

MODELAGEM COM ARRANJO EXPERIMENTAL DE SISTEMAS DE VÁCUO TUBULARES: CAMPO DE PRESSÃO E SEU GRADIENTE

FRANCISCO TADEU DEGASPERI¹

¹Fatec São Paulo – Coordenadoria de Microeletrônica

francisco.degasperi@fatec.sp.gov.br

Modeling with experimental arrangement of tubular vacuum systems: pressure field and its gradient.

Eixo Tecnológico: Controle e Processos Industriais

Resumo

A Ciência e a Tecnologia do Vácuo - com as suas bases nas teorias da Termodinâmica do Equilíbrio e Fora do Equilíbrio, da Teoria Cinética dos Gases, dos Fenômenos de Transporte, da Mecânica Estatística e da Dinâmica dos Gases Rarefeitos - são utilizadas em muitas etapas de fabricação e de transformação em diversos produtos, sendo também utilizada de forma intensa tanto na pesquisa básica como na pesquisa aplicada. Há muitos processos industriais que empregam extensivamente o vácuo na realização da manufatura. O vácuo é utilizado em processo que necessariamente precisam estar em atmosfera rarefeita e, nos quais o vácuo torna o resultado muito melhor. Os sistemas de vácuo têm inúmeras formas e dimensões decorrentes das diferentes tarefas e quantidades de gases presentes nos processos realizados à baixa pressão. Há também processos, que mesmo ocorrendo em pressão atmosférica, ou ainda em altas pressões, usam o vácuo para mudar os gases da atmosfera de processo. Nestes casos, realizamos a remoção dos gases, e em seguida, introduzimos gases ou vapores de processo ou para armazenamento. A diversificação dos sistemas de vácuo faz com que seus cálculos e projetos sejam geralmente distintos entre si e tem-se que na maior parte deles de difícil execução, particularmente quando os detalhes inerentes são considerados. Uma escolha adequada da instrumentação é fundamental, após a modelagem detalhada do processo de bombeamento de gases. Em particular, os sistemas de vácuo com geometria predominantemente tubular têm muito interesse na Tecnologia do Vácuo, por dois motivos: um, sendo o sistema de vácuo intrinsecamente tubular, como ocorre em um microscópio eletrônico. O outro, devido ao fato de a linha de bombeamento, a qual conecta a câmara de vácuo à bomba de vácuo, ser tubular. A condutância de sistemas de vácuo tubulares são pesquisadas de forma profunda para geometrias mais utilizadas.

Palavras-chave: Ciência e tecnologia do vácuo, Gás rarefeito, Condutância, Modelagem, Arranjo experimental.

Abstract

Vacuum Science and Technology - with its bases in the theories of Equilibrium and Non-Equilibrium Thermodynamics, Kinetic Theory of Gases, Transport Phenomena, Statistical Mechanics and Rarefied Gas Dynamics - are used in many stages of manufacturing and transformation in various products, and are used intensively in both basic and applied research. Many industrial processes extensively employ vacuum in manufacturing. Vacuum is used in processes that necessarily need to be carried out in a rarefied atmosphere, and in which vacuum makes the result much better. Vacuum systems have numerous shapes and dimensions due to the different tasks and quantities of gases present in processes carried out under low pressure. There are also processes that, even when occurring at atmospheric pressure, or even at high pressures, use vacuum to change the gases in the process atmosphere. In these cases, we remove the gases and then introduce process or storage gases or vapors. The diversification of vacuum systems means that their calculations and designs are generally different from each other and most of them are difficult to execute, particularly when the inherent details are considered. An appropriate choice of instrumentation is essential, after detailed modeling of the gas pumping process. In particular, vacuum systems with predominantly tubular geometry are of great interest in Vacuum Technology, for two reasons: one, the vacuum system is intrinsically tubular, as in an electron microscope. The other, due to the fact that the pumping line, which connects the vacuum chamber to the vacuum pump, will be tubular. The conductance of tubular vacuum systems is researched in depth for the most commonly used geometries.

Key words: Vacuum science and technology, Rarefied gas, Conductance, Modeling, Experimental set up

1. Introdução

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

A Ciência e a Tecnologia do Vácuo - com as suas bases nas teorias da Termodinâmica do Equilíbrio e Fora do Equilíbrio, da Teoria Cinética dos Gases, dos Fenômenos de Transporte, da Mecânica Estatística e da Dinâmica dos Gases Rarefeitos - são utilizadas em muitas etapas de fabricação e de transformação em diversos produtos, sendo também utilizada de forma intensa tanto na pesquisa básica como na pesquisa aplicada. Há muitos processos industriais que empregam extensivamente o vácuo na realização da manufatura. O vácuo é utilizado em processo que necessariamente precisam estar em atmosfera rarefeita e, nos quais o vácuo torna o resultado muito melhor. Os sistemas de vácuo têm inúmeras formas e dimensões decorrentes das diferentes tarefas e quantidades de gases presentes nos processos realizados à baixa pressão.

Há também processos, que mesmo ocorrendo em pressão atmosférica, ou ainda em altas pressões, usam o vácuo para mudar os gases da atmosfera de processo. Nestes casos, realizamos a remoção dos gases, e em seguida, introduzimos gases ou vapores de processo ou para armazenamento. A diversificação dos sistemas de vácuo faz com que seus cálculos e projetos sejam geralmente distintos entre si e tem-se que na maior parte deles de difícil execução, particularmente quando os detalhes inerentes são considerados. Uma escolha adequada da instrumentação é fundamental, após a modelagem detalhada do processo de bombeamento de gases.

Em particular, os sistemas de vácuo com geometria predominantemente tubular têm muito interesse na Tecnologia do Vácuo, por dois motivos: um, sendo o sistema de vácuo intrinsecamente tubular, como ocorre em um microscópio eletrônico. O outro, devido ao fato de a linha de bombeamento, a qual conecta a câmara de vácuo à bomba de vácuo, ser tubular. Neste trabalho a condutância de sistemas de vácuo tubulares são pesquisadas de forma profunda.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

A fim de realizar as experiências sobre o desempenho dos sistemas de vácuo em geral, considerando os regimes de transporte de gás viscoso laminar (meio contínuo - fluido), intermediário (regime de *Knudsen*) e molecular (moléculas livres), os arranjos experimentais montados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo – LTV da FATEC-SP têm sido construídos com procedimentos bastante rigorosos. Os materiais utilizados no arranjo experimental, em contato com o vácuo, são construídos em aço inoxidável da linha 304 e 304 L, e também, com alumínio Dural. As peças são muito bem usinadas e suas superfícies polidas mecanicamente. Os testes de vazamento realizados mostraram em todos os casos, que se houverem vazamentos, estes produzem gases com três ordens de grandeza menor que os produzidos nas experiências desta forma, tornando os resultados experimentais bastante confiáveis.

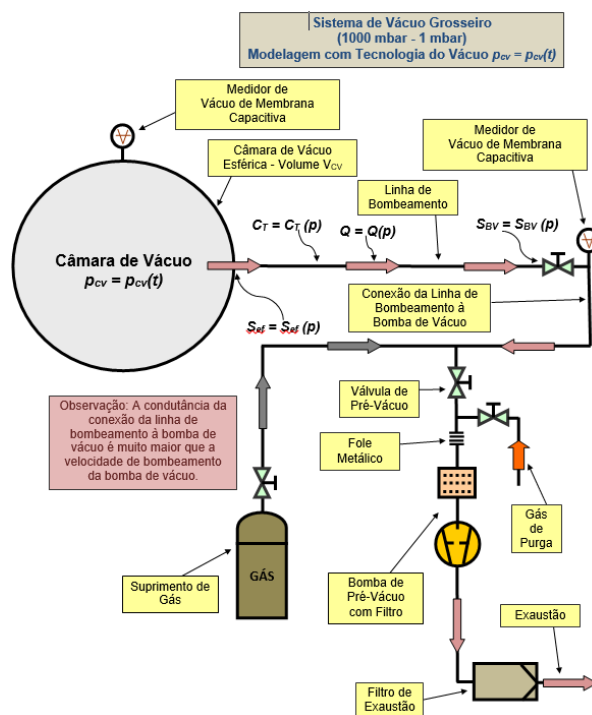
Além das conexões e tubos construídos em alta qualidade, as bombas de vácuo empregadas e os sensores de pressão são de alta qualidade. A velocidade de bombeamento das bombas de vácuo, utilizadas nas medições de condutâncias de tubos, são verificadas quanto à sua velocidade de bombeamento nominal. Na Fig. 1 pode-se ver o diagrama esquemático do arranjo experimental para a determinação da condutância da linha de bombeamento do sistema de vácuo. A partir da determinação da variação da pressão da câmara de vácuo do sistema de vácuo, tem-se que a variação da pressão depende tanto da condutância da linha de bombeamento como da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo.

É essencial para a determinação confiável da condutância da linha de bombeamento, que pode ser o tubo estudado, a determinação da pressão tanto na câmara de vácuo como na bomba

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

de vácuo. Assim, deve-se determinar a pressão nas extremidades do tubo, que está sendo determinada a condutância. Os sensores de pressão são periodicamente comparados com sensores de pressão utilizados em bancadas metrológicas de pressão. A medição de todas as grandezas físicas envolvidas são importantes, porém, a determinação da pressão é a mais importante. Tem-se que a condutância é uma grandeza sofisticada, uma vez que o transporte de gases rarefeitos é sofisticado. A condutância depende da geometria do tubo, do tipo de gás, da temperatura, do regime de transporte de gás e da pressão. Somente no regime molecular (regime de moléculas livres) a condutância não depende da pressão. As recentes atividades de pesquisa sobre condutâncias, realizadas no LTV, considera tanto os resultados tradicionais da teoria cinética dos gases - comumente aceitos nos projetos dos sistemas de vácuo -, como os resultados mais recentes, obtidos pela Dinâmica dos Gases Rarefeitos. Os trabalhos de pesquisa, considerando o transporte de gases no regime viscoso laminar, são realizados tendo tanto a formulação tradicional da Tecnologia do Vácuo - por meio da Eq. 2 - como utilizando a mecânica dos fluidos - considerando a equação de *Navier- Stokes* [1,2,6-9].

Fig. 1 - Esquemáticamente o arranjo experimental para a determinação da condutância da linha de bombeamento do sistema de vácuo, a partir da determinação da variação da pressão da câmara de vácuo do sistema de vácuo. A variação da pressão depende tanto da condutância da linha de bombeamento como da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo.



Fonte: (Degasperi, 2024).

2.2. Metodologia

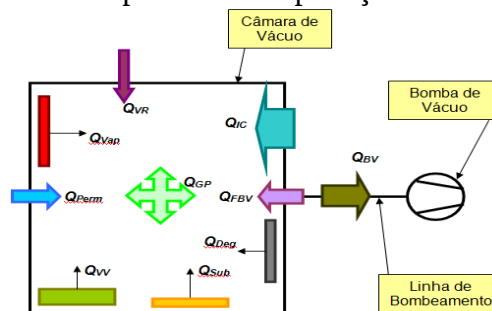
Como metodologia geral de trabalho - aquela que está ligada à essência da Física -, os problemas ligados à Ciência e Tecnologia do Vácuo, que são problemas de transporte de gases rarefeitos - gases com pressão menor que 1013 mbar (pressão atmosfera padrão no nível do mar) -, são tratados da seguinte maneira: identificação clara da questão de pesquisa e estudo. Em seguida, a construção da modelagem física e matemática do problema de pesquisa.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

Seguindo, obtenção da solução matemática da modelagem físico do problema. Interpretar fisicamente a solução matemática e propor aprofundamento na modelagem matemática, quando for o caso. Posteriormente, considerar os resultados experimentais, após a montagem do arranjo experimental do trabalho de pesquisa.

Na Fig. 2, pode-se ver o esquema geral de um sistema de um sistema de vácuo. São mostradas as três partes essenciais: a câmara de vácuo, a linha de bombeamento e a bomba de vácuo. Na câmara de vácuo se desenvolve o processo da aplicação em baixa pressão. O desempenho do sistema de vácuo, qualquer que seja ele, depende igualmente tanto da condutância da linha de bombeamento como da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo. A modelagem físico matemática do processo de bombeamento do sistema de vácuo é realizada por meio da equação diferencial ordinária de primeira ordem, na maioria dos casos não linear a Eq. 1. Com a solução do problema matemático é possível alcançar também a determinação da quantidade de gás desenvolvida durante o processo de bombeamento de gás. a chamada taxa de transferência de gás (*throughput*). Métodos numéricos são sempre utilizados para a modelagem de sistemas de vácuo em geral [1,2,6-9].

Fig. 2 - Esquema geral de um sistema de um sistema de vácuo. São mostradas as três partes essenciais: a câmara de vácuo, a linha de bombeamento e a bomba de vácuo. Na câmara de vácuo se desenvolve o processo da aplicação em baixa pressão.



Fonte: (Degasperi, 2007).

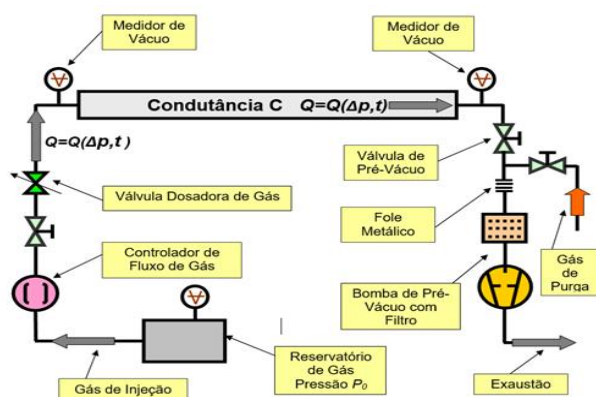
$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = - S_{ef} p_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \quad (1)$$

$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = - \frac{S_{bv} C_{Total}}{S_{bv} + C_{Total}} p_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \cdot$$

$$p_{CV}(t=0) = p_0$$

Na Fig. 3 pode-se ver tanto o esquema básico, utilizado no LTV, para a determinação experimental de condutâncias como uma fotografia mostrando o arranjo experimental sendo usado por um estudante. Na Fig. 4 pode-se ver um sistema de vácuo com estrutura puramente tubular. As linhas de bombeamento de sistemas de vácuo, de todos os tipos, são tubulares. Também, há sistema de vácuo, principalmente os de alto vácuo e os de ultra alto vácuo, cuja câmara de vácuo é tubular, nos casos mais comuns, com condutância de pequeno valor.

Fig. 3 - Esquema de um arranjo experimental para a determinação de condutâncias de tubos (lado esquerdo da figura). Do lado direito da figura, vê-se uma fotografia de um estudante trabalhando no arranjo experimental montado no LTV - FATEC-SP.

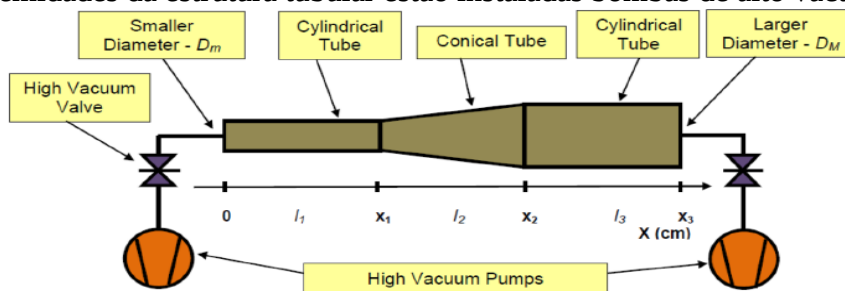


Fonte: (Degasper, 2024).

Nestes casos tem-se variação grande de pressão ao longo da estrutura tubular. O caso mostrado na Fig. 4 é apresentado sucintamente neste trabalho [3-5]. Tem-se o desenho de uma estrutura tubular considerando três tubos montados em série, dois tubos cilíndricos (nas extremidades da estrutura tubular) e um tubo cônico (entre os dois tubos cilíndricos). Nas extremidades da estrutura tubular estão instaladas bombas de alto vácuo.

O campo de pressão é obtido empregando a Eq. 2 - equação diferencial parcial de segunda ordem. O campo de pressão é mostrado na Fig. 7. Vê-se a intensa variação da pressão ao longo da estrutura tubular. Este estudo é fundamental para verificar o desempenho dos sistemas de vácuo em geral. São mostradas também as condições de contorno e a condição inicial que devem ser impostas à obtenção do problema. Estas condições dependem das especificidades de cada problema particular.

Fig. 4 - Desenho da estrutura tubular considerando três tubos, dois tubos cilíndricos (nas extremidades da estrutura tubular) e um tubo cônico (entre os dois tubos cilíndricos). Nas extremidades da estrutura tubular estão instaladas bombas de alto vácuo.



Fonte: (Degasper e Ricotta), 2023).

Na Fig. 5 pode-se ver o esquema do arranjo experimental para a determinação da condutância, a partir da determinação da variação da pressão da câmara de vácuo do sistema de vácuo, instalado no LTV da FATEC-SP. A variação da pressão depende também da condutância da linha de bombeamento. A sua determinação é condição necessária para o desempenho adequado do sistema de vácuo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[c(x) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \right] = -q(x,t) + A(x) \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \quad (2)$$

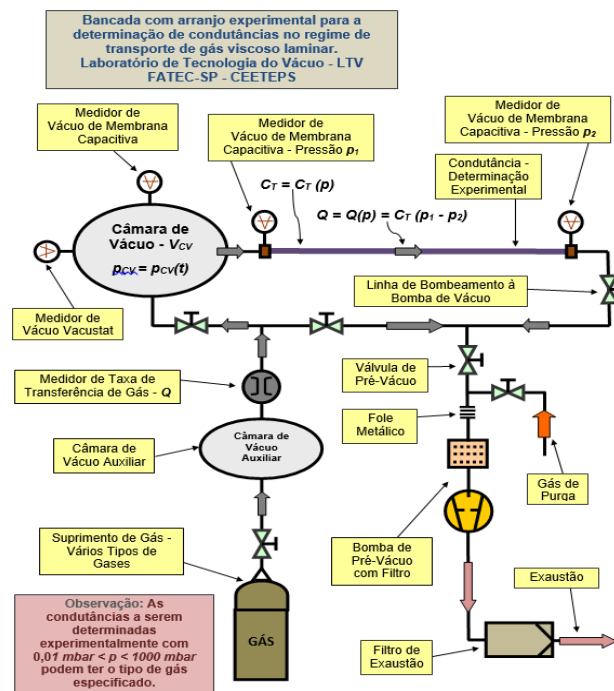
$$c(x) \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + \frac{dc(x)}{dx} \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -q(x,t) + A(x) \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}$$

$$p(x_A, t) = p_A(t) \quad -c(x_A) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_A} = q_A(t) \quad \pm c(x_A) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_A} = S_A p(x_A)$$

$$p(x,0) = p_0(x)$$

A sua determinação é condição necessária para o desempenho adequado do sistema de vácuo. Considerando a variação do comprimento do tubo - linha de bombeamento do sistema de vácuo - pode-se construir as curvas de pressão variando no tempo, na câmara de vácuo. Com o uso da Eq. 1, pode-se obter o valor da condutância do tubo. As curvas da pressão, variando no tempo, na câmara de vácuo, podem ser vistas na Fig. 6 [1,2,13].

Fig. 5 - Esquema do arranjo experimental para a determinação da condutância, a partir da determinação da variação da pressão da câmara de vácuo do sistema de vácuo. A variação da pressão depende também da condutância da linha de bombeamento. A sua determinação é condição necessária para o desempenho adequado do sistema de vácuo.



Fonte: (Degasperi, 2023).

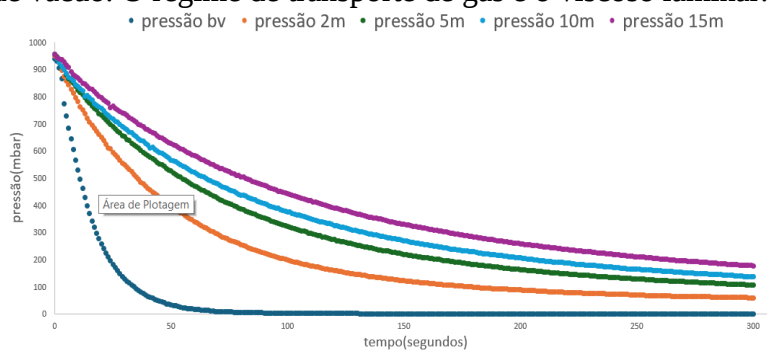
3. Resultados e Discussão

Os resultados considerados alcançados neste trabalho referem-se a dois casos de estudo: um é para a linha de bombeamento do sistema de vácuo (conecta a câmara de vácuo à bomba de vácuo), sendo essencial para atingir o sucesso do sistema de vácuo. O outro é para determinar o campo de pressão e seu gradiente em sistemas de vácuo, que são de essência tubular. A câmara de vácuo é um tubo de comprimento grande comparado ao seu diâmetro. Neste caso estabelece-

se uma grande variação de pressão ao longo da câmara de vácuo. Faz-se necessário o estudo detalhado destes casos para o bom funcionamento do sistema de vácuo.

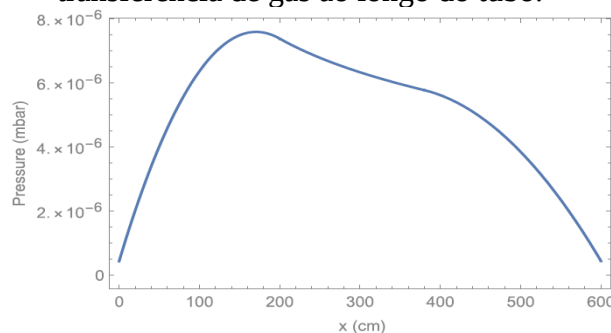
Curvas da pressão na câmara de vácuo em função do tempo, considerando 5 comprimentos do tubo que conectam a câmara de vácuo à bomba de vácuo mecânica de palhetas. A medição de pressão é realizada na câmara de vácuo. O regime de transporte de gás é o viscoso laminar. As curvas mostram as pressões medidas mostradas na Fig. 5 [1,2,13]. Campo de pressão ao longo da estrutura tubular com tubos cilíndrico, cônico e cilíndrico montados sequencialmente. Vê-se a mudança de pressão ao longo do estrutura tubular. A inclinação na curva indica a intensa variação da pressão no ponto da curva considerado, neste caso tem-se o gradiente de pressão. [1-5].

Fig. 6 - Curvas da pressão na câmara de vácuo em função do tempo, com 5 comprimentos de tubo que conectam a câmara de vácuo à bomba de vácuo. A medição de pressão é realizada na câmara de vácuo. O regime de transporte de gás é o viscoso laminar. [1,2,13].



Fonte: (Degasperi, 2024).

Fig. 7 - Campo de pressão ao longo da estrutura tubular com tubos cilíndrico, cônico e cilíndrico montados sequencialmente. A inclinação da curva é proporcional à taxa de transferência de gás ao longo do tubo.



Fonte: (Degasperi e Ricotta), 2023).

4. Considerações finais

A pesquisa com sistemas de vácuo tubulares, considerando os regimes de transporte de gases rarefeitos viscoso laminar, intermediário (regime de *Knudsen*) e molecular (moléculas livres) foram realizado com sucesso e publicados. Foi submetida uma patente com este tema, com financiamento de empresa, com a participação de estudantes. Temos os seguintes colaboradores em torno deste tema: Regina Maria Ricotta (FATEC-SP), Denize Kalempa, USP - Campus Lorena), Nivaldo Heder Medina ((IFUSP), Fernando Fuzinato Dall-Agnol (UFSC - Campus

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

de Blumenau) e também estudantes de graduação. Este tema de pesquisa continua presente e muito atuante no LTV da FATEC-SP. Finalizando, este tema de pesquisa se justifica tanto do ponto de vista do conhecimento (científico) como do ponto de vista da sua aplicação na tecnologia e no setor industrial. Os recursos financeiros para equipar o LTV da FATEC-SP têm sido obtidos por meio de trabalhos realizados com os setores industrial e de serviços, transferidos ao LTV, por meio da competente ação da FAT.

Agradecimentos

À Empresa Bravoluz Lâmpadas Especiais Ltda. (Curitiba - PR). À Empresa TEX Equipamentos Eletrônicos Ltda. (Itupeva - SP). À Empresa Centro Tecnológico de Metrologia - CTM Ltda. (São Paulo - SP). À Fundação de Apoio à Tecnologia - FAT. (São Paulo - SP).

Referências

- [1] DEGASPERI, F. T. **Dissertação de Mestrado**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC - UNICAMP - 2002. Campinas. São Paulo. Brasil.
- [2] DEGASPERI, F. T. **Tese de Doutorado**. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC - UNICAMP-2006. Campinas. São Paulo. Brasil.
- [3] DEGASPERI, F. T.; RICOTTA, R. M. High and Ultra High-Vacuum Pressure Profile and its Gradient of the Conic Tube. **Brazilian Journal of Physics**, v. 53, p. 44, 2023.
- [4] DEGASPERI, F. T.; ROCHA, et al. Modeling and Simulation of the Pressure Field in the Association of Cylindrical-Conical-Cylindrical Tubes in High and Ultra-high Vacuum. **Brazilian Journal of Physics**, v. 53, p. 153, 2023.
- [5] DEGASPERI, F. T.; RICOTTA, R. M., Pressure field and its gradient in electron microscopes. **Vacuum**. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.101616>. 2021.
- [6] ARFKEN, G., WEBER, H. J., HARRIS, F. E., **Mathematical Methods for Physicists**. 7th Edition. Elsevier-Academic Press. 2013.
- [7] GILAT, A; SUBRAMANIAM, V. **Métodos numéricos para engenheiros e cientistas: uma introdução com aplicações usando o MATLAB**. Bookman Editora, 2009.
- [8] PONTES, J., MANGIAVACCHI, N., **Fenômenos de Transferência com Aplicações às Ciências Físicas e à Engenharia**. Volume 1 - Fundamentos. SBM. 2016. Rio de Janeiro.
- [9] PONTES, J., MANGIAVACCHI, N., ALAVES, L., ANJOS, G. dos, ESTACIO-HIRONS, K., HIRATA, S., ROSA, R., **Fenômenos de Transferência com Aplicações às Ciências Físicas e à Engenharia**. Volume 2 - Aplicações. SBM. 2016. Rio de Janeiro.
- [10] DEGASPERI, F. T., MARTINS, M. N., TAKAHASHI, et al. Time Dependence of the Pressure Profile in a Tube with Axially-Dependent Degassing. **Particle Accelerator Conference, PAC-2001**, Chicago, Illinois, USA, 2001. Apresentado em forma de Pôster e Publicado nos Anais.
- [11] DEGASPERI, F. T.; BARANAUSKAS, V., Pressure Field in High Vacuum Systems: Mathematical Physics Formulation. **8th European Vacuum Conference - EVC-8 e 2nd Annual Conference of the German Vacuum Society**. Berlin, Germany, 2003.
- [12] **Trabalhos de Conclusão de Curso - TCC e Trabalhos de Iniciação Científica e Tecnológicas - ICT** - Realizados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo - LTV da Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC-SP - CEETEPS. Orientador: Francisco Tadeu Degasperi. Disponíveis na Biblioteca da FATEC-SP.