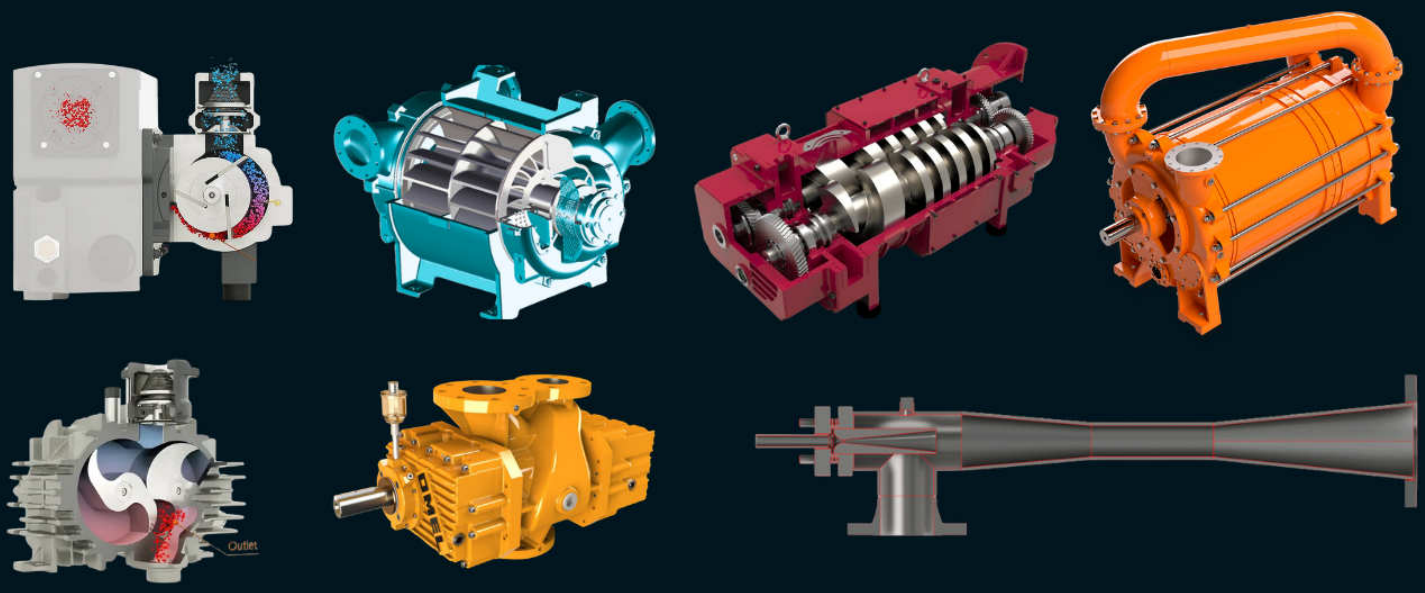
ENGENHARIA & CIA
EDUCACIONAL

Pós Graduação Lato Sensu

Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais



Bombas de Vácuo e Sistemas à Vácuo

Tipos, Aplicações e Dimensionamento

Micelli R. Camargo

Bombas de Vácuo e Sistemas de Vácuo

Tipos, Aplicações e Dimensionamento

Micelli Rodrigues Camargo

São Paulo, 19 de outubro de 2026

Direitos autorais e edição

© 2026 Micelli Rodrigues Camargo. 1ª edição. São Paulo, Brasil.

Editor/Selo: Edição do Autor (Micelli Camargo) • Engenharia & Cia – Publicações Técnicas.

Esse material foi elaborado para apoio aos alunos da Pós-Graduação Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução por quaisquer meios sem autorização do detentor dos direitos, exceto nos casos previstos em lei.



[reservado para dados de registro]

Créditos

- ✓ Capa e projeto gráfico: Micelli R. Camargo
- ✓ Revisão técnica: Micelli R. Camargo
- ✓ Diagramação: Micelli R. Camargo

Índice:

1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS 16
1.1. Introdução 16
1.2. Propriedades dos Fluidos 16
1.2.1. Conceito Técnico de Fluido e Os Estados da Matéria 16
1.2.2. Princípio da Aderência (Condição de Não Deslizamento) 16
1.2.3. A Experiência Das Duas Placas E A Lei De Newton 17
1.2.4. Massa Específica, Peso Específico 17
1.2.5. Gravidade Específica 18
1.2.6. Viscosidade Dinâmica E Viscosidade Cinemática 18
1.2.6.1. Exemplo 1.1: Conversão de unidade de viscosidade 18
1.3. Estática dos Fluidos 19
1.3.1. Pressão E Unidades 19
1.3.2. Pressão Absoluta, Atmosférica E Efetiva 19
1.3.3. Exemplo 1.2: Conversão entre escalas de pressão 20
1.3.4. Princípio de Stevin e Carga de Pressão 20
1.3.5. Exemplo 1.3: pressão no fundo de um reservatório 21
1.4. Cinemática dos Fluidos 21
1.4.1. Vazão Volumétrica e Vazão Mássica 21
1.4.2. Exemplo 1.4: Vazão a Partir de V e D 21
1.4.3. Velocidade Média e Perfil de Velocidades 21
1.4.4. Regimes de Escoamento e Número de Reynolds 22
1.4.5. Exemplo 1.5: Cálculo do número de Reynolds 22
1.4.6. Equação Da Continuidade 22
1.4.7. Exemplo 1.6: Efeito da Redução de Diâmetro 23
1.4.8. Escoamentos em Regime Permanente e Não-Permanente 23
2. FUNDAMENTOS DO VÁCUO E DOS GASES 24
2.1. Introdução 24
2.2. Pressão Absoluta no Vácuo 25
2.2.1. A Única Escala Que Vale No Cálculo 25
2.2.2. Exemplo 2.1: Leitura Do Vacuômetro À Pressão Absoluta 25
2.2.3. Pressão Atmosférica e Altitude 26
2.3. Unidades de Pressão em Vácuo 26
2.4. Faixas de Vácuo 26
2.4.1. A Classificação 26
2.4.2. O Que Muda de Uma Faixa Para Outra 27

2.5. Os Gases Sob Vácuo 28
2.5.1. Equação de Estado Na Forma Usada Em Vácuo 28
2.5.2. Boyle-Mariotte: Equalização Entre Volumes 28
2.5.3. Dalton: Misturas de Gás e Vapor 29
2.6. Vapor e Pressão de Vapor 29
2.6.1. Gás, Vapor e Vapor Saturado 29
2.6.2. Consequências Práticas 30
2.6.3. Ar Úmido e Vapor Na Sucção 30
2.6.4. Exemplo 2.2: Ar Saturado Na Sucção Da Bomba 30
2.7. Vazão de Uma Bomba de Vácuo 31
2.7.1. Velocidade de Bombeamento 31
2.7.2. Fluxo de Gás (Throughput) 31
2.7.3. Exemplo 2.3: A Mesma Bomba Em Duas Pressões 32
3. ESCOAMENTO SOB VÁCUO 33
3.1. Introdução 33
3.2. Regimes de Escoamento 33
3.2.1. Do Livre Caminho Médio Ao Produto p·d 33
3.2.2. Exemplo 3.1: Em Que Regime Está a Linha de Sucção? 34
3.3. Condutância e Velocidade Efetiva de Bombeamento 34
3.3.1. A Lei de Ohm do Vácuo 34
3.3.2. Orifícios e Fluxo Bloqueado 35
3.3.3. Velocidade Efetiva 36
3.3.4. Condutância de Tubos Longos em Regime Viscoso 36
3.3.5. Exemplo 3.2: Velocidade Efetiva Com Uma Linha Real 38
3.4. Carga de Gás do Sistema 39
3.4.1. Pressão Limite e Constante de Tempo 40
3.5. Medição de Pressão no Vácuo 40
3.5.1. Medidores Que Não Dependem do Tipo de Gás 41
3.5.2. Medidor Que Dependem do Tipo de Gás 42
3.5.3. Seleção Por Faixa 43
3.6. Medição de Vazamento em Campo 44
3.6.1. Teste de Subida de Pressão 44
3.6.2. Exemplo 3.3: Teste de Subida de Pressão 45
3.6.3. Detecção Por Hélio 46
4. PRINCIPAIS TIPOS DE BOMBAS DE VÁCUO 47
4.1. Introdução 47

4.2. Classificação das Bombas de Vácuo 47
4.2.1. Transferência e Aprisionamento 47
4.2.2. Deslocamento Positivo e Cinéticas 47
4.2.3. Bombas Úmidas e Bombas Secas 48
4.3. Faixas de Trabalho por Tecnologia 49
4.4. Pressão × Vazão 50
4.5. Pré-Seleção da Tecnologia 50
4.6. Quando Uma Tecnologia É Mais Indicada Que Outra 51
5. BOMBAS DE VÁCUO DE ANEL LÍQUIDO 53
5.1. Introdução 53
5.2. Princípio de Funcionamento 53
5.3. Duas Construções: Placa e Cone 54
5.4. Compressão Quase Isotérmica 54
5.5. Principais Componentes 54
5.6. Bomba de Vácuo 2 Estágios 55
5.7. Curva Característica 56
5.7.1. A Curva de Catálogo 56
5.7.2. O Efeito da Temperatura do Líquido de Selagem 57
5.7.3. Cavitação 58
5.8. Características Operacionais 59
5.8.1. Faixa de Vazão e Vácuo Final 59
5.8.2. Potência 59
5.8.3. Líquido de Selagem e Circuitos de Alimentação 59
5.8.4. Condensação no Anel Líquido e Controle 60
5.9. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 60
5.10. Aplicações 61
5.11. Pressão Mínima de Um e de Dois Estágios Por Fabricante 62
6. BOMBAS DE VÁCUO LUBRIFICADAS E SECAS 63
6.1. Introdução 63
6.2. Bombas de Palhetas Lubrificadas 63
6.2.1. Introdução 63
6.2.2. Princípio de Funcionamento 63
6.2.3. Principais Componentes 64
6.2.4. Lastro de Gás 65
6.2.5. Exemplo 6.1: Posso Bombear Sem Lastro De Gás? 66
6.2.6. Curva Característica 67

6.2.7. Características Operacionais 67
6.2.8. Bombas de Vácuo de Palhetas de Dois Estágios 68
6.2.9. BV de Palhetas de Passagem Única 68
6.2.10. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 69
6.2.11. Aplicações 69
6.3. Bombas de Palhetas Secas 70
6.3.1. Introdução 70
6.3.2. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 71
6.3.3. Aplicações 72
6.4. Bombas de Parafusos a Seco 72
6.4.1. Introdução 72
6.4.2. Princípio de Funcionamento 72
6.4.3. Principais Componentes 73
6.4.4. Curva Característica 74
6.4.5. Características Operacionais 74
6.4.6. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 75
6.4.7. Aplicações 75
6.5. Bombas de Vácuo de Garras 76
6.5.1. Introdução 76
6.5.2. Princípio de Funcionamento 76
6.5.3. Curva Característica 77
6.5.4. Características Operacionais 77
6.5.5. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 78
6.5.6. Aplicações 78
6.6. Outros Tipos de BV: Diafragma, Pistão e Scroll 79
6.6.1. Diafragma 79
6.6.2. Pistão 80
6.6.3. Scroll 81
6.7. Quadro Comparativo da Família 82
7. BOOSTERS ROOTS e EJETORES 83
7.1. Introdução 83
7.2. Bomba de Vácuo de Lóbulos (Roots) 83
7.2.1. Princípio de Funcionamento 83
7.2.2. Características Operacionais 83
7.2.3. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 84
7.2.4. Aplicações 84

7.3. Bomba de Vácuo de Lóbulos com Pré-admissão de Ar 84
7.3.1. Princípio de Funcionamento 84
7.3.2. Características Operacionais 84
7.3.3. Aplicações 85
7.4. Booster Roots 85
7.4.1. Introdução 85
7.4.2. Características Operacionais 86
7.4.3. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 86
7.4.4. Booster de Parafusos Secos 87
7.5. Ejetores 87
7.5.1. Introdução 87
7.5.2. Princípio de Funcionamento 87
7.5.3. Principais Componentes 88
7.5.4. Características Operacionais 88
7.5.5. Pontos Críticos de Operação e Manutenção 89
7.5.6. Aplicações 90
7.6. Para Saber Mais: Bombas de Alto Vácuo 90
8. ACESSÓRIOS, INSTALAÇÃO E SEGURANÇA DO SISTEMA DE VÁCUO 91
8.1. Introdução 91
8.2. A Cadeia Típica do Sistema de Vácuo 91
8.3. Acessórios do Lado da Sucção 92
8.3.1. Separador de Líquido 92
8.3.2. Condensador Antes da Bomba 92
8.3.3. Exemplo 8.1: O Condensador Na Frente Da Bomba 93
8.3.4. Filtro de Entrada 94
8.4. Válvulas do Sistema de Vácuo 95
8.4.1. Válvula Quebra-Vácuo 96
8.5. Acessórios do Lado da Descarga 97
8.6. Reservatório (Pulmão) de Vácuo 97
8.6.1. Exemplo 8.2: Número de Ciclos para Reservatório 98
8.7. Instalação e Linha de Sucção na Prática 99
8.7.1. Regras da Linha 99
8.7.2. Vedações 99
8.7.3. Sistema Central ou Bombas Descentralizadas 100
8.8. Segurança do Sistema de Vácuo 101
8.8.1. Implosão de Vasos 101

8.8.2. Atmosferas Explosivas, Vapores Tóxicos e Descarga 101
8.8.3. Temperatura de Superfície e Ruído 102
8.8.4. Manutenção, Bloqueio e Retorno de Pressão 102
9. DIMENSIONAMENTO DE UMA BOMBA DE VÁCUO 103
9.1. Introdução 103
9.2. Dados de Entrada 103
9.2.1. Inventário da Carga de Gás 103
9.2.2. Lista de Verificação 103
9.2.3. Escolha Preliminar da Tecnologia 104
9.3. Tempo de Evacuação 104
9.3.1. Fórmula Fundamental 104
9.3.2. Correção Por Faixa de Pressão 105
9.3.3. Constantes de Tempo 105
9.3.4. Equalização Entre Câmaras 106
9.4. Velocidade Efetiva e Linha de Sucção 106
9.4.1. Influência da Linha no Dimensionamento 106
9.4.2. Critérios de Projeto da Linha 107
9.5. Carga de Gás Contínua 108
9.5.1. Regime Permanente 108
9.5.2. Estimativa de Vazamentos na Fase de Projeto 109
9.5.3. Medição de Vazamento No Sistema Instalado 109
9.5.4. Dessorção 110
9.6. Bombeamento de Vapores 110
9.6.1. Lastro de Gás em Bombas de Palhetas 110
9.6.2. Correções Para Bombas de Anel Líquido 111
9.6.3. Regra Anticavitação 113
9.6.4. Condensadores Auxiliares 113
9.7. Fatores Práticos 113
9.7.1. Altitude 113
9.7.2. Consumo de Água na Bomba de Anel Líquido 114
9.7.3. Balanço Térmico do Líquido de Selagem 114
9.7.4. Unidades de Capacidade 115
9.8. Margem de Segurança e Seleção Final 115
9.8.1. Margens Recomendadas 115
9.8.2. Leitura de Curvas de Catálogo 116
9.9. Roteiro de Dimensionamento 116

9.10. Especificação Completa da Bomba de Vácuo 117
9.11. Exemplo 9.1: Tempo de Evacuação 118
9.12. Exemplo 9.2: Anel Líquido Com Vazamentos e Correção de Temperatura 118
9.13. Exemplo 9.3: Dimensionamento de BV Para Secagem 124
10. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE VÁCUO 130
10.1. Introdução 130
10.2. Limites de Uma Bomba Única 130
10.3. Combinação em Série: Booster Roots + Bomba Primária 131
10.3.1. Função da Bomba Primária 131
10.3.2. Continuidade, Gradação e Rendimento 131
10.3.3. Diferencial, Pressão de Acionamento e Proteção 132
10.3.4. Potência do Booster 132
10.3.5. A Curva Combinada 132
10.3.6. Exemplo 10.1: Booster Roots Sobre Bomba de Parafusos Secos Na Secagem De Solvente 134
10.4. Série Com Ejetor de Gás e Com Condensador 138
10.4.1. Ejetor de Gás Sobre Anel Líquido 138
10.4.2. Condensador Antes da Bomba 138
10.5. Sistemas Híbridos: Ejetores a Vapor, Condensadores e Anel Líquido 139
10.5.1. Como o Sistema Se Organiza 139
10.5.2. Consumo de Vapor e de Água 140
10.6. Combinação em Paralelo 140
10.6.1. Redundância N+1 e Divisão de Capacidade 140
10.6.2. Carga Variável, Inversor e Sistemas Centrais 141
10.6.3. Bombas Iguais Para Vazão e Reserva 141
10.6.4. Exemplo 10.2: Bombas Iguais em Paralelo 142
10.6.5. Partida e Regime 143
10.6.6. Exemplo 10.3: Bomba de Partida e Bomba de Regime 144
10.7. Roteiro de Dimensionamento de Sistemas Combinados 146
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 147
11.1. Livros e Manuais Técnicos 147
11.2. Normas e Práticas Recomendadas 147
11.3. Catálogos e Publicações de Fabricantes 148
11.4. Materiais Didáticos e Fontes de Figuras 149
12. ANEXOS 151
12.1. Pressão Atmosférica em Função da Altitude 151
12.2. Unidades de Pressão 151

12.3. **Composição do Ar Seco** 151
12.4. **Dados do Ar por Faixa de Pressão** 152
12.5. **Taxas de Dessorção de Materiais** 152
12.6. **Propriedades dos Solventes Mais Comuns** 153
12.7. **Propriedades de Elastômeros** 153
12.8. **Agentes Dessecadores** 154
12.9. **Fatores de Correção de Condutância por Gás** 154
12.10. **Propriedades do Ar Seco em Função da Temperatura** 155
12.11. **Pressão de Vapor da Água** 155
12.12. **Diâmetros Internos do Tubo de Aço** 156
12.13. **Quadro Comparativo das Tecnologias** 157
12.14. **Vazamento Estimado em Projeto** 157
12.15. **Fatores de Correção e Margens** 158
12.16. **Alto Vácuo: Referência Resumida** 158
12.17. **Folha de Dados da Bomba de Vácuo** 160
12.18. **Folha de Dados do Ejetor a Vapor** 161
12.19. **Ejetor a Vapor: Vapor Motor e Garganta do Bocal** 161
12.19.1. **Escoamento Crítico no Bocal** 161
12.19.2. **A Vazão de Vapor Motor** 162
12.19.3. **A Razão de Arraste** 162
12.20. **Exercícios Resolvidos Extras** 162
12.20.1. **Exemplo 12.1: Ganho de Capacidade Por Condensação do Vapor** 163
12.20.2. **Exemplo 12.2: Água de Selagem Mais Quente Que a do Catálogo** 165
12.20.3. **Exemplo 12.3: Influência do Booster Roots No Tempo de Evacuação** 165
12.20.4. **Exemplo 12.4: Partida Com as Bombas de Regime Em Condensador De Turbina** 167

Sobre o Autor e Coordenador do Curso

🎓 Formação Acadêmica



Micelli Camargo é Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Mestre em Ciências pela Universidade de São Paulo (USP/IPEN) na área de Tecnologia Nuclear, com especialização em Didática do Ensino Superior (Uniderp) e MBA Executivo em Marketing (FGV).

🏭 Experiência Profissional

Possui mais de 20 anos de experiência profissional, sendo 16 no setor de bombas e equipamentos industriais. Atuou como consultor e instrutor técnico em empresas de referência, como OMEL, Vallair e Embraseal, nas áreas de vendas técnicas, aplicação de equipamentos e treinamentos.

👨‍🏫 Atuação como Professor e Coordenador de Curso

Com mais **de 25 anos de experiência docente**, lecionou Engenharia Mecânica em universidades de São Paulo. Atualmente dedica-se a cursos técnicos e treinamentos especializados para engenheiros e profissionais da indústria e à coordenação do curso de **Pós-Graduação Lato Sensu Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais**, até então inédita no Brasil.

📈 Engenharia & Cia

Em 2016, fundou o canal Engenharia & Cia, que hoje conta com mais de 50.000 inscritos no YouTube e 130.000 no LinkedIn. Desde então, já treinou mais de 1.200 alunos em cursos presenciais e online, além de desenvolver materiais técnicos e softwares exclusivos, como a Calculadora de Dimensionamento de Bombas.

💡 Missão Profissional

Combinando teoria sólida, prática de campo e experiência docente, Micelli Camargo dedica-se a transformar conhecimento técnico em aprendizado acessível e aplicável, contribuindo para a formação e atualização de engenheiros, técnicos e profissionais da indústria.

📩 contato@engenhariaecia.com
🌐 www.engenhariaecia.com
WhatsApp: +55 11 95696 7808

APRESENTAÇÃO

A Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais foi concebida para formar profissionais capazes de especificar, selecionar, operar e manter os equipamentos que movimentam líquidos e gases na indústria. O foco do curso não está na teoria pela teoria, mas no raciocínio de projeto e na decisão de campo, apoiados em dados reais de fabricantes e em casos da prática industrial.

Dentro dessa estrutura, cada disciplina foi pensada como parte de uma sequência. Esta disciplina, Bombas de Vácuo e Sistemas de Vácuo, aplica ao lado da sucção o mesmo raciocínio que a disciplina de compressores aplicou ao lado da descarga. Uma bomba de vácuo é, no fundo, um compressor cuja sucção está abaixo da atmosfera, e boa parte do que já foi visto continua valendo.

Vácuo é um dos assuntos em que a distância entre o que se ensina na graduação e o que se exige na indústria é maior.

Na graduação, ele aparece como um capítulo curto de termodinâmica ou de física. Já na indústria, vácuo é uma utilidade tão presente quanto ar comprimido e água de resfriamento, e a especificação errada de uma bomba de vácuo custa energia, água, parada de produção e, com frequência, a própria bomba.

O material segue a mesma lógica da disciplina de ventiladores, compressores e sopradores, em três blocos:

- **Conceitos:** O que muda quando a pressão fica abaixo da atmosférica: escala absoluta, faixas de vácuo, vapor e pressão de vapor, vazão na sucção, escoamento na linha, fontes de gás e medição (capítulos 1 a 3).
- **Máquinas:** O mapa de aplicações e, família por família, as bombas de anel líquido, de palhetas, de parafusos secos e de garras, os boosters Roots e os ejetores, e de forma resumida as bombas de diafragma, pistão e scroll, com princípio de funcionamento, componentes, curva, características operacionais, pontos críticos de manutenção e aplicações, seguidos dos acessórios que completam o sistema (capítulos 4 a 8).
- **Dimensionamento:** Primeiro o sistema com uma bomba só, depois os casos que exigem combinação de bombas em série ou em paralelo, sempre com roteiro e exercícios resolvidos (capítulos 9 e 10).

A proposta didática privilegia:

- abordagem prática, sem carregamento acadêmico: toda equação apresentada é útil para algum exemplo ou exercício resolvido.
- o foco no baixo e no médio vácuo, onde está a indústria de processo. O alto vácuo é apenas situado.
- a tecnologia, e não o modelo comercial: o aluno aprende a escolher entre anel líquido, palhetas, parafusos, garras, lóbulos e ejetor e a ler o catálogo do fabricante, e não a decorar modelos.
- exemplos resolvidos passo a passo, com a origem de cada dado declarada.
- a identificação dos erros comuns de especificação e de instalação, e de suas consequências na operação.

ORGANIZAÇÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO

Este Programa de Pós-Graduação Lato Sensu em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais nasce como resultado de anos de atuação profissional, pesquisa aplicada e prática de campo, aliado a um convênio de cooperação acadêmica e institucional entre organizações de referência nas áreas de engenharia, educação superior e pesquisa científica.

O curso conta com uma parceria acadêmica e institucional estruturada, envolvendo as seguintes entidades, com atribuições claramente definidas:

- **Engenharia e Cia Educacional:**
  Empresa especializada em treinamentos técnicos, cursos, softwares e consultoria em engenharia mecânica e industrial, com foco em bombas, equipamentos industriais e sistemas de movimentação de fluidos.
  É a responsável pela concepção técnica do curso, definição da grade curricular, coordenação dos conteúdos e orientação prática, assegurando o alinhamento do programa com as demandas reais da indústria.
- **Instituto Sendtko de Ensino Superior:**
  É a instituição parceira responsável pela coordenação institucional e intermediação dos trâmites acadêmicos junto à instituição certificadora.
  O Instituto Sendtko possui experiência na estruturação de programas de pós-graduação lato sensu reconhecidos pelo MEC.
- **Faculdade de Governança, Engenharia e Educação de São Paulo (FGE-SP):**
  É a instituição de ensino superior responsável pelo registro, autorização e certificação do curso junto ao **Ministério da Educação (MEC)**, assegurando a regularidade acadêmica, a validade nacional do diploma e o cumprimento das exigências legais do ensino superior brasileiro.
- **STAR:**
  O **Science, Technology and Advanced Research Institute** é uma instituição de pesquisa e ensino tecnológico registrada nos Estados Unidos que possibilita ao aluno a participação em um Programa de Pós-Bacharelado (Post-Baccalaureate Program), estruturado para o desenvolvimento de projetos técnicos aplicados, construção de portfólio profissional e ampliação da experiência internacional, obtendo assim uma segunda certificação, válida nos Estados Unidos da América.

APOIO INSTITUCIONAL

A Pós-Graduação em Engenharia de Movimentação de Fluidos e Equipamentos Industriais conta também com o apoio institucional de empresas atuantes no setor, reforçando seu caráter aplicado, alinhado às demandas reais da indústria e às práticas de campo.

Entre elas:

- **OMEL Bombas e Compressores:**
  É uma empresa pioneira no Brasil no campo da tecnologia de bombeamento e controle de fluidos. Genuinamente nacional atuando desde 1952 no mercado e reconhecida pela tecnologia em projetos e qualidade de fabricação de bombas e sistemas especiais para as mais diversas aplicações.

  Entre os produtos oferecidos estão bombas centrífugas, bombas de vácuo, bombas dosadoras, sopradores tipo "roots", compressores de anel líquido, rotâmetros, sistemas de Vácuo e válvulas de mangote.

- **Vallair Bombas, Compressores, Instrumentação e Válvulas:**
  É uma empresa especializada em bombas de deslocamento positivo, tais como bombas pneumáticas, bombas peristálticas e bombas dosadoras, instrumentos pneumáticos e acessórios para estes produtos.

  Também faz parte do escopo de fornecimento da Vallair, produtos e soluções de bombeamento específicos para o setor de energia, petróleo e saneamento, por meio da distribuição exclusiva de sopradores, bombas centrífugas e dosadoras, bombas de vácuo, válvulas de mangote e rotâmetros da **OMEL.**

OBJETIVOS

Capacitar o aluno a especificar, dimensionar e selecionar bombas e sistemas de vácuo para a indústria de processo, com base na carga de gás do processo, no nível de vácuo requerido e nas condições de instalação.

Ao final da disciplina, o aluno deverá ser capaz de:

- Trabalhar em pressão absoluta, converter unidades de pressão em vácuo e situar cada aplicação industrial na faixa de baixo ou médio vácuo.
- Reconhecer o papel do vapor e da pressão de vapor no vácuo industrial e aplicar a lei de Dalton a misturas de gás e vapor na sucção.
- Distinguir velocidade de bombeamento de fluxo de gás e converter a carga de gás do processo em vazão de sucção.
- Reconhecer quando o gás rarefeito deixa de escoar como no escoamento comum e dimensionar a linha de sucção pela condutância e pela velocidade efetiva.
- Inventariar as fontes de gás de um sistema, estimar vazamentos em projeto, medi-los em campo e selecionar o medidor de pressão adequado.
- Escolher a tecnologia de bomba pelo mapa de aplicações: nível de vácuo, vazão, condensáveis, sólidos, corrosivos, atmosfera explosiva, disponibilidade de água e custo de aquisição e de operação.
- Descrever princípio de funcionamento, componentes, curva característica, características operacionais e pontos críticos de manutenção das bombas de anel líquido, palhetas, parafusos, garras, Roots e ejetores, e de forma resumida das bombas de diafragma, pistão e scroll, e reconhecer quando se justifica uma versão especial.
- Ler o catálogo do fabricante e reconhecer que o limite de pressão de cada tecnologia, inclusive a escolha entre um e dois estágios, depende do fabricante e do modelo.
- Especificar os acessórios do sistema de vácuo e aplicar as boas práticas de instalação e de segurança.
- Dimensionar a bomba de vácuo pelo tempo de evacuação e pela carga contínua, com as correções de temperatura e de condensação, a perda na linha de sucção e as margens de segurança, e registrar o cálculo em memorial e na folha de dados da cotação.
- Identificar quando uma bomba só não resolve o serviço e dimensionar combinações em série e em paralelo, incluindo a separação entre bomba de partida e bomba de regime, comparando com a solução de uma bomba só em potência, reserva e custo.

1.CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1. Introdução

Os conceitos de mecânica dos fluidos aqui reunidos de forma direta já foram estudados em profundidade em disciplina própria.

Nosso objetivo aqui é relembrar os principais pontos estudados e permitir que aqueles que não cursaram ainda a disciplina possa acompanhar a disciplina sem maiores dificuldades.

Tudo o que faremos adiante repousa sobre quatro blocos:

- São as propriedades do fluido quem definem como ele resiste ao escoamento e ao bombeamento,
- a estática, que fixa o conceito de pressão e de coluna de líquido,
- a cinemática, que descreve vazão, velocidade e regime de escoamento, e
- equação da energia que trata da inteiração do fluido ao longo do escoamento

Sem esses pilares não se calcula altura manométrica, curva do sistema, número de Reynolds ou NPSH.

1.2. Propriedades dos Fluidos

1.2.1. Conceito Técnico de Fluido e Os Estados da Matéria

Fluido, em engenharia, é toda substância que se deforma continuamente quando submetida a uma tensão de cisalhamento, por pequena que seja essa tensão. A definição não separa líquidos de gases: ambos são fluidos. O que os separa, para o propósito deste módulo, é a resposta a uma variação de pressão.

A matéria é usualmente descrita em três estados, sólido, líquido e gasoso, aos quais a física moderna acrescenta o plasma.

No estado sólido as moléculas ocupam posições fixas em uma estrutura reticulada, vibrando em torno de uma posição de equilíbrio. Fornecendo energia térmica, a agitação vence a ligação reticulada e a substância funde.

Fornecendo mais energia, a ligação intermolecular é rompida por completo e a substância passa ao estado gasoso, expandindo-se em todas as direções e misturando-se aos demais gases presentes.

A ordem de grandeza envolvida ajuda a fixar por que um gás se comporta como se comporta: um milímetro cúbico de ar à pressão atmosférica contém aproximadamente $2{,}55 \times 10^{16}$ moléculas. É a liberdade de movimento dessa população, e não sua quantidade, que responde por compressibilidade, difusibilidade e expansibilidade.

1.2.2. Princípio da Aderência (Condição de Não Deslizamento)

Princípio da aderência ou condição de não deslizamento está relacionado com o fluido que em contato com uma superfície sólida assume a mesma velocidade da superfície.

Junto à parede parada, a velocidade do fluido é nula, por outro lado, junto a uma parede em movimento, o fluido acompanha a parede.

É esse princípio que dá origem ao perfil de velocidades e às perdas de carga por atrito.

Observação: *Somente em escoamento molecular, o princípio da aderência não está presente.*

1.2.3. A Experiência Das Duas Placas E A Lei De Newton

A relação entre esforço e deformação é mais bem compreendida pela experiência das duas placas.
Considere duas placas paralelas, separadas por uma pequena distância e com o fluido entre elas.
A placa inferior é fixa, enquanto a superior é móvel e submetida a uma força tangencial e passa a se mover com velocidade constante.

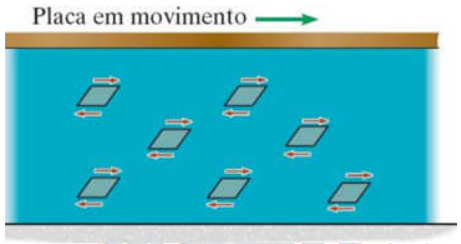


Figura 1: Experiência das duas placas (Fonte: Hibbeler)

Pelo princípio da aderência, o fluido junto à placa inferior tem velocidade nula e o fluido junto à placa superior move-se com a velocidade da placa.

Entre esses extremos há uma variação contínua de velocidade ao longo da espessura que traz as consequências:

- o movimento ocorre por deslizamento relativo entre camadas adjacentes.
- Essa diferença de velocidade entre camadas é a deformação por cisalhamento.

A **taxa de cisalhamento** mede a rapidez dessa deformação e é numericamente igual ao gradiente de velocidade normal ao escoamento, du/dy.

Para um grande grupo de fluidos, a tensão de cisalhamento é proporcional a essa taxa, com a viscosidade dinâmica como constante de proporcionalidade, esta é a chamada **Lei de Newton da viscosidade**:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad (1)$$

onde τ = tensão de cisalhamento [Pa], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s] e **du/dy** = taxa de cisalhamento [1/s].

1.2.4. Massa Específica, Peso Específico

A **massa específica ρ** (rô), também chamada de densidade, é a massa por unidade de volume, em [kg/m³].

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2)$$

onde: **ρ** = massa específica [kg/m³], **m** = massa [kg], **V** = volume [m³].

O **peso específico** γ (gama) é o peso (**W**) por unidade de volume, em [N/m³] no SI.

Como o peso é W = m·g:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \rho \cdot g \qquad (3)$$

onde: γ = peso específico [N/m³], **W** = peso (N), **ρ** = massa específica [kg/m³], **g** = aceleração da gravidade (9,81 [m/s²]).

1.2.5. Gravidade Específica

A **gravidade específica SG** (densidade relativa) é a razão entre a massa específica do fluido e a de uma referência: É adimensional.

$$SG = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{ref}} \tag{4}$$

onde: **SG** = gravidade específica (adimensional), ρ_{fluido} **e** ρ_{ref} = massas específicas do fluido e da referência em [kg/m³] no SI.

A referência para líquidos é a água à pressão atmosférica e a temperatura de 4 [°C] que vale 1000 [kg/m³], enquanto para gás é o ar à pressão atmosférica 1,013 [bar] (101.300 [Pa]), e a temperatura de 15 [°C] que vale 1,225 [kg/m³], assim temos:

$$SG_{líquido} = \frac{\rho_{líquido}}{1000} \tag{5}$$

$$SG_{gás} = \frac{\rho_{gás}}{1,225} \tag{6}$$

1.2.6. Viscosidade Dinâmica E Viscosidade Cinemática

A viscosidade quantifica a resistência interna do fluido ao escoamento. O coeficiente μ da Lei de Newton é a **viscosidade dinâmica (absoluta)**, em [Pa.s] (equivalente a [N.s/m²] ou [kg/m.s]).

É comum o uso da unidade centi-Poise, oriunda do sistema CGS de unidades, que está caindo em desuso, conforme relação 1 [cP] = 0,001 [Pa.s].

A viscosidade depende fortemente da temperatura: nos líquidos ela diminui quando a temperatura sobe (o óleo quente escoa mais fácil), por outro lado, nos gases, cresce.

Por isso a temperatura de operação é sempre um dado de entrada no dimensionamento.

A água tem viscosidade dinâmica equivalente a 1 [cP].

A **viscosidade cinemática** ν (ni) é a razão entre a dinâmica e a massa específica, em [m²/s].

De forma semelhante, é comum o uso da unidade cSt (centi-Stoke), também do CGS, onde 1 [cSt] = 0,000001 [m²/s].

A viscosidade cinemática da água é equivalente a 1 [cSt].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{7}$$

onde: ν = viscosidade cinemática [m²/s], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s], **ρ** = massa específica [kg/m³], no SI.

1.2.6.1. Exemplo 1.1: Conversão de unidade de viscosidade

Um xarope tem viscosidade dinâmica de 200 [cP]. Em unidades do SI:

$$\mu = 200 \cdot 0{,}001 = 0{,}20\ [Pa \cdot s]$$

Resultado: μ = 0,20 [Pa.s], ou seja, 200 vezes a viscosidade da água.

> ***Ponto-chave:*** A viscosidade é a propriedade que mais impacta a escolha do tipo de bomba.
>
> Fluidos pouco viscosos favorecem a bomba centrífuga, à medida que a viscosidade cresce, o rendimento da bomba cai, o que torna a mudança para uma bomba de deslocamento positivo, mais atraente.

1.3. Estática dos Fluidos

1.3.1. Pressão E Unidades

Pressão é a força normal por unidade de área, conforme:

$$p = \frac{F}{A} \tag{8}$$

onde: **p** = pressão [Pa], **F** = força normal (N) e **A** = área (m²).



Figura 2: Definição de pressão (Fonte: Hibbeler)

Existem várias unidades de pressão que surgiram por várias circunstâncias, as mais utilizadas hoje em dia são:

- 1 [bar] = 10^5 [Pa] = 100 [kPa] = 0,1 [MPa] ≅ 14,5 [PSI] ≅ 750 [mmHg] ≅ 10,3 [mca] ≅ 750 [Torr] ≅ 1,02 [kgf/cm²]

1.3.2. Pressão Absoluta, Atmosférica E Efetiva

Pressão atmosférica é a pressão exercida pela coluna de ar que existe no nosso planeta, e portanto exerce pressão sobre tudo e todos que estão na superfície.

Ao nível do mar vale cerca de 1 atm (~ 101,3 [kPa] ou 14,7 [PSI]) e diminui com a altitude, da ordem de 12 [Pa] por metro nos primeiros níveis.

Pressão absoluta (pabs) é a pressão medida a partir do vácuo absoluto (ou zero absoluto). No Brasil recebe o índice abs e em material norte-americano, a letra "a" na unidade como [psia] e [bar(a)].

Pressão efetiva é a pressão medida a partir da pressão atmosférica local, daí ser chamada também de *pressão relativa*. Ela é o que a maioria dos instrumentos indica.

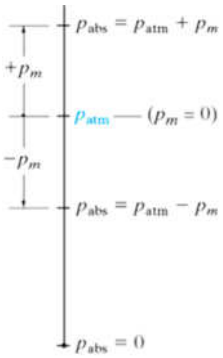
No Brasil, a literatura não costuma usar índices, no entanto, em material americano é comum "g" acompanhar a unidade como [PSIG] ou [barg].

Vale a relação entre as escalas é determinada por:

$$p_{abs} = p + p_{atm} \tag{9}$$

onde $\mathbf{p_{abs}}$ = pressão absoluta, **p** = pressão efetiva e $\mathbf{p_{atm}}$ = pressão atmosférica local (todas na mesma unidade).

Valores efetivos negativos indicam pressão abaixo da atmosférica que é uma condição que recebe o nome de *pressão de vácuo* ou *pressão vacuométrica*, comum em linhas de sucção, os instrumentos de Bourdon utilizados nessa condição são chamados de *vacuômetros.*



e forma similar, valores efetivos positivos indicam pressão acima da atmosférica, sendo chamadas de *pressão manométricas* e os instrumentos chamados de *manômetros*. Instrumentos que atuam tanto em faixas negativas quanto positivas são chamados de *vacuomanômetro ou manovacuômetros.*

Figura 3: Escala de pressão (Fonte: Engenharia e Cia)

1.3.3. Exemplo 1.2: Conversão entre escalas de pressão

Um manômetro indica 2 [bar] (efetiva) ao nível do mar (p_{atm} = 1,013 [bar]). A pressão absoluta é:

$$p_{abs} = 2 + 1{,}013 = 3{,}013\ [bar]$$

> ***Resultado:*** p_{abs} = 3,01 [bar]. Cálculos de NPSH e de sucção sob vácuo devem ser feitos em pressão absoluta.

1.3.4. Princípio de Stevin e Carga de Pressão

O Princípio de Stevin estabelece que, num fluido homogêneo em repouso, a variação de pressão entre dois pontos é proporcional à diferença de altura: quanto maior a profundidade, maior a pressão.

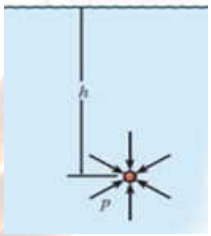


Figura 4: Pressão hidrostática em um ponto (Fonte: Hibbeler)

Da condição de equilíbrio de um elemento de fluido obtém-se a pressão hidrostática:

$$\boldsymbol{p = \rho \cdot g \cdot h = \gamma \cdot h} \qquad (10)$$

onde **p** = pressão hidrostática [Pa], **ρ** = massa específica [kg/m³], **g** = aceleração da gravidade (9,81 [m/s²]), **h** = profundidade [m] e $\boldsymbol{\gamma}$ = peso específico [N/m³].

Se a pressão no nível for diferente da pressão atmosférica, a equação fica:

$$\boldsymbol{p = p_{superfície} + \rho \cdot g \cdot h} \qquad (11)$$

Se a pressão na superfície for de vácuo, o valor entra negativo na equação (11).

Isolando h, obtém-se a **carga de pressão**, a pressão expressa como altura de coluna do próprio líquido, daí unidades como [mca] e [mmHg]:

$$\boldsymbol{h = \frac{p}{\gamma} \quad ou \quad h = \frac{p - p_{superfície}}{\gamma}} \qquad (12)$$

onde **h** = carga de pressão ou altura de coluna de líquido em [m], **p** = pressão [Pa] e $\boldsymbol{\gamma}$ = peso específico [N/m³], no SI.

Para ilustrar o conceito, veja a imagem seguinte, ambos líquidos promovem a mesma pressão no fundo, mesmo com carga de pressão tão diferentes, a diferença se deve justamente pela diferença da massa específica dos produtos.

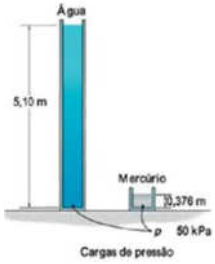


Figura 5: Carga de pressão (Fonte: Hibbeler)

1.3.5. Exemplo 1.3: pressão no fundo de um reservatório

Pressão efetiva no fundo de um reservatório de água com 15 [m] de coluna:

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9{,}8 \cdot 15 = 147000\ [Pa]$$

> ***Resultado:*** p = 147 [kPa] (aprox. 1,47 [bar]), o mesmo que 15 [mca], coerente com a definição de carga de pressão.

> ***Atenção:*** A cota onde o manômetro é instalado influencia a leitura pela própria coluna de líquido até ele. Em baixa pressão e, sobretudo, em vácuo, uma coluna de 1 [m] já representa erro relativo grande. Padronize a cota de medição.

1.4. Cinemática dos Fluidos

1.4.1. Vazão Volumétrica e Vazão Mássica

A **vazão volumétrica Q** é o volume que atravessa uma seção por unidade de tempo, definido por:

$$\boldsymbol{Q = \frac{\forall}{t}} \qquad (13)$$

onde **Q** = vazão volumétrica [m³/s], ∀= volume [m³] e **t** o tempo [s], no SI.

Uma maneira simples e rudimentar de medir a vazão é verificar quanto tempo leva para encher um determinado volume conhecido, útil em algumas situações práticas.

A vazão volumétrica está relacionada à velocidade média V e à área A, conforme:

$$\boldsymbol{Q = V \cdot A} \qquad (14)$$

onde **Q** = vazão volumétrica [m³/s], **V** = velocidade média [m/s] e **A** = área da seção transversal (m²).

A **vazão mássica** é uma propriedade similar, no entanto, relacionado à massa que atravessa uma área por unidade de tempo, conforme:

$$\boldsymbol{\dot{m} = \frac{m}{t} = \rho \cdot Q} \qquad (15)$$

onde $\dot{m}$ = vazão mássica [kg/s], **ρ** = massa específica [kg/m³] e **Q** = vazão volumétrica [m³/s].

Em análise de sistemas gasosos, cuja compressibilidade é importante, usar vazão mássica é mais apropriado, no entanto, no campo dos compressores é comum o uso de vazão volumétrica.

1.4.2. Exemplo 1.4: Vazão a Partir de V e D

Água a 2 [m/s] por um tubo de 100 [mm] (0,10 m) de diâmetro interno:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 0{,}785 \cdot 0{,}10^2 = 0{,}00785\ [m^2] \ \mid \ Q = V \cdot A = 2 \cdot 0{,}00785 = 0{,}0157\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

> ***Resultado:*** Q = 0,0157 [m³/s], ou seja, cerca de 56,5 [m³/h].

1.4.3. Velocidade Média e Perfil de Velocidades

Por causa do princípio da aderência, a velocidade é nula na parede e máxima na linha de centro da tubulação, assim existe uma distribuição espacial de velocidade, chamada de *perfil de velocidades*, ilustrado a seguir:

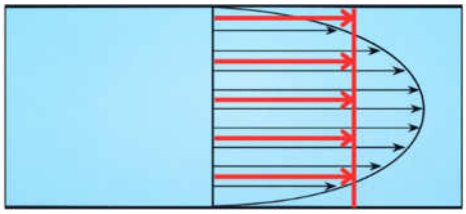


Figura 6: Perfil de velocidades e a velocidade média (vermelha) (Fonte: Engenharia e Cia)

Para o dimensionamento trabalha-se com a velocidade média V, tal que V·A reproduza a vazão real, é ela que normalmente entra nos cálculos, como do número de Reynolds e das perdas de carga.

1.4.4. Regimes de Escoamento e Número de Reynolds

O escoamento pode ser laminar (camadas ordenadas), turbulento (mistura intensa) ou de transição.

O regime muda o cálculo da perda de carga, então precisa ser classificado, e é o que o número de Reynolds faz, comparando efeitos inerciais e viscosos:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \tag{16}$$

onde **Re** = número de Reynolds (adimensional), **ρ** = massa específica [kg/m³], **V** = velocidade média [m/s], **D** = diâmetro interno [m], **μ** = viscosidade dinâmica [Pa.s] e ν = viscosidade cinemática [m²/s].

A classificação para tubos de seção circular, tanto para líquido quanto para gases é:

- Laminar: Re < 2000
- Transição: 2000 < Re < 2400
- Turbulento: Re > 2400

Observação: a faixa de valores listadas acima podem divergir dependendo da fonte. Alguns autores, como o Hibbeler, adotam apenas regime laminar e turbulento, com valor limite de 2300, sendo laminar abaixo ou turbulento acima.

1.4.5. Exemplo 1.5: Cálculo do número de Reynolds

Para a água do exemplo anterior (V = 2 [m/s], D = 0,10 [m], v = 0,000001 [m²/s]):

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{2 \cdot 0{,}10}{1 \cdot 10^{-6}} = 200000$$

> ***Resultado:*** Re = 200.000. Como Re > 2400, o escoamento é turbulento, o caso mais comum em bombeamento industrial de fluidos newtonianos.

1.4.6. Equação Da Continuidade

A equação da continuidade é a uma forma da *lei da conservação da massa*: a massa que entra em um volume de controle é igual à que sai.

Em regime permanente a vazão mássica é constante, para fluido incompressível (líquidos), a massa específica é constante e a expressão se reduz a:

$$Q_1 = Q_2 \quad \rightarrow \quad V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \tag{17}$$

onde: **Q** = vazão [m³/s], **V** = velocidade [m/s] e **A** = área (m²)

Mantida a vazão, reduzir o diâmetro aumenta a velocidade. Como a perda de carga cresce com o quadrado da velocidade, a escolha do diâmetro tem efeito forte sobre a altura manométrica.

1.4.7. Exemplo 1.6: Efeito da Redução de Diâmetro

Durante o escoamento numa linha, ao reduzir o diâmetro à metade, a área cai a um quarto para manter Q = V·A, conforme demonstrado a seguir:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{A_1}{A_2} = V_1 \cdot \frac{\pi/4\, D_1^2}{\pi/4 \left(D_1/2\right)^2} = 4 \cdot V_1 \qquad (18)$$

> ***Resultado:*** A velocidade fica 4 vezes maior. Como a perda de carga varia com o quadrado da velocidade, ela cresce numa proporção muito maior.

1.4.8. Escoamentos em Regime Permanente e Não-Permanente

Escoamento em regime permanente ou estacionário é aquele em que as suas propriedades, em cada ponto, não variam com o tempo.

Por outro lado, os **escoamentos em regime não-permanente ou transitórios** as propriedades, em cada ponto, mudam com o tempo.

Aqui cabem dois pontos importantes:

- Esses conceitos são aplicados a qualquer propriedade de interesse, portanto, se qualquer uma delas se alterar, o escoamento não é mais permanente.
- A análise de variação de propriedades é nos pontos de interesses. Em pontos diferentes não somente pode como normalmente acontece mudanças.

Esses pontos estão ilustrados a seguir:

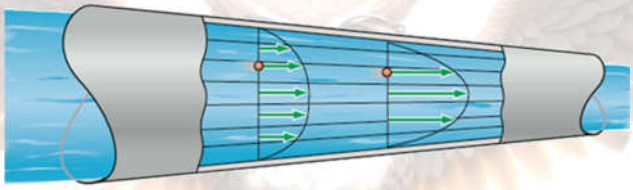


Figura 7 - Escoamentos em regime permanente (Fontes: Hibbeler)

Observe que há dois perfis de velocidades diferentes, se eles se mantiverem constantes com o tempo, o regime é permanente.

O dimensionamento convencional adota essa hipótese. Transitórios (golpe de aríete) são tratados à parte.

2. FUNDAMENTOS DO VÁCUO E DOS GASES

2.1. Introdução

No capítulo 1 relembramos pressão, vazão e as propriedades dos fluidos. Este capítulo aplica esses conceitos ao caso em que a pressão fica abaixo da atmosférica, e acrescenta apenas o que muda quando se trabalha com vácuo: a escala de pressão que passa a valer, as faixas de vácuo, o papel do vapor e a forma como se mede a vazão de uma bomba de vácuo.

Vácuo, na engenharia industrial, não é ausência de matéria. É uma condição de pressão abaixo da atmosférica dentro de um volume fechado. O que interessa ao engenheiro é quanto gás ainda está lá dentro e o que precisa ser feito para retirar mais.

Toda bomba de vácuo, de qualquer tipo, existe para isso: retirar gás de dentro de um volume e descarregá-lo, normalmente contra a atmosfera.

Uma bomba de vácuo é, no fundo, um compressor cuja sucção está abaixo da atmosfera e cuja descarga está na atmosfera. Por isso muito do que foi visto na disciplina de compressores continua valendo. A diferença está no lado da sucção: lá o gás é rarefeito, carrega vapor, e cada metro cúbico aspirado contém muito menos massa do que o mesmo metro cúbico na atmosfera.

O vácuo aparece em praticamente todos os setores industriais, e quase sempre por um destes três motivos:

- **Diferença de pressão como força:** Fixação de peças em usinagem, ventosas de manipulação, elevadores de chapas, paletizadoras, formação de papel sobre a tela.
  A força disponível é a área multiplicada pela diferença de pressão. Aqui não interessa vácuo profundo, e sim interessa vazão suficiente para compensar os vazamentos.
- **Remoção de gases e vapores:** Secagem, desaeração de líquidos, desgaseificação, destilação e evaporação a vácuo, recuperação de solventes, retirada de ar de condensadores de turbina, filtração a vácuo em mineração e açúcar.
  Aqui a bomba trabalha contra uma carga contínua de gás e de vapor.
- **Ambiente com poucas moléculas:** Deposição de filmes finos, fornos a vácuo, instrumentação analítica.
  Aqui interessa um vácuo muito mais profundo, e o problema já é de alto vácuo, que este curso apenas situa.

> ***Ponto-chave:*** Os três motivos levam a três lógicas de dimensionamento diferentes.
>
> Antes de escolher a bomba, é obrigatório saber por que o vácuo está sendo feito: força, remoção de gás e vapor, ou ambiente rarefeito.

2.2. Pressão Absoluta no Vácuo

2.2.1. A Única Escala Que Vale No Cálculo

As três escalas de pressão do capítulo 1 continuam as mesmas, mas no vácuo uma delas passa a mandar:

- **Pressão atmosférica** é a pressão da coluna de ar sobre o local. O valor normal de referência é 1.013,25 [mbar], mas esse é um valor de referência, não o valor do seu chão de fábrica, que depende da altitude e do tempo.
- **Pressão absoluta** tem o zero no vácuo absoluto. É a única escala usada em cálculo de vácuo. Em tecnologia do vácuo toda pressão é absoluta, e por isso os catálogos costumam omitir o índice "abs".
- **Pressão efetiva** (relativa, manométrica) é medida a partir da atmosfera local. Valores negativos indicam vácuo.

$$p_{abs} = p_{ef} + p_{atm} \tag{19}$$

No campo, o vacuômetro instalado na linha quase sempre lê pressão efetiva, enquanto o catálogo da bomba trabalha em pressão absoluta. A conversão é simples, mas precisa ser feita toda vez.

Como a pressão atmosférica muda com a altitude, a pressão necessária, no ramo do vácuo deve ser sempre a absoluta, pois um mesmo valor de pressão efetiva pode representar pressões absolutas diferentes, dependendo do local de instalação da bomba.

2.2.2. Exemplo 2.1: Leitura Do Vacuômetro À Pressão Absoluta

Um vacuômetro indica −0,8 [bar] e outro, instalado em outra linha, indica −530 [mmHg]. Qual é a pressão absoluta em cada caso, considerando a atmosfera local igual a 1 [bar] e 760 [mmHg]?

Resolução:

Passo 1: no primeiro caso, $p_{abs} = -0{,}8 + 1 = 0{,}2$ [bar], ou seja, 200 [mbar] absolutos.

Passo 2: no segundo caso, $p_{abs} = 760 - 530 = 230$ [mmHg].

Convertendo pela relação 1 [mmHg] = 1,333 [mbar], obtém-se cerca de 306 [mbar] absolutos.

Resultado: as duas linhas trabalham em vácuo parecido, entre 200 e 310 [mbar] absolutos, embora as leituras dos instrumentos pareçam muito diferentes.

> ***Atenção 1:*** Especificar a bomba pela leitura relativa é um erro clássico. Um pedido de "0,9 bar de vácuo" pode significar 100 [mbar] absolutos, que qualquer bomba de anel líquido de um estágio entrega, ou algo bem diferente se quem escreveu pensava em outra referência. Sempre feche o número em pressão absoluta antes de ir ao catálogo.
>
> ***Atenção 2:*** A expressão "por cento de vácuo" ainda aparece em pedidos de cotação e não deve ser aceita sem esclarecimento. Ela não é unidade de pressão, depende da atmosfera local e não permite cálculo algum.

2.2.3. Pressão Atmosférica e Altitude

Como a descarga da bomba de vácuo frequentemente está na atmosfera, a pressão atmosférica local entra em dois lugares do cálculo: na conversão das leituras de campo e na razão de compressão que a bomba precisa vencer.

Uma planta a 800 [m] de altitude tem cerca de 920 [mbar] de atmosfera, e não 1.013 [mbar].

Para a atmosfera padrão, a pressão em função da altitude z [m] é dada por:

$$p_{atm} = 1013{,}25 \cdot \left(1 - 2{,}2557 \cdot 10^{-5} \cdot z\right)^{5{,}2559} \quad (20)$$

onde p_{atm} = pressão atmosférica [mbar] e z = altitude em relação ao nível do mar [m]. A Tabela 12.1 do Anexo traz os valores calculados de 100 em 100 [m].

> ***Observação:*** *Em São Paulo, a cerca de 760 [m], a atmosfera padrão vale aproximadamente 925 [mbar].*
>
> *Uma leitura de −700 [mbar] no vacuômetro significa 225 [mbar] absolutos lá, e 313 [mbar] absolutos no nível do mar.*

2.3. Unidades de Pressão em Vácuo

A unidade do SI é o pascal, [Pa] = [N/m²]. A unidade de trabalho consagrada na indústria de vácuo é o milibar, [mbar], numericamente igual ao hectopascal: 1 [mbar] = 1 [hPa] = 100 [Pa].

Parte da literatura antiga e dos catálogos norte-americanos usa o Torr, praticamente igual ao milímetro de mercúrio, e a polegada de mercúrio.

Unidade	Pa	mbar	Torr (mmHg)	atm
1 Pa	1	0,01	$7{,}5 \times 10^{-3}$	$9{,}87 \times 10^{-6}$
1 mbar	100	1	0,75	$9{,}87 \times 10^{-4}$
1 bar	1×10^{5}	1.000	750	0,9869
1 Torr	133,32	1,333	1	$1{,}316 \times 10^{-3}$
1 atm	$1{,}01325 \times 10^{5}$	1.013,25	760	1

Tabela 2.1: Conversão entre unidades de pressão

Relações práticas que vale guardar:

- 1 [Torr] ≈ 4/3 [mbar] e 1 [mbar] = 3/4 [Torr].
- 1 [polegada de Hg] = 33,86 [mbar].
- 1 [psi] = 68,95 [mbar].
- 1 [mícron de Hg] = 1 [mTorr] = $1{,}33 \times 10^{-3}$ [mbar].

> ***Observação:*** *As unidades Torr, mmHg, atmosfera técnica e "por cento de vácuo" não são mais oficiais. O Torr sobrevive nos catálogos por tradição, e o engenheiro precisa saber converter.*

2.4. Faixas de Vácuo

2.4.1. A Classificação

A faixa de pressões usada em tecnologia do vácuo cobre mais de dezesseis ordens de grandeza, e nenhuma bomba atende essa faixa inteira.

Por isso ela é dividida em faixas, cada uma com um tipo de escoamento dominante e uma família de bombas capaz de atendê-la:

Faixa	Pressão [mbar]	Escoamento	Tecnologias típicas
Baixo vácuo (vácuo grosseiro)	1.013 a 1	Viscoso	Anel líquido, palhetas, garra, parafuso, ejetores
Médio vácuo	1 a 10^{-3}	Transição	Palhetas de dois estágios, parafuso, Roots sobre bomba primária, ejetores multiestágio
Alto vácuo	10^{-3} a 10^{-7}	Molecular	Difusora, turbomolecular (sempre com bomba primária)
Ultra-alto vácuo	abaixo de 10^{-7}	Molecular	Turbomolecular, criogênica, sorção

Tabela 2.2: Faixas de vácuo (Fonte: Leybold e Atlas Copco)

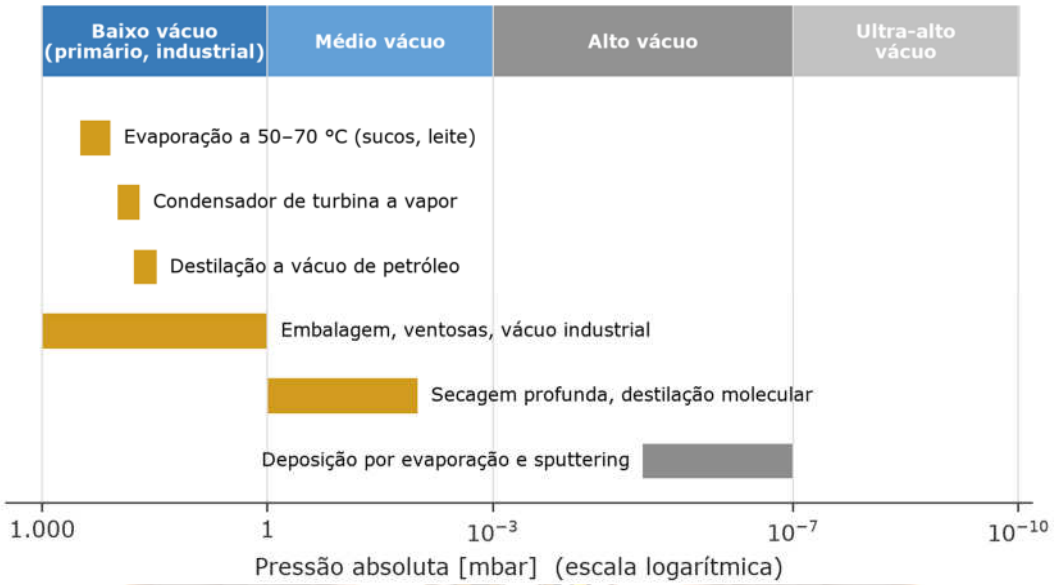


Figura 8: Faixas de vácuo e onde estão os processos industriais (Fonte: Engenharia & Cia)

A figura mostra o ponto mais importante para este curso: a indústria de processo trabalha no baixo vácuo, que a Atlas Copco chama de vácuo primário ou industrial, da atmosfera até cerca de 1 [mbar].

É nessa região que ficam a filtração, a evaporação, a desaeração, a destilação, o condensador de turbina, a embalagem e a manipulação por ventosa. Alguns processos, como a secagem profunda e a destilação molecular, descem até cerca de 10^{-2} [mbar], já no médio vácuo.

O alto e o ultra-alto vácuo pertencem à pesquisa, aos semicondutores e aos revestimentos finos, e aqui são apenas citados.

> ***Observação:*** *A classificação acima segue a linha apresentado academicamente e por alguns fabricantes tradicionais de bombas de vácuo, no entanto, baixo, médio ou alto vácuo, podem seguir critérios diferentes, a depender do fabricante, em outras palavras, uma bomba de alto vácuo de um fabricante pode estar na classificação de médio vácuo. O alto dele é em relação a outros modelos do portifólio.*

2.4.2. O Que Muda de Uma Faixa Para Outra

O que efetivamente muda de uma faixa para outra é a distância que uma molécula percorre entre dois choques com outras moléculas, chamada **livre caminho médio**.

Na pressão atmosférica ela é de centésimos de micrômetro. Para o ar a 20 [°C], vale a regra prática:

$$\lambda \cdot p \approx 6{,}67 \cdot 10^{-3} \tag{21}$$

onde λ = livre caminho médio [cm] e p = pressão absoluta [mbar]. A 1 [mbar], λ vale cerca de 0,07 [mm], já a 10^{-3} [mbar], cerca de 7 [cm] e no alto vácuo, metros.

Grandeza	Baixo vácuo	Médio vácuo	Alto vácuo
Pressão [mbar]	1.013 a 1	1 a 10^{-3}	10^{-3} a 10^{-7}
Livre caminho médio [cm]	abaixo de 10^{-2}	10^{-2} a 10	10 a 10^{5}
Moléculas colidem principalmente	entre si	entre si e com as paredes	com as paredes
Escoamento	Viscoso	Transição	Molecular
Quem manda no tempo de bombeamento	o volume do vaso	volume e superfícies	as superfícies internas

Tabela 2.3: Características físicas por faixa de vácuo, ar a 20 °C (Fonte: Leybold)

Enquanto as moléculas colidem principalmente entre si, o gás se comporta como um fluido contínuo, e vale a mecânica dos fluidos do capítulo 1. Quando passam a colidir principalmente com as paredes, as fórmulas de escoamento mudam. O capítulo 3 mostra como saber em qual situação a linha de sucção está.

> ***Ponto-chave:*** No baixo vácuo, quem manda no tempo de bombeamento é o volume do vaso. No médio vácuo começam a pesar as superfícies internas, as vedações e a umidade adsorvida nas paredes.
>
> É por isso que a indústria de processo, que trabalha no baixo vácuo, dimensiona a bomba pelo volume e pela carga de gás, e não pelo acabamento das paredes.

2.5. Os Gases Sob Vácuo

2.5.1. Equação de Estado Na Forma Usada Em Vácuo

A equação de estado dos gases ideais, vista na disciplina de compressores, continua valendo, e no vácuo vale com folga, porque a pressão é baixa:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \tag{22}$$

onde p = pressão absoluta [Pa], V = volume [m³], m = massa [kg], M = massa molar [kg/kmol], R = 8314 [J/(kmol·K)] e T = temperatura absoluta [K].

Uma consequência que o aluno precisa fixar: a uma dada temperatura, a pressão depende apenas do número de moléculas por volume, e não do tipo de gás.

Um grama de hélio em 10 litros a 20 [°C] exerce 609 [mbar], um grama de nitrogênio no mesmo volume exerce 87 [mbar].

A mesma massa de gás leve exerce mais pressão porque contém mais moléculas.

2.5.2. Boyle-Mariotte: Equalização Entre Volumes

À temperatura constante, o produto pressão vezes volume se conserva:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \tag{23}$$

É a relação usada no campo para prever o que acontece quando se abre a válvula entre um vaso evacuado e outro volume, e para dimensionar reservatórios de vácuo que atendem picos de consumo. O capítulo 9 usa essa relação na equalização entre câmaras.

2.5.3. Dalton: Misturas de Gás e Vapor

Praticamente nenhum processo aspira gás puro. O que chega à boca da bomba é uma mistura de gás que não condensa (ar, nitrogênio, gases de processo) com vapor que condensa (água, solventes).

Pela lei de Dalton, cada componente se comporta como se ocupasse sozinho o volume inteiro, e a pressão total é a soma das pressões parciais:

$$p_{total} = p_{gás} + p_{vapor} \tag{24}$$

A proporção em massa entre os componentes sai da própria equação de estado:

$$\frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{m}_{gás}} = \frac{M_{vapor}}{M_{gás}} \cdot \frac{p_{vapor}}{p_{gás}} \tag{25}$$

onde $\dot{m}$ = vazão mássica de cada componente [kg/h], M = massa molar [kg/kmol] (água 18, ar 29) e p = pressão parcial [mbar].

> ***Atenção:*** A pressão parcial do vapor nunca pode passar da pressão de vapor de saturação na temperatura da mistura. Se a conta der um valor maior, o que acontece na realidade é condensação, e não uma pressão mais alta.

2.6. Vapor e Pressão de Vapor

2.6.1. Gás, Vapor e Vapor Saturado

Três palavras que a linguagem do dia a dia mistura precisam ficar separadas:

- **Gás** é a substância que não condensa na temperatura de trabalho, como o ar.
- **Vapor** é a substância em estado gasoso que pode ser liquefeita, naquela temperatura, só por aumento de pressão, como o vapor de água a 40 [°C].
- **Vapor saturado** é o vapor em equilíbrio com o próprio líquido.

A pressão do vapor saturado, chamada pressão de vapor p_s, depende apenas da temperatura.

É o mesmo conceito que aparece no NPSH das bombas centrífugas, agora visto do outro lado: lá, a pressão não pode cair abaixo de p_s sem cavitar, aqui, enquanto houver água no sistema, a pressão não cai abaixo de p_s sem que a água ferva.

Temperatura [°C]	p_s [mbar]	Temperatura [°C]	p_s [mbar]
0	6,11	35	56,2
10	12,3	40	73,8
15	17,0	50	123,3
20	23,4	60	199,2
25	31,7	70	311,7
30	42,4	80	473,8

Tabela 2.4: Pressão de vapor da água (Fonte: SIHI)

2.6.2. Consequências Práticas

Tudo o que foi visto até aqui se resume numa ideia: a pressão de vapor depende só da temperatura, e onde houver líquido em contato com o gás a pressão parcial do vapor tende a esse valor.

Num sistema de vácuo isso vale para a água do processo, para os solventes, para a umidade das paredes e até para o líquido de selagem da bomba.

Dessa única ideia saem quatro consequências, que aparecem em todos os capítulos seguintes, da escolha da bomba ao dimensionamento:

- **Todo líquido dentro do sistema limita o vácuo:** Enquanto houver água livre a 20 [°C], a pressão não desce abaixo de cerca de 23 [mbar], por maior que seja a bomba.
  A bomba passa a evaporar a água, e não a baixar a pressão.
- **Ferver a baixa temperatura é o objetivo de muitos processos:** Evaporadores, cristalizadores, secadores e destiladores a vácuo trabalham justamente assim: baixando a pressão, a água ou o solvente evapora em temperatura menor, sem degradar o produto.
- **O vapor comprimido condensa dentro da bomba:** Ao ser comprimido, o vapor só sobe de pressão até p_s na temperatura da compressão, dali em diante ele condensa.
  Na bomba de palhetas lubrificada isso emulsiona o óleo. Na bomba de anel líquido isso pode ser vantagem, como mostra o capítulo 9.
- **Resfriar derruba a pressão de vapor:** É o princípio dos condensadores instalados antes da bomba, que serão apresentados no capítulo 8, retirar o vapor como líquido custa muito menos do que bombeá-lo como gás.

2.6.3. Ar Úmido e Vapor Na Sucção

O ar atmosférico já traz vapor de água. A 20 [°C] e 50 [%] de umidade relativa, a pressão parcial do vapor é de 11,7 [mbar], cerca de 0,7 [%] da massa do ar.

Saturado na mesma temperatura, com 23,4 [mbar] de pressão parcial, o teor sobe para cerca de 1,5 [%] em massa.

No processo, a proporção de vapor costuma ser muito maior, e é aí que o vácuo se diferencia do ar comprimido.

2.6.4. Exemplo 2.2: Ar Saturado Na Sucção Da Bomba

Um processo aspira ar saturado de vapor de água a 100 [mbar] e 40 [°C]. Qual é a pressão parcial do ar seco e quanto do fluxo aspirado é vapor?

Resolução:

Passo 1: pela tabela de pressão de vapor, a 40 [°C] tem-se $p_s = 73{,}75$ [mbar]. Como o ar está saturado, essa é a pressão parcial do vapor.

Passo 2: pela lei de Dalton, $p_{ar} = 100 - 73{,}75 = 26{,}25$ [mbar].

Passo 3: como cada componente ocupa o volume inteiro, a relação entre as vazões volumétricas de vapor e de ar é a relação entre as pressões parciais, $73{,}75/26{,}25 = 2{,}8$.

Resultado: quase três quartos do que a bomba aspira é vapor, com vazão volumétrica 2,8 vezes maior que a do ar.

Na compressão até a atmosfera, de 14 [kg/h] de vapor aspirados nessas condições, restam apenas 0,29 [kg/h] na descarga: os outros 13,71 [kg/h] condensam dentro da bomba.

> ***Ponto-chave:*** Vapor não é detalhe. Em muitos processos, a maior parte do que a bomba precisa remover é vapor de água ou de solvente.
>
> Ignorar o vapor leva a bombas subdimensionadas, a óleo emulsionado ou a anel líquido cavitando.

2.7. Vazão de Uma Bomba de Vácuo

2.7.1. Velocidade de Bombeamento

A capacidade de uma bomba de vácuo é dada pela **velocidade de bombeamento** S, que é a vazão volumétrica que atravessa o bocal de sucção, medida na pressão e na temperatura da sucção.

Em catálogo aparece em [m³/h] ou [l/s], e nos catálogos norte-americanos em [CFM].

De	Para	Multiplicar por
l/s	m³/h	3,6
m³/h	l/s	0,2778
CFM	m³/h	1,699
m³/h	CFM	0,589

Tabela 2.5: Conversão de velocidade de bombeamento

É aqui que mora o erro mais comum de quem vem do ar comprimido. No compressor, a vazão é referida à condição de ar livre, e 100 [m³/h] representam sempre a mesma massa de ar.

Na bomba de vácuo, 100 [m³/h] são medidos na pressão da sucção: a 500 [mbar] eles carregam metade da massa que carregariam na atmosfera, a 5 [mbar], carregam duzentas vezes menos.

2.7.2. Fluxo de Gás (Throughput)

Como o volume sozinho não diz quanto gás está sendo movido, em vácuo a quantidade de gás é expressa pelo produto pressão vezes volume, em [mbar·l].

A quantidade de gás movida por unidade de tempo é o fluxo de gás, em inglês, conhecido como **throughput,** definido por:

$$\boldsymbol{Q_{pv} = p \cdot S} \tag{26}$$

onde Q_{pv} = fluxo de gás [mbar·l/s], p = pressão na sucção [mbar] e S = velocidade de bombeamento [l/s].

O fluxo de gás se converte em vazão em massa pela equação de estado, equação (22): dividindo os dois lados pelo tempo, o produto pressão × volume por segundo é o próprio Q_{pV}, e a massa por segundo é a vazão em massa. Com as unidades usadas em vácuo, fluxo de gás em [mbar·l/s] e vazão em massa em [kg/h], a relação fica:

$$\dot{m} = \frac{360 \cdot M}{R \cdot T} \cdot Q_{pV} \quad (27)$$

onde $\dot{m}$ = vazão em massa [kg/h], M = massa molar do gás [kg/kmol], R = 8.314 [J/(kmol·K)], T = temperatura absoluta [K] e Q_{pV} = fluxo de gás [mbar·l/s].

O 360 reúne as conversões de unidade: 1 [mbar·l/s] = 0,1 [Pa·m³/s], e 1 [kg/s] = 3.600 [kg/h].

Para o ar (M = 29 [kg/kmol]) a 20 [°C] (T = 293,15 [K]), o fator vale $360 \cdot 29/(8314 \cdot 293{,}15) = 4{,}28 \cdot 10^{-3}$, e a relação fica:

$$\dot{m} = 4{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{pv} \quad (28)$$

onde $\dot{m}$ = vazão mássica de ar [kg/h] e Q_{pv} = fluxo de gás [mbar·l/s].

2.7.3. Exemplo 2.3: A Mesma Bomba Em Duas Pressões

Uma bomba com velocidade de bombeamento de 100 [m³/h], praticamente constante na faixa de trabalho, opera em dois processos: um a 500 [mbar] e outro a 5 [mbar]. Quanto ar ela remove em cada caso?

Resolução:

Passo 1: converter a velocidade de bombeamento, $S = 100 \cdot 0{,}2778 = 27{,}78$ [l/s].

Passo 2: calcular o fluxo de gás.

- A 500 [mbar], $Q_{pv} = 500 \cdot 27{,}78 = 13890$ [mbar·l/s].
- A 5 [mbar], $Q_{pv} = 5 \cdot 27{,}78 = 138{,}9$ [mbar·l/s].

Passo 3: converter para massa.

- A 500 [mbar], $\dot{m} = 4{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot 13890 \approx 59{,}4$ [kg/h].
- A 5 [mbar], $\dot{m} \approx 0{,}59$ [kg/h].

Resultado: a mesma bomba, com a mesma vazão volumétrica de catálogo, remove cem vezes menos ar a 5 [mbar] do que a 500 [mbar].

> ***Ponto-chave:*** Não confunda velocidade de bombeamento com fluxo de gás. A velocidade de bombeamento é a capacidade volumétrica da bomba, em [m³/h].
>
> O fluxo de gás é a quantidade de gás que ela move, e depende da pressão.
>
> O processo gera uma carga de gás em massa ou em fluxo de gás, a bomba é escolhida em velocidade de bombeamento na pressão de trabalho.
>
> A ponte entre os dois é $Q_{pv} = p \cdot S$, que será usada em todo o dimensionamento.

3.ESCOAMENTO SOB VÁCUO

3.1. Introdução

O capítulo 2 mostrou como se especifica a bomba: velocidade de bombeamento S na pressão de trabalho, ligada ao processo por $Q_{pv} = p \cdot S$. Este capítulo trata do que acontece entre a bomba e o vaso e do que o vaso devolve à bomba, em três perguntas:

- **Quanto da bomba chega ao vaso?** A tubulação de sucção é uma resistência, e uma linha mal projetada come boa parte da bomba.
- **Quanto gás a bomba precisa remover?** Além do ar do vaso, entra ar pelos vazamentos, sai gás das paredes e evaporam líquidos.
- **Como saber o que está acontecendo?** Pelo medidor de pressão, desde que adequado à faixa e ao gás, e instalado no lugar certo.

Quem domina essas três respostas resolve a maior parte das reclamações do tipo "a bomba é nova e não puxa o vácuo".

3.2. Regimes de Escoamento

3.2.1. Do Livre Caminho Médio Ao Produto p·d

O capítulo 2 apresentou o livre caminho médio pela regra prática $\lambda \cdot p \approx 6{,}67 \cdot 10^{-3}$ [cm·mbar]. O que decide o comportamento do gás no tubo é a comparação entre λ e o diâmetro d.

Com λ menor que um centésimo do diâmetro, as moléculas colidem muito mais entre si que com a parede, e o gás escoa como fluido contínuo.

Com λ maior que metade do diâmetro, elas batem quase só nas paredes.

Multiplicando a regra prática pelo diâmetro, o critério vira um número que se calcula no campo, o produto $p \cdot d$.

Para o ar a 20 [°C]:

Regime	Critério físico	Produto p·d [mbar·cm]	Onde aparece
Viscoso	λ menor que d/100	acima de 6×10^{-1}	Baixo vácuo, quase toda a indústria de processo
Transição (Knudsen)	λ da ordem de d	entre $1{,}3 \times 10^{-2}$ e 6×10^{-1}	Médio vácuo
Molecular	λ maior que d/2	abaixo de $1{,}3 \times 10^{-2}$	Alto e ultra-alto vácuo

Tabela 3.1: Regimes de escoamento pelo produto p·d, ar a 20 °C (Fonte: Leybold)

O regime viscoso se divide em dois:

- O **turbulento**, com vórtices, só aparece nos primeiros instantes do bombeamento, perto da atmosfera.
- O **laminar**, com camadas deslizando umas sobre as outras e fluxo proporcional à diferença de pressão, é o que interessa na maior parte do baixo vácuo industrial.

No regime **molecular**, apenas citado neste curso, cada molécula anda sozinha, a condutância (que veremos a seguir) deixa de depender da pressão e passa a crescer com o cubo do diâmetro.

Na transição, as fórmulas são semiempíricas.

> ***Ponto-chave:*** O regime depende do produto pressão vezes diâmetro, e não da pressão isolada. Um tubo largo pode estar em regime viscoso na mesma pressão em que um tubo estreito já está em transição.
>
> Calcule $p \cdot d$ antes de escolher a fórmula de condutância.

3.2.2. Exemplo 3.1: Em Que Regime Está a Linha de Sucção?

Uma linha de 10 [cm] de diâmetro interno liga um vaso a uma bomba de anel líquido que trabalha a 50 [mbar].

Anos depois, a mesma linha é aproveitada em um secador que opera a 10^{-2} [mbar], com booster Roots. Qual é o regime em cada caso?

Resolução:

Passo 1: no processo original, $p \cdot d = 50 \cdot 10 = 500$ [mbar·cm], quase mil vezes acima de 0,6 [mbar·cm]. O regime é viscoso.

Passo 2: no secador, $p \cdot d = 10^{-2} \cdot 10 = 0{,}1$ [mbar·cm], entre 1,3 × 10^{-2} e 0,6 [mbar·cm]. O regime é de transição.

Resultado: a mesma tubulação está em regime viscoso a 50 [mbar] e em transição a 10^{-2} [mbar]. No segundo caso a fórmula do regime viscoso deixa de valer, e usá-la superestimaria a condutância.

3.3. Condutância e Velocidade Efetiva de Bombeamento

3.3.1. A Lei de Ohm do Vácuo

Condutância é a facilidade com que um trecho da linha, seja tubo, válvula, filtro ou orifício, deixa o gás passar.

Em números, é o fluxo de gás que atravessa o trecho para cada unidade de diferença de pressão entre as suas extremidades. Tem unidade de vazão volumétrica, [l/s] ou [m³/h], a mesma da velocidade de bombeamento S.

É o inverso da resistência ao escoamento, que a tabela a seguir chama de impedância.

Na prática, uma linha de condutância alta é uma linha de pouca perda de carga, e uma linha de condutância baixa é um gargalo.

Assim, o fluxo através de qualquer elemento da linha obedece a:

$$\boldsymbol{Q_{pv} = C \cdot (p_1 - p_2)} \tag{29}$$

onde Q_{pv} = fluxo de gás [mbar·l/s], C = condutância do elemento [l/s], p_1 = pressão na entrada [mbar] e p_2 = pressão na saída [mbar].

Essa equação tem a mesma forma da lei de Ohm de um circuito elétrico, I = G·U, em que a corrente I que passa por um condutor é igual à condutância elétrica G vezes a tensão U aplicada entre os seus terminais.

No vácuo, quem empurra o gás é a diferença de pressão, como a tensão empurra a corrente, o que passa é o fluxo de gás, como a corrente. Já o quanto o trecho deixa passar é a condutância, como no fio.

É por isso que a equação é chamada de lei de Ohm do vácuo, e a vantagem prática é que todas as regras de associação de resistores valem também para a linha de vácuo.

A tabela a seguir resume a correspondência:

Vácuo	Eletricidade
Fluxo de gás Q_{pv} [mbar·l/s]	Corrente
Diferença de pressão $p_1 - p_2$ [mbar]	Tensão
Condutância C [l/s]	Condutância elétrica
Impedância Z = 1/C [s/l]	Resistência

Tabela 3.2: Analogia entre a linha de vácuo e o circuito elétrico (Fonte: Leybold, Vacuum Fundamentals, seção 1.8)

As associações seguem a regra dos resistores:

- Em série somam-se impedâncias, $1/C_{total} = 1/C_1 + 1/C_2 + \cdots$, e o total é sempre menor que o pior elemento.
- Em paralelo somam-se condutâncias, $C_{total} = C_1 + C_2 + \cdots$.

> ***Atenção:*** Condutância e velocidade de bombeamento têm a mesma unidade, mas não são a mesma coisa. S se refere a uma seção, a entrada da bomba, C se refere a um trecho entre duas seções.
>
> No baixo vácuo C depende da pressão média, por isso precisa ser recalculada em cada condição de operação.

3.3.2. Orifícios e Fluxo Bloqueado

No regime viscoso, o fluxo cresce com a diferença de pressão só até a velocidade na seção mais estreita atingir a velocidade do som. Daí em diante o fluxo fica **bloqueado**: a pressão a jusante cai e a vazão não aumenta.

Para o ar a 20 [°C], isso ocorre abaixo da razão crítica:

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{crit} = 0,528 \tag{30}$$

Com fluxo bloqueado, a condutância de um orifício vale:

$$C = \frac{20 \cdot A}{1 - \delta} \tag{31}$$

onde C = condutância [l/s], A = área do orifício [cm²] e $\delta = p_2/p_1 \leq 0{,}528$. Como $p_1 - p_2 = p_1 \cdot (1 - \delta)$, resulta $Q_{pv} = 20 \cdot A \cdot p_1$, nesse caso, o fluxo depende só da área do furo e da pressão a montante.

Duas situações de campo seguem essa regra:

- Na operação de **quebra vácuo** de um vaso evacuado, quando se abre a válvula de admissão para levar o vaso de volta à pressão atmosférica de 1.000 [mbar] (operação que a literatura em inglês chama de *venting*), o fluxo de entrada é constante e máximo até o vaso chegar por volta dos 528 [mbar], ou seja, enquanto a diferença de pressão passar de cerca de 470 [mbar].
- No **vazamento por um furo**, com o sistema abaixo de meia atmosfera, o ar entra em fluxo bloqueado, e a taxa de vazamento quase não depende da pressão de trabalho.

Por isso os valores empíricos de vazamento por junta usados no capítulo 9 valem abaixo de cerca de 535 [mbar].

3.3.3. Velocidade Efetiva

Entre a bomba e o vaso há tubo, curvas, válvula, filtro. Tudo isso está em série com a bomba, e a velocidade que chega ao vaso é:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad ou \quad S_{ef} = \frac{S \cdot C}{S + C} \tag{32}$$

onde S_{ef} = velocidade efetiva no vaso [l/s], S = velocidade da bomba [l/s] e C = condutância total da linha [l/s].

Só com condutância infinita teríamos $S_{ef} = S$.

Essa é provavelmente a equação mais desprezada da engenharia de vácuo, e responde por boa parte das instalações que não puxam o vácuo prometido com a bomba correta.

Com uma linha de condutância igual à velocidade da bomba, metade da bomba fica na tubulação.

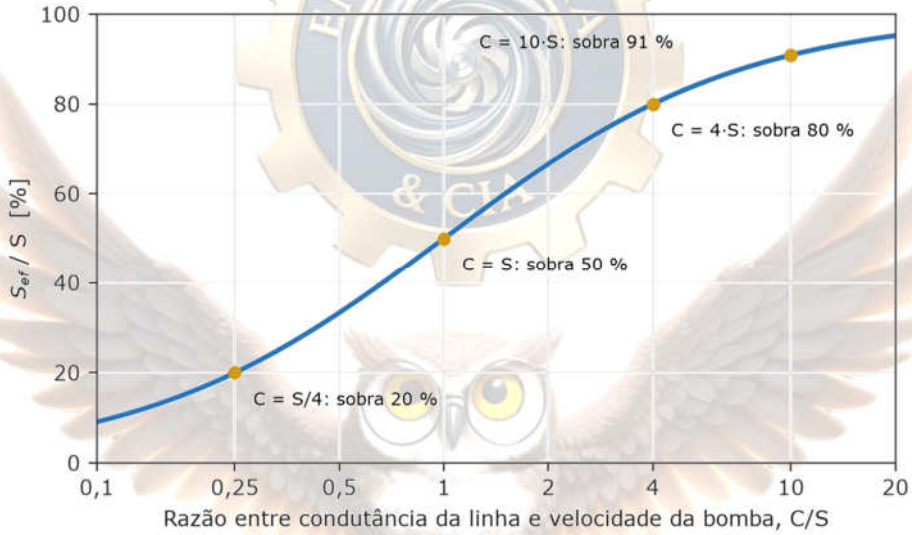


Figura 9: Fração da velocidade da bomba que chega ao vaso em função da razão entre a condutância da linha e a velocidade da bomba (Fonte: Engenharia & Cia)

> ***Ponto-chave:*** A linha precisa ter condutância bem maior que a velocidade da bomba. Com $C = 4 \cdot S$ ainda se perdem 20 [%].
>
> Comprar bomba maior para compensar linha estreita é a solução mais cara e a menos eficaz, porque quanto maior a bomba, maior a fração que a linha rouba.

3.3.4. Condutância de Tubos Longos em Regime Viscoso

Em regime viscoso a linha de vácuo se comporta como qualquer tubulação com escoamento laminar, e a condutância de um tubo reto de seção circular sai da equação de Hagen-Poiseuille, que dá a perda de pressão de um escoamento laminar em tubo circular:

$$\Delta p = \frac{128 \mu \cdot L \cdot Q}{\pi d^4} \tag{33}$$

onde Δp = perda de pressão [Pa], μ = viscosidade dinâmica do fluido [Pa·s], L = comprimento do tubo [m], Q = vazão volumétrica [m³/s] e d = diâmetro interno [m].

É a mesma equação de perdas já discutida em vários momentos, com duas diferenças de forma:

- a equação de Darcy-Weisbach fornece as perdas em carga de pressão, com unidade de comprimento, no SI em [m], e aqui ela aparece em pressão, e
- o fator de atrito já está substituído por f = 64/Re, o que faz a massa específica desaparecer e deixa a viscosidade como a propriedade que governa a perda. É também daí que vem a quarta potência do diâmetro.

Como já apresentado, no segmento de vácuo é mais comum se trabalhar com fluxo de gás (Q_{pv}), sendo Q a vazão volumétrica do gás medida na pressão média da linha.

Dividindo o fluxo de gás pela perda de pressão no tubo chega-se à condutância do tubo, conforme definição de condutância.

Na indústria de processo o gás raramente é ar puro: é vapor de água, vapor de solvente, gás de processo ou mistura deles, e por isso a forma geral, com a viscosidade do gás, é a que se usa. Para regime viscoso ($d \cdot p_m > 0{,}6$ [mbar·cm]) e tubo longo ($l \geq 10 \cdot d$):

$$\boldsymbol{C_{tubo} = 2{,}45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d^4 \cdot p_m}{\mu \cdot l}} \qquad (34)$$

onde C_{tubo} = condutância do tubo [l/s], d = diâmetro interno [cm], l = comprimento [cm], $p_m = (p_1 + p_2)/2$ = pressão média na linha [mbar] e μ = viscosidade dinâmica do gás na temperatura da linha [Pa·s]. A constante $2{,}45 \cdot 10^{-3}$ vem do $\pi/128$ da equação de Hagen-Poiseuille já com as conversões de unidade (centímetro, milibar e litro).

Para tubo reto de seção circular, ar a 20 [°C], regime viscoso ($d \cdot p_m > 0{,}6$ [mbar·cm]) e tubo longo[1] ($l \geq 10 \cdot d$):

$$\boldsymbol{C_{tubo} = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot p_m \cdot f_{gas}} \qquad (35)$$

onde C_{tubo} = condutância do tubo [l/s], d = diâmetro interno [cm], l = comprimento [cm], $p_m = (p_1 + p_2)/2$ = pressão média na linha [mbar] e $\boldsymbol{f_{gas}}$ = fator de correção para gases diferentes de ar, se ar, vale 1, outros gases, os valores podem ser verificados na tabela 12.10.

Da equação, podemos concluir:

- O diâmetro manda: dobrá-lo multiplica a condutância por 16.
- O comprimento pesa linearmente.
- E a pressão também entra: uma linha folgada a 500 [mbar] pode virar gargalo a 5 [mbar].

Curvas e cotovelos entram como comprimento adicional de tubo reto:

$$\boldsymbol{l_{ef} = l_{axial} + 1{,}33 \cdot \frac{\theta}{180} \cdot d} \qquad (36)$$

onde l_{ef} = comprimento equivalente [cm], l_{axial} = comprimento no eixo [cm], θ = ângulo da curva [graus] e d = diâmetro [cm].

[1] Tubo longo é aquele cujo comprimento é de pelo menos dez vezes o diâmetro. Em tubos mais curtos, a entrada do tubo passa a pesar no resultado, e a condutância do trecho fica menor que a calculada pela fórmula, nesse caso, soma-se em série a condutância da entrada, calculada como um orifício. No limite, um tubo muito curto se comporta como o próprio orifício.

Uma curva de 90° equivale a cerca de dois terços de diâmetro de tubo reto: no baixo vácuo pesa pouco. O que pesa mais é o diâmetro.

As regras de projeto da linha de sucção valem para qualquer tecnologia de bomba:

- **Curta e larga:** A linha deve ser tão curta e tão larga quanto possível, e os fabricantes de bombas de vácuo recomendam que a seção do tubo nunca dever ser menor que a do bocal de sucção da bomba.
- **Sem estrangulamentos:** Evite válvulas de furo reduzido e de diafragma no isolamento da bomba, use curvas de raio longo e elimine desvios desnecessários.
- **Linha longa inevitável:** Uma saída é instalar um booster na própria linha, perto do vaso, como ilustrado no capítulo 7.

3.3.5. Exemplo 3.2: Velocidade Efetiva Com Uma Linha Real

Uma bomba de palhetas de 100 [m³/h], com bocal de 4 [cm], foi ligada a uma câmara por uma linha de 5 [m] e 2,5 [cm] de diâmetro interno, com quatro curvas de 90°. A pressão média na linha é de 1 [mbar]. Qual é a velocidade efetiva na câmara? E se a linha for refeita com 5 [cm]?

Resolução:

Passo 1: Considerando d = 2,5 [cm]

- $S = 100 \cdot 0{,}2778 = 27{,}78$ [l/s].
- Regime: $d \cdot p_m = 2{,}5 \cdot 1 = 2{,}5$ [mbar·cm] maior que 0,6 [mbar·cm]: escoamento viscoso.
- Tubo longo: l = 500 >> 10.d $(10 \cdot 2{,}5 = 25)$

Passo 2: comprimento equivalente:

- $l_{ef} = l_{axial} + 1{,}33 \cdot \frac{\theta}{180} \cdot d = 500 + 4 \cdot 1{,}33 \frac{90}{180} \cdot 2{,}5 = 506{,}7$ [cm].

Passo 3: condutância:

- $C = C_{tubo} = 135 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot p_m \cdot f_{gas} = 135 \cdot \frac{2{,}5^4}{506{,}7} \cdot 1 \cdot 1 = 10{,}4$ [l/s].

Passo 4: velocidade efetiva:

- $S_{ef} = \frac{S \cdot C}{S + C} = \frac{27{,}78 \cdot 10{,}4}{27{,}78 + 10{,}4} = 7{,}57$ [l/s], ou 27,3 [m³/h].

Passo 5: repetindo para d = 5 [cm]:

- $l_{ef} = 500 + 4 \cdot 1{,}33 \cdot 0{,}5 \cdot 5 = 513{,}3$ [cm].
- $C = 135 \cdot \frac{5^4}{513{,}3} \cdot 1 \cdot 1 = 164{,}4$ [l/s].
- $S_{ef} = \frac{27{,}78 \cdot 164{,}4}{27{,}78 + 164{,}4} = 23{,}8$ [l/s], ou 85,5 [m³/h].

Resultado: com a linha com diâmetro de 2,5 [cm], mais estreita que o bocal, a câmara recebe só 27 [m³/h] de uma bomba de 100 [m³/h], ou seja, a linha rouba 73 [%] da capacidade.

Dobrando o diâmetro, a condutância aumenta cerca de 16 vezes e a câmara passa a receber 85 [m³/h]. Com a linha antiga, nenhuma bomba, por maior que fosse, entregaria mais que a condutância da linha, 10,4 [l/s], cerca de 37 [m³/h].

3.4. Carga de Gás do Sistema

Carga de gás é tudo aquilo que a bomba precisa retirar do sistema para chegar à pressão de trabalho e se manter nela. É o equivalente, no vácuo, à vazão que uma bomba de líquido precisa bombear, é a demanda que define o tamanho da máquina.

Como no vácuo a quantidade de gás se mede por pressão × volume, a carga de gás é expressa como fluxo de gás, em [mbar·l/s], pela equação (26), e pode ser convertida em vazão em massa pela equação (27) quando se conhece o gás e a temperatura.

A carga tem duas naturezas, o gás do volume e a carga de gás contínua.

Gás do volume é o gás que já está dentro do vaso e das tubulações no início da evacuação.

Por ser uma quantidade, e não um fluxo, não se soma às parcelas contínuas, ele se expressa em pressão × volume ou [mbar·l]. Um sistema de volume V à pressão atmosférica contém $p_{atm} \cdot V$ de gás, retirado uma vez só.

Depende só do tamanho do sistema e é o que determina o tempo de evacuação no baixo vácuo.

Carga de gás contínua trata-se do gás que continua entrando devido a vazamentos ou sendo liberado enquanto o sistema opera. Esse fluxo que define até onde a pressão de vácuo consegue descer quando o volume retirado se iguala à velocidade da bomba.

É dado em [mbar·l/s], sendo composta de quatro parcelas:

$$\boldsymbol{Q_{cont} = Q_{vazamento} + Q_{dessorção} + Q_{evaporação} + Q_{permeação}} \quad (37)$$

O capítulo soma essa carga contínua à carga do processo para chegar à velocidade de bombeamento requerida. A seguir, cada parcela, na ordem da equação.

$\boldsymbol{Q_{vazamento} = Q_L}$ é ar externo entrando por poros, trincas, riscos em face de flange, roscas, gaxetas e selos. O suprimento é o ar atmosférico, praticamente inesgotável, e por isso o vazamento real é constante no tempo.

A taxa de vazamento, também identificada como Q_L (L de *leak*, vazamento em inglês), é expressa em [mbar·l/s]. 1 [mbar·l/s] faz a pressão de um vaso fechado de 1 [l] subir 1 [mbar] por segundo.

Todo sistema vaza, a questão é se o vazamento afeta a pressão de trabalho. Um furo de 1 [mm] em tubulação a 1 [mbar] exige cerca de 500 [m³/h] de bomba só para compensá-lo, e instalações com mais de cinco anos perdem, em média, 20 [%] da capacidade em vazamentos.

$\boldsymbol{Q_{Dessorção}}$ corresponde a taxa de gases e vapores adsorvidos nas paredes e vedações, principalmente água, que são liberados aos poucos sob vácuo, com taxa que cai com o tempo e sobe com a temperatura.

A diferença entre materiais surpreende:

Material	Taxa de dessorção após 1 h [mbar·l/(s·cm²)]
Alumínio	6×10^{-9}
Aço inoxidável	9×10^{-8}
FKM (fluorelastômero)	4×10^{-7}
NBR	3×10^{-6}
Silicone	8×10^{-6}

Tabela 3.3: Taxas de dessorção à temperatura ambiente após 1 hora (Fonte: Leybold)

No baixo vácuo industrial a dessorção costuma ser pequena perto do gás do volume e dos vazamentos. Ela passa a mandar no médio vácuo, e explica o secador que "chega a 1 [mbar] rápido e depois demora horas para descer mais".

$Q_{Evaporação}$ corresponde à evaporação de líquidos presentes no sistema quando a pressão de vapor é atingida. Enquanto houver líquido, a pressão não desce abaixo da sua pressão de vapor (capítulo 24).

$Q_{Permeação}$ é a passagem de gás através do material de paredes e vedações, sem furo aberto. Não é vazamento e não se encontra da mesma forma. Em aço é desprezível para o ar.

Os casos relevantes são hidrogênio em metais, hélio em vidro e quartzo, e ar em plásticos e elastômeros. Na indústria, o exemplo típico é a mangueira de borracha comprida na sucção.

3.4.1. Pressão Limite e Constante de Tempo

Com velocidade de bombeamento e carga de gás constantes, a pressão se estabiliza em:

$$p_{lim} = \frac{Q_{cont}}{S_{ef}} \tag{38}$$

onde p_{lim} = pressão limite no vaso [mbar], Q_{total} = carga de gás [mbar·l/s] e S_{ef} = velocidade efetiva no vaso [l/s].

A rapidez com que o vaso se aproxima dessa pressão é dada pela constante de tempo:

$$\tau = \frac{V}{S_{ef}} \tag{39}$$

onde τ = constante de tempo [s] e V = volume do sistema [l]. O capítulo 9 usa as duas relações no cálculo do tempo de evacuação.

> ***Ponto-chave:*** A pressão limite não é propriedade da bomba. É o encontro entre a capacidade da bomba e a carga de gás do sistema.
>
> Bomba nova em sistema com vazamento entrega pressão final ruim, e a culpa não é da bomba.

3.5. Medição de Pressão no Vácuo

Nenhum medidor cobre toda a faixa de vácuo, e a exatidão piora rapidamente perto dos limites de cada um. Há ainda uma divisão essencial: medidores que medem a força do gás sobre uma superfície, cuja leitura **não depende do tipo de gás**, e medidores que medem outra propriedade, como a condutividade térmica, cuja leitura **depende do tipo de gás**.

3.5.1. Medidores Que Não Dependem do Tipo de Gás

Pressão é força por unidade de área e os medidores deste grupo medem exatamente isso: o gás empurra um elemento elástico, que pode ser um tubo curvado, uma cápsula ou uma membrana, e a deformação é convertida em leitura, mecanicamente ou por um sinal elétrico.

Como a força vem do choque de todas as moléculas presentes, não importa de que gás elas são: ar, vapor de água, vapor de solvente ou qualquer mistura produzem a mesma leitura na mesma pressão.

É a pressão verdadeira, a que interessa para o processo. O limite deste grupo está na outra ponta da escala: à medida que o vácuo aprofunda, a força sobre o elemento fica tão pequena que a deformação deixa de ser medível com exatidão. Por isso cada tipo cobre uma faixa, e os que descem mais são os de membrana mais sensível. Os tipos usuais, do mais simples ao mais preciso, são os seguintes.

Bourdon: Um tubo curvado em arco, ligado ao vaso, se deforma com a diferença entre a pressão interna e a atmosfera, e move o ponteiro.

É robusto, barato e o padrão de leitura local. Como a referência é a atmosfera, a leitura é relativa ou efetiva, e a exatidão fica em torno de 10 [mbar].



Figura 10: Vacuômetro de Bourdon – vista interna e externa (Fonte: Leybold)

Diafragma ou cápsula: Eles contêm uma cápsula de diafragma hermeticamente selada, evacuada e de paredes finas, localizada dentro do instrumento.

À medida que a pressão do vácuo diminui, a cápsula se expande. Esse movimento é transmitido por meio de um sistema de alavancas para um ponteiro, e a pressão pode ser lida em uma escala linear.

Como a célula de medição é hermeticamente selada contra o ambiente externo, ela não é afetada por mudanças na pressão atmosférica, tornando-a **mais confiável em pressões abaixo de 10 [mbar].**



Figura 11: Vacuômetro de capsula ou diafragma (Fonte: Leybold)