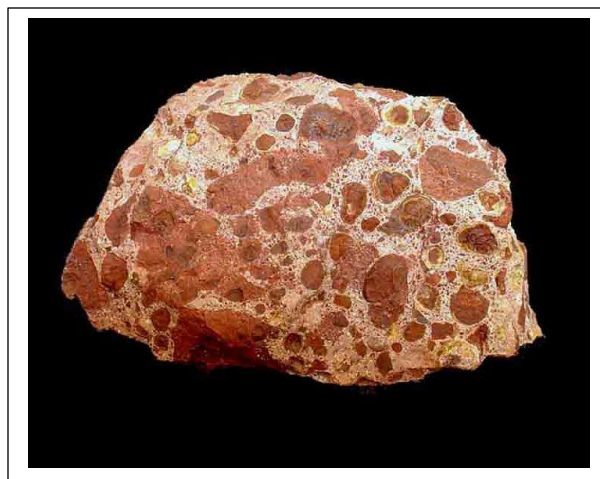
<sup>3</sup> F. Habashi, *A short history of hydrometallurgy*, Hydrometallurgy 79 (2005) 15-22.



**Fig.4. Paul Héroult**



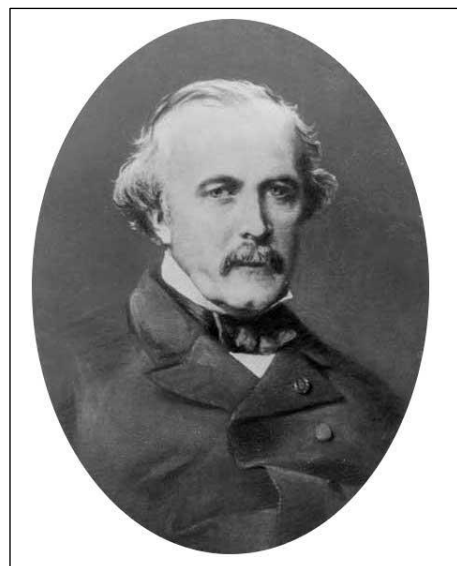
**Fig.5. Bayer**



**Fig.6. Bauxita**

Destaque-se que o processo foi concebido, originalmente, pensando-se simplesmente na obtenção de hidróxido de alumínio (empregado como mordente no tingimento de algodão). Sua importância na metalurgia seria percebida apenas em 1886, quando da invenção da obtenção de alumínio por via eletrolítica.

Um método para preparar-se alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aquecendo-se bauxita com carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) à  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , já havia sido inventado anteriormente por Louis Le Chatelier (1815-1873; Fig.7)<sup>4</sup>.



**Fig. 7. Louis Le Chatelier**

<sup>4</sup> Não confundir com Henry Louis Le Chatelier (1850 -1936), autor do famoso “Princípio de Le Chatelier”. Louis Le Chatelier era pai de Henry Louis Le Chatelier.

Assim, o alumínio pode ser obtido pela eletrólise da alumina (obtida, por sua vez, pelo processo Bayer). Para promover-se a eletrólise, é necessário ter-se a alumina em estado líquido. Porém, tendo em vista seu elevado ponto de fusão (2.072 °C) adiciona-se criolita (Fig. 8 e 9) que atua como impureza capaz de reduzir o ponto de fusão da alumina (deixando-o em torno de 1.000 °C).

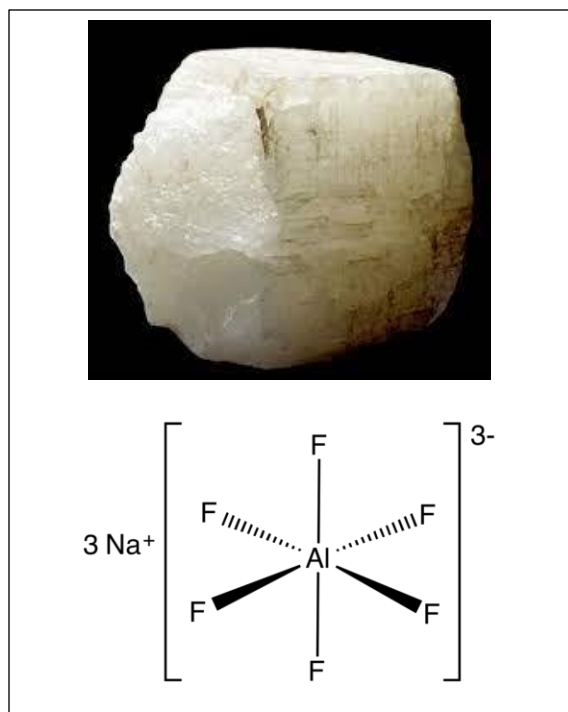


Fig. 8. Cristal e fórmula estrutural da criolita

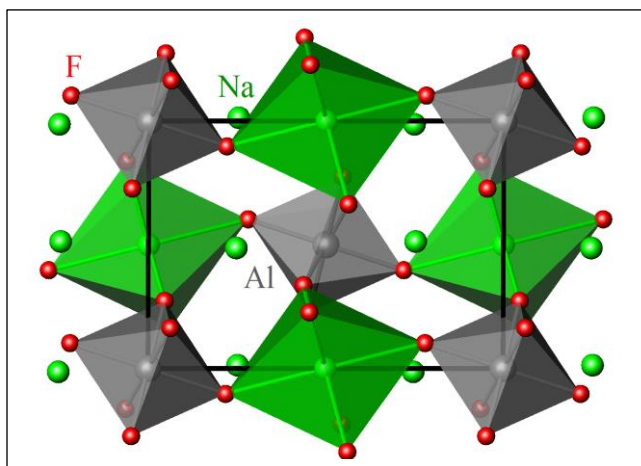


Fig. 9. Estrutura cristalina da Criolita

A criolita, por sua vez, é constituída por hexafluoreto de alumínio e sódio ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ),o qual também foi descoberto no século XVIII (1799) por Peter Christian Abildgaard (1740–1801; Fig.10).

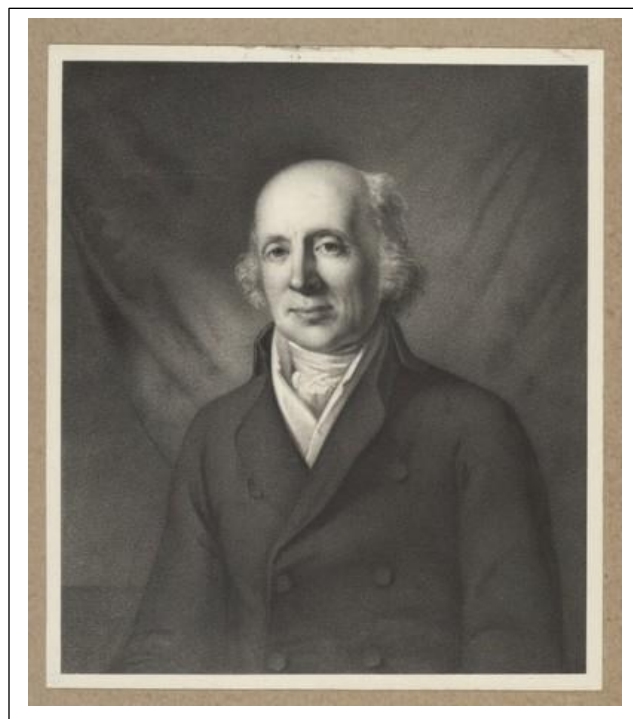


Fig. 10. Abildgaard