

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA**

**CRISTIAN AMARAL SANTOS MENEZES**

**GESTÃO DE PROJETOS: RECOMENDAÇÕES DE PROCEDIMENTOS  
PARA O DESENVOLVIMENTO, PROJETO, SIMULAÇÃO,  
CONSTRUÇÃO, MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE  
PRÉ-VÁCUO**

**SÃO PAULO  
AGOSTO/2009**

**CRISTIAN AMARAL SANTOS MENEZES**

**GESTÃO DE PROJETOS: RECOMENDAÇÕES DE PROCEDIMENTOS  
PARA O DESENVOLVIMENTO, PROJETO, SIMULAÇÃO,  
CONSTRUÇÃO, MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE  
PRÉ-VÁCUO**

Dissertação apresentada como exigência parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia no Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado em Tecnologia: Gestão, Desenvolvimento e Formação, sob orientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

**SÃO PAULO  
AGOSTO/2009**

	Menezes, Cristian Amaral Santos
M543g	Gestão de projetos: recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo / Cristian Amaral Santos Menezes. - São Paulo : CEETEPS, 2009. 225 f.
	Dissertação (Mestrado) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2009.
	1. Tecnologia do vácuo. 2. Sistemas de pré-vácuo. 3. Gestão de projetos. I. Título.
	CDU 533.5:621.521

CRISTIAN AMARAL SANTOS MENEZES

GESTÃO DE PROJETOS: RECOMENDAÇÕES DE PROCEDIMENTOS PARA O  
DESENVOLVIMENTO, PROJETO, SIMULAÇÃO, CONSTRUÇÃO,  
MONTAGEM E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRÉ-VÁCUO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. FRANCISCO TADEU DE GASPERI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. DEILTON REIS MARTINS

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. M<sup>º</sup>. LÚCIA PEREIRA DA SILVA

São Paulo, 20 de agosto de 2009

## **Agradecimentos**

À Deus, pela oportunidade de chegar até esta importante fase da minha vida.

A minha esposa Vera e aos filhos Renan e Lucas, pelo apoio e incentivo recebidos.

Aos meus pais, Armando e Josefa, que contribuíram para a minha educação.

Ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, por seu profissionalismo, dedicação e encorajador trabalho de orientação.

À Empresa PV- Prest-Vácuo, pela construção da câmara de vácuo onde realizamos os experimentos.

À Prof. Dra. Maria Lúcia Pereira da Silva, sempre disponível para ensinar e acompanhar a trajetória de aprendizado de seus alunos.

Ao Prof. Dr. Deilton Reis Martins, da Empresa Elmitec, pelas sugestões que contribuíram para dar maior clareza ao trabalho.

Aos colegas Katia Akie, Leandro Murano Sartori, Leandro Toshio e Wellington Ribeiro Richard, do Laboratório de Tecnologia do Vácuo da FATEC de São Paulo, pelo apoio na realização dos experimentos, sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

Aos Professores da ETEC São Paulo, Walter Pichi Jr., Marta Silva, Carlos A. Maio, Elisabeth R. Oliveira, pelo apoio e incentivo dados durante a realização deste trabalho.

## Resumo

MENEZES, C.A.S., **Gestão de Projetos: recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo.** 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2009.

Muitos processos industriais ocorrem na faixa do vácuo grosseiro, pressão entre a pressão atmosférica até 1 mbar, e pré-vácuo de 1 mbar a  $10^{-3}$  mbar. As aplicações do pré-vácuo, que vão desde a indústria alimentícia, farmacêutica, petroquímica, produção de biocombustíveis, secagem, cristalização, polimerização, impregnação de materiais, tratamento de óleos isolantes para transformadores e ampolas de raios X, geralmente apresentam detalhes de projeto, simulação, construção, montagem e caracterização protegidos por patentes e tidos como segredos industriais. Atualmente, para a tecnologia do vácuo, temos a necessidade de manuais de procedimentos para boas práticas de fabricação, produção mais limpa, metrologia de pressão, normas de segurança com a operação dos equipamentos envolvidos, normas de uso, descarte, armazenamento e destinação de resíduos gerados. Assim, a principal contribuição deste trabalho foi a elaboração de recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistema de pré-vácuo. Neste trabalho foram apresentados parâmetros que devem ser considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo, incluindo especificações de bombas, integração energética, projeto de instrumentação e projeto de implantação de sistema supervisor. Foram citados os elementos conceituais que devem ser levados em consideração na simulação e modelagem de processos, principalmente o modelo matemático dos equipamentos, as fontes de incerteza e a análise de sensibilidade. Foram recomendados procedimentos de limpeza de superfícies e cuidados a serem tomados em relação às operações de soldagem e usinagem das peças para que o sistema de pré-vácuo em operação tenha o seu desempenho otimizado em termos de pressão final mínima atingida e manutenção da qualidade do vácuo obtido.

**Palavras-Chaves:** gestão de projetos, sistemas de pré-vácuo, recomendações de procedimentos, desenvolvimento, caracterização, projeto, simulação, montagem.

**Abstract**

MENEZES, C.A.S. **Projects Management: recommendation to the development, project, simulation, construction, assembly and characterization of pre-vacuum systems.** 2009. Essay (Master Degree in Technology) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2009.

Many industrial processes occur in the coarse vacuum band, pressure between atmospherical pressure up to 1 mbar, and pre-vacuum from 1 mbar up to  $10^{-3}$  mbar. An application of pre-vacuum, whose range may involve different fields such as provision, petrochemical and pharmaceutical industries, biofuels production, drying, crystallization, polymerization, impregnation of materials, insulating oil treatment for transformers and even x-ray ampoules, usually includes simulation, construction, assembly and characterization details protected by patents and regarded as industrial secrets. Nowadays, vacuum technology requires particular guideline books for suitable manufacture, cleaner production, pressure metrology, equipment operation safety rules, as well as norms for residue usage, discard, storage and destination. Thus, the main contribution of this essay was the creation of a proposition as to relevant procedure recommendation for the development, project, simulation, construction, assembly and characterization of pre-vacuum systems. Useful parameters, which must be taken into account in pre-vacuum system projects, were introduced here including bomb specifications, energy integration, instrumentation projects and projects of supervising system implementation. Conceptual principles were also mentioned, mainly the mathematical model of equipment, the sources of uncertainty and the susceptibility analysis, significant principles that must be taken into account in simulation and modeling of processes. The contents also include recommendation involving surface clean procedures as well as special caution as to production and welding of parts to enable the performance optimization of the operating pre-vacuum system in terms of ultimate minimum pressure obtained and vacuum quality maintenance.

**KEY-WORDS:** projects management, pre-vacuum systems, procedure recommendations, development, characterization, project, simulation, assembly.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Secador de tambor rotativo de eixo horizontal	20
Figura 1.2 Estufa de secagem a vácuo	23
Figura 1.3 Esquema do sistema de pré-vácuo utilizado por Polônio	24
Figura 1.4 Representação do filtro de tambor rotativo a vácuo	24
Figura 1.5 Esquema simplificado de um resfriador a pré-vácuo	25
Figura 1.6 Equipamento piloto para destilação molecular a vácuo	27
Figura 1.7 Uso de pré-vácuo no refino de óleos vegetais	28
Figura 1.8 Movimentação de peças a vácuo	29
Figura 1.9 Geradores de vácuo tipo Venturi	30
Figura 1.10 Representação esquemática de um cristalizador a vácuo	31
Figura 1.11 Esquema do sistema de impregnação a vácuo	32
Figura 1.12 Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica	33
Figura 1.13 Esquema do processo de pervaporação a vácuo	34
Figura 1.14 Pervaporação para recuperação de aromas de sucos	35
Figura 1.15 Esquema do processo fermentativo extrativo a vácuo	37
Figura 1.16 Equipamento para o processo extrativo fermentativo	37
Figura 1.17 Esquema de um reator assistido a plasma	38
Figura 1.18 Reator assistido a plasma	39
Figura 1.19 Esquema da laminação a vácuo de compósitos poliméricos	40
Figura 1.20 Esquema do processo de termoformação a vácuo	42
Figura 1.21 Equipamento para termoformação a vácuo	42
Figura 1.22 Esquema de vasos sanitários que operam sob pré-vácuo	43
Figura 1.23 Principais componentes de um vaso sanitário a vácuo	44
Figura 1.24 Sistema a vácuo para o cozimento de alimentos	45
Figura 1.25 Sistemas de vácuo clínico	47
Figura 2.1 Representação simplificada de um sistema de pré-vácuo	51
Figura 2.2 Exemplos de geometrias de câmaras de vácuo	52
Figura 2.3 Vasos de pressão que obedecem a critérios de segurança	53
Figura 2.4 Principais fontes de liberação de gases	54
Figura 2.5 Faixa de pressão de operação das bombas de vácuo	56
Figura 2.6 Operações e partes de uma bomba rotativa de palhetas	57
Figura 2.7 Exemplos de bombas de pré-vácuo	57
Figura 2.8 Representação de uma bomba de vácuo tipo Roots	60
Figura 2.9 Sistema de vácuo com bomba mecânica e bomba Roots	60
Figura 2.10 Sistema formado por bomba Roots e de palhetas rotativas	61
Figura 2.11 Esquema de um sistema de pré-vácuo híbrido	62
Figura 2.12 Protótipo de um sistema de pré-vácuo híbrido	62
Figura 2.13 Componentes auxiliares dos sistemas de pré-vácuo	64
Figura 3.1 Exemplo de tela do software LabVIEW 6.1	73
Figura 3.2 Esquema 3D do sistema de vácuo	78
Figura 3.3 Aplicativo SolidWorks – Dimensionamento de peças	79
Figura 3.4 Aplicativo SolidWorks – Simulação da física do conjunto	79
Figura 3.5 Símbolos utilizados em sistemas de pré-vácuo	80
Figura 3.6 Sistema de pré-vácuo formado por bomba mecânica	80
Figura 3.7 Sistema de pré-vácuo formado por bomba Roots e mecânica	81
Figura 3.8 Circuito de vácuo de tratamento de óleo isolante	81
Figura 3.9 Sistema de vácuo para tratamento de óleo isolante	82



Figura 4.1 Corpo de um misturador estático com malha gerado no ICM	93
Figura 4.2 Malha Numérica de um Corpo - Escoamento Externo	94
Figura 4.3 Tela do CFX-Solver	94
Figura 4.4 Limite de validade da hipótese do contínuo numa câmara com gás progressivamente evacuada	97
Figura 5.1 Taxa de degaseificação para tubos de aço inoxidável	100
Figura 5.2 Perfis de rugosidade do aço laminado	102
Figura 5.3 Tipos de foles metálicos	106
Figura 5.4 A natureza da superfície metálica usinada	108
Figura 5.5 Desvios de forma de superfícies técnicas	108
Figura 5.6 Princípio de funcionamento do perfilômetro	110
Figura 5.7 Exemplos de rugosímetros	110
Figura 5.8 Perfil da peça formado por rugosidade e ondulações	111
Figura 5.9 Desenho com especificação de acabamento superficial	111
Figura 5.10 Exemplos de especificações de rugosidade	112
Figura 6.1 Foles metálicos utilizados para unir a bomba de vácuo à câmara de vácuo	116
Figura 6.2 Montagem dos sensores de pressão	119
Figura 6.3 – Tubulações que unem a câmara de vácuo ao sensor de pressão	119
Figura 6.4 Instalação dos sensores protegendo-os da região de admissão de gases e vapores	119
Figura 6.5 Montagem incorreta de tubulações	120
Figura 6.6 Escolha de bombas de vácuo utilizadas nas montagens de sistemas de pré-vácuo	120
Figura 6.7 . Descrição dos diferentes componentes de uma bomba mecânica de palhetas de duplo estágio	121
Figura 6.8 Representação das diferentes partes internas de uma bomba	122
Figura 6.9 Acessórios de proteção das bombas de vácuo de palhetas	123
Figura 6.10 Seqüência de montagem das peças que fazem parte do conjunto do visor de óleo da bomba mecânica de palhetas	127
Figura 6.11 Controle do filtro de admissão	128
Figura 6.12 Componentes do controle do lastro de gás	128
Figura 6.13 Detalhamento da montagem dos componentes auxiliares do sistema de vácuo	129
Figura 6.14 Exemplos de válvulas manuais	130
Figura 6.15 Exemplo de sistema de pré-vácuo para movimentação de peças	132
Figura 6.16 Peças utilizadas nas montagens de ligações desmontáveis	132
Figura 6.17 Princípio de funcionamento do medidor Pirani	134
Figura 7.1 Exemplos de sistema de vácuo de alta e de baixa condutância	136
Figura 7.2 Esquema do sistema de pré-vácuo formado por câmara de vácuo de 2,1 litros	138
Figura 7.3 Gráfico da pressão da câmara de vácuo de 2,1 litros	138
Figura 7.4 Gráfico da caracterização do vazamento do sistema de vácuo	139
Figura 7.5 Conexões entre a bomba e a câmara de vácuo	141
Figura 7.6 Fórmulas práticas para a determinação da condutância	142
Figura 7.7 Caracterização de um sistema de alto-vácuo	143
Figura 7.8 Gráfico da pressão em função do tempo de bombeamento	144
Figura 7.9 Arranjo experimental proposto para a caracterização da	146

velocidade de bombeamento das bombas mecânicas de palhetas	
Figura 7.10 Esquema para determinação da velocidade de bombeamento	147
Figura 7.11 Método da pipeta para determinação de velocidade de bombeamento	148
Figura 7.12 Montagens de sensores in-line e off-line	150
Figura 8.1 Partes da câmara de vácuo de 46 litros	152
Figura 8.2 – Diferentes etapas da montagem da câmara de vácuo	153
Figura 8.3 Montagem do medidor Pirani	153
Figura 8.4 Montagem do filtros de admissão e exaustão de gases	154
Figura 8.5 Bombas de vácuo utilizadas no estudo de caso	156
Figura 8.6 Fole metálico e válvula solenóide do sistema de pré-vácuo	158
Figura 8.7 Medidor de ruído da marca Instrutherm	159
Figura 8.8 Válvula de acionamento eletrônico	163
Figura 8.9 Filmagem do decaimento da pressão	163
Figura 8.10 Medida do decaimento da pressão: $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$	164
Figura 8.11 Decaimento da pressão sem expansão dos gases $16 \text{ m}^3/\text{h}$	165
Figura 8.12 Gráficos do estudo de repetibilidade $16 \text{ m}^3/\text{h}$	166
Figura 8.13 Gráfico do estudo de repetibilidade $S_b = 8,2 \text{ m}^3/\text{h}$	166
Figura 8.14 Ensaio com tubo fino de 30 metros de comprimento	170
Figura 8.15 Ensaio com tubo fino de 2,25 metros de comprimento	170
Figura 8.16 Ensaio com tubo de 48 cm de comprimento	171
Figura 8.17 Gráfico linear – decaimento da pressão	173
Figura 8.18 Gráfico dilog – decaimento da pressão	173

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Temperaturas de ebulição da glicerina para diferentes níveis de pré-vácuo	27
Tabela 1.2 Fatores de conversão para unidades de pressão	49
Tabela 2.1 Cores empregadas para identificar tubulações industriais	55
Figura 4.1 Variáveis da equação de conservação utilizadas em fluidodinâmica computacional.	91
Tabela 5.1 Pressão de vapor em função da temperatura para diferentes materiais	99
Tabela 5.2 Taxas de degaseificação de uma câmara de vácuo submetida a diferentes tratamentos	106
Tabela 6.1 Limite de tolerância para ruído, segundo a NR 15	116
Tabela 7.1 Aplicações industriais em diferentes regiões do pré-vácuo	136
Tabela 7.2 Valores da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo	148
Tabela 8.1 Resultados do teste de vazamento da câmara de vácuo	155
Tabela 8.2 Especificações das bombas mecânicas de palhetas	156
Tabela 8.3 Parâmetro PxD utilizado para a identificação do regime de escoamento dos gases	157
Tabela 8.4 Identificação do regime de escoamento dos gases	157
Tabela 8.5 Níveis de condutância e velocidade de bombeamento	159
Tabela 8.6 Resultados da medição de ruído dos sistemas de pré-vácuo	160
Tabela 8.7 Gradientes de temperatura nos sistemas de pré-vácuo	160
Tabela 8.8 Cálculos da velocidade efetiva de bombeamento	162
Tabela 8.9 Repetibilidade para o sistema de pré-vácuo com $S_b = 8,2 \text{ m}^3/\text{h}$	167
Tabela 8.10 Repetibilidade para o sistema de pré-vácuo com $S_b = 16 \text{ m}^3/\text{h}$	168
Tabela 8.11 Velocidade de bombeamento a partir dos dados experimentais	169

## **Sigla e Abreviaturas**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CFD – Fluidodinâmica Computacional

CLP – Controlador Lógico Programável

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LTV-FATEC/SP – Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

REV – Elementos Representativos de Volume

SAAP – Sistema de Avaliação Ambiental de Processo

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition

## Sumário

<b>Capítulo 1. Classificação, Aplicações e Desenvolvimento Histórico.</b>	<b>19</b>
1.1 Classificação do vácuo em função da pressão	19
1.2 Pré-vácuo e suas aplicações	19
1.2.1 Secagem	20
1.2.2 Filtração	23
1.2.3 Resfriamento	25
1.2.4 Destilação	26
1.2.5 Desodorização	28
1.2.6 Movimentação e sustentação de peças	29
1.2.7 Cristalização	30
1.2.8 Impregnação	31
1.2.9 Pervaporação	33
1.2.10 Embalagem a vácuo	35
1.2.11 Produção de biocombustíveis	36
1.2.12 Polimerizações assistidas a plasma	38
1.2.13 Processamento de laminados de compósitos poliméricos	40
1.2.14 Termoformação a vácuo	41
1.2.15 Vasos sanitários a vácuo	43
1.2.16 Cozimento de alimentos em pré-vácuo	44
1.2.17 Curativo a vácuo	45
1.2.18 Sistema de vácuo clínico	46
1.3 Desenvolvimento histórico da tecnologia do vácuo	47
1.4 Objetivos da dissertação	50
<b>Capítulo 2. Desenvolvimento de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>51</b>
2.1. Introdução	51
2.2. Câmaras de vácuo	52
2.3. Tubulações	54
2.4. Bombas de pré-vácuo	56
2.5. Estratégia de controle do processo	63
2.6. Instrumentação e malha de controle do processo	63
2.7. Componentes auxiliares	64
<b>Capítulo 3. Projeto de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>65</b>
3.1 Introdução	65
3.2 Elementos a serem considerados na sistematização do projeto	66
3.3 Elementos a serem considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo	68
3.4 Integração energética em sistemas de pré-vácuo	70
3.5 Projeto de Instrumentação	72
3.6 Projeto e implementação de sistema supervisorio	72
3.6.1 Documentação exigida	74
3.6.2 Procedimento de testes	75

3.6.3 Relatório de testes	75
3.6.4 Treinamento e manuais do sistema	75
3.6.5 Período de Observação	76
3.6.6 Causas de problemas	76
3.6.7 Dimensionamento e arquitetura	76
3.7 Dimensionamento, esquemas e desenhos do projeto	78
3.8 Especificações de bombas de vácuo	82
<b>Capítulo 4. Simulação de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>83</b>
4.1 Introdução	83
4.2 Considerações sobre o modelo matemático de equipamentos	85
4.3 Considerações sobre as fontes de incerteza	86
4.4 Considerações sobre a análise de sensibilidade	87
4.5 Elementos a serem identificados na otimização do processo	88
4.6 Fluidodinâmica computacional	89
4.6.1 Pacotes computacionais para CFD	92
4.6.2 Metodologia para a determinação de modelos	94
4.7 Abordagens de modelagens para os sistemas de pré-vácuo	95
<b>Capítulo 5. Construção de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>98</b>
5.1 Introdução	98
5.2 Critérios para a seleção de materiais	98
5.3 Tratamento de superfícies	100
5.3.1 Limpeza de aços inoxidáveis	101
5.3.2 Eletropolimento	101
5.3.3 Limpeza a vácuo	103
5.3.4 Limpeza do Cobre	103
5.3.5 Limpeza do Alumínio	104
5.3.6 Limpeza de material cerâmico	104
5.3.7 Limpeza de Ferrite	105
5.4 Operações de soldagem	105
5.5 Qualidade das superfícies usinadas	107
<b>Capítulo 6. Montagem de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>114</b>
6.1 Introdução	114
6.2 Montagem dos sensores de pressão	114
6.3 Redução das vibrações	115
6.4 Redução do ruído	116
6.5 Critérios para obtenção de vácuo máximo	117
6.6 Exemplos de montagens que devem ser evitadas	118
6.6.1 Situações que causam contaminações nos sensores	118
6.6.2 Situações que causam erros de leitura no sensores de pressão	119
6.6.3 Situações que limitam a condutância	120
6.7 Componentes auxiliares de proteção às bombas de vácuo	121
6.7.1 Condições de falhas nas bombas mecânicas de palhetas	124
6.7.2 Montagens e limpeza da partes externas	126
6.8 Montagem de ligações desmontáveis	129
6.9 Critérios para escolha dos vacuômetros de pré-vácuo	133

<b>Capítulo 7. Caracterização de Sistemas de Pré-Vácuo</b>	<b>135</b>
7.1 Introdução	135
7.2 Importância da caracterização dos sistemas de vácuo	136
7.3 Condutância	140
7.4 Velocidade de bombeamento da bomba de vácuo ( $S_{bv}$ )	142
7.5 Velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ )	145
7.6 Throughput	145
7.7 Métodos experimentais de caracterização	146
7.8 Critérios para análise dos gases durante o bombeamento	150
7.9 Calibração da instrumentação utilizada na caracterização	151
<b>Capítulo 8. Estudo de caso envolvendo sistemas de pré-vácuo</b>	<b>152</b>
8.1 Introdução	152
8.2 Construção da câmara de vácuo	152
8.3 Limpeza e montagem da câmara de vácuo	152
8.4 Montagem do sistema de pré-vácuo	153
8.5 Testes de vazamentos da câmara de vácuo	154
8.6 Bombas de vácuo utilizadas no estudo de caso	156
8.7 Identificação do regime de escoamento	157
8.8 Condutâncias das tubulações e do filtro de admissão de gases	157
8.9 Nível de ruído dos sistemas pré-vácuo	159
8.10 Avaliação dos gradientes de temperatura	160
8.11 Cálculo teórico da velocidade efetiva de bombeamento	161
8.12 Procedimento de caracterização do decaimento da pressão	163
8.12.1 Resultados da caracterização do decaimento de pressão	164
8.13 Velocidade efetiva de bombeamento a partir dos dados experimentais.	169
8.14 Ensaios para avaliar a contribuição da condutância em leituras de pressão feitas em diferentes pontos do sistema de pré-vácuo.	169
8.15 Simulação Computacional	171
<b>Capítulo 9 – Definição do Escopo do Projeto</b>	<b>174</b>
9.1. Introdução	174
9.2. Questões para a definição do escopo de projeto	175
9.3. Considerações finais	184
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>186</b>
Anexo A. Critérios recomendados pela NR 13 para os vasos de pressão	194
Anexo B. Ficha de dados de segurança para o mercúrio utilizado em metrologia do vácuo.	197
Anexo C. Ficha de dados de segurança para óleo de bomba de vácuo.	207
Anexo D. Ficha de dados de segurança para o álcool isopropílico utilizado na limpeza das peças constituintes dos sistemas de pré-vácuo	213
Anexo E. Informações sobre classificação, armazenamento, transporte e destinação de óleos lubrificantes, solventes e metais descartados após a montagem ou manutenção dos sistemas de pré-vácuo.	220

## INTRODUÇÃO

Segundo Stempniak (2002), a palavra vácuo pode indicar a idéia de espaço vazio, sem a presença de moléculas ou átomos. Mas na realidade, para um determinado volume podemos atribuir a denominação de vácuo quando a densidade de partículas nele existente é inferior aquela que encontramos nas condições troposféricas. Logo, a idéia de espaço vazio está incorreta uma vez que no referido volume continuam a existir átomos e moléculas, entretanto, em menor número em relação a pressão atmosférica. Durante muito tempo o conceito de vácuo se referia exclusivamente a ausência de matéria. Para Kaschny (2008), quando falamos em tecnologia do vácuo, estamos fazendo referência ao domínio dos mecanismos e processos necessários para removermos todos os gases do interior de uma câmara e mantê-la neste estado por tempo suficiente para a realização de um determinado processo ou operação.

Os sistemas de pré-vácuo, que operam entre  $10^3$  mbar e  $10^{-3}$  mbar, são utilizados para propósitos industriais e científicos. Na indústria, são indispensáveis para os processos de automação, secagem, impregnação, cristalização, concentração, filtração, destilação e polimerização, principalmente porque reduzem o tempo de processamento e exercem maior controle sobre as variáveis que afetam a qualidade dos produtos. Tais sistemas estão contribuindo para a preservação dos alimentos, melhorando a conservação de energia em processos industriais, aumentando a produtividade dos processos de produção de biocombustíveis, colaborando para a produção mais limpa e reduzindo o consumo de água e insumos, conforme será descrito posteriormente.

## ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 descrevemos a classificação do vácuo *em função da pressão e a relevância atual dos sistemas de pré-vácuo dedicados à secagem, filtração, resfriamento, destilação, empacotamento de produtos, polimerizações, impregnações e outras aplicações. Apresentamos um breve histórico da tecnologia do vácuo, bem como exemplos de como os sistemas de pré-vácuo podem contribuir para a conservação de energia, aumento do rendimento do processo e no desenvolvimento de tecnologias limpas.*



*No capítulo 2 são apresentados os detalhes relevantes para o desenvolvimento de sistemas de pré-vácuo, considerando o conjunto de componentes para gerar, medir e manter as pressões de trabalho entre  $10^3$  e  $10^{-3}$  mbar.*

No capítulo 3 apresentamos o conceito de projeto sob a perspectiva da engenharia de processos, considerando os principais elementos utilizados em sua sistematização. No mesmo capítulo sugerimos tópicos relevantes a serem considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo, principalmente a especificação das condutâncias, a integração energética através da rede de trocadores de calor e a implementação de um sistema supervisor para determinados processos industriais de bombeamento de gases e vapores, como destilações, cristalizações e secagem de materiais.

O capítulo 4 fornece elementos conceituais sobre simulação e modelagem de processos considerando o modelo matemático dos equipamentos, as fontes de incerteza e a análise de sensibilidade. Aspectos básicos das principais ferramentas computacionais normalmente utilizadas na simulação de sistemas de pré-vácuo também foram comentados neste capítulo.

O capítulo 5 traz informações sobre os principais critérios de seleção de materiais destinados à construção de sistemas de pré-vácuo. Foram descritas recomendações sobre procedimentos de limpeza de superfícies e cuidados que devem ser tomados em relação as operações de soldagem e usinagem das peças para que o sistema de pré-vácuo em operação tenha o seu desempenho otimizado em termos de pressão final máxima atingida e manutenção da qualidade do vácuo obtido.

O capítulo 6 aborda e ilustra de forma detalhada as principais montagens de sistemas de pré-vácuo que devem ser evitadas, apresenta sugestões para a redução de ruído, vibrações e liberação de óleo da bomba para o ambiente e sistema de vácuo. Descreve uma lista de possíveis falhas e causas associadas ao funcionamento irregular das bombas mecânicas, além de abordar a questão da montagem de flanges, tubulações e conexões comumente utilizadas nos sistemas de pré-vácuo.

O capítulo 7 descreve a importância da caracterização dos sistemas de pré-vácuo dedicados à pesquisa e atividade industrial. Aborda também a necessidade da identificação e caracterização dos elementos estáticos e dinâmicos que podem interferir na eficiência do bombeamento dos gases e vapores no regime de escoamento viscoso laminar, bem como os métodos e esquemas dos sistemas de pré-vácuo utilizados para a determinação da velocidade de bombeamento das bombas mecânicas.

Estes esquemas servem de base para o arranjo experimental do estudo de caso desenvolvido no penúltimo capítulo da presente dissertação.

No capítulo 8, apresentamos um estudo de caso realizado em 2008 no Laboratório de Tecnologia de Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, onde procuramos seguir os principais itens da proposta de recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo, também são comentadas as principais contribuições decorrentes desta dissertação. O capítulo 9 apresenta um questionário que deverá ser respondido pelas pessoas interessadas em desenvolver, projetar, simular, construir, montar e caracterizar sistemas de pré-vácuo. A resolução do questionário poderá contribuir para a definição preliminar do escopo de trabalho, favorecendo o cumprimento das especificações e metas de projeto, dando maior clareza em relação às fases do desenvolvimento, simulação, projeto, construção, montagem e caracterização do sistema de pré-vácuo em questão.

## Capítulo 1

### **Classificação, Aplicações e Desenvolvimento Histórico**

*No presente capítulo apresentamos a classificação do vácuo em função da pressão e a relevância atual dos sistemas de pré-vácuo dedicados à secagem, filtração, resfriamento, destilação, empacotamento de produtos, polimerizações, impregnações e outras aplicações. Apresentamos um breve histórico da tecnologia do vácuo, bem como exemplos de como os sistemas de pré-vácuo podem contribuir para a conservação de energia e desenvolvimento de tecnologias limpas. Descrevemos também os objetivos gerais e específicos desta dissertação.*

#### **1.1. Classificação do vácuo em função da pressão**

A classificação do vácuo é feita em relação a pressão medida na câmara de vácuo e pode apresentar algumas variações de um autor para outro, conforme observamos em Gama(2002), Degasperri (2006), Tompkins (2002), Umrath (2002) e nos catálogos dos fabricantes de bombas de vácuo. A medida que a pressão diminui, o vácuo pode ser classificado em primário ou pré-vácuo, alto-vácuo, muito alto-vácuo e ultra alto-vácuo. As aplicações em tecnologia do vácuo exigem faixas de pressão bem definidas. Por exemplo, pré-vácuo, que vai de  $10^3$  mbar a  $10^{-3}$  mbar, é normalmente aplicado em processos de secagem, filtração, resfriamento, destilação e remoção de gases de materiais.

A região de médio vácuo, que vai de 1 a  $10^{-3}$  mbar, é aplicada em processos de destilação molecular, aquecimento e resfriamento, processos de impregnação, fusão e cura de materiais, em fornos à arco elétrico e de fundição. Alto vácuo compreende a região de pressão entre  $10^{-3}$  e  $10^{-7}$  mbar, aplicada em processos de evaporação, espectrometria de massa, produção de feixes de elétrons e nos aceleradores de partículas. Ultra alto vácuo é a região onde as pressões são inferiores a  $10^{-7}$  mbar, onde as aplicações envolvem fusão nuclear, estocagem de anéis para aceleradores, pesquisas espaciais e física de superfícies.

#### **1.2. Pré-vácuo e suas aplicações**

A região de vácuo compreendida entre  $10^3$  e  $10^{-3}$  mbar, campo de interesse desta dissertação, é denominada pré-vácuo ou vácuo primário. A seguir serão descritos exemplos mais detalhados de aplicações que utilizam sistemas de pré-vácuo, as faixas de pressão em que operam e sua relevância dentro dos processos industriais.

### 1.2.1. Secagem

Conforme descreve Costa (2007), a secagem industrial é a operação pela qual é retirada a umidade contida em certos materiais. A secagem é uma das operações industriais mais empregadas na prática, tanto para o acabamento final ou equilíbrio de umidade natural de diversos materiais processados com o ar ambiente como é o caso das madeiras e de seus derivados, das borrachas, dos couros, dos plásticos, da celulose e dos materiais perecíveis. Quando os sistemas de secagem operam com sistemas de pré-vácuo é favorecida a secagem dos produtos termicamente sensíveis. A Figura 1.1. apresenta um secador de tambor rotativo de eixo horizontal, onde o material úmido é aquecido diretamente, enquanto o ar entra controlado numa das extremidades e é bombeado juntamente com o vapor retirado na outra, mantendo o conjunto em pré-vácuo. Outro sistema, que opera com pré-vácuo, é o sistema de secagem por pulverização.



Figura 1.1 – Secador de tambor rotativo de eixo horizontal (Afonso & Silveira, 2003).

Neste caso, tanto o ar como o material são previamente aquecidos a temperaturas mais amenas e o sistema é colocado em pré-vácuo. Com o auxílio de ventiladores centrífugos adequados atinge-se níveis de pressão da ordem de 200 mbar, o que permite reduzir em mais de 6<sup>o</sup>C a temperatura de aquecimento do material. Ordóñez (2005) descreve que a perda de massa que ocorre quando um alimento é seco a vácuo diminui consideravelmente os custos de transporte e manuseio. Entre os vários métodos de secagem de alimentos, o processo que

utiliza pré-vácuo é um método intermediário entre a secagem tradicional e a liofilização, pois permite trabalhar a pressões baixas com temperaturas moderadas, geralmente inferiores a 100°C, obtendo-se maiores taxas de evaporação e um produto final de melhor qualidade se comparado com a secagem tradicional com ar aquecido.

Estudos realizados por Jankosky (2000) comparando a secagem a vácuo com a secagem convencional para a madeira de *Eucalyptus globulus* com 50 milímetros de espessura, demonstraram que uma das vantagens do método de secagem à vácuo é a redução no tempo de secagem. Enquanto a secagem a vácuo demora cerca de 16,5 dias, a secagem convencional demora 75 dias para a mesma quantidade de madeira processada. Em relação a qualidade da madeira seca; a secagem a vácuo resulta em tensões internas de maior intensidade e menor incidência de empenamentos e rachaduras. Exemplos importantes do uso de pré-vácuo na conservação de alimentos de origem animal e vegetal são dados na literatura por Ordóñez (2005). A secagem empregando pré-vácuo é utilizada para preservação de alimentos perecíveis de origem vegetal, permitindo o transporte sem refrigeração. A secagem de abóbora e da cenoura, por exemplo, foi realizada por Pinedo e Murr (2005) empregando pressões que variaram entre 50 e 250 mbar. A perda de massa que ocorre quando um alimento é seco a vácuo diminui consideravelmente os custos de transporte e manuseio. Segundo Ordóñez (2005) na indústria de alimentos, os equipamentos em que se aplica pré-vácuo têm quatro componentes fundamentais: uma câmara hermética de vácuo de construção sólida com pontos de entrada e de saída para o produto e para os gases e vapores; uma fonte de calor; um sistema para gerar e manter o vácuo entre 1,3 e 93,3 mbar, como uma bomba de vácuo de palhetas rotativas de duplo estágio ou um ejetor de vapor e componentes para remover o vapor de água à medida que se evapora do alimento. O secador a vácuo de placas é provavelmente o equipamento a vácuo mais simples e opera de forma descontínua.

Em uma câmara, dispõem-se placas ocas horizontais e paralelas, aquecidas internamente pela circulação de água quente ou vapor de água, sobre as quais o alimento é estendido em camadas uniformes e finas.

É adequado tanto para alimentos líquidos como sólidos. No secador a vácuo de esteira rolante, os alimentos líquidos ou pastosos são acomodados em esteira transportadora contínua de aço inoxidável. Essa esteira, situada no interior da câmara de vácuo,

desloca-se sobre dois tambores: um de aquecimento e outro de resfriamento. O tambor quente e os sistemas de aquecimento, situados acima e abaixo da esteira rolante, proporcionam o calor necessário para a operação. O produto resfria ao passar pelo tambor de resfriamento, antes de ser separado da esteira por uma faca.

Para Ordóñez (2005), a principal aplicação desses equipamentos é a desidratação de alimentos muito sensíveis ao calor, como sucos de frutas, tomates concentrados e extratos de café. Os produtos assim tratados, em especial os sólidos, tem estrutura esponjosa, porque se expandem ao se aplicar vácuo na câmara pela liberação de gases e vapores. Essa estrutura porosa favorece rápida velocidade de secagem e de posterior reidratação. Se a meta é que o produto final seja muito poroso, pode-se injetar previamente nitrogênio gasoso; ao aplicar pré-vácuo, o gás se expande e sai rapidamente do produto, aumentando a sua porosidade.

A termoestabilidade, porosidade, viscosidade, superfície de contato e outras propriedades dos materiais interferem na velocidade de secagem. Em geral, empregando vácuo grosseiro e vácuo primário conseguimos remover a umidade de diferentes tipos de materiais. Produtos farmacêuticos podem ser desumidificados com pressões entre  $10^1$  e  $10^{-3}$  mbar, termoplásticos entre  $10^1$  e  $10^{-2}$  mbar e papeis isolantes entre  $10^2$  e  $10^{-3}$  mbar. A Figura 2.1 apresenta uma estufa de secagem que opera sob vácuo, equipada com bomba de vácuo de palhetas de duplo estágio com velocidade de bombeamento de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ . Este equipamento realiza testes de secagem de produtos sob vácuo e posterior injeção de gases como dióxido de carbono e nitrogênio até pressão de 3 bar.



Figura 1.2 – Estufa de secagem a vácuo. Incorpora câmara de trabalho de chapa de aço inoxidável AISI 304 para aquecimento a seco, porta de aço inoxidável AISI 304 com vedação hermética por guarnição de silicone, dois visores de vidro temperado de 20 mm, sistema de captura de imagem com câmera de vídeo e monitor de cristal líquido de 7" e dois registros instalados na parte superior, um para adição de resina e outro para aplicação de nitrogênio na amostra. Disponível em: [www.marconi.com.br](http://www.marconi.com.br), acesso em 12/12/2008.

### 1.2.2. Filtração

Filtração é a operação pela qual um sólido pode ser separado de um líquido ou de um gás mediante a utilização de um meio poroso, que retém o sólido e deixa passar o fluido. Seja qual for o tipo de equipamento utilizado, irá ocorrer o acúmulo de uma torta de filtração no meio filtrante e a resistência ao fluxo aumentará progressivamente no decorrer de toda a operação. Segundo Richter (2001), os fatores que mais interferem na velocidade de filtração envolvem a queda de pressão entre a alimentação e o lado a jusante do meio filtrante, a área de filtração, a viscosidade do filtrado, a resistência do bolo de filtração e a resistência do meio filtrante e das camadas iniciais do bolo. Equipamentos de filtração a vácuo semelhantes aos apresentados nas Figuras 1.3. e 1.4. podem, mediante a diferença de pressão produzida, acelerar os processos de filtração e reduzir os custos do processo.

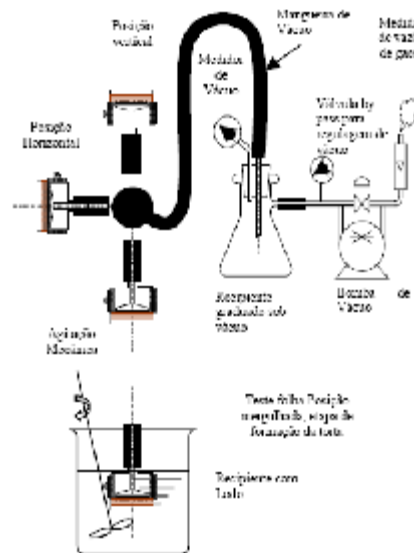


Figura 1.3 – Esquema de equipamento de laboratório desenvolvido para a filtração de lodo de caldo de cana, com pré-vácuo utilizando pressões entre 133 e 534 mbar. Fonte: Polônio, Gonçalves e Razuk-2004)

Atualmente, filtros contínuos de tambor rotativo sob pré-vácuo são os equipamentos mais utilizados na indústria de açúcar e álcool no Brasil, em função do tipo de tratamento utilizado na clarificação do caldo de cana, que é a sulfitação.

Os autores citados na Figura 1.3. estimaram que, para o processamento anual de 320 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, são necessários 51850 m<sup>2</sup> de área filtrante, principalmente se for mantida a atual relação média de 0,7 m<sup>2</sup> de área de filtração por tonelada de cana, com período médio de duração de safra de 180 dias.

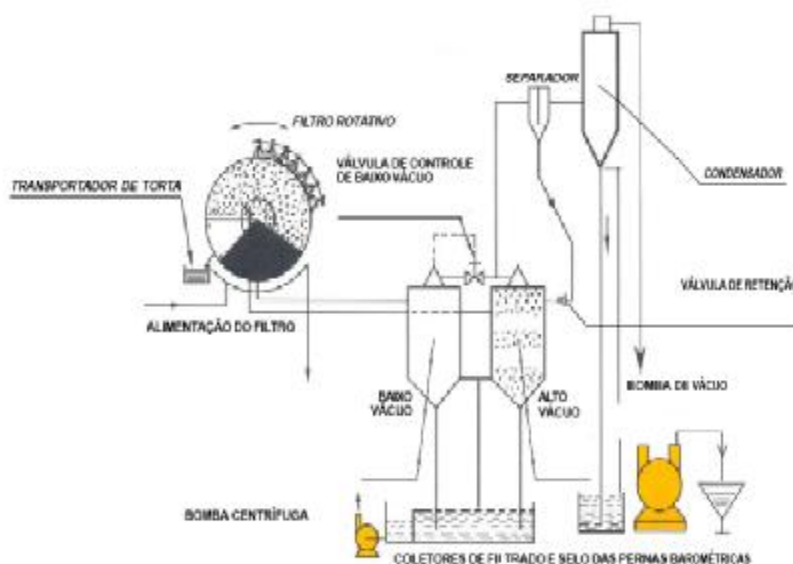


Figura 1.4 – Representação esquemática do filtro de tambor rotativo a vácuo, empregado no processo de produção de álcool combustível, que opera com pressões até 10<sup>-3</sup> mbar e vazões de filtrado até 10.000 m<sup>3</sup>/h. Disponível em <http://www.omel.com.br/pdfespanhol/usinas.pdf>, acessado em 12/12/2008.



### 1.2.3. Resfriamento

A partir do momento em que uma hortaliça é colhida, ocorre uma série de processos fisiológicos que levam à perda de qualidade do produto e, conseqüentemente, à redução de sua vida útil. Conseguir uma diminuição na velocidade desses processos traz vantagens para os produtores, transportadores e consumidores.

Trata-se de um método de resfriamento rápido que tem sido aplicado com sucesso em alimentos como aipo, aspargo, alface, espinafre, repolho, cogumelos e couve-flor. Um exemplo descrito por Afonso e Silveira (2003) para o resfriamento rápido de alfaces, empregando bombas de vácuo com velocidades de bombeamento que variaram entre 5 e 13 m<sup>3</sup>/h e pressões entre 953 e 400 mbar, alcançaram temperaturas de resfriamento entre 4,7<sup>o</sup>C e 5,0<sup>o</sup>C. Segundo eles, o processo termodinâmico envolvido na refrigeração a vácuo pode ser dividido em duas fases distintas. Na primeira, com o produto carregado dentro da câmara de vácuo à temperatura ambiente, a bomba de vácuo é acionada para reduzir a pressão interna da câmara. A temperatura do produto permanece constante até a câmara atingir a pressão de saturação, isto é, até a pressão na câmara atingir a pressão de vapor da água do produto. Com a temperatura de ebulição atingida, inicia a evaporação e o vapor de água começa a ocupar o espaço do ar na câmara. A segunda fase começa simultaneamente com o fim da primeira, onde a saturação continua até o produto ser resfriado a temperatura desejada.

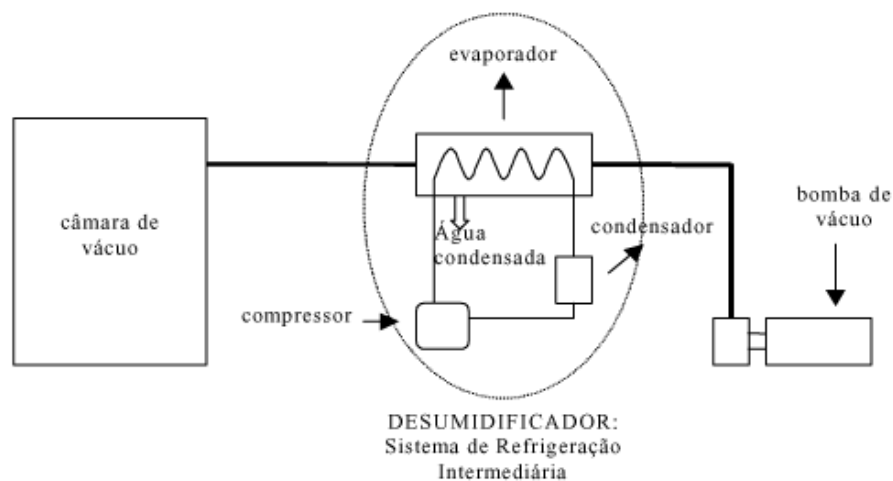


Figura 1.5 – Esquema simplificado de um resfriador sob pré-vácuo, que opera com velocidade de bombeamento entre 5 e 13 m<sup>3</sup>/h e pressão de trabalho 400 mbar (Afonso & Silveira, 2003).

O vapor de água retirado do produto não deve atingir a bomba de vácuo, devendo ser removido do sistema através de uma armadilha gelada, sendo fundamental, em equipamentos comerciais, a utilização de um sistema de refrigeração auxiliar na condensação e remoção desse vapor de água. A quantidade de água evaporada aceitável no resfriamento a vácuo de hortaliças folhosas representa entre 1 e 4% da sua massa. Tais quantidades vão depender da temperatura final e inicial do produto, sendo que a cada 5,5 a 6<sup>o</sup>C de resfriamento, tem-se aproximadamente 1% da perda de peso para hortaliças folhosas. Uma forma de reduzir a perda de massa durante o resfriamento a vácuo é umedecer os produtos antes de colocá-los dentro da câmara. O umedecimento do produto resulta, algumas vezes, em um resfriamento mais rápido, mas sua principal vantagem está em minimizar a perda de massa do produto.

#### **1.2.4. Destilação**

Um exemplo importante do uso de vácuo no processo de destilação, foi dado por Pinto, Guariero e Rezende (2005) para o caso da glicerina, um co-produto da produção do biodiesel e de sabões de origem animal e vegetal, atualmente utilizada na preparação de fármacos, alimentos, bebidas, explosivos, polímeros e biogás, cuja aplicação é determinada pelo grau de pureza, que deve ser superior a 95%.

A purificação da glicerina é feita por destilação empregando pressão da ordem de 80 mbar, obtendo-se um produto límpido e transparente, denominado comercialmente de glicerina destilada ou bi-destilada. Segundo Uchimura (2006) a glicerina bruta é cotada a 1,4 R\$/kg, a bidestilada por 3,5 R\$/kg, enquanto a farmacêutica, com grau de pureza acima de 99,5% é vendida a valores acima de 564 R\$/kg.

A destilação primária é empregada para remover a glicerina pelo topo da coluna de destilação, com temperaturas que variam entre 165-180<sup>o</sup>C, pressões entre 10 e 20 mbar, já a destilação secundária em coluna recheada resulta na obtenção de glicerina com pureza entre 99,8% e 99,9% (grau farmacêutico) e rendimento entre 90 e 95%.

Tabela 1.1 - Temperaturas de ebulição da glicerina para diferentes níveis de pré-vácuo.

Pressão em mbar	Temperatura de ebulição da glicerina (°C)
1011	290,0 (Decomposição)
532	263,0
266	240,0
133	220,1
79,8	208,0
26,6	182,2
13,3	167,2
6,7	153,8
1,3	125,0

Fonte: Budavari, 1996.

De acordo com a Tabela 1.1. sob pressão atmosférica a glicerina sofre decomposição a 290°C durante a destilação convencional. O uso de pré-vácuo reduz a temperatura de ebulição e propicia menor consumo de energia no processo de destilação. A Figura 1.6 apresenta um equipamento piloto para destilação molecular a vácuo provido de duas bombas rotativas de palhetas, banho termostático, dispositivos para condensação e coleta dos vapores bombeados, além de acessórios para programar e medir a temperatura e pressão do sistema.



Figura 1.6 - Equipamento piloto para destilação molecular a vácuo.

Fonte <http://www.vic-gmbh.de-bild>, acessado em 15/12/2008

Conforme Lopes, Winter e Batistella (2007), o processo de destilação molecular é um caso particular de evaporação, o qual ocorre em pressões entre  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  mbar. Neste processo, a superfície de evaporação e a superfície de condensação estão separadas ente si de um distância da ordem do livre caminho médio das moléculas

evaporadas. Deste modo o efeito do vapor gerado sobre o líquido praticamente não influencia a taxa de moléculas evaporadas que escapam da superfície do líquido e atingem o condensador facilmente, uma vez que encontram um percurso relativamente sem obstáculos. A destilação molecular representa um tipo especial de vaporização a baixas pressões e temperaturas, de grande utilidade para a separação e purificação de moléculas de alta massa molecular bem como aquelas termicamente sensíveis. Isto significa que a evaporação pode ser feita a temperaturas consideravelmente mais baixas do que com qualquer outro método de destilação a vácuo.

### 1.2.5. Desodorização

Segundo Ordóñez (2005), a desodorização consiste na remoção de odores dos produtos, resíduos industriais, efluentes e de outros materiais empregando, vapor de água ou nitrogênio sob vácuo. Um exemplo na área de refino de óleos vegetais envolve a desodorização do óleo de soja, que remove os peróxidos, ácidos graxos livres e agrotóxicos empregando insuflação direta de vapor de água entre 180<sup>o</sup>C e 260<sup>o</sup>C e pré-vácuo entre 10<sup>2</sup> e 10<sup>-3</sup> mbar.

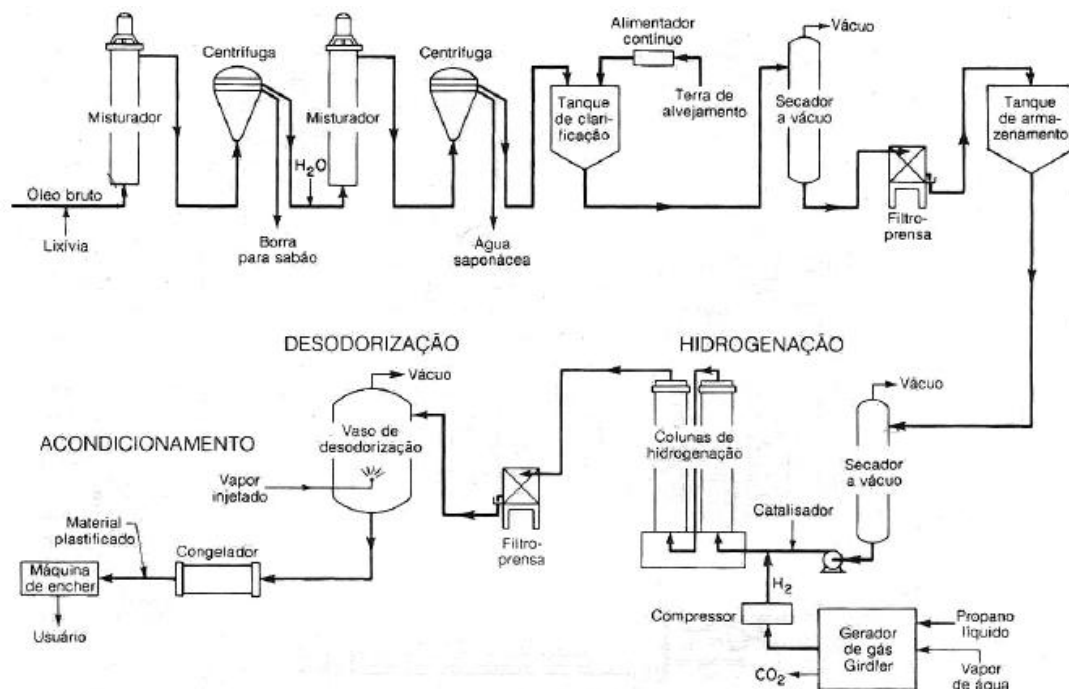


Figura 1.7 – No processo de refino de óleos vegetais diferentes operações utilizam pré-vácuo, principalmente os processos de secagem e desodorização. Fonte Barcza,2007.

Em escala laboratorial, Menacho e Silva (2007), descreveram um procedimento laboratorial para a desodorização de óleo de arroz empregando câmara de vácuo

sob pressão de 16 mbar, envolvida externamente por um banho de óleo de silicone aquecido a 180°C durante 2 horas, onde as condições do experimento foram consideradas satisfatórias para a remoção dos odores e minimização do escurecimento do óleo.

### 1.2.6. Movimentação e sustentação de peças

Para Degasperri (2006), um dos objetivos da tecnologia de vácuo é o de produzir deformações mecânicas, movimentos, levantamentos e/ou sustentação de peças por meio de diferenças de pressão. A Figura 1.8 apresenta equipamentos onde a força gerada pela diferença entre a pressão atmosférica e a pressão final obtida pelo sistema de vácuo é utilizada como elemento motor para segurar ou para manipular peças mecânicas.

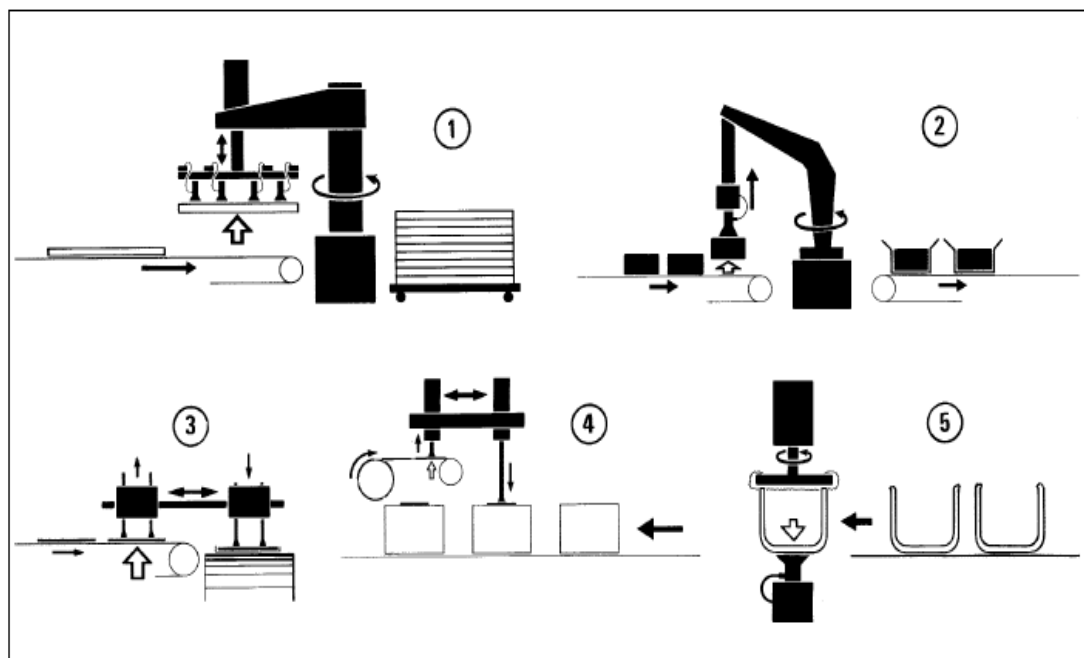


Figura 1.8 – Processos automatizados que utilizam manipulação sob vácuo: (1) manipulação robotizada. (2) alimentação automatizada de máquinas, ferramentas e prensas, (3) alimentação de máquinas de embalagem, (4) manipulação de componentes eletrônicos e mecânicos; (5) etiquetagem e (6) manipulação de papel em impressoras industriais. Fonte: [www.ascojoucomatic.com](http://www.ascojoucomatic.com)

Esta técnica utiliza sistemas de vácuo baseados no princípio do efeito “Venturi”, que cria uma redução de pressão a partir de uma alimentação de ar comprimido.

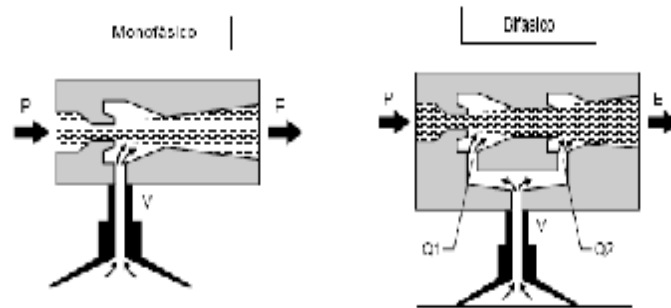


Figura 1.9 – Geradores de vácuo tipo Venturi: a) monofásico e b) bifásico.  
 Fonte: [www.ascojoucomatic.com](http://www.ascojoucomatic.com)

Conforme a Figura 1.9. no gerador de vácuo tipo Venturi monofásico, a alimentação de ar comprimido (P) provoca um bombeamento de gases, reduzindo a pressão no interior da ventosa (V). O ar é evacuado através de um silenciador de escape situado em (E). O gerador de vácuo Venturi bifásico permite velocidades maiores de bombeamento, reduzindo os tempos de fixação das peças nas ventosas.

### 1.2.7. Cristalização

Coulson e Richardson (1968) esclarecem que a cristalização é utilizada quando se deseja remover de uma solução líquida a parte dissolvida (soluto) em forma de cristais. A cristalização permite a separação da mistura em duas fases distintas, uma sólida e outra líquida. A fração de interesse pode ser a sólida, a líquida ou ambas. Para se obter a cristalização de um dos componentes da mistura, é necessário aquecer, para evaporar a água, ou resfriar, com o objetivo, em ambos os casos, de atingir sua saturação.

A cristalização é uma operação importante na indústria química, farmacêutica e de alimentos, seja como método de purificação ou como processo de controle de distribuição granulométrica dos cristais formados. Por muitos anos, a prática comum na produção de cristais era aquecer uma solução até uma condição próxima a saturação e colocá-la em tanques retangulares abertos, onde a solução era resfriada e os cristais depositados no fundo no recipiente. Ordóñez (2005) cita que, atualmente, entre as diversas opções, a cristalização a vácuo em operação contínua é uma delas; neste caso, a solução é enviada a uma câmara que trabalha sob pré-vácuo, geralmente é efetuada em pressões que variam entre 5 e 100 mbar.

A Figura 1.10. apresenta o esquema de um cristalizador a vácuo, onde a precipitação dos cristais decorre da evaporação adiabática e do resfriamento.

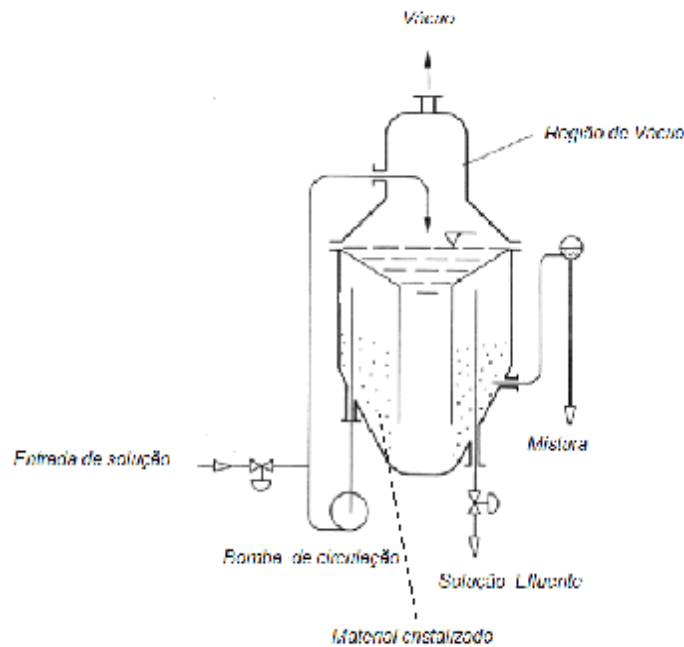


Figura 1.10 – Representação esquemática de um cristalizador a vácuo.  
Disponível em [http://tar.trix.net/doc/opu/cristalizacao\\_ver2\\_3.pdf](http://tar.trix.net/doc/opu/cristalizacao_ver2_3.pdf), acesso em 15/12/2008.

### 1.2.8. Impregnação

Para Schmidt e Carciofi (2008), o processo de impregnação a vácuo de produtos porosos consiste na troca do gás e do líquido nativos presentes no interior dos poros por um líquido externo. Isso se faz pela ação de gradientes de pressão promovidos pela aplicação de pré-vácuo, seguida pelo restabelecimento da pressão atmosférica em uma câmara contendo o produto imerso em uma solução. Resende e Reno (2007) consideram três fenômenos associados ao processo de impregnação: saída de gases, deformação/relaxação da matriz sólida e entrada do líquido. No primeiro passo do processo submete-se as amostras ao vácuo a uma pressão ( $P_1$ ) por um dado período de tempo ( $t_1$ ), em que o gás ocluído nos poros se expande até o equilíbrio com a pressão imposta ao sistema, saindo do produto e drenando parte do líquido nativo presente no interior dos poros. Uma vez alcançado o equilíbrio das pressões do sistema, uma quantidade de líquido penetra nos poros devido à ação das forças capilares. Após este período, a pressão atmosférica ( $P_2$ ) é restabelecida e o produto é mantido imerso na solução por um tempo ( $t_2$ ). Nesta segunda etapa, o gás residual presente no interior da amostra é comprimido, conduzindo à impregnação dos poros do produto pela solução externa. Em alimentos industrializados a impregnação a vácuo

é aplicada com o objetivo de modificar a sua composição pela remoção parcial de água e impregnação de solutos sem alterar a integridade estrutural do produto. A figura 1.11. apresenta o esquema de um sistema de impregnação a vácuo onde as pressões variaram entre  $10^2$  e  $10^{-3}$  mbar.

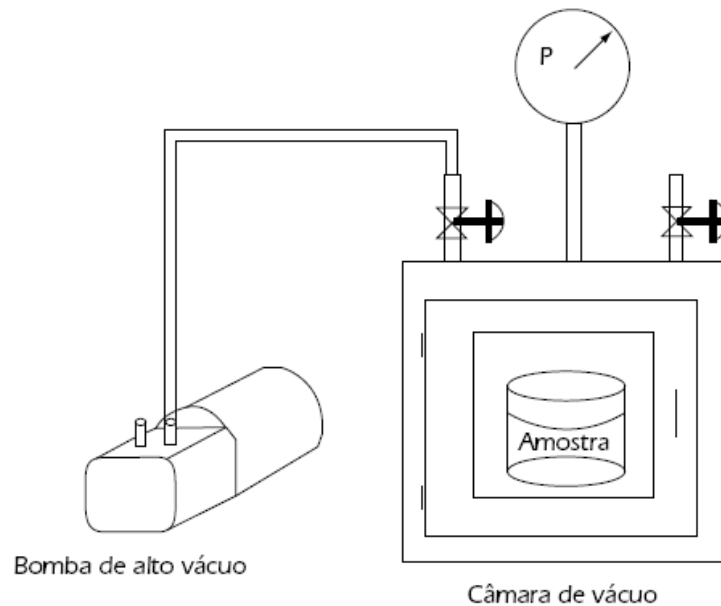


Figura 1.11 – Esquema do sistema de pré-vácuo destinado à impregnação a vácuo de amido gelatinizado nos poros de fatias de melão, realizado por Resende e Reno (2007).

A principal forma de deterioração que inviabiliza o congelamento e armazenamento sob refrigeração de frutas em pedaços é a perda de textura decorrente dos danos mecânicos causados por cristais de gelo às paredes celulares nos tecidos. Esses cristais de gelo, provavelmente, se formam inicialmente nos espaços intercelulares contendo vapor de água que condensam nas paredes celulares como pequenas gotículas e depois se convertem em cristais de gelo à temperatura de congelamento.

No congelamento posterior os componentes da solução modificam os hábitos de crescimento dos cristais de gelo, influenciando a mobilidade molecular da água necessária para o crescimento ou aumentam a resistência dos tecidos pela interação destes componentes com os compostos de parede celular. De acordo com estudos realizados por Resende e Reno em 2007, a impregnação a vácuo mostra-se como um tratamento efetivo para modificar a composição de melões pela incorporação de substâncias que interferem nos fluxos moleculares durante os processos de congelamento e descongelamento.



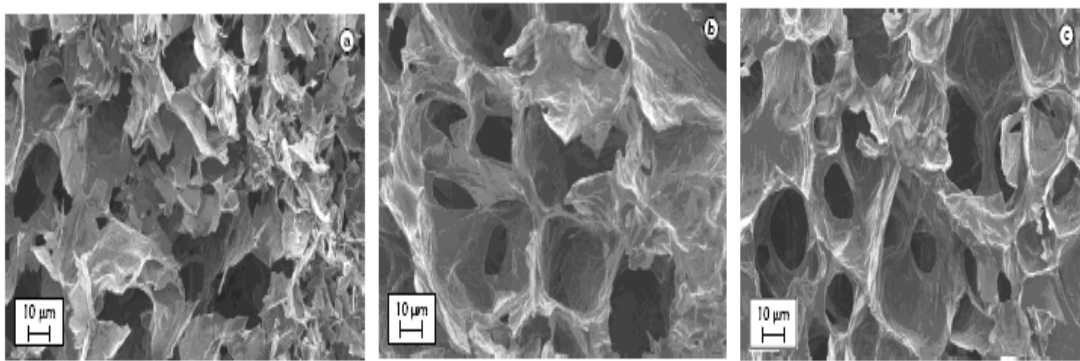


Figura 1.12 – Fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura de fatias de melão após descongelamento, tratados com concentração de 10g de amido/100ml de solução, 20g de glicose/100ml de solução e pré-vácuo de: a) 844 mbar b) 505 mbar c) 166 mbar. Fonte: Resende e Reno (2007)..

As fotomicrografias apresentadas na Figura 1.12., obtidas por microscopia eletrônica de varredura e análises microestruturais, mostram que pré-tratamentos com aumento do nível de pré-vácuo, particularmente 505 e 166 mbar, e solução contendo amido gelatinizado preservam melhor a textura de pedaços de melão congelados.

Segundo Schmidt e Carciofi (2008), a utilização de impregnação a vácuo tem sido estudada para reduzir o tempo dos processos de salga aplicados a queijos, presuntos e cortes de peitos de frangos.

### 1.2.9. Pervaporação

Assis e Bizzo (2007) esclarecem que, a pervaporação é um processo de separação por membranas, em que os componentes de misturas líquidas são fracionados devido a sua vaporização parcial através de uma membrana densa de permeabilidade seletiva.

Na pervaporação, ao contrário de outros processos com membrana, ocorre mudança de fase: a alimentação líquida se difunde seletivamente através da membrana, sendo o permeado obtido na fase de vapor. A diferença da pressão parcial ocorre pela redução da pressão total no lado do permeado, a qual é obtida pelo uso de uma bomba de vácuo rotativa de palhetas ou de um gás inerte de arraste no lado do permeado, conforme exemplificado na Figura 1.13. Em ambos os modos de operação, o vapor permeado é coletado na fase líquida com auxílio de um condensador.

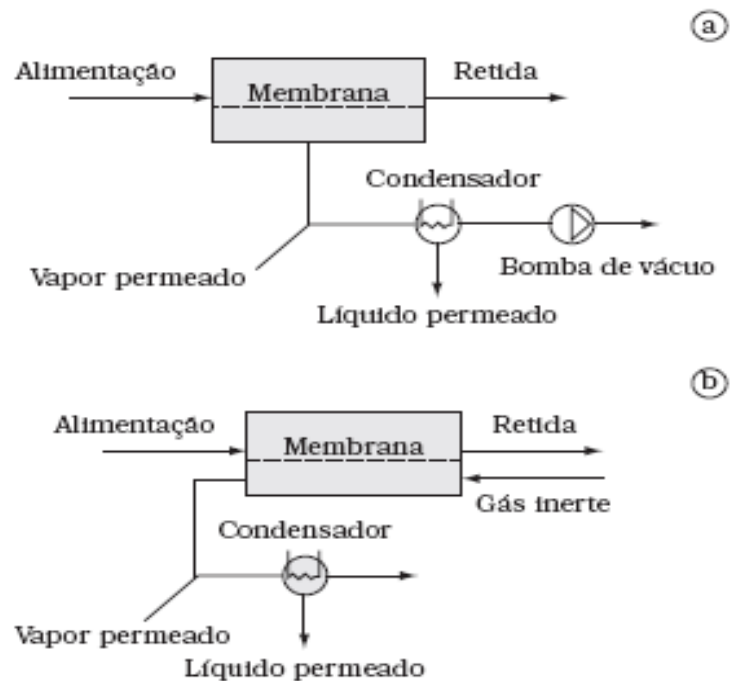


Figura 1.13 – Esquema de operação do processo de pervaporação: a) utilizando sistema de pré-vácuo b) empregando arraste dos vapores com gás inerte. Fonte: Assis e Bizzo (2007).

A transferência de massa dos permeantes na pervaporação ocorre em três etapas consecutivas: sorção seletiva na membrana no lado da alimentação, difusão através da membrana e dessorção do vapor no lado do permeado. Desta forma, a permeabilidade de um componente através da membrana resulta, das contribuições da solubilidade e da difusividade.

Este processo foi citado por Pereira et al (2005) como uma técnica com grande potencial de aplicação para a recuperação de compostos orgânicos voláteis de meios líquidos, apontando dessa forma para a possibilidade da sua utilização na recuperação de componentes de aroma.

Este processo apresenta como vantagens, em relação aos processos de extração com solventes a vapor e extração supercrítica, a não utilização de solventes tóxicos e a operação em condições amenas de temperatura e pressão. A possibilidade de operar a temperatura ambiente é importante pois evita a degradação de compostos aromatizantes, além de reduzir os custos de energia, conforme relataram Rajagopalan e Cheyran (1995) e Borjesson, Karlsson e Tragardh (1996). A Figura 1.14. apresenta um esquema de pervaporação e cristalização dos aromas de suco de caju.

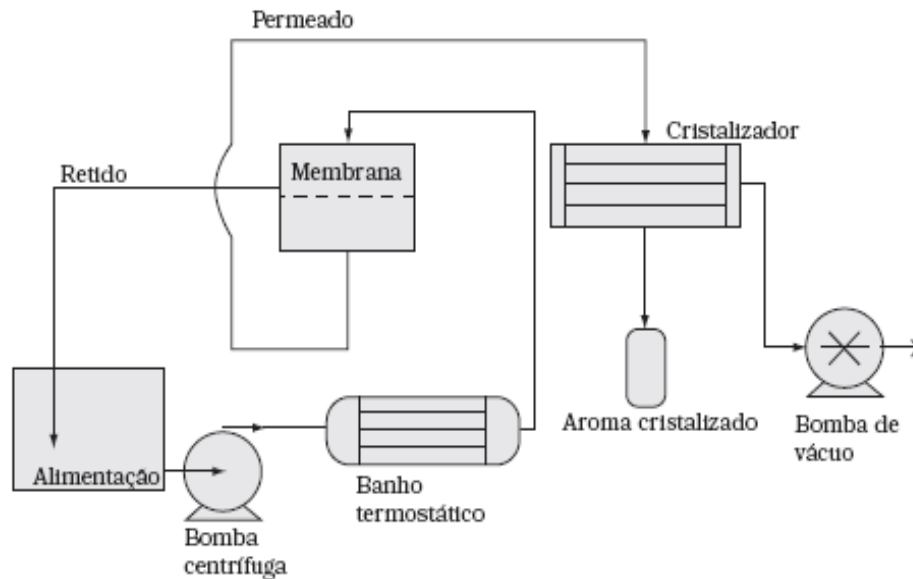


Figura 1.14 – Esquema do processo de pervaporação para recuperação dos aromas do suco de caju, segundo Assis e Bizzo (2007).

#### 1.2.10. Embalagem a vácuo

Segundo Degasperri (2006) um dos principais objetivos da embalagem a vácuo é a remoção de gases e vapores ativos do conteúdo das latas antes do fechamento, reduzindo a corrosão causada pela presença de oxigênio. Outro objetivo tão importante quanto o primeiro, mas mais difícil de ser explicado, é evitar tensões excessivas nas latas durante a esterilização comercial. Durante a esterilização, já com a lata fechada, ocorre a liberação de vapor de água, o que aumenta a pressão interna. O pré-vácuo produzido na exaustão permite o preenchimento do espaço livre da lata, sem aumentar excessivamente a pressão interna, evitando deformações. Geralmente, quando tampas e fundos de embalagens metálicas se apresentam convexos ou abaulados, é sinal de alterações gasosas no interior das latas, o que causa a rejeição por parte dos consumidores. A formação de vácuo elevado também pode resultar em deformações na embalagem metálica, principalmente devido a diferença entre a pressão externa e interna durante o resfriamento da embalagem metálica. A operação de embalar a vácuo também é conhecida como processo de exaustão e consiste em remover o ar do recipiente que vai ser fechado hermeticamente. É uma operação de grande importância para a indústria de conservas alimentícias. Segundo Roça (2000) os métodos de exaustão mais utilizados são: aquecimento do alimento, bombas de vácuo e injeção

direta de vapor no espaço livre do recipiente. No primeiro método, o alimento pode ser aquecido antes ou depois do enchimento do recipiente, ou mesmo antes e depois. O calor expande o produto, o ar e os gases aprisionados e portanto, o ambiente no espaço livre do recipiente fica rarefeito. Quanto mais altas forem as temperaturas no momento do fechamento e menos espaço livre do recipiente, maior será o vácuo. O segundo método, usando bombas de vácuo, realiza o bombeamento dos gases e vapores em câmaras de vácuo no momento da recravação (fechamento). Este processo é indicado para produtos sólidos que não tenham líquidos livres. O terceiro método consiste em injetar vapor no espaço livre do recipiente no momento do fechamento. O vapor substituirá o ar no espaço livre e o vácuo será formado quando o vapor se condensar. Este método conhecido como “*Steam vac*”, não é adaptável a produtos sólidos e sempre exige espaço livre adequado no recipiente.

#### **1.2.11. Produção de biocombustíveis**

A indústria é uma grande consumidora de insumos energéticos, e portanto muito sensível aos fatores que possam influenciá-los, principalmente preço, disponibilidade e qualidade. Para otimizar o uso dos recursos energéticos naturais disponíveis, Manzini et al (2005) e Almeida et al (2006) apontam que é necessário aumentar o rendimento dos processos e máquinas atuais e conservar energia. Segundo Pinheiro (1996), a conservação de energia é um fator de grande relevância para que as empresas reduzam seus custos de produção, na busca da competitividade, sendo encarada atualmente como uma importante estratégia empresarial para cumprir tal objetivo. Existe um grande potencial no qual os sistemas de pré-vácuo podem contribuir para a melhoria da conservação de energia nos processos industriais. Um exemplo a ser considerado, descrito por Atala e Maugeli (2005), é o processo extrativo fermentativo a vácuo para a produção do etanol da cana-de-açúcar, esquematizado na Figura 1.15 e apresentado, depois do desenvolvimento e construção, na Figura 1.16.

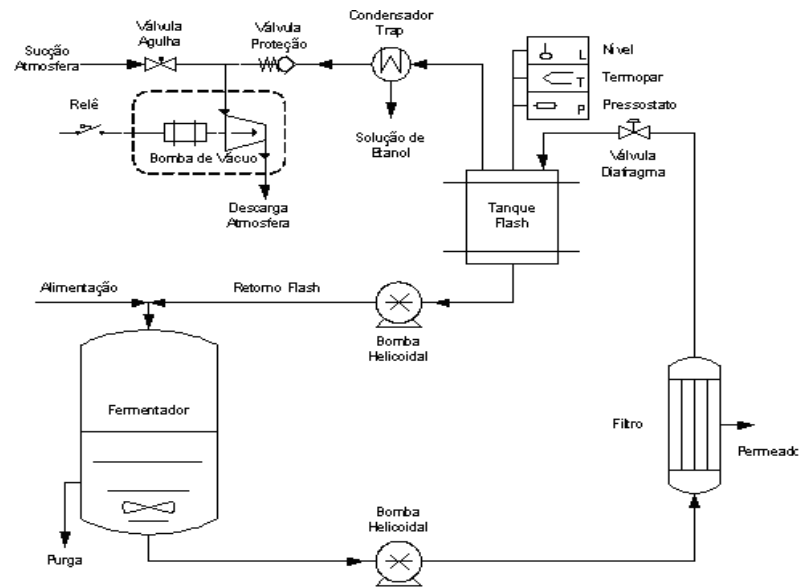


Figura 1.15 – Esquema do processo fermentativo extrativo a vácuo para a produção do etanol, desenvolvido pelo laboratório de Engenharia e de Bioprocessos da Universidade Estadual de Campinas. Fonte: Atala e Maugeli (2005)

O sistema é constituído por fermentador, sistema de filtração, tanque flash, bomba helicoidal, bomba peristáltica, bomba mecânica de palhetas rotativas e sistema de condensação. No processo extrativo a vácuo o etanol é retirado ao mesmo tempo em que é formado, sua concentração permanece em níveis baixos no fermentador eliminando-se grande parte da inibição da reação de formação do produto causada por altas concentrações de etanol, conseqüentemente a levedura torna-se mais produtiva, pois fica livre desta interferência.

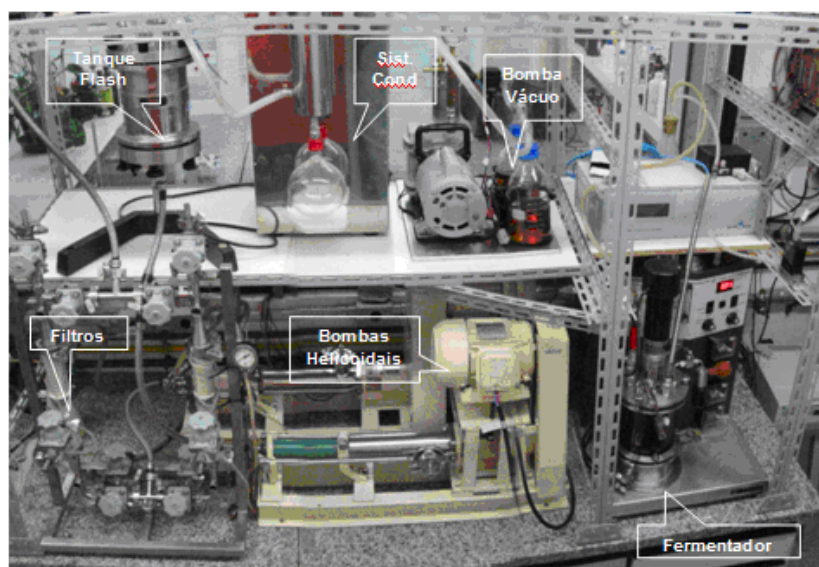


Figura 1.16 – Equipamento para o processo extrativo fermentativo, que utiliza pré-vácuo para bombear os vapores de etanol produzido no fermentador. Fonte: Atala e Maugeli (2005)

As principais contribuições que o sistema de pré-vácuo propicia para tornar o processo de produção de etanol mais limpo, melhorando inclusive a sua conservação de energia, são as seguintes: (i) o sistema que utiliza pré-vácuo proporciona uma redução do consumo de vapor de aproximadamente 1,6 kg por litro de álcool hidratado, contra 2,2 a 2,6 kg de consumo de vapor no processo convencional; (ii) o caldo a ser fermentado pode ser alimentado três vezes mais concentrado ou mais; (iii) redução do resíduo de vinhaça; (iv) processo mais produtivo, cerca de 3 vezes maior; (v) plantas de produção mais compactas e econômicas; eliminação dos trocadores de calor; (vi) o álcool evaporado sai mais concentrado, o que elimina uma coluna de destilação do processo, reduzindo o consumo de energia e água no processo.

### 1.2.12. Polimerizações assistidas a plasma

Segundo Ortiz (2007), o uso extensivo de plasmas para o tratamento de superfícies ocorre devido a sua capacidade de gerar eficientemente espécies químicas ativas, produzir íons e acelerá-los em direção ao substrato. Quanto a faixa de pressão do processo, Viana (2002) descreve que, na polimerização a plasma o monômero é introduzido num ambiente de vácuo, entre  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  mbar, e com um campo eletromagnético formado. No interior desse campo as moléculas de monômero sofrem ionização e são atraídas para o substrato sólido formando um filme polimérico fino. A fácil operacionalização, sua reprodutibilidade, e redução de tempo e temperatura são as principais vantagens do processo citadas por Ortiz (2007) e Hernandez (2006).

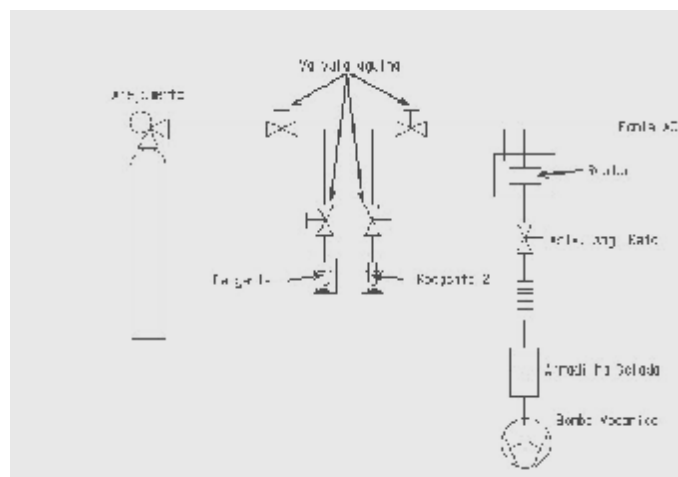


Figura 1.17 - Esquema de um reator assistido a plasma, provido de um sistema de pré-vácuo.  
Fonte: Lima, 2004.

Outra vantagem, citada por Lima (2004) e Bogaerts (2002), é que através de um único reagente podemos produzir diferentes espécies ativas por quebra de ligações

químicas, que podem então polimerizar-se. Conforme esquema da Figura 1.17. e foto apresentada na Figura 1.18., um reator assistido a plasma é formado por uma câmara de vácuo, sistema de admissão de gases do processo, sistema de vácuo e de uma fonte de alimentação. No reator assistido a plasma, apresentado na Figura 1.18, a câmara de vácuo é feita de aço inox com dois eletrodos de formato circular dispostos paralelamente um ao outro. A distância entre eles pode ser variada, modificando-se a posição do eletrodo inferior através de um sistema de *o' rings* dinâmicos, ou com a utilização de espaçadores no eletrodo superior. A câmara de vácuo possui três janelas de vidro para observação das condições do plasma ou da posição da amostra.

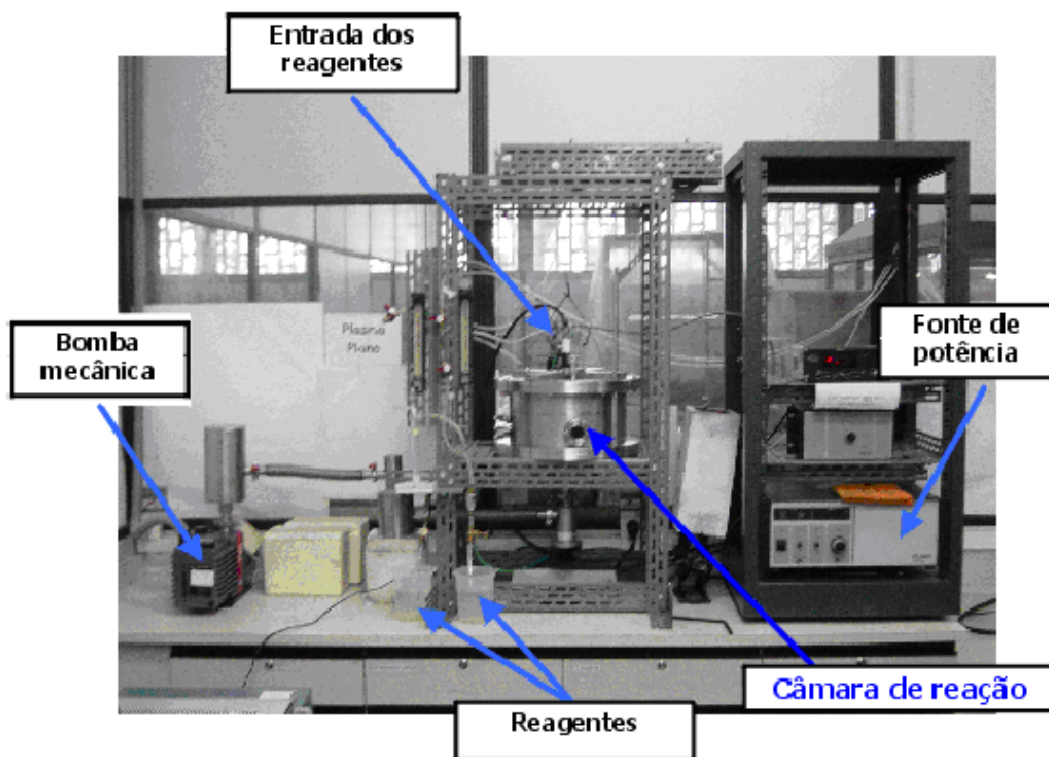


Figura 1.18-Reator assistido a plasma, provido de um sistema de pré-vácuo, desenvolvido a partir do esquema da Figura 17. Fonte: Lima,2004.

Toda a câmara de vácuo e o eletrodo inferior são aterrados. O eletrodo superior é conectado à fonte de radiofrequência e é isolado eletricamente do restante da câmara com a utilização de um anel de cerâmica. O sistema de injeção de gases apresenta dispositivos para purga e limpeza com Argônio e o conjunto de válvulas agulhas para a admissão de gases e vapores na câmara de processo.

### 1.2.13. Processamento de laminados de compósitos poliméricos

A aplicação de vácuo nos laminados é uma operação necessária para se obter a compactação uniforme das camadas e simultaneamente extrair voláteis, solvente e umidade, evitando a formação de porosidades ou vazios e remover o excesso de resina para evitar a presença de bolhas. Em razão disto, é necessário confeccionar uma bolsa de filme plástico flexível cujo tipo de material escolhido seja compatível com a temperatura e o tempo de cura dos laminados e a espessura do filme seja resistente à pressão. Cândido et al (2000) descrevem que, na montagem dessa bolsa, além do filme plástico, é necessário utilizar materiais auxiliares, tais como, tecido separador, tecido absorvedor do excesso de resina, tecido canalizador para a remoção do ar, chapa de compactação, tecido superficial removível, bico para vácuo e fita selante para vedar a bolsa em todo contorno do ferramental, como, também, para formar uma barreira de controle do excesso de resina, conforme esquema mostrado na Figura 1.19.

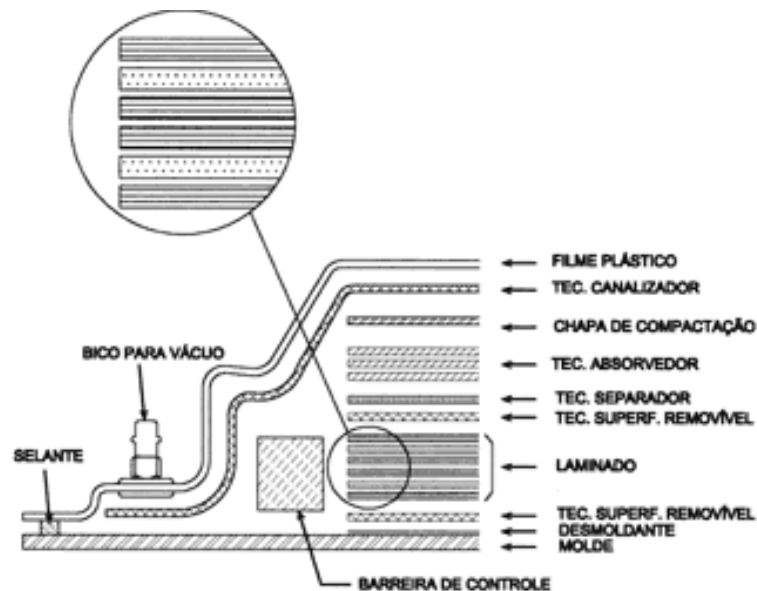


Figura 1.19 – Esquema da laminação a vácuo de compósitos poliméricos.

Fonte: Cândido et al (2000).

O tecido separador é um desmoldante que fica posicionado sobre a última camada do laminado, para evitar que o tecido absorvedor do excesso de resina tenha aderência com o tecido superficial removível ou à superfície não acabada do produto. Este tecido é feito de fibra de vidro impregnada com silicone ou teflon e de malha porosa para permitir que o excesso de resina e os voláteis removidos dos laminados



fluam livremente através dele. A camada de tecido superficial removível é moldada sobre a superfície do laminado para proporcionar uma superfície quimicamente limpa para colagem, quando este é removido. As camadas de tecido absorvedor são posicionadas cobrindo toda a área do laminado, de modo que a absorção do excesso de resina seja uniforme. Sobre estas camadas é colocada uma chapa fina de aço inox com quatro furos de 1,0 mm de diâmetro, distribuídos regularmente. Esta chapa auxilia na compactação uniforme e melhora o acabamento superficial do lado do laminado que não está em contato com o ferramental de moldagem. Para cobrir completamente esta montagem, é colocada uma camada de tecido canalizador, visando à remoção do ar e dos gases resultantes da cura. A característica principal deste tecido é assegurar que o fluxo dos gases ocorra normalmente, mesmo sob a ação da pressão aplicada durante a cura.

Em seguida, é posicionada a base do bico para vácuo e a fita selante no contorno da borda do ferramental de moldagem, de modo a fechar o filme plástico e formar a bolsa. Finalizando, o bico é acoplado à base, que por sua vez está posicionada no interior da bolsa. Este é conectado à mangueira de bombeamento e aplicado o vácuo de 0,78 mbar para verificar a existência ou não de vazamentos na bolsa antes do processo de cura dos laminados. O vácuo é mantido até os laminados seguirem para a cura em autoclave. Este tipo de compósito polimérico é utilizado em aplicações aeronáuticas.

#### **1.2.14. Termoformação a vácuo**

A partir de uma chapa de material termoplástico aquecida, a embalagem forma-se por moldagem a vácuo com um molde macho ou com um molde fêmea, ou por um único molde “macho-fêmea”. A Figura 1.20. apresenta o esquema do processo de termoformação a vácuo que opera na região do pré-vácuo.

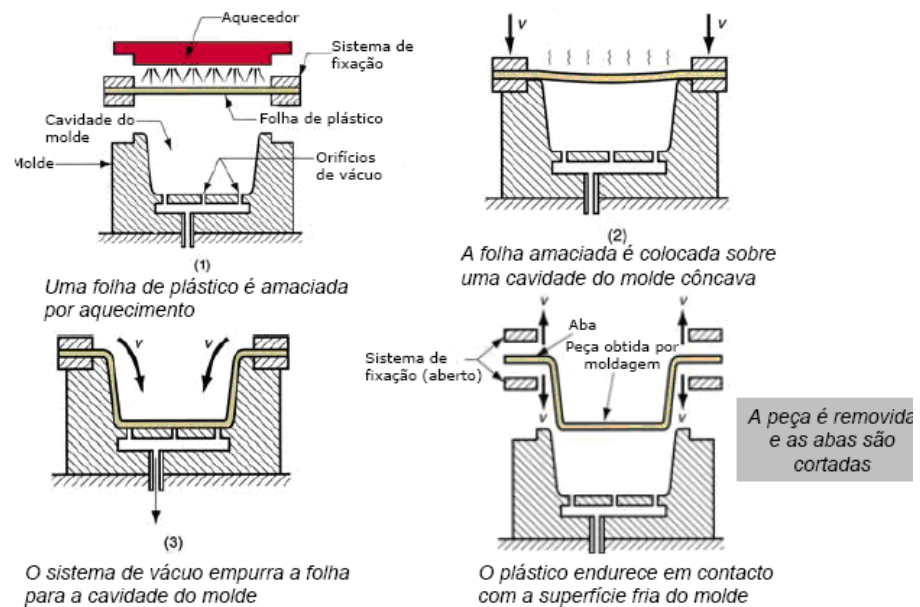


Figura 1.20 – Esquema do processo de termoformação a vácuo que opera na região do pré-vácuo. Fonte: Cohen (2008).

No processo a vácuo, a chapa depois de aquecida é “comprimada pela pressão atmosférica” contra as paredes do molde; no processo de pressão, a chapa depois de aquecida é “atirada” contra as paredes do molde por injeção de ar; no processo “macho-fêmea” a chapa aquecida passa entre um molde e contra molde tomando a forma destes. De acordo com Mano (1986), a termoformação a vácuo é muito utilizada na fabricação de copos, potes, bandejas e artigos baixos e de boca com grande diâmetro. A Figura 1.21 apresenta um equipamento para termoformação a vácuo que opera com pressão de 330 mbar e velocidade de bombeamento 40 m<sup>3</sup>/h.



Figura 1.21 – Equipamento para termoformação a vácuo. Fonte: [www.vacuummachine.com.br](http://www.vacuummachine.com.br), acesso em 20/12/2008

### 1.2.15. Vasos sanitários a vácuo

Segundo Spaeth (2000), trata-se de um sistema coletor de esgoto destinado à redução de consumo de água em bacias sanitárias. A Figura 1.22. apresenta o esquema de vasos sanitários a vácuo que operam pneumaticamente e com descargas de fluxo reduzido. O sistema é formado por uma central de pré-vácuo, tubulação selada, válvulas de interface e bacias sanitárias a vácuo.

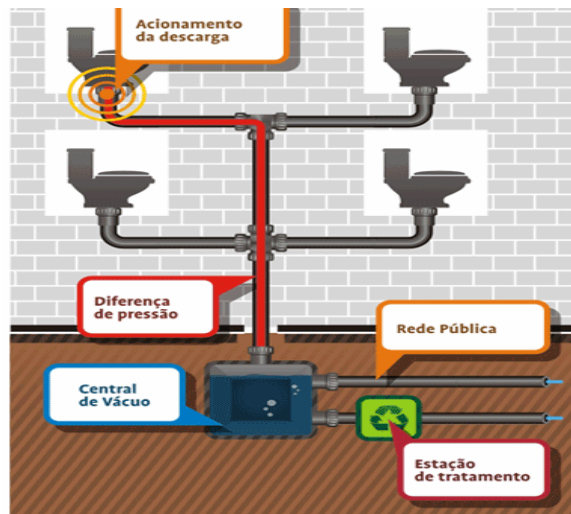


Figura 1.22 - Esquema de vasos sanitários que operam sob pré-vácuo.  
Fonte: Spaeth (2000)

O vácuo é gerado e mantido por toda a rede coletora, onde funciona uma unidade central. Nas extremidades da rede, vasos sanitários a vácuo são instalados e quando o botão é pressionado, sua válvula de descarga se abre. Neste momento devido a diferença de pressão, baixa no interior da tubulação e alta fora do vaso, o efluente é coletado para dentro da tubulação e em direção à unidade central. Ao mesmo tempo, um jato de água limpa o vaso sanitário. Após o ciclo completo a válvula de descarga se fecha e o aparelho está pronto para outro uso. Conforme os tanques de coleta da unidade central se enchem, tem-se um ciclo de descarga automática, despejando o efluente para a rede municipal de coleta ou estação de tratamento de efluentes.

Segundo Okamura (2006), as descargas comuns acopladas operam com uma vazão de 6,12 e até 20 litros por acionamento. Ou seja, cada vez que a descarga é acionada, ela despeja 6, 12 ou 20 litros de água tratada no esgoto, apenas para transportar os efluentes. Já o sistema que utiliza pré-vácuo opera com 1,0 litro de água por descarga e gera uma economia para lavar o vaso, uma vez que o transporte dos resíduos fica a cargo do sistema de vácuo. Durante a descarga cerca de 60 a 80 litros

de ar são levados junto com o efluente, removendo odores e agentes patogênicos do ambiente. A ventilação do sistema é garantida pelo dispositivo de ventilação, que conduz os gases formados da central de vácuo para a atmosfera, acima da cobertura. A Figura 1.23 apresenta os principais componentes de um vaso sanitário a vácuo.

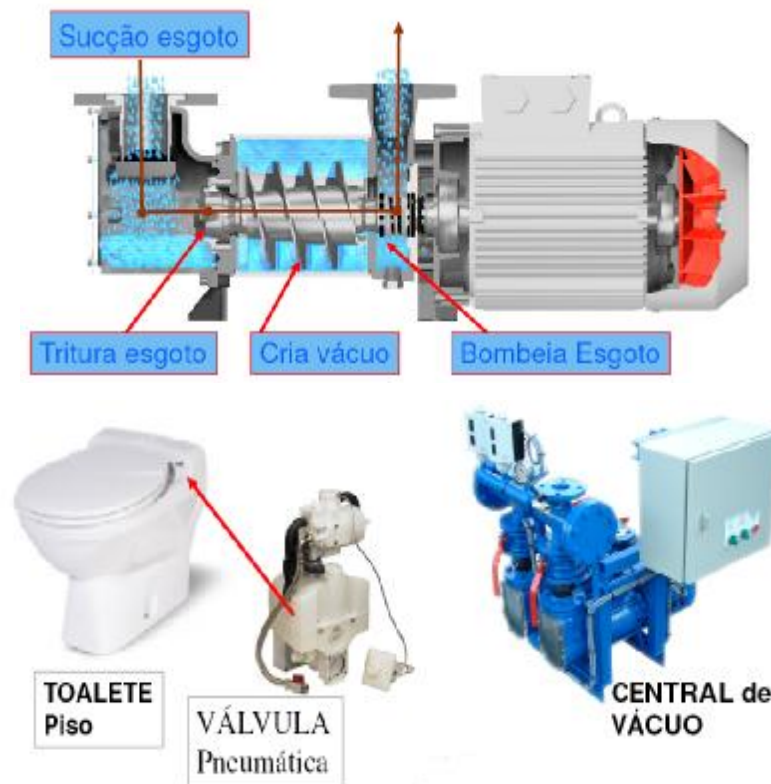


Figura 1.23 – Principais componentes de um vaso sanitário a vácuo.  
 Fonte: Tavola Engenharia (2008), disponível em [www.tavola.com.br](http://www.tavola.com.br), acesso em 18/12/2008.

### 1.2.16. Cozimento de alimentos em pré-vácuo

O cozimento de alimentos a vácuo surgiu por volta de 1974 quando um cozinheiro francês se deu conta que ao fazer um pudim de *foie gras* dentro de uma bolsa de plástico selada a vácuo, este tinha menor desperdício, menor redução de volume e conservava melhor suas propriedades de aroma e sabor. A Figura 1.24. apresenta os principais componentes de um do sistema para o cozimento de alimentos a vácuo, ou seja, (1) câmara de vácuo ou panela, (2) válvula antiretorno, (3) vacuômetro (4) acionamento do sistema (5) bomba de vácuo e (6) saída dos condensados.

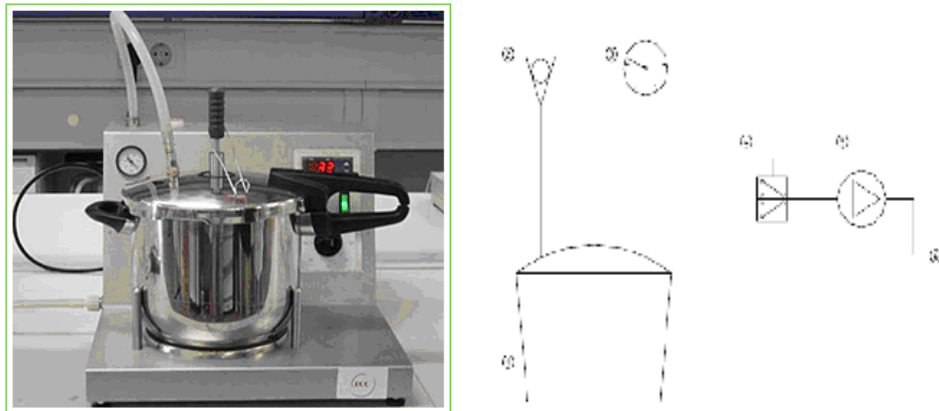


Figura 1.24 – Componentes do sistema para cozimento de alimentos a vácuo. Fabricante: Gastrovac. Fonte: Mermelstein (2003).

A bolsa de vácuo, feita de polímero relativamente impermeável atua como uma segunda pele do produto, contribuindo para a manutenção da uniformidade da pressão interna durante o processo de cozimento do alimento. Outro ponto relevante é a atmosfera dentro do alimento apresentar baixa concentração de oxigênio, que reduz consideravelmente as reações químicas de oxidação e hidrólise durante a cocção do alimento. A duração e a temperatura do cozimento são consideradas pelos especialistas em gastronomia como as variáveis mais importantes na preparação de alimentos submetidos a pré-vácuo. É fundamental reduzir a temperatura e aumentar o tempo de cozimento para conseguir uma transferência de calor homogênea no centro do alimento. Quanto mais baixa for a temperatura, mais tempo será necessário para realizar o cozimento. Como exemplo, Mermelstein cita o caso do filé de salmão, que em forno convencional a  $190^{\circ}\text{C}$  deverá ser cozido durante 8 minutos enquanto em pré-vácuo a  $50^{\circ}\text{C}$  o seu tempo de cozimento deverá ser de 12 minutos.

### 1.2.17. Curativo a vácuo

O tratamento de feridas através de métodos convencionais é, muitas vezes, limitado por condições locais inadequadas ou por comprometimento das condições clínicas dos pacientes. Ferreira et al (2003) relataram que o uso de sistema de vácuo teria como vantagens aumentar a velocidade de formação do tecido de granulação, remover secreções de ferida, aumentar o fluxo sanguíneo local, e atrair as bordas da ferida ao centro, reduzindo suas dimensões. Os autores desse estudo relataram três casos de pacientes com diferentes feridas de difícil tratamento devido a más condições

locais ou a condições clínicas desfavoráveis, nos quais utilizaram o sistema de curativo a vácuo a fim de preparar a ferida para o fechamento definitivo. Um deles apresentava úlcera de pressão, outro uma úlcera de pé-diabético, e o terceiro um coto de amputação de pé com área cruenta. Nos três casos uma melhora importante das condições das feridas foi obtida em sete a oito dias, permitindo tratamento cirúrgico bem sucedido com retalho ou enxertia de pele. Cothren et al (2006) relataram que obtiveram índice de sucesso de 100% de fechamento definitivo primário do abdome utilizando a técnica de curativo a vácuo. Rezende et al (2007), apontaram que o pré-vácuo necessário para o funcionamento adequado do curativo varia entre 13 e 55 mbar.

#### **1.2.18. Sistema de vácuo clínico**

Um sistema de vácuo clínico deve conter basicamente: funil coletor, tubos visor de nível, serviço principal de vácuo, válvulas de retenção, mangueiras, bombas de vácuo, reservatório, controlador automático de vácuo, silenciadores de exaustão, válvulas isolantes, filtros bacteriológicos, sifões de dreno, válvulas manuais de drenagem e pressostatos. As instalações de uma central de vácuo clínico devem obedecer as normas regulamentadoras RDC 50/2002 do Ministério da Saúde e NBR 12188/2001 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Segundo a NBR 121888/2001, o sistema de vácuo clínico, deverá ser composto de um suprimento primário e de um secundário, ou seja, duas bombas de vácuo funcionando alternadamente ou em paralelo, com capacidade para atender individualmente 100% do seu consumo máximo provável. Ainda, de modo a garantir a funcionalidade do sistema, faz-se necessário considerar a conexão de, no mínimo, uma das bombas ao sistema de emergência elétrica. Caso o sistema não possua desinfecção dos gases e vapores bombeados, deverão ser instalados dois filtros bacteriológicos de 0,1  $\mu\text{m}$  a montante da câmara de vácuo, de modo a reter aerossóis liberados no processo de aspiração. A utilização de filtros bacteriológicos também é um fator importante nesses sistemas, uma vez que dispensam o uso de agentes bactericidas químicos, como o cloro e o ozônio, que podem causar danos ambientais ou acidentes de trabalho, quando de seu manuseio. Esses filtros devem ser montados de forma que sua troca seja efetuada de maneira simples e segura. A descarga da central de vácuo deve ser obrigatoriamente dirigida ao exterior do prédio, com o terminal voltado para baixo, devidamente telado, preferencialmente acima do telhado, da central de vácuo e das construções vizinhas

localizado a uma distância mínima de 3 metros de qualquer porta, janela ou entrada de ar ou abertura do edifício. Uma placa de sinalização de atenção e risco deve ser adequadamente colocada próxima ao ponto de descarga do sistema de vácuo. A capacidade do reservatório deve ser relacionada à capacidade das bombas de vácuo. Deve ser previsto um sistema de alarme de emergência por sinal luminoso e sonoro, alertando a queda do sistema de vácuo, abaixo de 266 mbar, que deve ser precisamente identificado, alimentados pela rede elétrica geral do estabelecimento assistencial de saúde e ligado também à rede elétrica de emergência. A Figura 1.25. apresenta dois sistemas de vácuo clínico formados por unidades de bombas de vácuo tipo palhetas rotativas de duplo estágio, filtros bacteriológicos de exaustão, painel elétrico frontal e câmara de vácuo cilíndrica vertical.



Figura 1.25. Exemplos de sistemas de vácuo clínico dotados de bombas de palhetas rotativas. Fonte: <http://www.buschdobrasil.com.br>, acesso em 21/07/2009.

A instalação de sistemas centralizados de vácuo clínico eliminam o uso de sistemas tipo Venturi ou aspiradores portáteis que, além do ruído e do alto consumo de ar, oxigênio e energia elétrica, constituem-se em fontes potenciais de contaminação cruzada.

### 1.3. Desenvolvimento histórico da tecnologia do vácuo

Os primeiros estudos do que chamamos de tecnologia do vácuo tiveram início no século I d.C., quando as primeiras bombas de vácuo capazes de atingir pequenas rarefações foram desenvolvidas, como por exemplo, as seringas de Heron e as bombas de água de Ctesibius. Segundo Stempiniak (2002), foi somente no século XVII com o uso mais intenso da experiência como auxiliar do raciocínio científico que dois problemas começaram a ser devidamente equacionados: a natureza do ar e a possibilidade de produzir ambientes com uma pequena quantidade de ar.

Para Longuini e Nardi (2002), as origens históricas sobre o conceito de pressão atmosférica, de maneira geral, estão intimamente ligadas ao estudo de hidráulica e do comportamento dos fluídos.

O desenvolvimento dos principais elementos da estática dos fluidos data da época dos gregos. Atribui-se, por exemplo a Ctesibius, no século III a.C., vários inventos, como órgãos hidráulicos e bombas aspirantes. Porém, anteriormente, no século IV a.C., Aristóteles já pensava em conceitos como o de vazio. Para ele, não se podia conceber na natureza um espaço vazio, ou seja, a natureza tem horror ao vácuo. Nesta época, as opiniões sobre a existência ou não do vazio estavam bastante divididas.

Platão (428 a.C -347 a.C), por exemplo, aceitava a possibilidade de um vazio artificial porém, só existiria na natureza, entre os pequeníssimos espaços das últimas partículas dos corpos. Considerava-se que, como não haveria vazio além da atmosfera, os espaços celestes estariam ocupados pelo “éter”, ou seja, uma espécie de ar mais rarefeito.

Sextus Empiricus, ao contrário de Aristóteles, defendia a existência do vácuo para que pudesse haver movimento. Apesar de toda a capacidade argumentativa de Aristóteles, outros filósofos continuaram a defender a existência do vazio. Um deles foi Lucrécio, que até mesmo apontou um modo de medi-lo, segundo o qual se dois corpos achatados e grandes estão em contato e são bruscamente separados, será impossível que o ar penetre instantaneamente até o ponto central das placas, portanto haverá pelo menos durante algum momento, um vácuo entre as placas. No entanto pesquisas sobre vácuo, podemos afirmar que tiveram início somente no século XVII, quando Galileu Galilei (1564-1642) observou que, qualquer que fosse o diâmetro do encanamento usado, uma bomba hidráulica, só conseguia elevar a água até 10 metros de altura. Em 1643, Evangelista Torricelli (1608-1647), que havia sido discípulo de Galileu descobre que a atmosfera, ao nível do mar, produz uma pressão equivalente à força exercida por uma coluna de 760 mm de altura de mercúrio. Na opinião de Torricelli, o espaço acima do mercúrio estaria em vazio absoluto, o que ficou conhecido como o vácuo de Torricelli. Hoje sabemos que o vácuo de Torricelli contém vapor de mercúrio, que apresenta pressão de vapor de  $10^{-3}$  mbar a  $18^{\circ}\text{C}$ . Destas experiências surgiram duas unidades equivalentes de medida de vácuo, que são empregadas até hoje, denominadas Torr, de Torricelli, e mmHg, proveniente de milímetros de mercúrio, conforme ilustra a Tabela 1.2.



Tabela 1.2 – Fatores de conversão para unidades de pressão, onde no Sistema Internacional de Unidades as unidades comumente utilizadas são o Pa e kPa.

	<b>1 Pa</b>	<b>1 kPa</b>	<b>1 mbar</b>	<b>1 atm</b>	<b>1 torr</b>	<b>1 mmHg</b>
<b>1 Pa</b>	1	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$0,987 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
<b>1 kPa</b>	$10^3$	1	10	$0,987 \cdot 10^{-3}$	7,5	7,5
<b>1 mbar</b>	$10^2$	$10^{-1}$	1	$0,987 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$
<b>1 atm</b>	$1,013 \cdot 10^5$	$1,013 \cdot 10^2$	$1,013 \cdot 10^3$	1	$7,6 \cdot 10^2$	$7,6 \cdot 10^2$
<b>1 torr</b>	$1,333 \cdot 10^2$	$1,333 \cdot 10^{-1}$	1,333	$1,316 \cdot 10^{-3}$	1	1
<b>1 mmHg</b>	$1,333 \cdot 10^2$	$1,333 \cdot 10^{-1}$	1,333	$1,316 \cdot 10^{-3}$	1	1

Fonte: Trivelin e Bendassolli (2003).

Pascal e Perier, em 1648, mostraram que a pressão atmosférica varia com a altura. Este experimento mostrou, por sua vez, que a coluna de Torricelli podia ser utilizada como medidor de vácuo, o que ocorreu durante muito tempo, tendo este método de medida de pressão sobrevivido até hoje. De acordo com Gama (2002), a utilização do sistema Torricelliano também constituiu a primeira bomba de vácuo, de um único movimento, e foi aperfeiçoada mais tarde, resultando na chamada bomba de Sprengel. É interessante percebermos que a experiência de Torricelli, com o seu barômetro foi uma das primeiras técnicas para produzir vácuo artificialmente. Nesse sentido vale destacar as experiências feitas muito antes de Torricelli, por Heron, em Alexandria, no século III a.C, quando, ao aquecer água em um recipiente, e, fechando-o, em seguida, produziu pressões inferiores à pressão atmosférica.

Atualmente este tipo de tecnologia do vácuo é utilizada para vedar embalagens de produtos como requeijão e molho de tomate, através da diferença de pressão criada entre o meio interno e externo das embalagens feitas de materiais rígidos. Gama relata que outro marco importante da tecnologia do vácuo foi o experimento realizado em 1640 por Otto Von Guericke na Alexandria, que levou ao desenvolvimento da primeira bomba mecânica de vácuo. Seus primeiros experimentos usaram uma bomba de água adaptada para esvaziar um barril contendo água. Dada a dificuldade desta tarefa, Von Guericke modificou a bomba para a retirada de ar do barril, mas a impossibilidade de vedação levou-o a utilizar hemisférios de cobre selados com tiras de couro, molhadas com uma mistura de cera de terebentina. Com isso, Von Guericke demonstrou a possibilidade de usar vácuo para exercer grandes forças, como espetacularmente demonstrado pelo seu famoso experimento dos hemisférios de Magdeburgo, em 1654, em que duas parselhas de oito cavalos não foram capazes de separar dois hemisférios de diâmetro de 119cm. Assim, Von Guericke aprimorou a

bomba mecânica de vácuo, otimizando a sua vedação, melhorando a válvula de saída, cujo esquema ainda hoje é utilizado, substituindo água por óleo, e diminuindo o espaço morto no corpo da bomba. Segundo Gama (2002) desenvolvimentos posteriores seguiram a trajetória de aperfeiçoar o esquema de Von Guericke, que se estendeu até o final do século XIX, seguido de um retorno ao conceito Torritelliano de bombas de pistão líquido de mercúrio, seguido do aparecimento das bombas mecânicas rotativas e de adaptações de bombas de jato de vapor, turbo moleculares e finalmente bombas baseadas em ionização, combinação química, adsorção e absorção criogênica. Atualmente existe um grande enfoque em modelagem matemática de sistemas de alto-vácuo e ultra alto-vácuo empregando o método de Monte Carlo. Por outro lado, quando consideramos a análise de sistemas de pré-vácuo, os programas computacionais da mecânica dos fluidos tem sido bastante utilizados, principalmente a fluidodinâmica computacional. No Brasil, dignos de nota são os estudos de fenômenos de transporte no escoamento de misturas de gases rarefeitos realizados por Sharipov e Kalempa (2005), solução de problemas de fenômenos de transporte pelo método de Monte Carlo, desenvolvidos por Kaviski e Cumin (2006) e as contribuições para análise, cálculo e modelagens de sistemas de vácuo feitas por Degasperi (2006).

#### **1.4. Objetivos da dissertação**

Sistemas de pré-vácuo empregados em diversas aplicações, muitas vezes, apresentam tubulações que restringem o escoamento de gases e vapores, ausência de filtros de proteção contra gases e vapores agressivos e falta de observação em relação aos critérios ambientais e as normas de segurança. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo fornecer informações gerais para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo que viabilizem a definição e elaboração do escopo de projeto, contemplando boas práticas de fabricação, normas ambientais e de segurança, preocupações com a conservação de energia, assim como a instrumentação necessária para a medição e o controle da pressão na câmara de vácuo. Em razão de não haver publicações que tratem de uma proposta sobre gestão de projetos de sistemas de pré-vácuo, este será o principal objetivo e contribuição desta dissertação.

## Capítulo 2

### Desenvolvimento de sistemas de pré-vácuo

Neste capítulo apresentamos os detalhes relevantes para o desenvolvimento de sistemas de pré-vácuo, considerando o conjunto de componentes para gerar, medir e manter as pressões de trabalho entre  $10^3$  e  $10^{-3}$  mbar.

#### 2.1. Introdução

Desenvolvimento refere-se à descrição dos detalhes relevantes para o projeto, construção, montagem e operação de sistemas de pré-vácuo de interesse atual, tendo em vista que eles devem operar com pressões entre  $10^3$  e  $10^{-3}$  mbar. Gama (2002) define um sistema de pré-vácuo como sendo um conjunto de componentes utilizados para obter, medir e manter o vácuo em um dispositivo ou câmara.

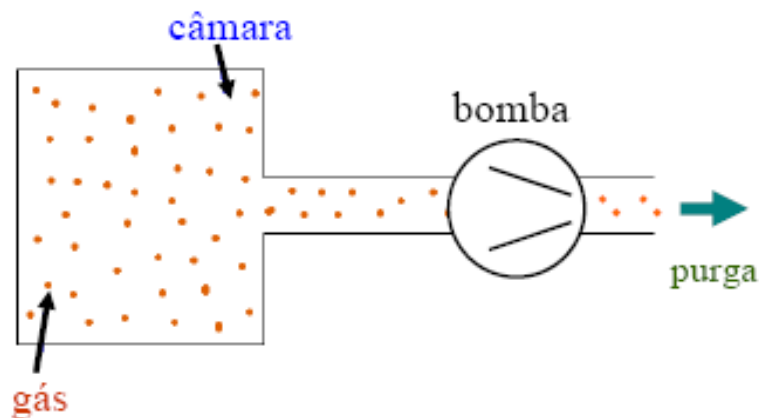


Figura 2.1 - Representação simplificada de um sistema de pré-vácuo.  
Fonte: Kaschny (2008).

De acordo com a Figura 2.1, um sistema de pré-vácuo consiste de uma câmara de vácuo, de uma ou mais bombas de vácuo, de medidores de vácuo e de tubos conectando-os.

O sistema também deverá conter válvulas, armadilhas, selos diversos, passantes elétricos e mecânicos e outros elementos. Moutinho et al (1980), faz uma distinção entre sistemas de pré-vácuo estáticos e dinâmicos. Nos sistemas estáticos os gases são bombeados de uma câmara e em seguida fechados de modo a manter o vácuo, e, portanto, não devem apresentar fugas nem grande degaseificação.

Nos sistema dinâmicos os gases são bombeados continuamente de uma câmara de modo a manter uma determinada pressão constante. A seguir serão descritos os principais itens necessários ao desenvolvimento de sistemas de pré-vácuo.

## 2.2. Câmaras de vácuo

De acordo com a Norma Regulamentadora 13 da Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NR 13 da ABNT”, as câmaras de vácuo são consideradas vasos de pressão, isto é, equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa. Os vasos de pressão podem conter líquidos, gases ou misturas destes. Algumas aplicações dos vasos de pressão incluem: armazenamento final ou intermediário, troca de calor, contenção de reações, filtração, destilação, separação de fluidos e criogenia. Os vasos de pressão estão sempre submetidos simultaneamente à pressão interna e externa. Assim, para Dutra (2001), o vaso de pressão deverá ser dimensionado considerando-se a pressão diferencial resultante atuando sobre as paredes, que poderá ser maior internamente ou externamente. Há casos em que o vaso de pressão deve ser dimensionado pela condição de pressão mais severa, a exemplo de quando não exista atuação simultânea das pressões interna e externa. A Figura 2.2. apresenta exemplos de geometrias de câmaras de vácuo, tais como esférica, cilíndrica, retangular e quadrada e a Figura 2.3. vasos de pressão que obedecem aos critérios de segurança recomendados pela norma NR 13.



Figura 2.2 - Exemplos de geometrias de câmaras de vácuo. Fonte: Nu Vacuum Systems, Inc (2008), disponível em: <http://www.nuvacuum.com/indexold.html> , acessado em 22/12/2008.



Figura 2.3 - Vasos de pressão que obedecem a critérios de segurança conforme NR 13 da ABNT. À esquerda vaso de pressão com placa de identificação contendo ano de fabricação, fabricante, pressão máxima de trabalho admissível, temperatura máxima e mínima de operação, código do projeto e ano de edição. À direita vaso de pressão, com proteção feita de tela metálica perfurada, contra colapso, implosão ou explosão. Fonte: <http://www.buchiglas.ch/english/products/stirredautoclaves/inertclaves.cfm>, acesso em 24/12/2008.

Pelo menos 5 fatores devem ser levados em consideração em relação ao desenvolvimento de câmaras de pré-vácuo: (i) resistência mecânica dos materiais utilizados; (ii) faixas de temperatura de processo; (iii) composição e propriedades físico-químicas dos gases residuais; (iv) faixa de vácuo desejada; (v) tempo em que o vácuo deverá ser mantido na câmara para o cumprimento da sua função.

Com relação à resistência mecânica dos materiais, Hablanian (1990), esclarece que as câmaras de vácuo não são totalmente seguras, pois apresentam potencial para desencadear implosões, especialmente aquelas feitas a partir de materiais transparentes como vidro ou acrílico, que podem projetar fragmentos de materiais em todas as direções.

O segundo ponto envolve as temperaturas nas quais as câmaras de vácuo estarão sujeitas durante o bombeamento de gases e vapores. As variações de temperatura sobre os materiais de construção da câmara de vácuo, podem desencadear dilatações, tensões, fissuras, degaseificação e outros problemas que normalmente comprometerão a qualidade e a duração do vácuo desejado, conforme ilustrado na Figura 2.4.

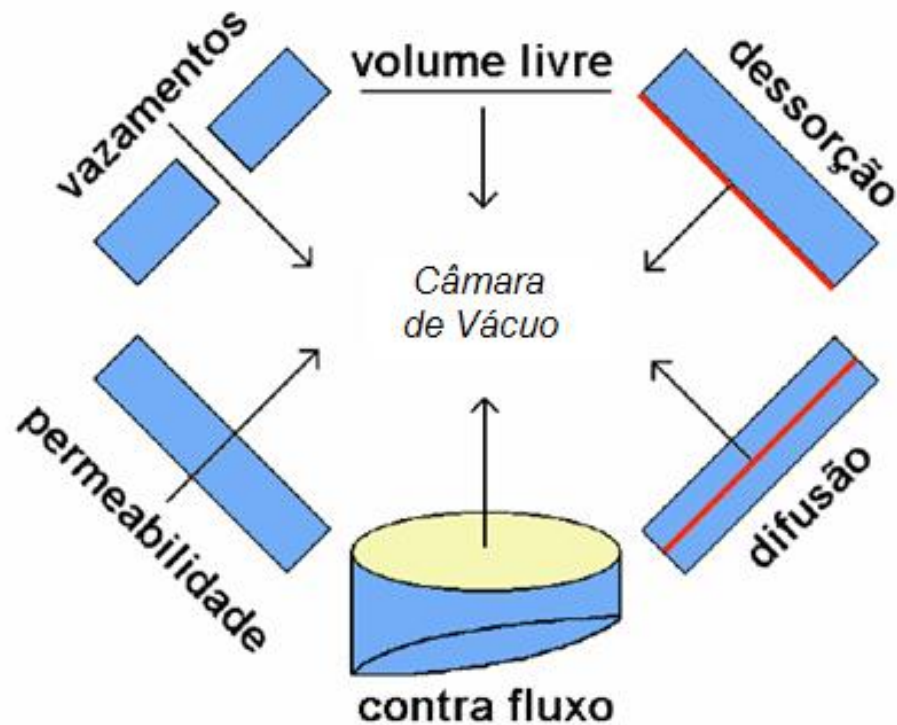


Figura 2.4 – Principais fontes de liberação de gases que podem comprometer a qualidade e a duração do vácuo desejado. Fonte: Kaschny (2008).

Levando em conta a composição e características físico-químicas dos gases residuais, Hablanian recomenda que devemos projetar a câmara de vácuo tendo em vista a minimização dos principais fenômenos de liberação de gases tais como permeação, difusão, contra fluxo, dessorção e vazamentos, que podem comprometer a qualidade e a duração do vácuo desejado para realizar uma determinada função. Finalizando, Hauviller (2004), sugere que a câmara de vácuo deve apresentar baixo custo de produção e manutenção, ser robusta, de fácil manutenção e projetada para uso multifuncional. Manzini e Vezzoli (2005) explicam que, se um único produto absorve em si os mesmos serviços que vários produtos oferecem, ele será comparado, em termos de qualidade de material, ao conjunto de todos esses outros.

### 2.3. Tubulações

Segundo Gama (2002), um dos aspectos importantes do fluxo de gases é que sua natureza pode variar consideravelmente dependendo da pressão e da geometria da câmara de vácuo ou da tubulação em que o mesmo está se movendo. Normalmente, o escoamento dos gases é provocado por um gradiente na pressão ou temperatura. Mesmo um pequeno gradiente na pressão faz com que o gás flua da região de alta para

a de baixa pressão. Para Kaschny (2008), o fluxo volumétrico de um sistema de bombeamento é reduzido pelas conexões e a tubulação que ligam as bombas a câmara de vácuo. De um modo geral, quanto mais longa a tubulação e quanto menor o seu diâmetro maior serão as perdas, ou seja, menor será a eficiência da bomba em evacuar a câmara. As normas regulamentadoras NR 26 e NR 54 da ABNT tratam da sinalização de segurança em tubulações. A NR 26 tem por objetivo estabelecer as cores que devem ser usadas nos locais de trabalho para a prevenção de acidentes, identificando os equipamentos de segurança, delimitando áreas, identificando tubulações empregadas nas indústrias para a condução de líquidos e gases e advertindo contra riscos. A norma estabelece que tubulações para condução de líquidos e gases, deverão receber a aplicação de cores, em toda sua extensão, a fim de facilitar a identificação do produto transportado por ela e evitar acidentes.

Conforme indica a Tabela 2.1, a cor cinza claro deverá ser utilizada para identificar tubulações sob vácuo, enquanto o cinza escuro deverá ser empregado em eletrodutos e amarelo para gases não liquefeitos.

Tabela 2.1 – Cores para identificar tubulações industriais, conforme NB 54 R da ABNT

Inflamáveis e Combustíveis de Alta Viscosidade	Preto
Inflamáveis e Combustíveis de Baixa Viscosidade	Alumínio
Produtos intermediários ou Pesados	Creme
Gases não liquefeitos	Amarelo
Vácuo	Cinza Claro
Eletrodutos	Cinza Escuro
Álcalis — Lixívias	Lilás
Ácido	Laranja
Água - Potável	Verde
Vapor Saturado — Materiais destinados a combate a incêndios	Vermelho
Produtos sob pressão - Ar comprimido	Azul
Vapor	Branco
Vapor Superaquecido	Vermelho - Branco - Vermelho
Gasolina	Marrom - Vermelho - Marrom
Cor para os demais fluidos - Óleo	Marrom

Fonte: [www.areaseg.com/segpedia/coresdostubos.html](http://www.areaseg.com/segpedia/coresdostubos.html) , acesso em 22/12/2008.

A NR 26 da ABNT também estabelece que a utilização de cores não dispensa o emprego de outras formas de prevenção de acidentes. A indicação de cor, sempre que necessária, especialmente quando em área de trânsito para pessoas estranhas ao trabalho, será acompanhada dos sinais convencionais ou da identificação por palavras.

## 2.4. Bombas de pré-vácuo

Segundo Gama (2002), as bombas de vácuo são equipamentos utilizados para reduzir a densidade molecular e, portanto, a pressão, favorecendo a transferência da massa de gases e vapores de um recipiente para o ambiente exterior. Trivelin e Bendassolli (2006) apontam que não existe uma bomba de vácuo capaz de bombear todo o gás existente em uma câmara de vácuo ou recipiente. Por mais eficientes que sejam as bombas de vácuo, as juntas e as soldas, sempre ocorrerá um pequeno vazamento e a pressão atingirá um valor limite que não poderá ser ultrapassado. Para remover os gases e vapores de um recipiente as bombas de vácuo podem operar transferindo ou aprisionando estas substâncias. As bombas de aprisionamento retiram as moléculas do recipiente prendendo-as em algum meio líquido ou sólido através de processos físico-químicos. As bombas de transferência transportam o gás da câmara de vácuo para atmosfera ou para recipientes ou para outras bombas que operam com pressões ainda menores. A Figura 2.5. ilustra a faixa de pressão de operação das principais bombas de vácuo.

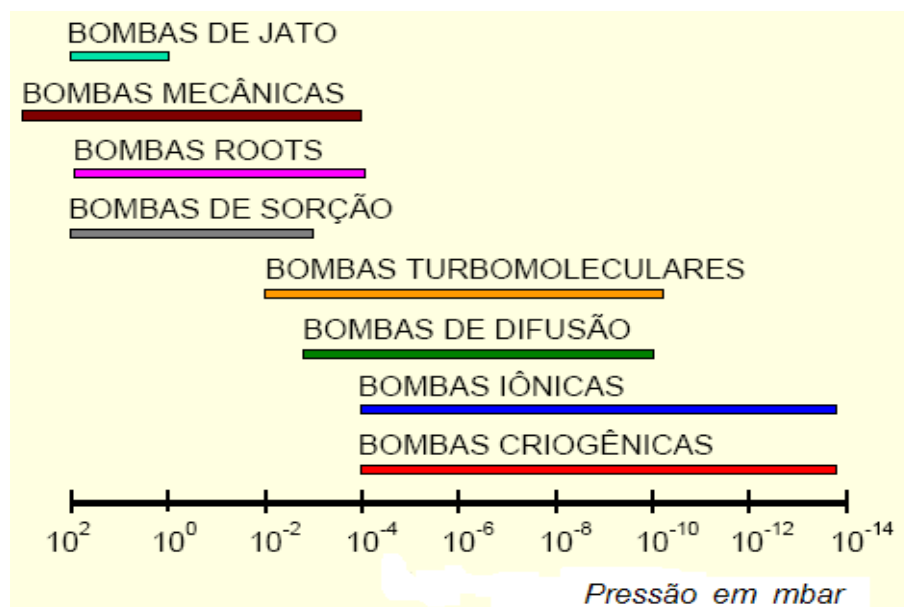


Figura 2.5 - Faixa de pressão de operação das bombas de vácuo. Fonte: Laboratório de filmes finos MET. Disponível em: <http://www.cbpf.br/~emecbpf/vacuomet.CLuiz.pdf>, acesso em 10/12/2008

As bombas de vácuo de compressão, também chamadas de rotatórias, mecânicas ou de pré-vácuo, são equipamentos que operam no regime de fluxo viscoso, onde é possível estabelecer o escoamento dos gases da câmara de vácuo para o ambiente via gradiente de pressão, sendo eficientes até  $10^{-4}$  mbar. Exemplos típicos desta categoria de bombas de vácuo são as rotatórias de palheta, rotatórias de



pistão, tipo roots e as bombas de membrana. Nas bombas de membranas o princípio é bastante similar ao das bombas de pistão, sendo este substituído por uma membrana de borracha, algo similar a uma seringa hipodérmica. Tais bombas apresentam fácil manutenção, porém com muita frequência. Segundo Gama (2002), as bombas rotativas de palhetas consistem de um corpo cilíndrico (estator) e o rotor montado no centro do estator. Fundamentalmente são compressores que bombeiam os gases de um recipiente ou câmara lançando-os na atmosfera. A vedação é feita com óleo que também serve como lubrificante dos componentes móveis da bomba. Os óleos utilizados nas bombas rotativas de palhetas devem apresentar pressão de vapor bastante baixa. As Figuras 2.6. e 2.7. apresentam as diferentes partes e o princípio de funcionamento da bomba rotativa de palhetas.

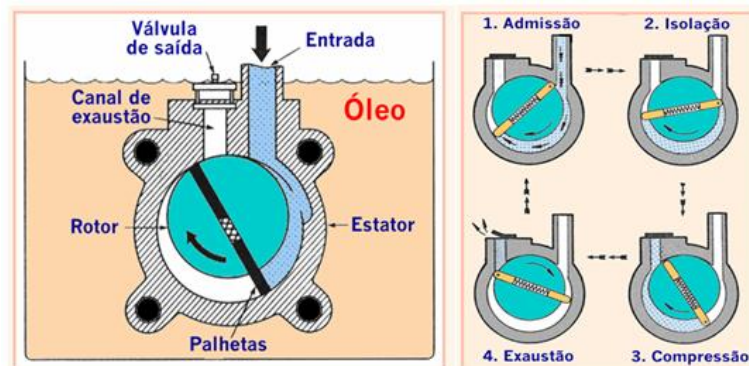


Figura 2.6 – Representação das diferentes partes e diferentes fases de operação de uma bomba rotativa de palhetas.(1) admissão de gases, (2) isolamento, (3) compressão dos gases e vapores, (4) exaustão dos gases para a atmosfera. As bombas de pistão operam segundo princípio similar. Fonte: Degasperi (2006).

As bombas rotativas de palhetas podem ser de um ou dois estágios. Segundo Trivelin e Bendassolli (2006), as bombas de um estágio atingem pressão limite de  $10^{-2}$  mbar e de dois estágios até  $10^{-4}$  mbar.



Figura 2.7 – Exemplos de bombas de pré-vácuo: (a) de palhetas rotativas; (b) de membranas; (c) de pistão oscilante de um estágio; (d) de pistão oscilante de dois estágios. Fonte: physika.info/physika/documents/**Vacu4.pdf**, acesso em 02/01/2009.

Currington e Watson (2005) trazem as seguintes recomendações de segurança durante a operação de bombas de vácuo do tipo palhetas rotativas:

- Não utilizar a bomba de vácuo para bombear substâncias perigosas
- Se a bomba ficar instalada no interior de um recinto fechado, Certificar-se de que há ventilação adequada junto de ambas as extremidades da bomba, de modo que a temperatura ambiente em torno do equipamento não exceda 40°C. Deve haver um espaço de, no mínimo, 25 mm entre a bomba e as paredes do recinto.
- Não utilizar uma bomba preparada para óleo hidrocarbonado em processos com oxigênio em concentrações a 25% em volume, devido ao risco de incêndio ou explosão no cárter de óleo da bomba.
- Não expor qualquer parte do seu corpo ao vácuo visando evitar ferimentos ou acidentes.
- Certificar-se de que o sistema de escape de gases da bomba de vácuo não esteja obstruído.
- Certificar-se de que a instalação elétrica da bomba de vácuo está de acordo com os requisitos de segurança locais. A bomba deve ser ligada a uma alimentação elétrica com fusível e proteção e um ponto de aterramento adequado.
- Conectar a saída de gases da bomba de vácuo a um equipamento de tratamento adequado para impedir a descarga de gases e vapores perigosos na atmosfera. Utilizar um sistema de coleta ou absorção de vapores para impedir a drenagem de condensado contaminado de volta à bomba.
- Verificar o sentido de rotação da bomba de vácuo. Observar a ventoinha de arrefecimento do motor através da cobertura na extremidade do motor. Ligar a alimentação elétrica por alguns segundos. Verificar se a ventoinha de arrefecimento do motor gira no sentido indicado pela seta na extremidade do depósito de óleo. Se o sentido de rotação estiver incorreto, desligar imediatamente a alimentação do motor e trocar os condutores vermelho e preto próximos a caixa do motor.
- Controlar o lastro de gás para mudar a quantidade de ar ou gás inerte alimentado para a bomba de vácuo. A utilização do lastro de gás impedirá a condensação de vapores dentro da bomba, evitando a contaminação do óleo no reservatório.
- Abrir o controle do lastro de gás quando for constatada uma proporção elevada de vapores condensáveis nos gases de processo empregando o seguinte procedimento: fechar a válvula de isolamento do sistema de vácuo; abrir o controle do lastro de gás até a posição totalmente aberta e operar a bomba aberta por 30 minutos para aquecer o óleo; isto ajudará a impedir condensação de vapor na bomba. Abrir a válvula de

isolamento do sistema de vácuo e continuar a operar a bomba com o controle do lastro de gás aberto.

- Utilizar o controle de lastro de gás fechado quando for necessário alcançar vácuo máximo ou para bombear gases secos. Utilizar o controle do lastro de gás aberto para bombear altas concentrações de vapor condensável ou para descontaminar o óleo da bomba. É importante salientar que quando a bomba de vácuo opera com o controle de lastro de gás aberto, há um aumento da perda de óleo da bomba.
- Observar o aspecto físico do óleo no visor do reservatório da bomba de vácuo. Se ele estiver turvo ou com a cor alterada, fechar a válvula de isolamento do sistema de vácuo e deixar o controle de lastro de gás totalmente aberto. Operar a bomba até que óleo fique totalmente transparente, substituindo-o caso isto não acontecer.
- Observar a sinalização de segurança presente nas diferentes partes da bomba de vácuo, principalmente nos locais onde existe risco de choque elétrico, nas superfícies quentes e nas partes que podem resultar em lesões ou danos físicos às pessoas.
- Atender ao cronograma de manutenção da bomba de vácuo conforme orientações presentes em seu manual de operação. Verificar mensalmente o nível de óleo; substituir o óleo após 3000 horas de funcionamento da bomba de vácuo; anualmente inspecionar e limpar o filtro de admissão de gases, o visor de nível do óleo, o controle do lastro de gás e a tampa e caixa do ventilador do motor; realizar montagem de palhetas novas a cada 30000 horas de funcionamento; limpar e recondicionar a bomba de vácuo e realizar ensaio do estado do motor após 15000 horas de funcionamento.
- Verificar se é necessária uma manutenção mais freqüente, principalmente se a bomba for utilizada para bombear gases e vapores corrosivos ou abrasivos, tais como solventes, substâncias orgânicas e ácidos.

A bomba Roots é utilizada em sistemas de pré-vácuo onde uma grande quantidade de gases precisa ser bombeada em pouco tempo. Sua faixa de trabalho, até  $10^{-5}$  mbar, é justamente aquela onde outros tipos de bombas são menos eficientes em termos de velocidade de bombeamento. Segundo Gama (2002) sua maneira de operar é semelhante à bomba mecânica de palhetas com uma diferença importante: os dois rotores em forma de oito não tocam o estator, pois existe uma folga da ordem de 0,1 mm entre eles e o estator. Por este motivo, a bomba Roots não precisa de óleo lubrificante para funcionar, exceto na caixa de engrenagens, portanto, não ocorre

contaminação do sistema de vácuo. As Figuras 2.8. e 2.9. apresentam a representação de uma bomba Roots, incluindo seus rotores, flanges de entrada e saída de gases, além de câmara interna onde os gases são aprisionados.

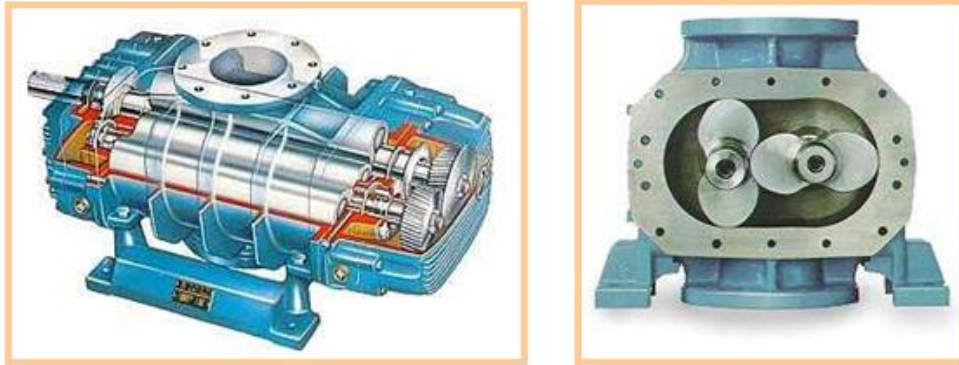


Figura 2.8 – Representação de uma bomba de vácuo tipo Roots e a direita vista frontal dos rotores em forma de oito. Fonte: Degasper (2006).

Os gases e vapores a serem bombeados entram na bomba pela flange de entrada. À medida que os rotores giram, os gases ocupam a área entre os rotores e a parede do estator até serem aprisionados. Segundo o seu movimento, os rotores expulsam os gases pela flange de saída, normalmente conectada a uma bomba mecânica. Os rotores girando em alta rotação, em muitos casos 3000 rpm, não permitem que os gases voltem através da folga existente entre eles e o estator. Isto, contudo, deixa de ser válido para pressões muito baixas, daí o limite de  $10^{-5}$  mbar para estas bombas.

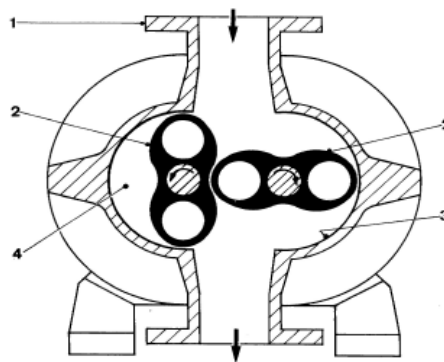


Figura 2.9 - Representação dos componentes de um bomba Roots: (1) flange de entrada de gases; (2) rotores em forma de oito; (3) região onde os gases são varridos para a flange de saída (4) câmara interna onde os gases são aprisionados. Fonte: Gama (2002).

Estas bombas são empregadas em uma ampla variedade de aplicações que determinarão as características particulares para cada caso. Atualmente existem no mercado bombas Roots com velocidades de bombeamento desde 125 até 100.000  $m^3/h$ , operando em diferentes faixas de pressão, incluindo sistemas onde a saída da

bomba Roots é ligada em série com uma bomba rotativa de palhetas, conforme exemplo apresentado na Figura 2.10.



Figura 2.10. – Sistema de bombeamento combinando bomba mecânica de palhetas de duplo estágio e bomba Roots, que permite pressão final  $10^{-3}$  mbar e velocidade de bombeamento  $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Fonte: [www.buschdoBrasil.com.br/roots.htm](http://www.buschdoBrasil.com.br/roots.htm), acesso em 02/01/2009.

Trivelin e Bendassolli (2006) explicam que as bombas de vapor ou ejetores de vapor são muito utilizados em instalações industriais sempre que necessitamos bombear gases e vapores muito sujos ou grandes quantidades de vapores. Normalmente os ejetores de vapor trabalham na mesma zona de pressão que as bombas rotativas de palhetas de um estágio. A razão de compressão de um ejetor é da ordem de 7 para 1. Utilizando vários andares de ejetores (quatro é típico), podemos atingir pressões da ordem de  $10^{-2}$  mbar, e velocidades de bombeamento muito elevadas, podendo ir até 45.000 litros por segundo. Nos ejetores de vapor, o gás a ser bombeado é arrastado por um jato de vapor, em geral vapor de água, dando-se uma transferência de momento linear entre a corrente de vapor e o gás. O vapor de água, à pressão e temperatura adequadas, expande-se no ejetor divergente, produzindo uma diminuição de pressão, à entrada da câmara de vácuo. Grande parte da energia térmica de agitação molecular é convertida em energia cinética de translação. O jato de vapor, a alta velocidade, arrasta os gases que estejam na câmara de mistura para a parte convergente do difusor, por efeito de uma transferência de momento linear. Como as moléculas do jato têm uma pequena energia térmica, a temperatura é baixa e a pressão devida aos vapores é a correspondente à pressão de vapor da água a esta temperatura. A mistura vapor-gás entra no difusor convergente divergente, onde diminui de velocidade e se expande até a pressão de descarga. Esta pressão, que depende da

pressão inicial do vapor e do desenho do ejetor, tem de ser suficiente para equilibrar a pressão atmosférica. Caso contrário, não se manterá o jato no difusor e o gás entra novamente no sistema.

A Figura 2.11 apresenta o esquema e a Figura 2.12 o protótipo de um sistema de vácuo híbrido composto por ejetor de vapor, condensador casco/tubo intermediário e bombas de anel líquido com circuito fechado de líquido de selagem. Os sistemas de vácuo híbridos atendem aos segmentos químicos, petroquímicos, farmacêuticos, siderúrgicos e alimentícios.

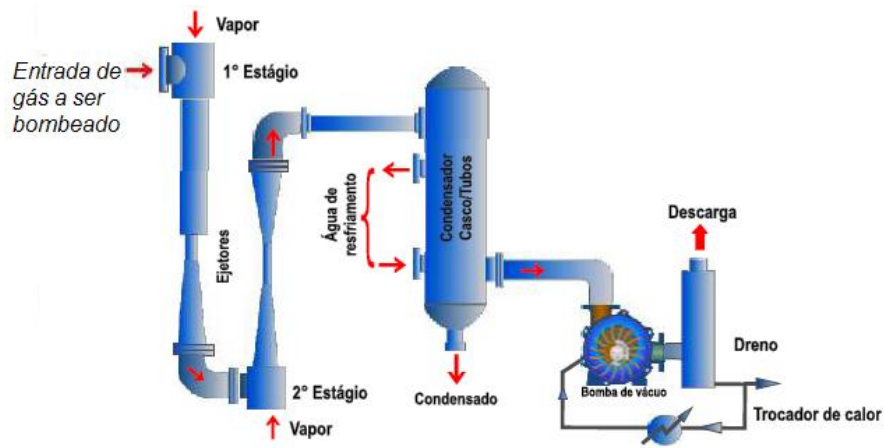


Figura 2.11- Esquema de um sistema de pré-vácuo híbrido composto por ejetor de vapor, condensador casco/tubo intermediário e bomba de anel líquido com circuito fechado de líquido de selagem. Fonte: <http://www.gardnerdenvernash.com.br/pdf/ejetor.pdf> acesso em 02/01/2009.

O sistema de vácuo híbrido apresentado na figura 2.11. proporciona vácuo da ordem de 2 mbar e alta velocidade de bombeamento.



Figura 2.12. Protótipo de um sistema de pré-vácuo híbrido, formado por ejetor de vapor, condensador casco/tubo intermediário e bomba de anel líquido com circuito fechado de líquido de selagem. Fonte: <http://www.gardnerdenvernash.com.br/pdf/ejetor.pdf> acesso em 02/01/2009.

## **2.5. Estratégia de controle do processo**

A Estratégia de controle define a filosofia básica de controle, conseqüentemente, a interligação entre os instrumentos e os equipamentos do sistema de pré-vácuo que viabilizam a estratégia de controle adotada. Os instrumentos e as estratégias de controle devem ser documentados nos diversos estágios de um projeto de engenharia.

## **2.6. Instrumentação e malha de controle do processo**

Valdman et al (2008) definem instrumentação como a ciência que desenvolve e aplica técnicas de medição, indicação, registro e controle das variáveis físicas presentes em processos industriais visando à otimização dos mesmos. A instrumentação indica o conjunto de instrumentos e dispositivos caracterizados por seus aspectos estáticos e dinâmicos, usados para medição e controle contínuos das variáveis de operação dos sistemas de pré-vácuo.

Malha de controle é o conjunto de instrumentos que representa a implementação prática de uma estratégia de controle e é identificada pelos elementos componentes do circuito de atuação da informação e das variáveis e sinais envolvidos de acordo com a estratégia implementada.

Os diversos componentes de uma malha dever ser representados em um diagrama que indica as ligações físicas entre eles (pneumáticas, elétricas e digitais). Estes documentos, chamados diagramas de malha, são essenciais para o entendimento das funções de cada elemento da malha. As malhas mais complexas podem ser descritas em diagramas de controle que são diagramas mais abstratos em que os detalhes de interligação são omitidos.

Diversos outros documentos de engenharia são gerados em um projeto de instrumentação: as folhas de dados e especificações técnicas, por exemplo, definem os requisitos e características de cada instrumentos; diagramas de interligação e plantas de instrumentação, entre outros, fornecem informações que permitem a montagem eficiente dos sistemas de pré-vácuo e dos seus componentes.

## 2.7. Componentes auxiliares

Os componentes auxiliares dos sistemas de pré-vácuo, apesar de serem qualificados de auxiliares, desempenham papel importante na tecnologia do vácuo. A denominação auxiliar de forma alguma deve ser entendida como sendo de menor valor. Conforme exemplos apresentados na Figura 2.13., componentes auxiliares são aqueles que não são diretamente responsáveis pela produção de vácuo. Significa que são componentes do sistema de vácuo que auxiliam o acesso ao sistema de pré-vácuo, introduzindo válvulas, passadores de tensão e corrente, além de fluidos refrigerantes. Tubos, conexões, flanges, vedações, filtros e uma série de outros dispositivos e peças que tornam o sistema de pré-vácuo mais acessível, seguro e confiável podem ser considerados componentes auxiliares. Segundo Degasperri (2006), são peças que trazem uma melhoria na qualidade do acesso ao sistema de vácuo construído, além de permitirem a união de várias partes que compõem o sistema de pré-vácuo.



Figura 2.13 – Exemplos de componentes auxiliares utilizados em sistemas de pré-vácuo, entre outros: foles metálicos, anéis de vedação, cotovelos, válvula manual, flanges e braçadeiras. Fonte: Degasperri (2006).

É importante que a escolha dos componentes auxiliares atendam os mesmos requisitos de qualidade e custo das partes principais do sistema de pré-vácuo. Componentes auxiliares de qualidade inferior podem comprometer o desempenho do sistema de pré-vácuo. No capítulo 6 serão fornecidos detalhes sobre a montagem dos componentes auxiliares.



## Capítulo 3

### Projeto de Sistemas de Pré-Vácuo

O presente capítulo apresenta o conceito de projeto sob a perspectiva da engenharia de processos, considerando os principais elementos utilizados em sua sistematização. Sugere tópicos relevantes a serem considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo, principalmente a especificação das condutâncias, a integração energética através da rede de trocadores de calor e a implementação de um sistema supervisor para determinados processos industriais de bombeamento de gases e vapores.

#### 3.1. Introdução

Projeto é uma palavra derivada do latim “*Projectus*”, que significa descrever o que se tem a intenção de fazer, também faz referência a desenho, esboço, plano, estudo ou pesquisa. Para Perlingeiro (2005), projeto refere-se a um problema complexo de otimização constituído de três variáveis interdependentes: otimização tecnológica, otimização estrutural e otimização paramétrica. O projeto também é considerado como um problema, com enunciado bem definido, dotado de um conjunto crescente de métodos sistemáticos de resolução. Uma vez sistematizado, o projeto tornou-se plausível de ser ensinado, disseminado e reproduzido. A grande contribuição da engenharia de processos veio a ser a sistematização do projeto. A engenharia de processos revolucionou a prática do projeto, tornando possível aprimorar os processos a partir da sua própria concepção estrutural e não mais apenas pelo aprimoramento dos equipamentos, além de propiciar uma visão integrada de processos, acrescentando-lhes a dimensão de sistema. Sistemas são criados a cada momento para a execução de tarefas novas ou para a realização mais eficiente de tarefas já conhecidas. A elaboração de um sistema compreende um número considerável de operações que, no seu conjunto, recebem o nome projeto. Perlingeiro (2005) sugere que sistema é a denominação genérica de dispositivos ou instalações que apresentam as seguintes características:

- (a) são um conjunto de elementos interdependentes;
- (b) cada elemento é capaz de executar uma ação específica;
- (c) têm como finalidade a execução de uma ação complexa, que só pode ser executada mediante a conjugação dos seus elementos

Um sistema pode exibir uma estrutura complexa formada por uma combinação de estruturas elementares. Perlingeiro esclarece que, quanto mais complexa for a estrutura, mais difíceis são o projeto, a análise e a operação do sistema. Na engenharia

de processos, a estrutura é representada pelo fluxograma do processo, que esboça a definição dos equipamentos e a seqüência para produzir aquilo para o qual foi projetado. Sistemas são formados por elementos e conexões, concretos ou abstratos. A estrutura de um sistema é definida pela forma como os seus elementos são interligados. Os sistemas podem exibir estruturas das mais simples às mais complexas. A estrutura mais simples é a acíclica, em que cada elemento influencia apenas os seus subseqüentes. Estruturas um pouco mais complexas podem exibir pontos de bifurcação e de convergência. Uma estrutura mais complexa é a cíclica, em que todos os elementos são influenciados uns pelos outros, diretamente ou indiretamente.

### **3.2. Elementos a serem considerados na sistematização do projeto**

De acordo com Perlingeiro (2005), a sistematização do projeto começa com o seu equacionamento sob a forma de um problema, que consiste em determinar a melhor estrutura para um sistema destinado a cumprir a finalidade desejada. Esse problema é constituído dos seguintes subproblemas: (i) gerar o conjunto de estruturas viáveis para o sistema, etapa denominada de síntese; (ii) prever e avaliar o desempenho de cada estrutura gerada, etapa denominada de análise. A síntese é a etapa criativa do projeto. Ela consiste na geração das estruturas viáveis, de acordo com a finalidade do sistema. Dentre elas será escolhida a melhor através da análise. A síntese é escolhida de modo que o conjunto de elementos exiba o melhor desempenho possível. No caso dos processos, a síntese consiste na seleção dos equipamentos e na definição do fluxograma. A síntese é um problema essencialmente combinatório, caracterizado pela multiplicidade de soluções: basta trocar um elemento ou uma conexão para se obter um sistema diferente, com um desempenho também diferente. Ela pode ser considerada a etapa mais difícil do projeto, porque enfrenta o desafio de tornar visíveis todas as soluções possíveis. O problema da síntese pode ser classificado como um problema em aberto, porque o seu ponto de partida é abstrato: um tênue desejo de produzir um determinado sistema de pré-vácuo. Cada um dos fluxogramas alternativos gerados na etapa de síntese tem que ser submetido a uma análise para se identificar aquele que exibe o melhor desempenho.

A análise começa pela identificação dos elementos do sistema e da forma como os mesmos interagem, e prossegue com a previsão e a avaliação do seu desempenho. A previsão é realizada com o auxílio de um modelo matemático. No caso dos sistemas

de pré-vácuo, partindo-se das especificações do projeto, são obtidas as principais dimensões dos equipamentos, as condutâncias, velocidade efetiva de bombeamento, tempo necessário para remover os gases da câmara de vácuo, vácuo máximo atingido, etc. Observa-se que, ao contrário da síntese, a análise é de natureza numérica, consistindo essencialmente na resolução dos sistemas de equações do modelo matemático. Muitas vezes esses sistemas admitem uma infinidade de soluções física e economicamente plausíveis. Essa multiplicidade de soluções complica o problema de análise, exigindo o emprego de técnicas matemáticas. De qualquer forma, o problema de análise pode ser classificado como um problema fechado, porque o seu ponto de partida é um fluxograma bem definido gerado pela síntese, bastando a ele aplicar um conjunto de técnicas bem conhecidas. Todo problema que admite mais de uma solução viável dispara, inexoravelmente, a busca da melhor das soluções: a solução ótima. O problema se torna, então, um problema de otimização. O projeto é um problema típico de otimização, que compreende a melhor solução estrutural e paramétrica para um determinado caso: (a) no nível estrutural, são geradas sucessivamente as estruturas viáveis do sistema, em busca da estrutura ótima; (b) no nível paramétrico, determina-se o desempenho ótimo de cada uma das estruturas.

O desempenho ótimo é caracterizado pelos valores das variáveis correspondentes aos menores custos, consumo de energia, impacto ambiental e risco de acidentes, bem como o melhor desempenho operacional. A estrutura ótima para o sistema é aquela cujo desempenho ótimo é superior ao desempenho ótimo de qualquer outra estrutura. Perlingeiro (2005) destaca que, o desempenho aqui referido é aquele previsto pelo modelo matemático ainda na fase de projeto e que pode ser monitorado por técnicas de inteligência artificial. A inteligência artificial é o campo das ciências da computação em que se estuda a forma pela qual utilizamos intuitivamente a inteligência e o raciocínio na resolução de problemas complexos, bem como as formas de implementar essas duas finalidades humanas em máquinas.

Os problemas complexos aqui considerados são aqueles em que os seus elementos característicos podem ser combinados de maneiras diversas, originando muitas configurações distintas. É o caso típico do problema de projeto de sistemas de pré-vácuo. Uma das estratégias preconizadas pela inteligência artificial para a resolução de um problema complexo é a sua decomposição em subproblemas mais simples. Essa estratégia pode ser aplicada ao projeto decompondo-o nos subproblemas tecnológico, estrutural e paramétrico. Outra estratégia consiste em dividir a abordagem

de um problema em duas etapas: representação e resolução. A representação tem por objetivo revelar todas as soluções e apresentá-las de uma forma ordenada que sugira um procedimento para a sua resolução. A resolução consiste na obtenção da solução ótima do problema orientada pela representação. Uma das representações mais comuns é a árvore dos estados. Trata-se de uma representação com a forma de uma árvore invertida com raiz, ramos e folhas. As folhas representam os estados percorridos durante a resolução do problema. As que se encontram ao longo dos ramos representam os estados intermediários ou soluções ainda incompletas. As que se encontram nas pontas representam os estados finais ou soluções completas. Essa representação é adotada em seguida para o próprio problema do projeto.

### **3.3. Elementos a serem considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo**

O projeto constitui uma das fases mais importantes no desenvolvimento de sistemas de pré-vácuo, devendo contemplar problemas específicos sobre mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa, termodinâmica, segurança, controle, avaliação econômica, seleção de materiais, cronograma de execução, etc. Para projetar adequadamente o sistema de pré-vácuo, Degasper (2006) sugere que devemos ter como referência o conhecimento físico-químico da matéria no estado gasoso, a sua interação com superfícies sólidas e líquidas que compõem o sistema de vácuo e o transporte destes gases e vapores pelas tubulações. Este autor salienta que os sistemas de vácuo com injeção controlada de gases e vapores tóxicos, corrosivos ou inflamáveis, ou ainda com a presença de plasmas altamente ionizados, ou também com grandes quantidades de vapor de água a ser bombeados, são de difícil projeto, manutenção e operação. Ele propõe que os projetos de sistemas de pré-vácuo devem contemplar os seguintes aspectos:

- \* Pressão final a ser atingida e pressão de trabalho;
- \* Características marcantes do processo em questão, como por exemplo, se haverá gases corrosivos ou explosivos;
- \* Identificação do regime de escoamento dos gases e vapores;
- \* Cálculo das condutâncias e da velocidade efetiva de bombeamento;
- \* Escolha das bombas de vácuo, dos sensores de pressão e dos equipamentos auxiliares;
- \* Tempo requerido para bombear os gases e vapores da câmara de vácuo;

- \* Processos de limpeza e acondicionamento dos sistemas de vácuo;
- \* Roteiro para acompanhamento do desempenho do sistema de vácuo e o seu registro no decorrer da utilização do equipamento;
- \* Cronograma de manutenção preventiva;
- \* Planejamento das possíveis manutenções corretivas e reformas que poderão ocorrer no sistema de vácuo;
- \* Realização freqüente de novos testes de desempenho do sistema de vácuo.

A determinação da condutância constitui uma etapa fundamental nos projetos de sistemas de vácuo. A condutância é uma grandeza que depende das dimensões da linha de bombeamento, do tipo de gás e da sua temperatura, mas depende fortemente do regime de escoamento. A velocidade de bombeamento efetiva é dependente da condutância da tubulação. No caso do regime de escoamento viscoso laminar a condutância depende da pressão e isto traz dificuldades nos seus cálculos. A distinção e identificação entre os quatro tipos de regime de escoamento presentes no transporte de gases e vapores rarefeitos é fundamental e o ponto de partida para podermos dimensionar o sistema de bombeamento de gases e vapores. As condutâncias no regime de escoamento viscoso laminar estão presentes nas pressões de vácuo grosseiro e pré-vácuo, sendo de muita importância para muitos processos industriais. No início do processo de bombeamento as condutâncias dependem da pressão e isso torna os seus cálculos em geral de difícil realização. Além do cálculo da condutância, a determinação do volume da tubulação deve ser incluída na determinação do tempo de bombeamento. Segundo Degasperri (2006), os cálculos podem ser feitos utilizando o programa computacional MathCad™ e no caso da determinação da pressão na câmara de vácuo em função do tempo, podem ser empregados os métodos numéricos de Runge-Kutta de segunda e de quarta ordens, escrito a partir da equação fundamental para o processo de bombeamento. Com esses procedimentos, teremos à disposição as expressões das condutâncias para tubos com algumas seções transversais cujo escoamento dos gases e vapores esteja ocorrendo no regime viscoso laminar.

### 3.4. Integração energética em sistemas de pré-vácuo

Segundo Koretsky (2007), calor corresponde à transferência de energia entre o sistema e as vizinhanças quando a força motriz é fornecida por um gradiente de temperatura. A energia será transferida espontaneamente da região de temperatura alta para a região de baixa temperatura. Às vezes essa forma de transferência de energia faz parte do processo de engenharia. Há três modos pelos quais a energia pode ser transferida devido a um gradiente de temperatura: condução, convecção e radiação.

A convecção é um mecanismo pelo qual a energia pode ser transferida entre o sistema e as vizinhanças em forma de calor. A convecção se refere ao caso em que ocorre um aumento da transferência de calor devido ao acoplamento com o escoamento de um fluido. A convecção não depende apenas das propriedades condutoras dos fluidos, mas também do tipo de escoamento que se estabelece.

A radiação consiste na transferência de energia através dos diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética. Todo objeto emite radiação eletromagnética quando está acima do zero absoluto. Em uma escala molecular, a radiação está associada à aceleração de partículas carregadas presentes na superfície do objeto devido à vibração.

A condução refere-se à transferência de calor devido a vibração dos sólidos da região de mais alta temperatura para a de menor temperatura. A temperatura, uma propriedade macroscópica mensurável, é representativa da rapidez com que as moléculas de gás se movem no sistema. Quando um gás aumenta de temperatura, a velocidade média das suas moléculas aumenta, de modo que ele tem maior energia interna. Ao contrário, os sólidos não têm movimento translacional; seu modo principal de energia cinética molecular é em forma de vibrações. As vibrações do sólido são chamadas de fônons. Os fônons representam parte da energia interna e, por outro, estão relacionados diretamente com a temperatura do sólido. Assim, quanto mais rápido o sólido vibra, maior a temperatura e maior a energia interna. É muito freqüente encontrar, em sistemas de pré-vácuo, correntes que precisam ter as suas temperaturas ajustadas entre os seus equipamentos de origem (câmara de vácuo) e de destino (bombas de vácuo). As que precisam ser aquecidas são denominadas correntes frias e as que precisam ser resfriadas recebem o nome de correntes quentes, independentemente das suas temperaturas de origem. Esse ajuste é promovido através

dos trocadores de calor. A forma mais eficiente de se promover o ajuste é pela integração energética do processo.

A integração consiste no aproveitamento do calor das correntes quentes para aquecer as correntes frias com o concomitante resfriamento das correntes quentes. A integração energética serve para reduzir o consumo de utilidades pelo processo. A solução ótima é determinada pela técnica de análise de processos. Um processo pode ter diversas correntes quentes e frias. Nesse caso, a integração energética é promovida por uma rede de trocadores de calor.

Em geral, nem todas as trocas são possíveis ou desejadas; o aquecimento e o resfriamento complementares podem ser necessários para algumas correntes e desnecessários para outras.

De acordo com Perlingeiro (2005), os principais critérios empregados para projetar uma rede de trocadores de calor envolvem questões econômicas (menor custo), de segurança, de controlabilidade e de flexibilidade operacional. Este autor sugere alguns procedimentos para a integração energética em processos:

- Selecionar a corrente quente com a maior temperatura de entrada e a fria com a maior temperatura de saída;
- Selecionar a corrente quente com a menor temperatura de entrada e a fria com menor temperatura de entrada;
- Acrescentar ou remover um trocador de calor de integração. A rede pode não estar totalmente integrada ou pode ter um trocador de integração, cuja tarefa pode ser vantajosamente redistribuída pelos demais;
- Efetuar a troca térmica máxima entre as correntes escolhidas, respeitando uma variação de temperatura de  $10^0\text{C}$ ;
- Questionar algumas decisões tomadas anteriormente invertendo uma das correntes;
- Dividir uma corrente. Uma mesma corrente pode trocar calor simultaneamente com diversas outras, podendo o arranjo em paralelo ser superior ao seqüencial.

### **3.5. Projeto de instrumentação**

Segundo Valdman (2008), o projeto de detalhamento da instrumentação define a especificação e as características de cada elemento sensor, transmissor, controlador, válvula de controle e outros elementos necessários para implementação das estratégias de controle. Esta especificação inclui, principalmente, os seguintes dados:

- Alcance de sinais de entrada/saída de cada instrumento;
- Faixas de atuação de entrada/saída;
- Linearidade do instrumento em toda a faixa;
- Fontes de alimentação necessárias, elétrica e/ou pneumática;
- Tempo de respostas dos instrumentos;
- Características das válvulas de controle;
- Tipos de ação-direta ou reversa para todos os elementos da malha.

A implantação prática de qualquer estratégia de controle passa necessariamente pela disponibilidade e seleção adequadas da instrumentação necessária e principalmente pelo estudo integrado das características estáticas e dinâmicas dos instrumentos que atuarão em conjunto com o processo nas malhas de controle automático. Valdman et al (2008) apontam que é importante estudar os aspectos da modelagem e simulação de alguns instrumentos mais comuns e seu peso relativo em relação à dinâmica dos processos e influência no projeto e na eficiência de malhas de controle como um todo.

### **3.6. Projeto e implementação de sistema supervisório**

Sistemas Supervisórios são programas utilizados basicamente para o monitoramento de processos industriais. Para tanto, são instalados em microcomputadores conectados a uma rede de comunicação de controladores lógicos programáveis, CLPs, ligados aos equipamentos ou até mesmo a um processo completo de fabricação. O programa de computador busca as informações no CLP e as exibe de forma animada na tela do computador, na forma de sinóticos, gráficos, displays de mensagens, forma numérica ou objetos em movimento como motores ou mudança de



cores para identificar fluxos e outros movimentos. Também possibilita a atuação sobre o processo, acionando elementos, modificando valores ou até mesmo interrompendo um processo. Esses sistemas supervisórios podem ser controlados remotamente através de rede, conectado ao processo via WEB, telefonia (celular ou satélite) ou rádio, como no exemplo do software LabVIEW 6.1 apresentado na Figura 3.1.

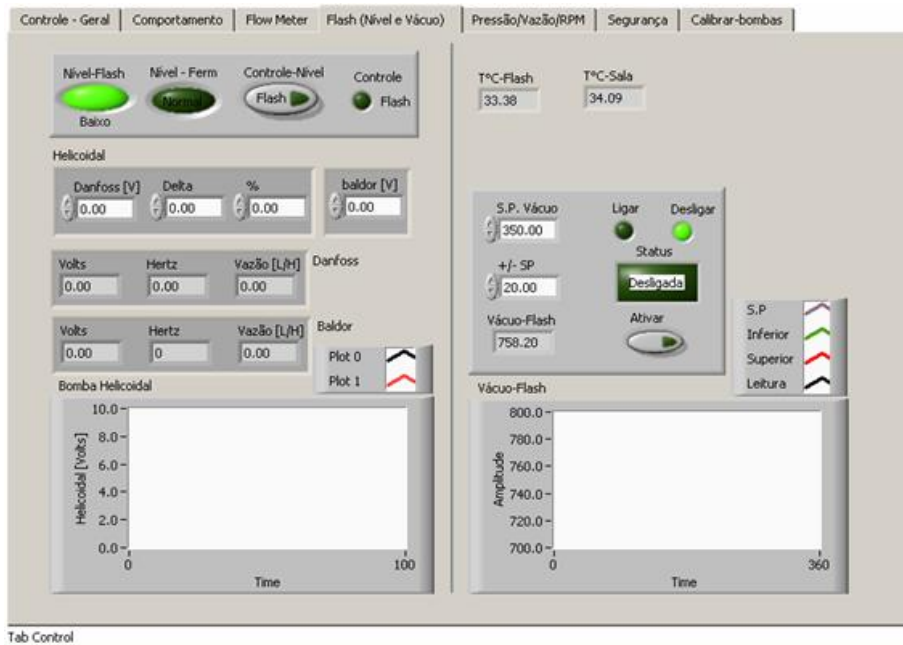


Figura 3.1 – Exemplo de tela do software LabVIEW 6.1, utilizada no sistema supervisório do controle de nível e do vácuo do tanque flash, dedicado ao processo extrativo fermentativo a vácuo para a produção de etanol. Fonte: Atala e Maugeri (2005).

O sistema supervisório, atuando como um software dedicado à monitoração e automação de um processo ou operação, é uma das ferramentas gerenciais da cadeia de informações necessária para a implementação de conceito de operação *on-line* via microcomputadores, envolvendo instrumentação de campo, painéis na sala de controle, controladores e softwares especializados.

De acordo com Jurizato e Pereira (2003), uma das tarefas mais comuns do sistema supervisório é o controle estatístico do processo, que, ao processar as variáveis, pode elaborar gráficos e apontar tendências. Em muitos casos, é formada uma rede do tipo Mestre-Escravo entre dois CLPs, sendo deles a tarefa de intertravar e controlar os elementos de campo, como sensores, válvulas e reles, através de um programa lógico que é executado em cada um deles. É também tarefa dos CLPs informar o sistema supervisório sobre as variáveis do processo. Os sistemas supervisórios também atuam como interface homem-máquina, fornecendo ao operador

informações em tempo real do desempenho do processo controlado e dos efeitos de uma alteração de parâmetros. Este mesmo sistema também é utilizado para identificar e evidenciar as não conformidades dos equipamentos e das operações monitoradas, sendo que as informações só poderão ser confiáveis após a verificação completa de todo o caminho percorrido, com suas etapas intermediárias de conversão e tratamento de sinais.

Um sistema supervisorio pode ser subdividido basicamente em duas partes:

- \* Base de dados – Permite a identificação dos pontos de operação a serem considerados no sistema.

- \* Telas gráficas – Permite a apresentação gráfica da operação de modo a facilitar a identificação e solução rápida e eficiente de problemas operacionais, e auxiliar no estudo de eficiência da operação.

A complexidade na etapa de implementação de um sistema supervisorio é relativamente ampliada em virtude de os profissionais, responsáveis pelo acompanhamento das condições de operação, não participarem necessariamente de todas as etapas de configuração do sistema e de atualização dos instrumentos de campo para monitoração, controle e atuação.

A metodologia na instalação, implantação e partida de um sistema supervisorio deve considerar o número de pontos de condições de operação manipulados pelo sistema como um todo, o número de equipamentos e instrumentos analisados em todas as etapas de verificação e o número de pessoas envolvidas. Valdman et al (2008) sugerem uma metodologia de análise que inclui os seguintes pontos: documentação, procedimento de testes, relatório de testes, treinamento e manuais de operação e período de observação.

### **3.6.1. Documentação exigida**

Toda documentação do sistema em questão deve estar disponível para eventuais esclarecimentos. Entre a documentação mais importante podemos citar os diagramas dos circuitos elétricos do painel central de controle e dos controladores na sala de controle, manuais do fabricante para equipamentos e instrumentação utilizada, versão atualizada dos programas instalados nos controladores, e versão da configuração do sistema supervisorio com seus respectivos endereços de acesso e telas de supervisão utilizadas.

### **3.6.2. Procedimento de testes**

Normalmente, o procedimento é realizado de maneira seqüencial, evitando o acúmulo de problemas que dificultam sua identificação. Em casos extremos, a primeira análise de cada etapa pode ser feita em paralelo, a não ser a última. A etapa conclusiva de sinais entre o sistema supervisório e os equipamentos e/ou instrumentos de campo deverá ser feita ao final da verificação, considerando-se que de nada adianta a análise do ciclo fechado se existirem interrupções nas linhas intermediárias de comunicação. O procedimento envolve a realização de testes de comunicação e conformidade, partindo dos instrumentos de campo como transmissores, bombas de vácuo, válvulas de controle e solenóides, passando pelos controladores e pelas interfaces conversoras de sinais no painel central de controle até o sistema supervisório, facilitando dessa a verificação e a solução para os problemas encontrados nesta fase.

### **3.6.3. Relatório de testes**

Todas as etapas do procedimento devem resultar em relatórios individuais de testes, onde são anotados: data, responsável técnico pelo teste, equipamentos testados, procedimento de teste realizado com seus respectivos resultados. Resultados diferentes do esperado devem ser anotados, identificando-se o respectivo problema e a solução adotada para resolvê-lo.

### **3.6.4. Treinamento e manuais do sistema**

Após a implementação, todos os usuários do sistema supervisório deverão ser treinados para sua utilização, incluindo operadores, técnicos de manutenção e supervisores, para se familiarizar com o sistema como ferramenta importante de trabalho. O manual de operação deve conter procedimentos direcionados aos operadores para eliminar eventuais dúvidas e incluir opções alternativas de operação pela seleção mais indicada das telas de monitoração do processo.

### **3.6.5. Período de observação**

Após a fase de implementação do sistema supervisório, o mesmo deve passar por um período de observação, quando são anotadas todas as ocorrências e os problemas observados pelos usuários. Vale ressaltar que estas informações devem ser as mais precisas possíveis, otimizando o trabalho de verificação e solução das anomalias encontradas.

### **3.6.6. Causas de problemas**

As causas de problemas de um sistema supervisório nem sempre são previsíveis, e algumas vezes uma causa aparentemente sanada pode tornar a acontecer. As telas de monitoração do sistema supervisório evidenciam as inconformidades do processo, não identificando necessariamente as causas dos problemas. Nestes casos, todas as inconformidades devem ser estudadas e todas as etapas pelas quais passa o sinal analisado devem ser revistas a fim de se identificarem os erros.

Alterações em alguns pontos das etapas de comunicação podem definitivamente interromper a continuidade da informação. As normas utilizadas na definição da apresentação das informações nas telas do sistema supervisório devem seguir sempre que possível as normas internacionais em vigor, facilitando a identificação e padronização. Um grupo de profissionais da área de engenharia e da operação do sistema no local deve acompanhar de perto toda a fase de implementação, permitindo uma maior familiaridade com o sistema e facilitando sua posterior manutenção.

O acesso irrestrito à estrutura interna de funcionamento de um sistema supervisório é uma característica fundamental dos sistemas abertos. No entanto qualquer modificação na configuração feita por pessoal não especializado e não treinado poderá ocasionar alterações na operação do sistema.

### **3.6.7. Dimensionamento e arquitetura**

Um microcomputador com uma licença de um sistema supervisório instalada é denominado de nó, e vários nós podem estar conectados em uma mesma rede de

microcomputadores. As licenças estão associadas a chaves de segurança que impedem a utilização do mesmo sem a prévia autorização do fabricante. Ao solicitar a licença de um sistema supervisório, devem ser levados em consideração alguns pontos importantes:

- Nível de acesso:

O nível de acesso determina qual das diversas funções do sistema supervisório serão utilizadas naquele nó. Um nó pode ser utilizado para configuração, monitoração e atuação, ou apenas para monitoração. Esta característica deve ser avaliada para cada nó, a fim de compor uma rede otimizada e adequada ao processo em estudo.

- Número almejado de pontos de comunicação com o campo:

O número de pontos de comunicação com o campo deve ser calculado, considerando uma margem de erro de pelo menos 10% ou 20%. Vale ressaltar que, ao analisarmos uma malha de controle, devem ser levadas em consideração todas as variáveis de processo, todos os parâmetros de controle e todos os modos de operação da malha. Para determinar o número exato de pontos, deve ser analisado o aplicativo configurado nos respectivos controladores de processo.

Quanto à arquitetura, existem três modos básicos para caracterizar os nós de sistemas supervisórios em uma rede:

- **Nó SCADA** – *Supervisory Control And Data Aquisition*: tem como função a comunicação com o campo, aquisição e armazenamento de todos os dados necessários à rede de supervisão e monitoração. É o servidor da rede;

- **Nó Cliente**: não funciona isoladamente, apenas inserido dentro de uma rede, pois consulta sempre um Nó SCADA para obter as informações necessárias. Este terminal funciona como um terminal de consulta avançado, monitorando e atuando sobre as variáveis de processo desejadas;

- **Nó de Gerência**: é uma variante de um nó Cliente, mas através dele o usuário não pode atuar na planta. Este terminal tem como função fazer projeções, cálculos estatísticos, simulações, etc. sem interferir na operação da planta.

### 3.7. Dimensionamento, esquemas e desenhos do projeto

Os esquemas, desenhos e dimensões dos sistemas de pré-vácuo podem ser elaborados em aplicativos 3D AutoCAD e AutoCAD™. Eles fornecem a orientação tridimensional dos equipamentos, acessos para a realização de manutenção, dimensões totais e pontos críticos do espaço onde o sistema de pré-vácuo será instalado. O projeto 3D deve incluir diagramas de fluxo, vista de planta, isométricos de tubulações, dispositivos de estruturas metálicas, interface de instrumentação, diagramas elétricos, etc. A Figura 3.2. apresenta um esquema 3D de um determinado sistema de vácuo e à direita o mesmo sistema após a fabricação.

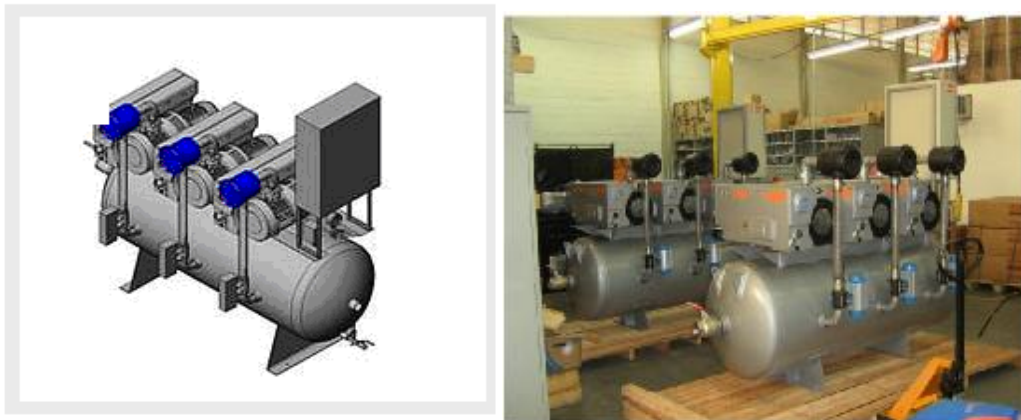


Figura 3.2 – Esquema 3D do sistema de vácuo e à direita sistema de vácuo após fabricação. Disponível em:

[http://www.buschdobrasil.com.br/fileadmin/Companies/Brazil/Pictures/Systems/central\\_geral\\_de\\_vacuio.jpg](http://www.buschdobrasil.com.br/fileadmin/Companies/Brazil/Pictures/Systems/central_geral_de_vacuio.jpg), acesso em 13/01/2009.

Algumas vantagens da modelagem sólida 3D incluem: melhor visualização geral do projeto, áreas críticas facilmente identificadas, excursão virtual do sistema, componentes 3D altamente detalhados similares aos modelos reais, redução do tempo de projeto e ciclo de fabricação. Conforme exemplos apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4., o SolidWorks Premium 2009 é uma ferramenta desenvolvida para atuar em aplicativo CAD 3D, cuja finalidade é a elaboração de projetos de máquinas e equipamentos. Segundo os fabricantes o aplicativo permite as seguintes ações:

- Arrastar faces e esboços de modelos para criar a geometria tridimensional em tempo real;
- Criar dimensões e tolerâncias de acordo com as normas ANSI e ISO e indicar automaticamente as geometrias que estão muito ou pouco dimensionadas;

- Devido aos conversores incorporados ao sistema pode trocar dados CAD com uma grande variedade de formatos de arquivo, entre outros: DWG, DXF, Pro/Engineer, Mechanical Desktop, 3D XML, PDF, JPG, U3D, Parasolid, CADKEY, etc;
- Otimizar projetos de máquinas, equipamentos ou instalações de processamento com tarefas de projeto automatizadas para mapeamento de tubos, canos, cabos elétricos e chicotes;
- Projetar estruturas soldadas esboçando o desenho da estrutura e escolhendo o corte transversal estrutural de cada membro. Os recursos incluem aparagem e corte de membros, bem como a criação de soldas, tampas de extremidades e cantoneiras;
- Realizar simulações e validações. Estuda a física de conjuntos em movimento para ajudar a refinar projetos, melhorar a confiabilidade e, principalmente, reduzir a necessidade de protótipos físicos.
- Baixar e executar programas direto dos modelos dos componentes dos principais fornecedores no projeto em estudo.

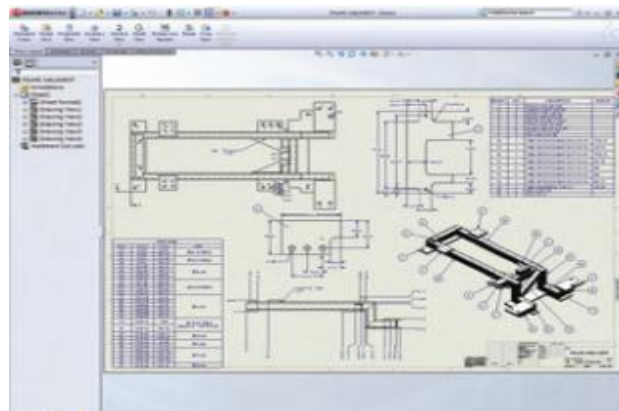


Figura 3.3. Aplicativo SolidWorks Premium 2009 – Exemplo de tela utilizada para dimensionamento de peças de um equipamento. Fonte: [www.solidworksbrasil.com.br](http://www.solidworksbrasil.com.br), acesso em 13/01/2009.



Figura 3.4. Aplicativo SolidWorks Premium 2009 – Exemplo de tela utilizada para simular a física do conjunto em movimento para refinar e validar o projeto. Fonte: <http://www.solidworkslaunch.com/VideoPage.aspx?id=1>, acesso em 13/01/2009.

Os esquemas, desenhos e esboços, desenvolvidos no projeto, não podem dar margem às interpretações que culminem em erros durante a construção, montagem e operação dos sistemas de pré-vácuo. Neste sentido, devemos adotar a simbologia internacionalmente aceita para designar as diferentes partes que constituem o sistema de pré-vácuo, conforme ilustram os exemplos dados na Figura 3.5.

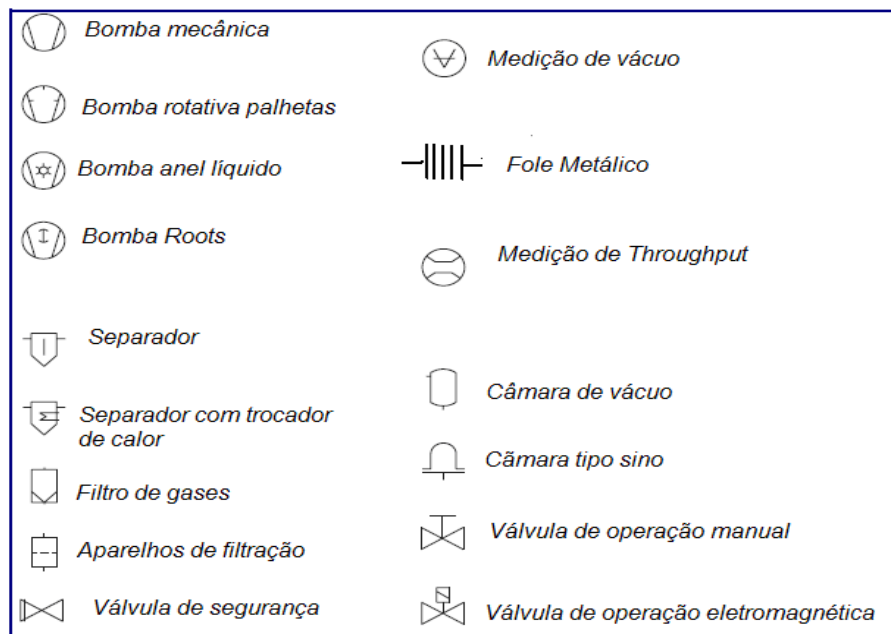


Figura 3.5 – Principais símbolos utilizados na representação das diferentes partes que constituem um sistema de pré-vácuo. Fonte: Pfeiffer Vacuum , 2008.

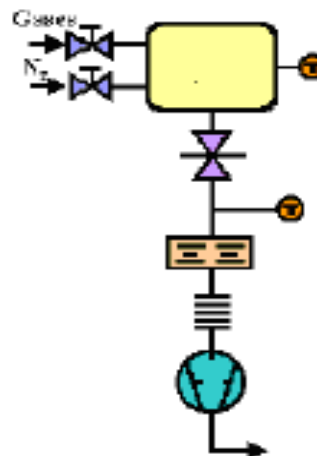


Figura 3.6 – Esquema típico de sistemas de pré-vácuo constituído por bomba mecânica de palhetas. Este sistema pode atingir até  $10^{-3}$  mbar de pressão final. Fonte: Degasperi: 2006.

Na Figura 3.6, o esquema do sistema de pré-vácuo é constituído por câmara de vácuo, válvula para controle de admissão de gases, filtro para evitar a contaminação da bomba mecânica, sensores de pressão, fole metálico para atenuar as vibrações



mecânicas do sistema, bomba mecânica tipo palhetas rotativas e tubulações diversas. Este sistema de pré-vácuo pode atingir até  $10^{-3}$  mbar de pressão final enquanto o esquema da Figura 3.7 pode chegar até  $10^{-5}$  mbar, com velocidade de bombeamento superior.

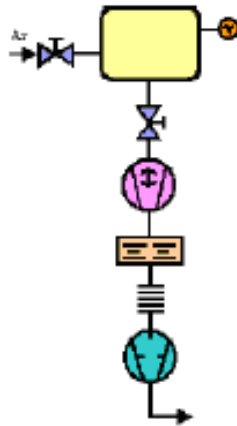


Figura 3.7 – Esquema típico de um sistema de pré-vácuo formado por uma bomba Roots e outra bomba mecânica de palhetas, que juntas podem atingir até  $10^{-5}$  mbar de pressão final. Fonte: Degasperri (2006).

Nas Figuras 3.8 e 3.9 vemos um sistema de vácuo para tratamento de óleo de transformadores elétricos de potência. O esquema da Figura 3.8 apresenta um detalhamento da instrumentação, da posição das válvulas, do circuito geral de vácuo e da linha de circulação do óleo isolante para transformadores elétricos de potência.

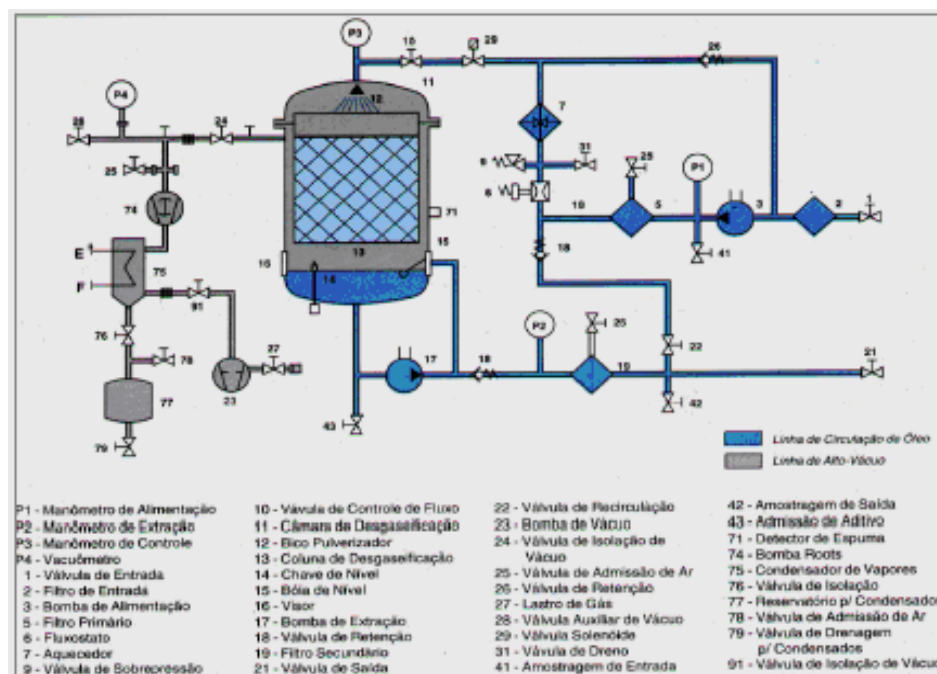


Figura 3.8 Circuito geral de vácuo e de óleo do sistema de tratamento de óleo isolante de transformadores elétricos de potência assistido a vácuo. Fonte: Degasperri (2006).

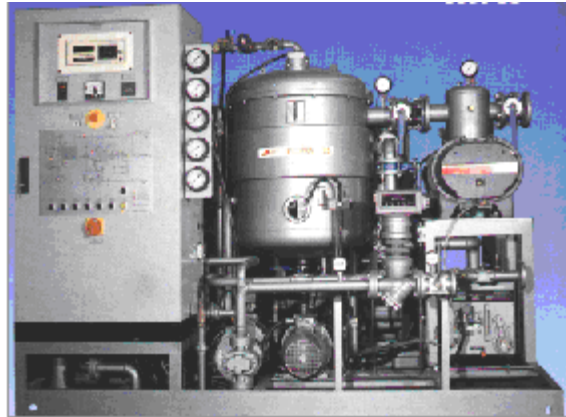


Figura 3.9 Sistema de vácuo para tratamento de óleo de transformadores elétricos de potência. Fonte: Degasper (2006).

Vale destacar que os detalhes apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9 são insuficientes para as etapas de construção e montagem, uma vez que carecem de informações sobre as dimensões e especificações dos materiais e componentes utilizados.

### **3.8. Especificações de bombas de vácuo**

Segundo Ono e Pereira (1990), bombas e manômetros constituem-se nos equipamentos mais importantes de qualquer sistema de pré-vácuo, sendo o estudo de suas características de importância fundamental no projeto e montagem de sistemas com bom desempenho. Com relação às especificações de bombas no projeto de sistemas de vácuo, Kaschny (2008), Manzini (2005), Ono e Pereira (1990) sugerem os seguintes parâmetros a serem considerados:

- Pressão de exaustão ou de saída dos gases: é o limite superior da faixa de pressões na qual a bomba irá operar, considerando-se o sistema fechado;
- Vácuo atingível ou máximo: é o limite inferior da faixa de pressões na qual a bomba irá operar, considerando-se o sistema fechado;
- Velocidade de bombeamento;
- Consumo de energia;
- Consumo de água e seu tratamento preliminar e final;
- Consumo de ar comprimido e seu pré e pós tratamento;
- Ruído e vibrações;
- Condutância dos filtros de admissão e exaustão dos gases
- Freqüência, facilidade e custo de manutenção.

## Capítulo 4

### Simulação de Sistemas de Pré-Vácuo

O presente capítulo fornece elementos conceituais sobre simulação e modelagem de processos considerando o modelo matemático dos equipamentos, as fontes de incerteza e a análise de sensibilidade. Aspectos básicos das principais ferramentas computacionais normalmente utilizadas na simulação de sistemas de pré-vácuo também foram comentados neste capítulo.

#### 4.1. Introdução

A simulação, do latim *simulatio*, é uma representação do comportamento de um processo por meio de um modelo material cujos parâmetros e variáveis são as imagens daqueles do processo estudado ou projetado. De acordo com Valdman et al (2008), modelagem pode ser definida como a atividade de representação dos principais fenômenos que ocorrem no processo, por equações e correlações entre suas variáveis mais significativas, e que tenham um papel importante nos projetos de suas malhas de controle. Os mesmos autores citados anteriormente definem simulação como a atividade que estuda o comportamento desse modelo quando lhe são aplicadas condições e estímulos análogos aos que ocorreriam no processo real analisado. Taís condições e estímulos se traduzem na forma de variação de parâmetros, condições iniciais ou perturbações nas condições de operação e variáveis estudadas.

Muitos trabalhos e técnicas de simulação têm sido empregadas e, hoje em dia, simulações que representam situações reais estão sendo feitas tanto em meio acadêmico como industrial. Cekinski e Urenha (2007) apontam que a simulação do comportamento do sistema através de protótipos numéricos, antes de serem levados para testes experimentais, significa considerável economia de dinheiro e de tempo. Vários métodos matemáticos e ferramentas computacionais têm sido utilizados nos últimos anos para essa etapa de simulação dinâmica de processos, cujos limites esbarram, por um lado, na complexidade adotada em alguns modelos que não tenham ainda soluções analíticas confiáveis de suas equações e, por outro lado, na simplicidade adotada em alguns modelos que sejam suficientemente representativos das situações práticas que ocorrem na maioria dos casos. Perlingeiro (2005) destaca que a maioria dos procedimentos, especialmente para análise de processos, encontra-se implementada sob a forma de simuladores comerciais. Linguagens como C++,

Fortran, Visual Basic, MatLab e até planilhas eletrônicas, são úteis para realizar a simulação de processos. Valdman et al (2008) relaciona alguns dos métodos e ferramentas utilizados para simulação dinâmica de processos:

- Cálculo numérico nos métodos iterativos de solução de equações algébricas, citando como exemplos Newton, Secante, etc;
- Cálculo numérico na integração numérica de equações diferenciais, citando como exemplos Euler, Runge-Kutta, Simpson, Rosenbrock, etc;
- Linearização de equações não lineares e aplicação de variáveis de desvio;
- Transformada de Laplace e conceitos de funções de transferência;
- Transformada de Fourier e conceitos de funções harmônicas; Transformada Z e sistemas amostrados;
- Programas-pacotes especiais para simulação dinâmica em computadores, citando como exemplos CSMP, MATLAB, HYSIS, AspenDynamics, entre outros;
- Simuladores especiais para dinâmica e controle de processos, citando como exemplos Autodynamics, SIMOP, APECS, MiMiC, PD-PLUS, VisSim, ProSim, Simul8, entre outros.

A previsão e a avaliação dos comportamentos físico, econômico e ambiental figuram entre os principais objetivos de uma simulação computacional de processo. A previsão do comportamento físico consiste em antecipar como um processo, que ainda não existe, deverá se comportar depois de montado e colocado em operação. É antecipada, também, a sua capacidade de operar satisfatoriamente em condições diversas. A previsão é realizada com o auxílio de modelos matemáticos. A avaliação consiste em verificar se o comportamento previsto atende às especificações do projeto.

A previsão do comportamento econômico consiste em antecipar a lucratividade do processo, utilizando como referência um determinado modelo econômico.

A avaliação consiste em verificar se a lucratividade prevista justifica a construção e a operação do processo ou a sua operação em condições diversas.

Santos (2006), desenvolveu uma metodologia para calcular os impactos ambientais e a pressão ambiental de determinados poluentes em um processo industrial, tendo como base a legislação ambiental e o nível de sustentabilidade de consumo de recursos naturais e energia.

Esta metodologia foi implementada no software SAAP – Sistema de Avaliação Ambiental de Processo – para calcular o índice de pressão ambiental (IPA) de um

processo industrial, através da seleção e cálculo de indicadores e índices ambientais, utilizando as técnicas de análise do ciclo de vida da série de normas ISO 14000. Estas normas definem categorias de impacto ambiental mundialmente adotadas, tais como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, toxicidade, entre outras. Os pesos de cada categoria de impacto ambiental variam de acordo com o valor da pressão ambiental relativa de cada índice ambiental. A partir destes resultados pode-se propor alternativas para diminuir os impactos e a pressão ambiental do processo analisado. O software SAAP foi desenvolvido em linguagem DELPHI, que utiliza compilador Pascal orientado a objeto, permitindo compatibilidade com ambiente Windows.

#### **4.2. Considerações sobre o modelo matemático de equipamentos**

Valdman et al (2008) explicam que o modelo matemático de um equipamento é constituído do sistema de equações que representam os fenômenos que regem o seu comportamento, podendo incluir alguns balanços de massa e energia; relações de equilíbrio de fases; expressões para o cálculo de propriedades, taxas e coeficientes; equações de dimensionamento; restrições de fluxos, entre outras. O tipo de modelo utilizado depende do grau de detalhamento com que se está estudando o processo. O modelo matemático contém diversos parâmetros de natureza física ou físico-química e coeficientes técnicos, cujos valores precisam ser estimados. Programas comerciais incorporam rotinas que executam esta tarefa automaticamente. No dimensionamento, o modelo é utilizado para o cálculo das dimensões principais dos equipamentos e do consumo de utilidades e demais insumos, de modo a atender às metas de um projeto.

Na simulação, o modelo é utilizado para reproduzir o comportamento de um processo já dimensionado quando operado em condições outras que não as do dimensionamento. Os problemas de dimensionamento e de simulação são resolvidos com base num conjunto de informações relevantes formado pelas condições conhecidas ou condições de contorno e pelas metas de projeto e de operação, que variam de acordo com o problema estudado. No caso de simulações, devem ser conhecidas as dimensões dos equipamentos, as condutâncias, vazões e as condições de todas as correntes de entrada. As metas de projeto e de operação são valores impostos a determinadas condições das correntes de saída do processo ou de alguns equipamentos em decorrência de especificações de ordem técnica, de restrições

ambientais ou de segurança. Segundo Perlingeiro (2005), cabem aos projetistas de processos, em nosso caso sistemas de pré-vácuo, duas ações bem distintas e complementares: a modelagem e a resolução.

A modelagem consiste na formulação dos modelos a partir de conhecimentos sobre fundamentos físicos ou físico-químicos e princípios de funcionamento dos equipamentos envolvidos no processo. A resolução consiste no processamento da informação contida nos modelos ao se resolver problemas de dimensionamento e de simulação. Ela pode assumir diferentes graus de complexidade dependendo da dimensão dos sistemas, da não linearidade de algumas equações e de outras variáveis. Nas situações mais complexas torna-se imperiosa a racionalização do processamento envolvido. Isto se consegue com o estabelecimento prévio de uma estratégia de cálculo. A existência de “softwares” comerciais cada vez mais sofisticados para este fim não exime o projetista do sistema de pré-vácuo de dominar este assunto, o que o torna apto a relacionar, criticar e interagir inteligentemente com os mesmos. Existem duas estratégias básicas para o dimensionamento e a simulação de processos: a global e a modular. A estratégia global é aquela em que as equações dos modelos de todos os equipamentos e as restrições de corrente são agrupadas como se o processo fosse um macroequipamento.

Elas podem ser seqüenciadas pelo algoritmo de orientação das equações. A seqüência resultante depende de variáveis especificadas em cada caso. A estratégia modular consiste em utilizar um módulo computacional para cada equipamento, em que as equações se encontram previamente ordenadas, para dimensionamento ou para simulação. Uma vantagem deste procedimento é que as equações são ordenadas uma só vez, quando os módulos são criados. Para cada problema, basta ordenar os módulos segundo o fluxograma do processo.

### **4.3. Considerações sobre as fontes de incerteza**

O projeto de processos se desenvolve num ambiente de “absoluta” incerteza. De acordo com Perlingeiro (2005), as principais fontes de incerteza são os modelos matemáticos e os valores dos parâmetros físicos e econômicos. Os modelos matemáticos são uma fonte de incerteza porque nem sempre representam, com precisão suficiente, os fenômenos que se passam no interior dos equipamentos e na correntes. Os valores dos parâmetros físicos são incertos pelos seguintes motivos:

\*Os valores de alguns parâmetros físicos são obtidos experimentalmente, sob condições de erro experimental, ou são estimados a partir de dados conhecidos para condições que não aquelas previstas no projeto.

\* Os valores dos parâmetros físicos, além de imprecisos, variam durante a operação do processo, devido a modificações estruturais dos equipamentos, e à influencia de outras variáveis a montante e a jusante (perturbações nas condições de fronteira).

Assim sendo, ao se concluir o dimensionamento de um processo, não há garantia de que o resultado estará correto e nem de que o processo, uma vez instalado, irá alcançar as metas estabelecidas.

#### **4.4. Considerações sobre a análise de sensibilidade**

O objetivo da análise de sensibilidade é avaliar o efeito da incerteza sobre o resultado do dimensionamento e sobre o desempenho futuro do processo.

A base da análise é formada pelos valores das variáveis especificadas, dos parâmetros e dos resultados do dimensionamento.

Ao dimensionamento do processo, seguem-se as seguintes etapas:

- \* aquisição dos equipamentos, com as dimensões citadas pelo projeto;
- \* a montagem dos equipamentos e das instalações gerais;
- \* o início da operação com o ajuste das condições das correntes de entrada aos seus valores de projeto.

Nesse sentido, é preciso observar a diferença entre o comportamento previsto e o comportamento real do sistema de pré-vácuo. O comportamento previsto é aquele ditado pelo modelo matemático, caracterizado pelos valores especificados ou calculados no dimensionamento para as variáveis pré-estabelecidas. Os comportamentos previsto e real de um processo diferem devido a incerteza nos modelos e nos parâmetros. A diferença entre o comportamento real e o comportamento previsto pode ser de ordem a comprometer o bom desempenho do sistema de vácuo. Por esse motivo, antes da implementação física torna-se indispensável estimar o efeito dessa diferença sobre o comportamento futuro do processo, buscando-se a resposta a pergunta do tipo: que valor uma dada variável de saída assumirá, caso o valor real de um parâmetro seja diferente daquele utilizado no dimensionamento?

A resolução de qualquer problema de dimensionamento resulta numa das seguintes situações:

- \* o problema não admite solução;
- \* o problema admite uma única solução;
- \* o problema admite várias soluções

A primeira situação ocorre quando as metas de projeto são em número excessivo ou inconsistentes. A segunda, quando as metas são consistentes, mas não deixam graus de liberdade. A terceira, quando as metas de projeto são insuficientes dando margem a graus de liberdade. Neste último caso, torna-se imperioso buscar a melhor dentre as soluções viáveis, a solução ótima. Segundo Perlingeiro (2005), o termo otimização refere-se, ainda, ao campo da matemática dedicado ao desenvolvimento de métodos eficientes de determinação de extremos de funções de uma ou mais variáveis. É importante reconhecer que todo problema de otimização compreende uma conjugação de fatores conflitantes.

#### **4.5. Elementos a serem identificados na otimização do processo**

Todo problema de otimização, independentemente do campo de aplicação, compreende os seguintes elementos que devem ser identificados em cada situação específica: variáveis de decisão; critério; função objetivo; restrições e região viável. Variáveis de decisão é a denominação atribuída às variáveis independentes do problema de otimização. São também chamadas de variáveis manipuladas. Os métodos de otimização chegam à solução ótima manipulando essas variáveis. Na engenharia de processos, elas são as variáveis de projeto e correspondem, em número, aos graus de liberdade do problema. As variáveis de projeto são escolhidas dentre as não especificadas. A escolha não afeta a solução ótima, mas apenas o esforço computacional envolvido. O critério é o que define a solução ótima do problema. A solução ótima segundo um critério pode não ser a ótima segundo outros. Por exemplo, a solução de menor custo pode não ser a mais segura e ambientalmente adequada. Soluções que atendem simultaneamente a mais de um critério podem ser obtidas por métodos de otimização com objetivos múltiplos, em que o projetista pode atribuir pesos diferentes a cada critério em função da importância relativa de cada um. A função objetivo é a expressão matemática do critério de otimização em termos das variáveis físicas do sistema. A função objetivo pode assumir aspectos os mais diversos, refletindo



decisivamente no modo de abordar o problema de otimização e na probabilidade de sucesso de sua aplicação. As restrições são os limites estabelecidos pelas leis naturais que governam o comportamento do sistema. Elas podem ser classificadas em restrições de igualdade ou de desigualdade. As restrições de igualdade são as equações do modelo matemático do processo. As restrições de desigualdade se referem aos limites físicos de variáveis do projeto. As restrições de condicionam os valores que as variáveis podem assumir durante a solução do problema. A região viável são os limites de espaço definidos pelas variáveis de decisão, delimitada pelas restrições, em cuja fronteira se localiza o máximo ou o mínimo da função objetivo. A região viável é também chamada de região de busca. O conhecimento da localização e da natureza dessa região é de fundamental importância para a aplicação de diversos métodos de otimização.

Os problemas de otimização são dificultados por fatores como descontinuidades na função e nas restrições, não linearidade da função e das restrições, sensibilidade da função em relação às variáveis de projeto e multimodalidade da função. Daí não existir um método univariável de otimização. Na verdade, os métodos existentes são dependentes do tipo de problema a ser analisado.

#### **4.6. Fluidodinâmica computacional**

Com relação aos sistemas de pré-vácuo operando no regime de escoamento viscoso laminar/turbulento, em suas análises e modelagens realizadas com bastante rigor são utilizados os programas computacionais consagrados na área de mecânica dos fluídos, entre outros, a fluidodinâmica computacional ou CFD. De acordo com Santos (2007), a fluidodinâmica computacional é o conjunto de ferramentas numéricas e computacionais utilizadas para resolver, visualizar e interpretar a solução das equações de balanço de momento, massa e energia. Tal ferramenta utiliza técnicas numéricas avançadas para solucionar problemas complexos da engenharia e da física, já que esse tipo de simulação computacional é capaz de prever fenômenos físicos e físico-químicos que ocorrem em um dado escoamento.

Para Fortuna (2000), a fluidodinâmica computacional pode ser descrita de forma generalizada como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos e/ou físico - químicos que apresentam escoamento. Suas vantagens estão relacionadas ao fato de que ela permite investigar o escoamento de fluidos dentro de equipamentos

empregados em processos, sem as desvantagens de custo e tempo relacionadas à realização de experimentos laboratoriais.

Segundo Maliska (2003), a predição dos campos de concentração, velocidades, pressão, temperaturas e propriedades turbulentas, é efetuada através de modelos microscópicos baseados nos princípios de conservação de massa, conservação de energia e da quantidade de movimento no domínio do espaço e do tempo. A hipótese do contínuo fundamenta a conceituação teórica que justifica a maior parte das análises em fluidodinâmica computacional. O fluido, um meio contínuo, é discretizado com base no modelo das partículas fluidas. Esta abstração conceitua um elemento representativo de volume, denominado REV. Neste elemento de volume, de micro ou nano dimensões, uma propriedade ou quantidade física mantém um valor médio sob as mesmas condições, passível de reprodução em laboratório, sob as mesmas solicitações externas ao fluido. Assim uma partícula representativa de um volume de fluido, o REV, é o menor volume em que as propriedades do fluido se mantêm. As moléculas de um contínuo vibram constantemente, cessando esta vibração somente no estado de repouso termodinâmico, o zero absoluto. Fisicamente em um REV o caminho médio percorrido pelas moléculas do fluido entre duas colisões sucessivas é no mínimo da ordem de grandeza das próprias moléculas deste fluido. Uma simulação em CFD consiste basicamente em cinco etapas. A primeira etapa envolve a definição do domínio a ser simulado e desenho da geometria no software apropriado. Na segunda etapa o domínio é dividido em pequenas porções, sendo chamado de malha, onde serão resolvidas as equações de conservação, de acordo com a equação 4.1, onde  $\mu$ ,  $u$  e  $w$  representam os componentes da velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente;  $\Phi$  representa um coeficiente de transferência, podendo ser transferência de momento energia ou massa;  $\rho$  é a densidade do fluido;  $\varphi$  é uma variável do escoamento e  $S\varphi$  é um termo fonte.

A Tabela 4.1 apresenta os valores dessas variáveis da equação de conservação para o caso de conservação de momento, de energia e de massa, onde  $\mu$  é a viscosidade do fluido,  $C_p$  é o calor específico do fluido à pressão constante,  $k$  é a condutividade térmica,  $D$  representa a difusividade,  $C$  representa a concentração do componente,  $T$  é a temperatura e  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$  são as forças de campo de escoamento.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\phi \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + S^\phi \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 Variáveis da equação de conservação utilizadas em fluidodinâmica computacional.

Equação de Conservação	$\phi$	$\Gamma^\phi$	$S^\phi$
Continuidade	1	0	0
Momento em x	u	$\mu$	$B_x + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial x}\right) - \frac{\partial P}{\partial x}$
Momento em y	v	$\mu$	$B_y + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y}$
Momento em z	w	$\mu$	$B_z + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3}\mu \nabla \cdot \vec{V}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial z}\right) - \frac{\partial P}{\partial z}$
Energia	T	$\frac{k}{C_P}$	$\frac{1}{C_P} \frac{DP}{Dt} + \frac{\mu}{C_P} \Phi$
Massa	C	$\rho D$	0

Fonte: Costa et al, 2006.

A terceira etapa é a modelagem, onde foram definidas as condições de contorno necessárias à realização da quarta etapa que é a solução numérica do problema. A quinta etapa consiste na análise e tratamento dos resultados. Um modelo numérico validado pode fornecer detalhes de escoamentos locais que, muitas vezes, não podem ser obtidos experimentalmente. Todos os métodos de fluidodinâmica computacional partem do mesmo princípio: eles aproximam numericamente as equações provenientes dos balanços de conservação de massa, de quantidade de movimento linear e de energia associados às condições de contorno da geometria que está sendo estudada. A modelagem que usa a ferramenta de fluidodinâmica computacional proporciona resultados excelentes se as equações do modelo representam com fidelidade o problema físico em questão, principalmente se estiverem livres de erros numéricos comuns a esse tipo de enfoque. Cekinski e Urenha (2007) esclarecem que a aplicação de métodos de discretização para a simulação de escoamentos, em sua formulação pura, leva a oscilações numéricas e isso exige que ela seja feita por profissionais que conheçam bem as técnicas da fluidodinâmica computacional. Para a correta utilização da fluidodinâmica computacional em sistemas de pré-vácuo, que operam no regime de escoamento viscoso laminar ou turbulento, é preciso conhecer profundamente a física do problema a ser resolvido, como também a metodologia numérica mais adequada para a situação a ser estudada.

O projetista do sistema de pré-vácuo precisa conhecer as limitações do seu modelo matemático e de seu modelo numérico para ter a noção correta do que a simulação numérica poderá proporcionar. Muita cautela deve ser tomada por qualquer projetista de sistema de pré-vácuo que se aventure na aplicação dos métodos numéricos de discretização. As equações discretizadas são as leis de conservação de massa, quantidade de movimento linear e energia. Se um volume infinitesimal é considerado, pode-se notar que, com o tempo, ele se desloca no espaço e, adicionalmente, também se distorce, mudando o seu formato. Normalmente, o processo de deslocamento é denominado convecção e o processo de distorção, que está relacionado com os gradientes de velocidade, denomina-se difusão. De um modo geral, estes são os processos que governam a movimentação da maioria dos fluidos no regime de escoamento turbulento e viscoso. Um exemplo importante é a utilização de esquemas dissipativos para o cálculo das velocidades. Para Costa (2006), esses esquemas são fundamentais para que sejam obtidos campos de pressão, temperatura e velocidade sem a presença de oscilações numéricas. As oscilações sempre ocorrem se os métodos de discretização mencionados forem utilizados sem modificações nos termos convectivos das equações de Navier-Stokes, uma forma simplificada da equação de conservação de quantidade de movimento aplicada à maioria dos escoamentos reais. Para regimes de transição e turbulento as variáveis se modificam com o tempo de forma que a turbulência precisa ser incorporada ao modelo, a fim de que sejam obtidos resultados confiáveis com a fluidodinâmica computacional. Existem diversos modelos que incluem o efeito da turbulência nas equações de Navier-Stokes. Quando o efeito da turbulência é incluído, as quantidades transportadas, como por exemplo, a velocidade, acabam sendo descritas como a soma de um valor de médio e um valor flutuante.

#### **4.6.1. Pacotes computacionais para CFD**

De acordo com Dias (2007) e Costa (2006), existem diferentes pacotes computacionais para CFD, uns são para construção de geometria, como o ICFM CFD, outros já são pacotes mais completos tais como o FLUENT<sup>®</sup>, o CFX<sup>®</sup>. O ICFM CFD é um pacote que tem como objetivo a construção de diferentes geometrias e malhas numéricas para a simulação. As Figuras 4.1., 4.2. e 4.3. apresentam exemplos de

telas que podem acompanhar os pacotes computacionais de fluidodinâmica computacional.

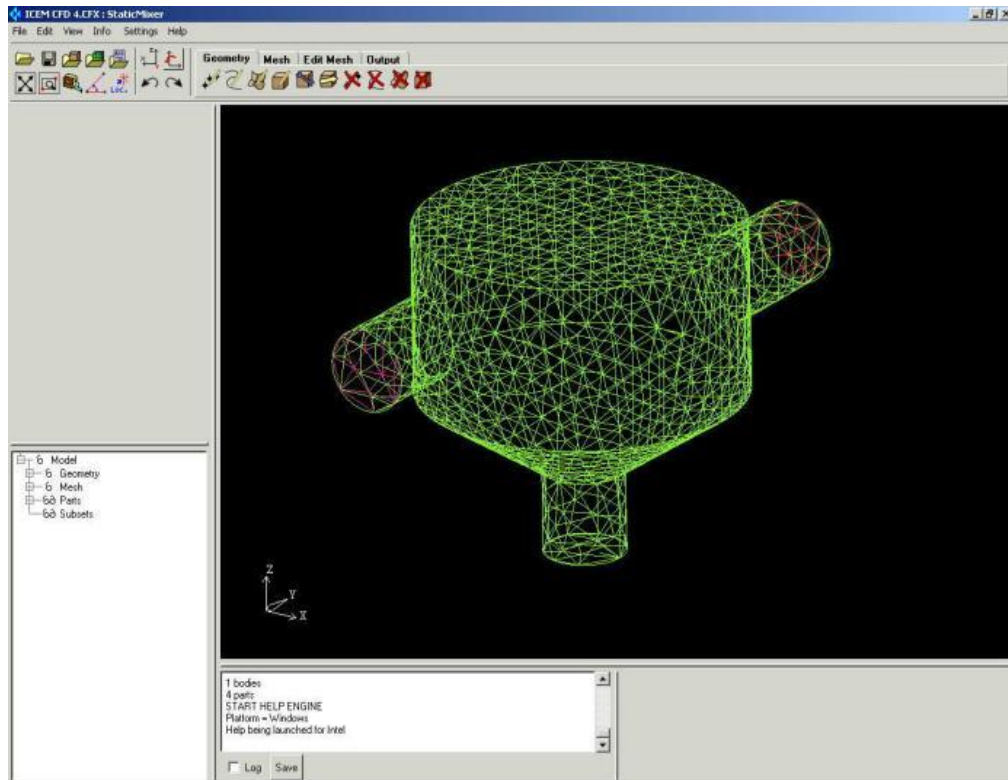


Figura 4.1: Corpo de um misturador estático com malha gerado no ICM.  
Fonte: <http://www.cfd-brasil.com/>, acesso em 14/01/2009.

O CFX<sup>®</sup> que é um software de CFD integrado, no qual é possível construir a geometria, fazer a malha numérica, ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar posteriormente, sendo utilizado para a simulação de diversos tipos de escoamentos. Como é um software comercial, ele é uma "caixa-preta", contudo ele apresenta uma boa interface software-usuário, sendo que o usuário tem a possibilidade de incluir sub-rotinas computacionais escritas em linguagem FORTRAN, e além disto, apresenta a flexibilidade da inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis. O pacote computacional CFX é composto basicamente de quatro programas, que são: o CFX-Build, para a construção das geometrias e da malha numérica; o CFX-Pre, para o ajuste dos parâmetros de simulação; o CFX-Solver, para a obtenção dos resultados, que podem ser obtidos utilizando um ou vários processadores, isto é, pode ser utilizado em cluster; e o CFX-Post, um programa para a análise dos resultados, que processa e apresenta os dados graficamente, podendo o usuário criar diferentes tipos de imagens gráficas, para melhor análise dos resultados.

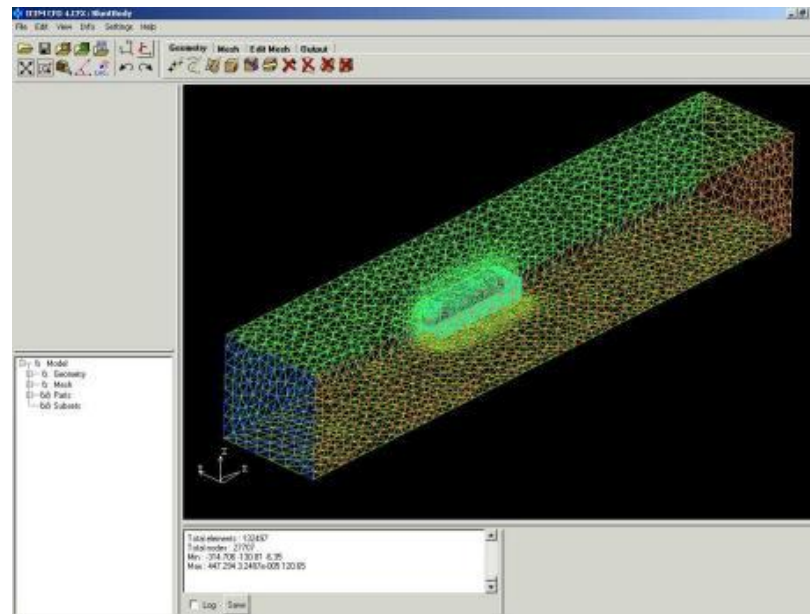


Figura 4.2 Malha Numérica de um Corpo para Visualização do Escoamento Externo. Fonte:<http://www.cfd-brasil.com/>, acesso em 15/01/2009.

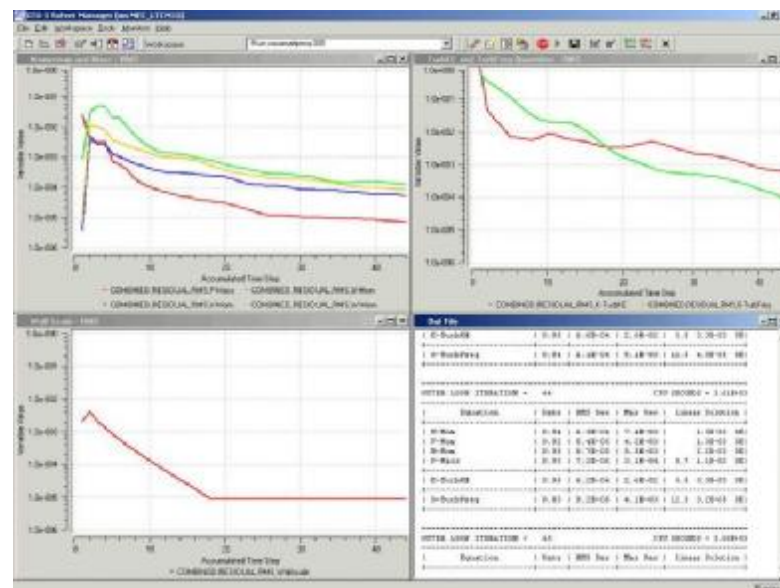


Figura 4.3 Tela do CFX-Solver. Fonte:<http://www.cfd-brasil.com/>, acesso em 14/01/2009.

#### 4.6.2. Metodologia para a determinação de modelos

Pelo alcance de sua aplicação para controle de processos, são utilizados com freqüência dois enfoques diferentes e paralelos de determinação de modelos, que são caminhos que se cruzam em várias ocasiões, principalmente para dar maior confiabilidade e representatividade ao modelo matemático pela comparação sempre

desejável do comportamento real do processo com resultados obtidos por simulações de modelos. São eles:

- Metodologia empírica, comumente denominada de identificação de processos, e com uso cada vez maior para várias aplicações em controle. Consiste basicamente na determinação das equações e correlações do modelo, pela análise quantitativa paramétrica dos efeitos experimentais apresentados nas variáveis do processo quando provocado por determinadas modificações prefixadas das suas condições de operação. Na maioria dos casos, os tipos de respostas apresentadas são comparadas com modelos simples cujas respostas analíticas são compatíveis com os resultados experimentais dentro de uma certa tolerância.

- Metodologia analítica consiste na determinação das equações diferenciais e algébricas que compõem o modelo, baseando-se nas leis fundamentais de física, química, físico-química, aplicadas às variáveis e condições de transformação do processo. Uma vez definidos os limites físicos do processo ou da parte dele que se deseja modelar, alguns passos importantes devem ser dados:

\* Identificação e seleção das variáveis estímulo/entrada e resposta/saída mais indicadas para o estudo proposto e dentro dos objetivos da operação do processo.

\* Fixação das condições e dos parâmetros que serão considerados invariáveis ou constantes com o tempo e das variáveis que terão um comportamento variável com o tempo.

\* Aplicação das leis indicadas para as variáveis consideradas para descrever estados em regime permanente e estados em regime transiente.

\* Verificação do número de equações e número de variáveis dependentes do modelo bem como das unidades de todos os termos das equações para uma solução consistente e viável. Finalmente, Valdman et al (2008), Degasperri (2006) e Costa (2005), lembram que é maior o mérito e a utilidade de um modelo, quanto menor for a sua complexidade e maior a facilidade e rapidez da solução numérica na sua simulação.

#### **4.7. Abordagens de modelagem para os sistemas de pré-vácuo**

Os projetos em tecnologia do vácuo são geralmente realizados com cálculos, análises e modelagens bastante simplificados. Muitos cálculos e análises dos projetos rotineiros são realizados com a finalidade de especificar as bombas de vácuo a fim de

obter o vácuo pretendido para realizar o processo. Degasper (2006) identifica dois tipos básicos de cálculos de projetos de sistemas de vácuo realizados por meio da formulação tradicional. No primeiro tipo de cálculo, temos os sistemas de vácuo de pequeno e médio porte; nestes casos, em geral não temos a necessidade de conhecer os detalhes do processo de bombeamento, precisamos apenas dimensionar a capacidade das bombas de vácuo, a partir da identificação da quantidade de gases e vapores que deverão ser bombeados. No segundo tipo de cálculo, temos os sistemas de vácuo utilizados nos processos industriais de uso geral. Nestes casos, devemos considerar os detalhes relativos às fontes de gases e vapores, a dependência da velocidade de bombeamento com relação à pressão, os valores das condutâncias em função do regime de escoamento dos gases, e ainda, os tipos de gases envolvidos no processo de bombeamento. Nestes casos a modelagem matemática dará origem às equações ordinárias não lineares de primeira ordem, cujas soluções deverão ser obtidas por meio dos métodos numéricos, uma vez que dificilmente métodos analíticos possam ser suficientes. A modelagem do sistema de pré-vácuo deve ser bastante rigorosa, deve considerar a dependência da velocidade de bombeamento com a pressão para todas as bombas de vácuo importantes encontradas na atualidade, e ainda, levar em conta todas as condutâncias em função dos regimes de escoamento viscoso laminar/turbulento, dimensões dos tubos e tipo de gás a ser bombeado.

Devemos considerar também se a modelagem será feita pela abordagem discreta ou pela contínua. A abordagem discreta alcança apenas um valor de pressão dependente do tempo para toda a câmara de vácuo, sendo impossível obter o campo de pressão para o sistema de vácuo, isto é, a pressão em cada ponto da câmara de vácuo. Na abordagem contínua, podemos construir formulações capazes de fornecer os valores de pressão em função do tempo para todos os pontos da câmara de vácuo.

Dependendo da distribuição e da intensidade dos *throughputs* das fontes de gases e vapores e da geometria da câmara de vácuo podemos ter variações grandes de pressão de um ponto para outro. Esta é a principal limitação da abordagem discreta, ou seja, não ser capaz de encontrar os valores de pressão para cada ponto da câmara de vácuo. Existem situações importantes em tecnologia de pré-vácuo, nas quais, as pressões de trabalho levam a números de Knudsen menores que 0,01, nestes casos a hipótese do contínuo é válida, conforme ilustra a Figura 4.4.



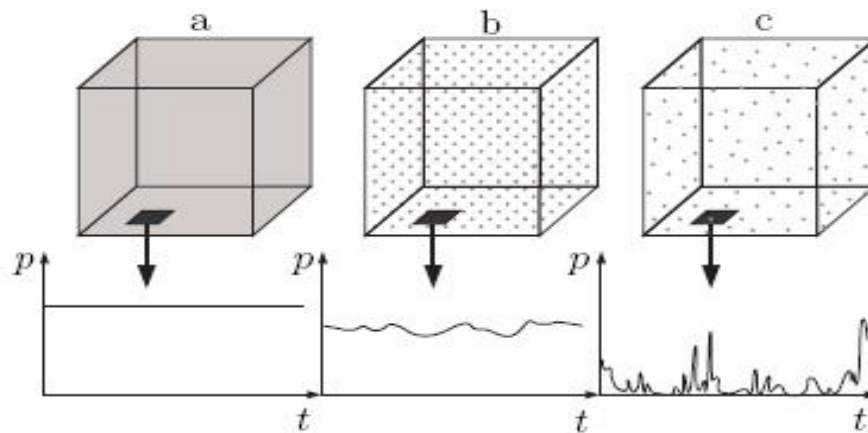


Figura 4.4. Ilustração do limite de validade da hipótese do contínuo numa câmara com gás progressivamente evacuada: (a) regime de escoamento viscoso laminar, (b) regime de escoamento intermediário, (c) regime de escoamento molecular. Onde  $p$  denota a pressão e  $t$  tempo de bombeamento dos gases da câmara. Fonte: Gobbi et al, 2007.

Com isso, a equação de Navier-Stokes da mecânica dos fluidos pode ser empregada e com ela as técnicas e os programas computacionais já consagrados e testados. Assim, para os sistemas de pré-vácuo temos como encontrar de forma rigorosa o campo de pressão tanto estacionário como dependente do tempo.

## Capítulo 5

### Construção de Sistemas de Pré-Vácuo

O presente capítulo traz informações sobre os principais critérios de seleção de materiais destinados à construção de sistemas de pré-vácuo. Apresenta recomendações sobre procedimentos de limpeza de superfícies e cuidados que devem ser tomados em relação as operações de soldagem e usinagem das peças para que o sistema de pré-vácuo em operação tenha o seu desempenho otimizado em termos de pressão final máxima atingida e manutenção da qualidade do vácuo obtido.

#### 5.1. Introdução

A construção refere-se ao conjunto de técnicas que permitem a fabricação de sistemas de pré-vácuo. Segundo Hernandez (2006), os sistemas de vácuo têm características que dependem da etapa de fabricação e operam desde o pré-vácuo até o ultra alto-vácuo, apresentando particularidades que tornam a tecnologia do vácuo nesta área bastante rica tanto em equipamentos como nos seus projetos. Degasperi (2006) descreve que o desempenho dos sistemas de vácuo dependem muito da “história” da fabricação dos materiais utilizados em sua construção, processos de usinagem, técnicas de soldagem e principalmente a procedência dos materiais utilizados, os métodos e produtos químicos utilizados na limpeza das diferentes partes do sistema de pré-vácuo, bem como as taxas de degaseificação específica dos vários materiais e sua metodologia de obtenção e condicionamento.

#### 5.2. Critérios para a seleção de materiais

No trabalho dos projetistas da área de tecnologia do vácuo uma etapa importante é a escolha dos materiais a serem utilizados na construção do sistema de pré-vácuo. Segundo Moutinho et al (1980), os materiais que devemos escolher para a construção de sistemas de vácuo devem satisfazer as condições de elevada resistência mecânica, elevada resistência à corrosão, baixa pressão de vapor; baixa permeabilidade aos gases e vapores, baixa taxa de degaseificação, usinabilidade e soldabilidade.

Conforme a Tabela 5.1, a faixa de temperatura de operação é outro fator determinante para a escolha dos materiais de construção do sistema de pré-vácuo.

Tabela 5.1 Pressão de vapor (Torr) em função da temperatura (°C) para diferentes materiais.

Elemento	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>0</sup>
<b>Ag</b>	574	626	685	752	832	922	1027	1162	1322
<b>Al</b>	685	742	812	887	972	1082	1217	1367	1557
<b>Au</b>	807	877	947	1032	1132	1252	1397	1567	1767
<b>Cu</b>	722	787	852	937	1027	1132	1257	1417	1617
<b>Mo</b>	1592	1702	1822	1957	2117	2307	2527	2787	3117
<b>Ta</b>	1957	2097	2237	2407	2587	2807	3057	3357	3707
<b>Ti</b>	1062	1137	1227	1327	1442	1577	1737	1937	2177
<b>W</b>	2117	2247	2407	2567	2757	2977	3227	3537	3917
<b>Zn</b>	123	147	177	209	247	292	344	408	487

Fonte: [http://www.topometrix.com/learniong\\_vaporelements.asp](http://www.topometrix.com/learniong_vaporelements.asp), acesso em 31/12/2008

De acordo com Trivelin e Bendassolli (2006), alguns metais, cerâmicas, vidros e elastômeros conseguem sustentar o vácuo, apresentar muito baixa taxa de degaseificação e serem quimicamente inertes. Entende-se por taxa de degaseificação a quantidade de gás liberado por segundo e por cm<sup>2</sup> de superfície de um material sob condições de vácuo. Com relação aos vidros, suas vantagens incluem a transparência, baixa taxa de degaseificação, características de isolamento elétrico e o fato de serem quimicamente inertes. O melhor material metálico para sistemas de pré-vácuo é o aço inoxidável. O aço inoxidável possui muito baixa taxa de degaseificação e baixa porosidade, sendo inerte ao ataque de ácido; é fácil de ser limpo e polido para reduzir a área real de superfície que poderia adsorver gases fisicamente ou quimicamente. Latão, Cobre e Alumínio também podem ser utilizados. Aço coberto por níquel diminui a taxa de degaseificação e protege contra a corrosão. O cobre raramente é utilizado por ser mole, sendo fácil de usinar, podendo ser usado na forma de longos tubos de conexão.

O latão é fácil de usinar mas só é utilizado se recoberto com níquel devido a sua elevada taxa de degaseificação. Alumínio endurecido pode ser usado em equipamentos que utilizam pré-vácuo.

De acordo com a NBR – 11816 de 2003 toda tubulação adutora de vaso de pressão deve ser construída do mesmo material da câmara de vácuo. Baseado nesta norma regulamentadora, Lugueta (2008) entende que toda linha de bombeamento, incluindo-se as válvulas, as conexões e outros acessórios devem ser

construídos do mesmo material, preferencialmente aço inoxidável com superfície interna eletropolida.

A Figura 5.1 demonstra como diferentes tipos de tratamento contribuem para alterar a taxa de degaseificação de tubos de aço inoxidável. A partir do gráfico da Figura 5.1 observa-se maior taxa de degaseificação para tratamentos que deixam a superfície dos tubos de aço inoxidável com maior rugosidade, com resíduos oleosos de usinagem, ou mesmo o jateamento com areia abrasiva.

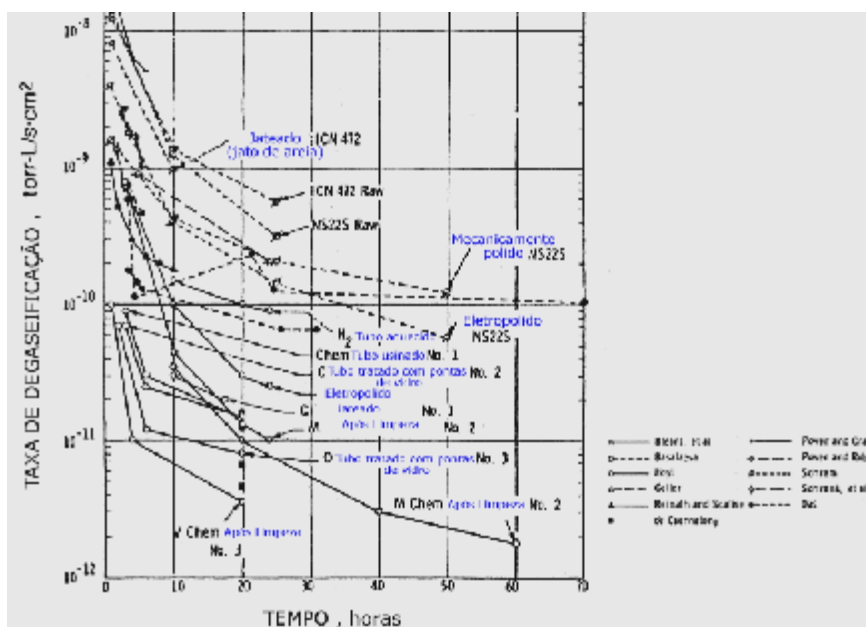


Figura 5.1 – Taxa de degaseificação para tubos de aço inoxidável submetidos a diferentes tipos de tratamentos de superfície. Fonte: Degasperri (2006)

### 5.3 Tratamento de superfícies

Segundo Taborelli (2006), o objetivo do tratamento de superfícies é a limpeza de diferentes materiais para que estejam adequados à montagem e livres de contaminações, de modo que não prejudique a pressão final de nenhum tipo de montagem de sistema de vácuo.

A limpeza mecânica de metais e cerâmicas é a primeira etapa de uma série de operações e consiste em limar/lixar a superfície de peças da usinagem mecânica e máquina laser, para retirada do acúmulo de material contaminante, retirada de óxidos e acabamento superficial dependendo da aplicação.

### 5.3.1 Limpeza de aços inoxidáveis

A limpeza de aços inoxidáveis tem início no desengraxe com álcool isopropílico ou acetona, para a retirada da maior parte das substâncias oleosas presentes na peça ou lavagem com esponja macia e detergente neutro. Em seguida, a peça é submetida a um jato de água abrandada. A água abrandada é aquela que foi submetida um tratamento físico-químico para diminuir a dureza ou teor de sólidos dissolvidos, evitando a formação de carbonatos. Posteriormente a peça é imersa em banho de ultrassom com água desmineralizada e detergente alcalino (pH 14), concentrado 1:80 por 15 minutos ou mais. Quando retirada do banho de ultrassom, a peça é enxaguada com água desmineralizada quente por, no mínimo, 5 minutos.

O armazenamento das peças limpas é feito em estufa com temperatura média de 120°C, caso não seja utilizada de imediato.

É importante ressaltar que o detergente precisa ser totalmente removido para que o material fique livre de contaminações e não prejudique o vácuo das montagens. Se for constatado que a peça em aço inoxidável apresenta algum tipo de corrosão existe dois tipos de utilizadas para que ela seja eliminada.

- Água régia: é uma solução concentrada utilizada quando constatamos elevados níveis de corrosão na peça.

Sua composição, em volume, é três partes de ácido clorídrico para uma parte de ácido nítrico. Para sua utilização basta a imersão da parte oxidada na solução por alguns segundos, haverá a liberação de gás hidrogênio. Em seguida a peça é enxaguada por, no mínimo 3 minutos em água corrente, para a completa retirada do ácido.

- Solução aquosa de ácido clorídrico e ácido nítrico: é uma solução mais diluída, ideal para remover pequenas oxidações. Sua composição, em volume, é: 70% água destilada ou desmineralizada, 15% ácido clorídrico e 15% ácido nítrico. Seu procedimento de utilização é similar ao da água régia, porém com um tempo superior de imersão da peça na solução.

### 5.3.2 Eletropolimento

Outro tratamento de superfície importante é o eletropolimento, que consiste em submeter as peças de aços inoxidáveis como anodo (pólo positivo) num eletrólito

aquoso e aplicar uma corrente contínua durante um tempo determinado de modo a formar uma película polida, uniforme e resistente. Para Morellato (2008), o processo de eletropolimento nivela uma peça seletivamente removendo mais material dos pontos altos da superfície do metal do que dos pontos baixos. Segundo Mainier e Tavares (2008), devido a possibilidade de contaminações químicas e microbiológicas, o uso de aço inoxidável eletropolido, é uma diretriz formal nos projetos para sistemas de vácuo, tubulações e equipamentos voltados às indústrias farmacêuticas e alimentícias.

A Figura 5.2 mostra as diferenças entre os perfis de rugosidade do aço laminado: (a) sem tratamento; (b) submetido a lixamento mecânico; (c) após lixamento mecânico seguido de eletropolimento.

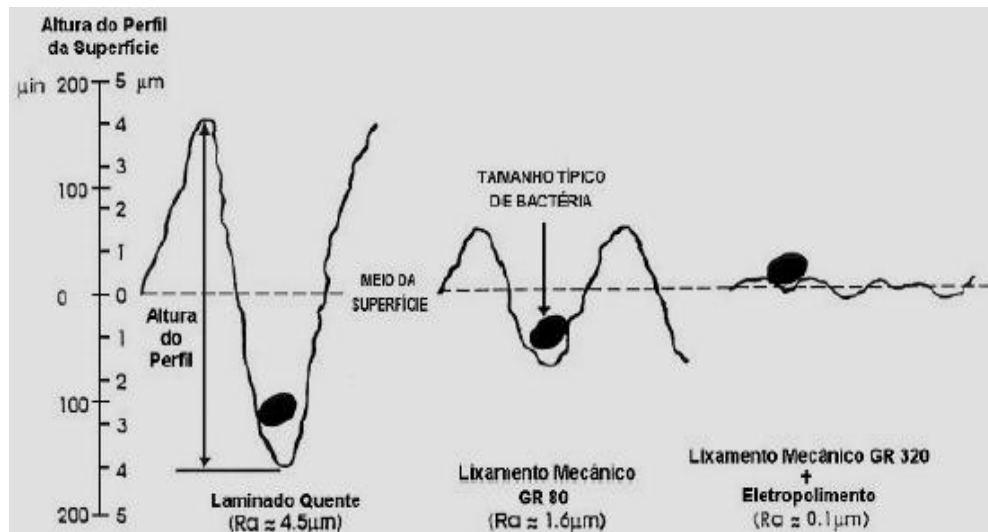


Figura 5.2 – Perfis de rugosidade do aço laminado submetidos a diferentes tratamentos de superfície. Fonte: Morellato (2008).

O processo de eletropolimento contribui para a redução dos microvales que poderiam alojar microorganismos e filmes finos de contaminantes na superfície do aço. É importante também destacar que as superfícies eletropolidas não resistem à abrasão.

Morellato (2008) faz as seguintes recomendações quanto a limpeza de superfícies eletropolidas:

- \* Evitar métodos convencionais de limpeza mecânica como raspagem e lixamento;

- \* A limpeza deve ser realizada preferencialmente utilizando hidrojato com água tratada sem partículas sólidas e, se houver a necessidade, auxiliado por espátulas plásticas ou esponjas macias;

- \* Havendo necessidade de entrar no equipamento, o operador deverá utilizar equipamentos como botas de borracha para proteger a superfície contra agressões;

\* O uso de produtos de limpeza convencionais deverá ser revisto. Morellato relata que em 1980 foram realizados estudos em indústrias de alimentos mostrando que uma superfície de 1,0  $\mu\text{m}$  de rugosidade demora aproximadamente duas vezes o tempo de limpeza de uma cuja rugosidade é de 0,5  $\mu\text{m}$ .

### **5.3.3 Limpeza a vácuo**

A limpeza a vácuo é essencial para alguns tipos de montagens. Neste caso, após a limpeza mecânica e química, as peças são submetidas a aquecimento em forno a vácuo com pressão mínima de aquecimento  $10^{-4}$  mbar. As peças são aquecidas para efeito de degasagem, que consiste na retirada dos gases que estão retidos no material. Estes gases retidos normalmente prejudicam a obtenção de vácuo máximo do sistema. A cada tipo de material, a temperatura final de aquecimento é diferente. No caso do aço inoxidável a temperatura é de  $900^{\circ}\text{C}$ , o cobre devido à mudanças em sua estrutura e da dureza final necessária utiliza-se temperaturas inferiores ao aço inoxidável. O alumínio por apresentar uma baixa temperatura de fusão deve ser aquecido até no máximo  $400^{\circ}\text{C}$ .

Durante o processo de aquecimento a vácuo, os metais devem permanecer uma hora na temperatura máxima de aquecimento para que haja garantia de que todo o gás adsorvido na superfície do metal tenha sido desprendido. Para as ferrites, a temperatura máxima de aquecimento chega a  $650^{\circ}\text{C}$ , com um tempo de, no mínimo, uma hora.

### **5.3.4 Limpeza do Cobre**

Antes da decapagem, a peça de cobre deve passar por uma limpeza com acetona ou álcool isopropílico para a remoção do material oleoso superficial ou lavagem com esponja macia e detergente neutro.

Depois da decapagem, a peça de cobre deve ser imediatamente utilizada para as montagem do sistema de vácuo, pois quanto maior o tempo de exposição ao ar atmosférico, maior será a oxidação da superfície.

A decapagem é essencial, pois o cobre é um tipo de metal que oxida facilmente em presença de umidade, ar atmosférico e calor. Existem dois tipos de soluções para a retirada do óxido superficial do cobre.

- Ácido Fosfórico e Nítrico: esse decapante é utilizado para superfícies mais oxidadas, pois é concentrado. Sua composição consiste de três partes de ácido fosfórico para uma parte de ácido nítrico.

- Ácido Cítrico: essa solução é utilizada na concentração de 15 g/L, para superfícies menos oxidadas, pois é diluída.

Depois de retirar o material oleoso superficial, devemos imergir a peça na solução decapante, deixar agir por cerca de 1 a 3 minutos, retirar da solução e enxaguar por 5 minutos ou mais em água desmineralizada corrente até a retirada completa do ácido. Secar com gás nitrogênio ou toalha de papel macia. O soprador de ar quente não pode ser utilizado para secagem de peças de cobre, pois o calor poderá oxidá-lo.

### **5.3.5 Limpeza do Alumínio**

O procedimento de limpeza do alumínio é simples, o desengraxe não pode ser feito com detergente alcalino e ultra-som, pois isso deteriora o alumínio. Em primeiro lugar, retira-se o material oleoso superficial do alumínio com álcool isopropílico ou acetona. As peças também podem ser lavadas com esponja macia e detergente neutro. O enxágüe nessa fase pode ser com água potável. Para o alumínio, é utilizado apenas um tipo de solução decapante, cuja composição, em volume, é a seguinte: 85% de água destilada, 10% de Ácido Nítrico e 5% de Ácido Fluorídrico.

Para a decapagem a peça é imersa na solução preparada, permanecendo por cerca de 5 minutos, em seguida é retirada e lavada com água desmineralizada por 5 minutos, no mínimo, até a retirada total da contaminação visualmente presente na superfície. Em seguida, a peça pode ser seca com soprador de ar quente ou preferencialmente com fluxo de nitrogênio gasoso.

### **5.3.6. Limpeza de material cerâmico**

O desengraxe de materiais cerâmicos pode ser feito com acetona, álcool isopropílico ou detergente alcalino no ultra-som. Antes da decapagem, a peça pode ser submetida a uma limpeza com detergente alcalino (pH 14) de concentração 1:80 no ultra-som, em seguida enxaguada com água desmineralizada. Em seguida, a cerâmica



deve ser lavada com água desmineralizada a quente, por cerca de 5 minutos. Caso a peça tenha marcas, podemos efetuar uma decapagem de modo que a superfície da mesma fique completamente limpa. A solução para decapagem consiste em 1 parte de ácido fluorídrico, 4 partes de ácido nítrico e 5 partes de água. O tempo de imersão varia de acordo com o estado da peça, porém esse tempo geralmente é mais longo em relação aos metais. O tempo mínimo de imersão na solução decapante é de cerca de 20 minutos. Após a limpeza das cerâmicas, as peças são submetidas a aquecimento em pressão ambiente em fornos chamados muflas até uma temperatura de 1100<sup>0</sup>C, por cerca de uma hora, para retirada de eventuais contaminantes.

### **5.3.7. Limpeza de Ferrite**

A ferrite é um tipo de material que merece atenção especial quanto à limpeza. Não existe limpeza química para ela, portanto sua degasagem em forno a vácuo é essencial, e por isso sua manipulação se faz com luvas. Antes de entrar no forno, a ferrite é limpa com acetona e papel apenas para a retirada de material oleoso presente na superfície.

## **5.4. Operações de soldagem**

Para soldar peças que serão utilizadas em sistemas de vácuo, Moutinho et al (1980), recomendam a soldagem por arco elétrico em presença de Argônio ou a soldagem através de feixe de elétrons sob vácuo. Antes das operações de soldagem, as peças devem passar pelo eletropolimento, seguido do processo de degaseificação por aquecimento a temperaturas entre 250 e 350<sup>0</sup>C. Conforme a Tabela 5.2., a soldagem em vácuo a 1000<sup>0</sup>C apresenta grandes vantagens porque ocorre maior degaseificação das superfícies à temperatura de soldagem. Embora a qualidade possa variar com as aplicações e o nível de vácuo desejado, em geral, não é recomendado o uso de peças fundidas porque podem ter uma determinada porosidade que resultará em fugas de gases de difícil localização e correção.

Tabela 5.2 Taxas de degaseificação de uma câmara de vácuo submetida a diferentes tratamentos.

Condição de tratamento prévio da câmara de aço inoxidável	Tempo de degaseificação (horas)	Taxa de degaseificação ( $\text{mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ )
Câmara com soldas polidas mecanicamente e depois desengorduradas com solvente	4	$1,0 \times 10^{-11}$
Câmara com soldas em vácuo a $1000^{\circ}\text{C}$	4	$2,0 \times 10^{-13}$

Fonte: Moutinho et al, 1980.

Degasperri (2006), Moutinho et al (1980) e Gama (2002) recomendam os seguintes cuidados durante a execução das operações de soldagem das peças que deverão ser utilizadas na construção de sistemas de pré-vácuo:

- Evitar a sobreposição de camadas de solda;
- Procurar evitar a formação de bolsas de ar ou pontos onde se possa acumular contaminações e minimizar a superfície interna total de modo que a degaseificação seja tão baixa quanto possível.
- Quando existem várias regiões soldadas num sistema de vácuo é conveniente dividir o conjunto em setores, que serão testados um por um para verificar a sua estanqueidade.
- Observar o sentido da soldagem dos foles metálicos: a soldagem feita longitudinalmente para os foles hidraulicamente formados, conforme Figura 5.3 (a) e soldagem feita onda a onda para o fole tipo diafragma, segundo Figura 5.3 (b).

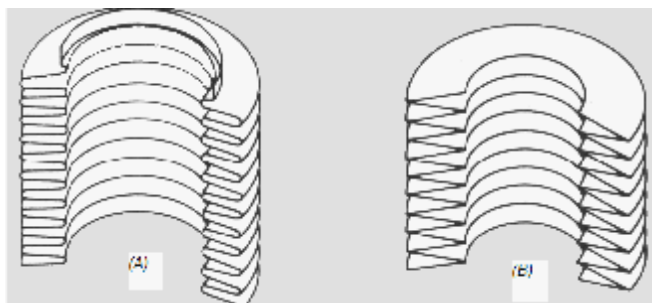


Figura 5.3 – Tipos de foles metálicos: (A) hidraulicamente formado, (B) formado por diafragmas. Fonte: Degasperri (2006).

## 5.5 Qualidade das superfícies usinadas

A qualidade das superfícies usinadas pode refletir na qualidade do vácuo obtido. A norma DIN 8580 define usinagem como a operação que confere à peça forma, dimensões e acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco. Cavaco é uma porção da peça retirada pela ferramenta caracterizando-se por apresentar forma irregular. Segundo Stoeterau (2007), os processos de usinagem são classificados da seguinte forma:

- Usinagem com ferramenta de geometria definida, representada principalmente pelas operações de: tornear, fresar, furar, rosquear, alargar, brochar, serrar e plainar.
- Usinagem com ferramentas de geometria não definida, representada principalmente pelas operações de: retificar, brunir, lapidar, lixar, polir, jatear e tamborear.
- Usinagem por processos não convencionais, representada principalmente pelos processos de remoção: térmicos, químicos, eletroquímicos, por ultra-som, por laser e por jato d'água.

Para Stoeterau (2007), a maioria dos processos de melhoria de qualidade superficial são feitos por usinagem. Assim, a natureza das superfícies metálicas utilizadas em sistemas de pré-vácuo é uma consequência direta do processo de usinagem.

Para o bom desempenho dos sistemas de pré-vácuo é fundamental conhecer e saber avaliar a estrutura das camadas e a forma dos desvios de superfícies dos materiais metálicos usinados que deverão ser utilizados nas montagens, conforme ilustram as Figuras 5.4. e 5.5.

Em geral, a estrutura de uma superfície metálica é constituída das seguintes camadas:

- camada de sujeira à aproximadamente 3nm de espessura;
- camada de adsorção à aproximadamente 0,3 nm de espessura;
- camada oxidada à de 1 a 10 nm de espessura;
- camada deformada à aproximadamente 5  $\mu$ m de espessura.

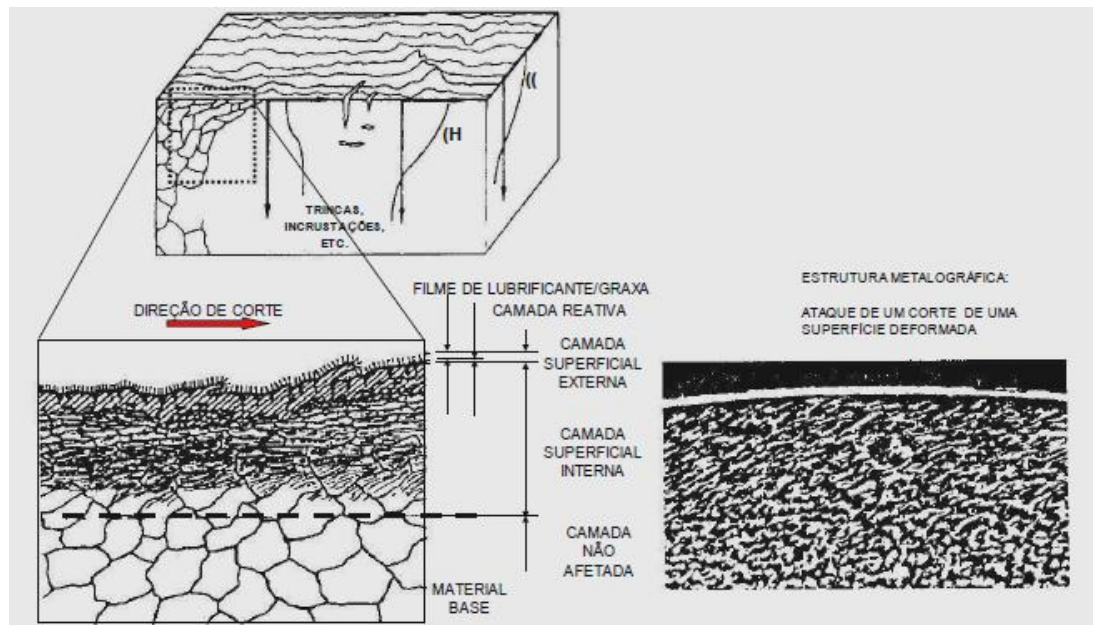


Figura 5.4 – A natureza da superfície metálica usinada. Fonte: Stoeterau (2007).

De acordo com a norma DIN 4760, os desvios de superfícies técnicas podem ser classificados em: não plano ovalado, ondas, ranhuras, estrias, escamas, ressaltos, entre outros, conforme ilustra a Figura 5.5.

DESVIOS DE FORMA (REPRESENTADO NUMA SEÇÃO DE PERFIL)	EXEMPLO PARA OS TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLO PARA A CAUSA DA ORIGEM DO DESVIO
1º ORDEM: DESVIO DE FORMA 	NÃO PLANO OVALADO	DEFEITO EM OLHAS DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS, DEFORMAÇÕES POR FLEÇÃO DA MÁQUINA OU DA PEÇA, FIXAÇÃO ERRADA DA PEÇA, DEFORMAÇÕES DEVIDO A TEMPERATURA, DESGASTE
2º ORDEM: ONDULAÇÃO 	ONDAS	FIXAÇÃO EXCÊNTRICA OU DEFEITO DE FORMA DE LIMA-FRESA, VIBRAÇÕES DA MÁQUINA-FERRAMENTA, DA FERRAMENTA OU DA PEÇA
3º ORDEM: DESVIO DE FORMA 	RANHURAS	FORMA DO GUME DA FERRAMENTA, AVANÇO OU PROFUNDIDADE DE CORTE
4º ORDEM: DESVIO DE FORMA 	ESTRIAS ESCAMAS RESSALTOS	PROCESSO DE FORMAÇÃO DE CAVACO (CAVACO ARRANCADO, CAVACO DE DESALHAMENTO, GUME POSIÇÃO DE CORTE), DEFORMAÇÃO DO MATERIAL POR JATO DE AREIA, FORMA RESSALTOS POR TRATAMENTO GALVÂNICO
5º ORDEM: DESVIO DE FORMA NÃO MAIS REPRESENTÁVEL GRAFICAMENTE EM FORMA SIMPLES	ESTRUTURA	PROCESSO DE CRISTALIZAÇÃO, MODIFICAÇÃO DA SUPERFÍCIE POR AÇÃO QUÍMICA (EX: DECAPAGEM), PROCESSO DE CORROSÃO
6º ORDEM: DESVIO DE FORMA NÃO MAIS REPRESENTÁVEL GRAFICAMENTE EM FORMA SIMPLES	ESTRUTURA RETICULADA DO MATERIAL	PROCESSOS FÍSICOS E QUÍMICOS DA ESTRUTURA DO MATERIAL, TENSÕES E DESLIZAMENTOS NA REDE CRISTALINA.
	SUPERPOSIÇÃO DOS DESVIOS DE FORMA DE 1º E 4º ORDEM	

Figura 5.5 Desvios de forma de superfícies técnicas segundo norma DIN4760. Fonte Stoeterau (2007).

As superfícies das peças usinadas apresentam irregularidades quando observadas em detalhes. Estas irregularidades são provocadas por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça. A importância do estudo do acabamento superficial aumenta na medida em que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas, onde somente a precisão dimensional, de forma e de posição não é suficiente para garantir a funcionalidade do sistema.

O acabamento superficial é fundamental onde houver desgaste, atrito, corrosão, requisitos de boa aparência, resistência à fadiga, transmissão de calor, propriedades óticas, escoamento de fluidos, e superfícies de medição. O acabamento superficial é medido através da rugosidade superficial, a qual é expressa em microns. No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são definidos pelas normas ABNT NBR 6405 de 1985. Trent (2000) aponta a velocidade de corte como sendo uma das variáveis que mais influenciam na qualidade da superfície das peças usinadas. O valor do avanço é citado como sendo a causa entre a diferença de altura dos picos e vales das marcas deixadas por este parâmetro, na superfície de uma peça usinada.

Rossi (2003) sugere que a rugosidade superficial é função do tipo de acabamento da máquina – ferramenta ou do processo de fabricação utilizado. Lima e Corrêa (2008) explicam que após a fabricação de determinada peça usinada utiliza-se, como indicador da qualidade, parâmetros de rugosidade obtidos por instrumentos denominados rugosímetros. Tais instrumentos têm a capacidade de fornecer inúmeros parâmetros a partir de uma mesma varredura sobre a superfície da amostra.

Assim, tem-se como principais parâmetros a rugosidade média ( $R_a$ ), a rugosidade total ( $R_t$ ) e a rugosidade máxima ( $R_y$ ). O primeiro ( $R_a$ ), representa a média entre as alturas dos picos e vales, enquanto o segundo ( $R_t$ ), por sua vez, expressa o maior valor ou distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo constatado dentre aqueles existentes ao longo do comprimento “varrido” e analisado pelo rugosímetro. O terceiro ( $R_y$ ), representa o valor de rugosidade obtido de um total de cinco medidas feitas ao longo de todo o comprimento “varrido” pelo rugosímetro.

Na análise dos desvios da superfície real em relação à superfície geométrica ideal de projeto, podemos distinguir os seguintes erros:

- Erros macro-geométricos ou erros de forma: podem ser medidos com instrumentos de medição convencional.

- Erros micro-geométricos: podem ser medidos com instrumentos especiais tais como rugosímetros, perfilógrafos, microscópio eletrônico de varredura, entre outros.

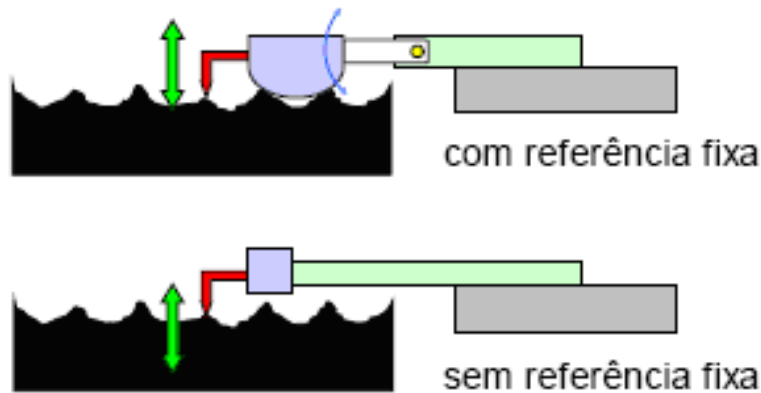


Figura 5.6 – Princípio de funcionamento do perfilômetro, desenvolvido em 1934 por Gustav Schultz para avaliar a qualidade da superfície de peças usinadas. (B) Rugosímetros. Fonte: Stoeterau (2007)

As superfícies reais distinguem-se das superfícies geométricas (teóricas e ideais) através dos erros de forma, sejam eles macro ou micro-geométricos. Quando se mede a rugosidade, o instrumento mostrará o perfil da peça composto da rugosidade e da ondulação:

- Ondulações ou textura secundária: é o conjunto das irregularidades em ondas de comprimento bem maior que sua amplitude. A frequência destas ondas é pequena.
- Rugosidade superficial ou textura primária: é o conjunto das irregularidades repetidas em ondas de comprimento semelhantes à sua amplitude. A frequência destas ondas são bastante elevadas.



Figura 5.7 – Exemplos de rugosímetros utilizados para avaliar a qualidade de superfícies usinadas. Fonte: Stoeterau (2007).

Quando se mede a rugosidade, o aparelho mostrará o perfil composto da rugosidade e das ondulações, como apresentam as Figuras 5.6, 5.7. e 5.8.

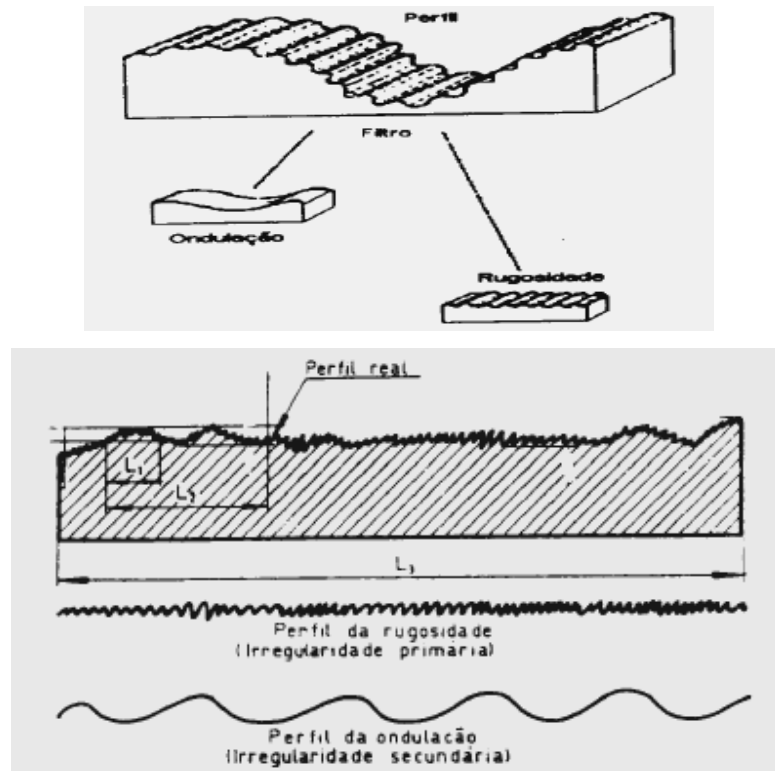


Figura 5.8 – Perfil da peça formado por rugosidade e ondulações.  
Fonte: ABNT NBR 6405-1985.

A Figura 5.9 mostra um desenho com representação de acabamento superficial, cuja descrição pode ser muito importante para compreendermos alguns desvios do comportamento teórico de um sistema de pré-vácuo durante o seu funcionamento.

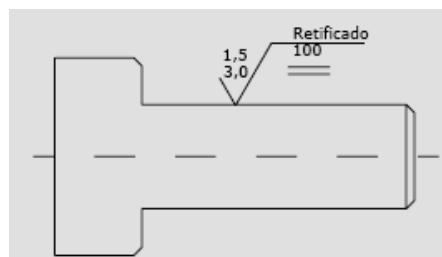


Figura 5.9 – Exemplo de desenho com especificação de acabamento superficial.  
Fonte: ABNT NBR 6405-1985

A leitura do desenho da Figura 5.9 indica as seguintes especificações para a usinagem da peça:

- A superfície deve ser retificada;
- A rugosidade deve estar compreendida entre 1,5 e 3,0  $\mu\text{m}$ ;
- Os sulcos devem ter orientação paralela à superfície mostrada;
- O comprimento de controle é de 100 mm

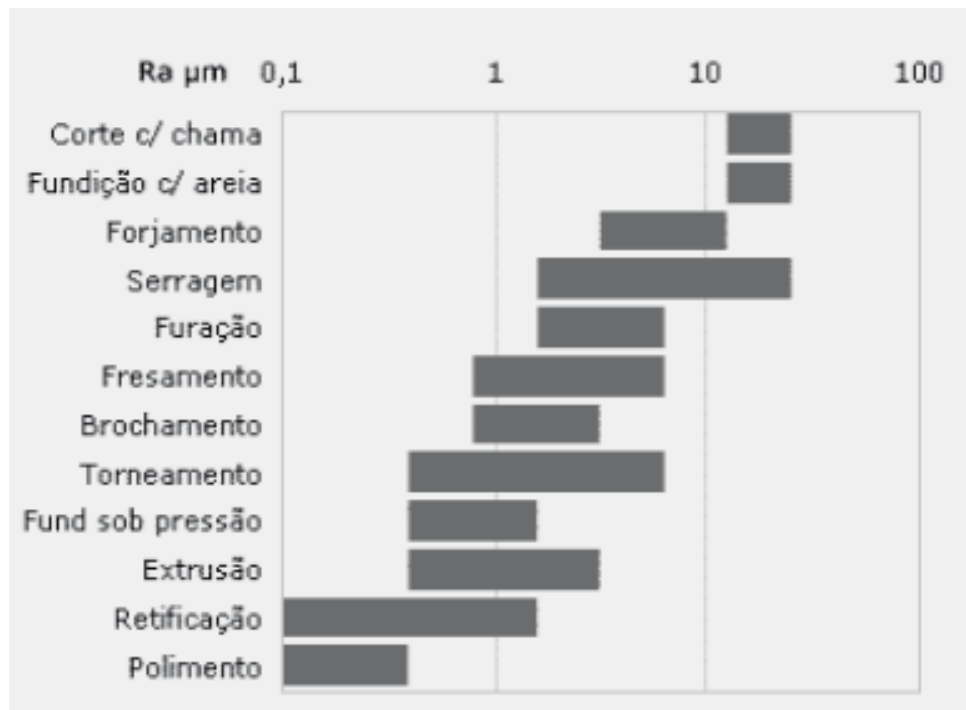


Figura 5.10 – Exemplos de especificações de rugosidade para diferentes processos de usinagem. Fonte: Lima e Corrêa (2008).

A Figura 5.10 apresenta as especificações de rugosidade (Ra) para diferentes processos de usinagem. Verifica-se, a partir do gráfico da Figura 5.10 que, o polimento é uma operação de usinagem importante para melhorar a qualidade superficial do interior das partes dos componentes que fazem parte do sistema de pré-vácuo onde ocorrerão o fluxo de gases e vapores no regime viscoso laminar.

Segundo Kalempa (2005), na interação de gases com superfícies sólidas pode ocorrer o fenômeno de adsorção, que consiste da ligação de partículas a uma superfície. A adsorção deve ser distinguida da absorção, quando o gás penetra através do corpo sólido após a ocorrência do contato. Quando uma molécula atinge uma superfície, ela pode ser adsorvida e também formar vínculos químicos dissociados, tornar-se ionizada ou substituir as moléculas da superfície. O estado das camadas da superfície não depende somente da temperatura, mas também da rugosidade e das impurezas existentes. A quantidade de impurezas presente nas superfícies pode ser variável com o tempo, podendo tornar a ser purificada com impactos das moléculas do gás ou pelo aquecimento da superfície. Em geral, camadas adsorventes podem existir, nestes casos, as interações das moléculas com as superfícies também dependem da distribuição das moléculas incidentes sobre os elementos das superfícies.



De acordo com Kaviski (2006), a dinâmica do espalhamento de moléculas em superfícies, em geral, pode ser classificada em dois tipos de processos: espalhamento direto-inelástico, em que a troca de energia entre as partículas que colidem e o sólido é dominada por colisões diretas e as moléculas não são totalmente acomodadas com o potencial atrativo. A duração desta interação é tipicamente da ordem de um período de vibração; (ii) captura e adsorção, quando as moléculas que colidem perdem completamente a energia cinética inicial e durante um período podem formar vínculos com a superfície, podendo posteriormente serem ativadas termicamente e serem liberadas como gás. Neste caso a partícula pode passar um tempo infinitamente longo na superfície, dependendo da intensidade do potencial governante da interação e da temperatura da superfície.

A distinção entre os dois processos pode ser realizada com base na medida do tempo de residência na superfície e pela investigação das propriedades do movimento translacional das moléculas que saem da superfície, registrando-se a velocidade angular ou a sua distribuição.

## Capítulo 6

### Montagem de Sistemas de Pré-Vácuo

O presente capítulo aborda e ilustra de forma detalhada as principais montagens de sistemas de pré-vácuo que devem ser evitadas, apresenta sugestões para a redução de ruído, vibrações e liberação de óleo da bomba para o ambiente e sistema de vácuo. Descreve uma lista de possíveis falhas e causas associadas ao funcionamento irregular das bombas mecânicas, além de abordar a questão da montagem de flanges, tubulações e conexões comumente utilizadas nos sistemas de pré-vácuo.

#### 6.1 Introdução

A montagem refere-se à disposição e fixação das diferentes partes de um sistema de pré-vácuo, de modo que permita o seu correto funcionamento.

A montagem deve integrar principalmente: a câmara de vácuo, as bombas de vácuo, os medidores de pressão e os componentes auxiliares, de modo que o sistema de pré-vácuo possa operar com pressões entre  $10^3$  e  $10^{-3}$  mbar. Conforme sugerem Moutinho et al (1980) e Gama (2002), a montagem deve ser feita de tal forma que os sistemas de pré-vácuo sejam flexíveis, isto é, suas partes possam ser facilmente modificadas ou parcialmente substituídas em caso de avaria. A utilização de partes desmontáveis e válvulas de vários tipos que permitam isolar, em vácuo, partes do sistema, também é um requisito importante a ser verificado durante a montagem do sistema de pré-vácuo.

#### 6.2 Montagem dos sensores de pressão

Os instrumentos de medição podem ser representados por duas partes interligadas: um sensor e um transmissor. O sensor tem por função básica a medição de variáveis de uma determinada propriedade física, química ou físico-química. A conversão desta informação em um sinal padrão é realizada pelo transmissor. Os diferentes tipos de sinais padrão existentes estão relacionados à tecnologia envolvida na fabricação do transmissor, não tendo nenhuma correlação com o elemento sensor. Um mesmo elemento sensor de medição, como, por exemplo, um medidor do tipo termopar, pode estar conectado a um transmissor analógico ou digital, gerando então sinais distintos utilizados para controle e/ou monitoração do processo.

Para evitar que a conexão inadequada dos sensores de pressão adulterem a medição da pressão, Degasper (2006) recomenda os seguintes procedimentos:

- Evitar a montagem do sensor de pressão muito próximo do sistema de injeção de gases da câmara de vácuo;
- Verificar como a posição ou local escolhido para a montagem do sensor de pressão contribui para modificar a condutância do sistema de pré-vácuo;
- Conhecer muito bem o diâmetro e o comprimento do tubo que conecta o sensor de pressão ao sistema de vácuo, caso contrário corremos o risco de ter a medição da pressão adulteradas;
- Não expor os sensores de pressão a atmosferas contaminadas, ou ainda, explosivas ou corrosivas;
- Observar se existem campos magnéticos, elétricos e condições de temperaturas críticas próximo dos locais onde os sensores de pressão serão instalados.
- Calibrar previamente os sensores de pressão.

### **6.3 Redução das vibrações**

Vibração é qualquer movimento que o sistema de pré-vácuo executa em torno de um ponto fixo. Esse movimento pode ser regular, do tipo senoidal ou irregular, quando não segue nenhum padrão determinado. Segundo Lida (1998), a vibração é definida por três variáveis: a frequência, medida em ciclos por segundo ou Hertz; a intensidade do deslocamento, em centímetros ou a aceleração máxima sofrida pelo equipamento. A terceira variável é a direção do movimento, definida por três eixos triortogonais: x, y e z. Os principais controles de vibrações sugeridos por Lida envolvem: eliminar a fonte de vibrações, isolar a fonte de vibrações, proteger as pessoas que operam ou ficam próximas a fonte de vibrações e conceder pausas no trabalho quando a vibração for contínua.

Currington e Watson (2005) sugerem a incorporação de foles metálicos na tubulações do sistema de vácuo para reduzir a transmissão de vibrações e evitar sobrecargas nas uniões, conforme ilustra a Figura 8.1.



Figura 6.1 – Foles metálicos utilizados para unir a bomba de vácuo à câmara de vácuo e reduzir as vibrações do sistema de pré-vácuo. Fonte: Degasperri (2006)

É recomendável que os foles flexíveis apresentem uma classe de pressões máximas superiores às maiores pressões que podem ser geradas no sistema de pré-vácuo. A instalação das bombas de vácuo em plataformas firmes e bem niveladas é outra forma de reduzir as vibrações do sistema de pré-vácuo. Tubulações flexíveis devem ser utilizadas para simplificar a conexão entre dois componentes do sistema de pré-vácuo ou corrigir problemas de alinhamento entre as peças.

#### 6.4 Redução do ruído

Lida (1998) conceitua ruído como sendo um estímulo auditivo que não contém informações úteis para a execução da operação a ser realizada pelo sistema. Fisicamente, o ruído é uma mistura complexa de diversas vibrações, medido em uma escala logarítmica, em uma unidade chamada decibel (dB). A Tabela 6.1 apresenta os limites de tolerância para ruído contínuo e intermitente.

Tabela 6.1 Limites de tolerância para ruído, segundo a NR 15.

Limite de tolerância para ruído contínuo ou intermitente	
Nível de ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 40 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos

Fonte: Lida (1998).

A avaliação da exposição ocupacional do ruído encontra-se regulamentada no Brasil pela Portaria 3214, NR 15, Anexos 1 e 2, sendo também aplicada a NR 9 que exige ações de controle quando a dose de ruído for igual ou superior a 80 dB, principalmente na faixa de 2000 a 6000 Hz. Por exemplo, para ruídos de 4000 Hz com 100 dB, o tempo máximo de exposição contínua sem riscos é de apenas 7 minutos. Em geral, ruídos mais agudos são menos tolerados pelas pessoas. Assim, ao nível de 100 Hz, a pessoa pode suportar até 100 dB enquanto a 4000 Hz esse nível cai para 85 dB.

Uma etapa importante no trabalho de um projetista de tecnologia do vácuo é a determinação das especificações das bombas de vácuo a serem utilizadas nos sistemas de pré-vácuo. Geralmente os fabricantes de bombas de vácuo especificam os seguintes itens: modelo, a velocidade de bombeamento, a pressão final atingida, potência e número de rotações do motor, faixa de temperatura de operação, quantidade de óleo do cárter ou da caixa de engrenagens da bomba, massa do equipamento e nível de ruído.

A seleção de bombas de vácuo que apresentem menor nível de ruído deve ser considerada durante o projeto, construção e montagem do sistema de pré-vácuo. Normalmente as bombas Roots apresentam níveis de ruído entre 70 e 80 dB enquanto as rotativas de palhetas entre 48 e 60 dB.

O nível de ruído de um sistema de pré-vácuo em operação também pode ser utilizado para a identificação de falhas. Para o caso da bomba rotativa de palhetas, por exemplo, o óleo contaminado com partículas sólidas, a tampa do ventilador do motor danificada, as palhetas desgastadas e a operação com “balastro de gás” podem ocasionar alterações nos níveis de ruídos observados habitualmente.

Se o sistema de pré-vácuo montado apresentar nível de ruído acima de 80 dB é recomendável que ele fique enclausurado em ambiente com isolamento acústico adequado.

## **6.5. Critérios para obtenção de vácuo máximo**

Para obter vácuo máximo após a montagem do sistema de pré-vácuo, Currington e Watson (2005) sugerem que é fundamental observar os seguintes itens:

\* Certificar-se de que a concepção do sistema de pré-vácuo montado não limitou a condutância dos gases e vapores.

\* Conhecer a pressão de vapor de todos os materiais utilizados no sistema de pré-vácuo, incluindo o óleo da bomba. A pressão de vapor dos materiais e fluídos deve ser muito mais baixa em relação ao vácuo máximo especificado na bomba.

\* Verificar se a técnica de medição de vácuo é adequada para a situação do sistema de vácuo projetado.

\* Verificar se os sensores de vácuo estão dispostos na posição mais adequada para realizar a medição.

\* Verificar se os sensores de vácuo não estão defeituosos.

\* Com relação a bomba de vácuo tipo palhetas rotativas, empregar o procedimento a seguir para alcançar o vácuo máximo: isolar a bomba do seu sistema de vácuo; deixar o controle de lastro de gás aberto e operar a bomba por pelo menos, uma hora ou durante uma noite para purgar totalmente o óleo de contaminantes; fechar o controle do lastro de gás; abrir a válvula de isolamento do sistema de vácuo e bombear até o vácuo máximo.

## **6.6 Exemplos de montagens que devem ser evitadas**

Segundo Degasperi (2006), existe um papel crucial da condutância no transporte de gases e suas consequências do ponto de vista do desempenho de sistemas de vácuo. É preciso saber calcular o circuito de vácuo e como associar as condutâncias de modo que a velocidade efetiva de bombeamento não seja muito inferior à velocidade de bombeamento nominal das bombas de vácuo. São apresentados a seguir exemplos, sugeridos por Degasperi (2006), de situações que devem ser evitadas durante a montagem de sistemas de pré-vácuo, particularmente aquelas onde podem ocorrer: leituras errôneas da pressão, contaminação dos sensores de pressão e redução da condutância dos gases no regime viscoso laminar.

### **6.6.1 Situações que causam contaminações nos sensores**

Na Figura 6.2, a montagem à esquerda deve ser evitada, pois os gases emanados do processo podem contaminar a cabeça sensora de pressão enquanto à direita temos uma montagem correta na qual existe um anteparo para proteção do sensor de pressão.

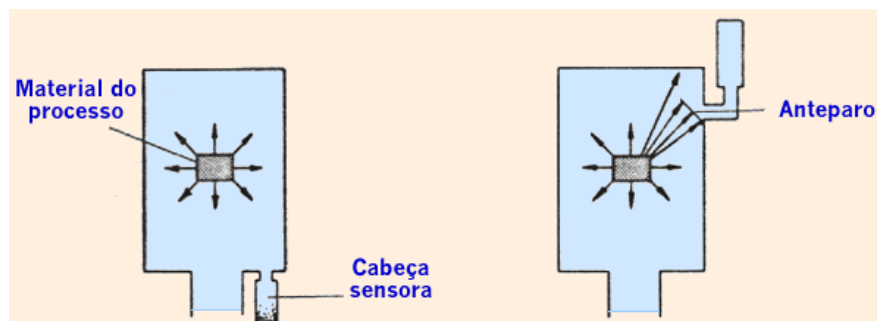


Figura 6.2 – Montagem dos sensores de pressão: à esquerda (incorreta) e à direita (correta). Fonte Degasperri (2006).

### 6.6.2 Situações que causam erros de leitura pelos sensores

Na figura 6.3, à esquerda temos uma situação incorreta de montagem, onde existe uma tubulação de pequeno diâmetro e grande comprimento, que pode dar origem a erros de leitura, devido a baixa condutância da tubulação que une a câmara de vácuo ao sensor de pressão. No lado direito da Figura 6.4 temos uma situação de montagem correta, onde os gases liberados da válvula de admissão não incidem diretamente no sensor de pressão, portanto conduzindo a uma leitura mais representativa.

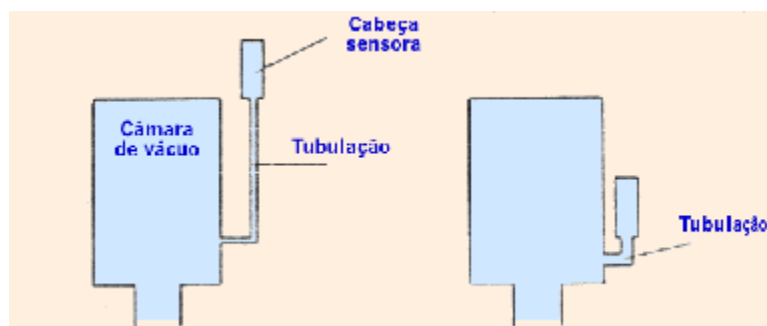


Figura 6.3 – Tubulações que unem a câmara de vácuo ao sensor de pressão: montagem incorreta à esquerda e correta à direita. Fonte: Degasperri (2006).

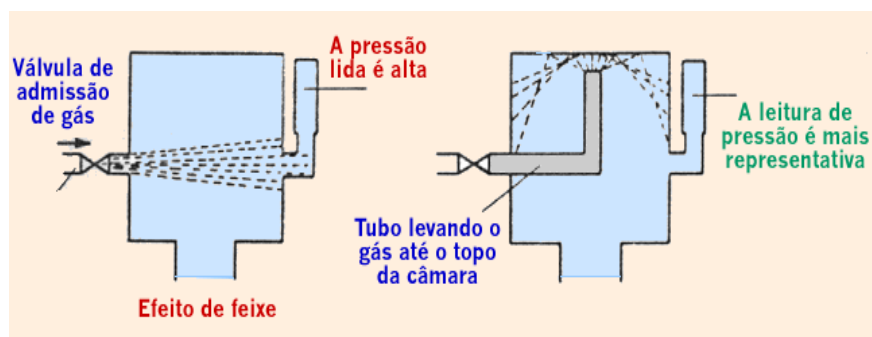


Figura 6.4 – Instalação dos sensores protegendo-os da região de admissão de gases e vapores. À direita temos a montagem correta. Fonte: Degasperri (2006).

### 6.6.3 Situações que limitam a condutância

Conforme os esquemas da Figura 6.5, montagens de sistemas vácuo que apresentam tubulações com grandes comprimentos ou com pequenos diâmetros reduzem a condutância do sistema de pré-vácuo.

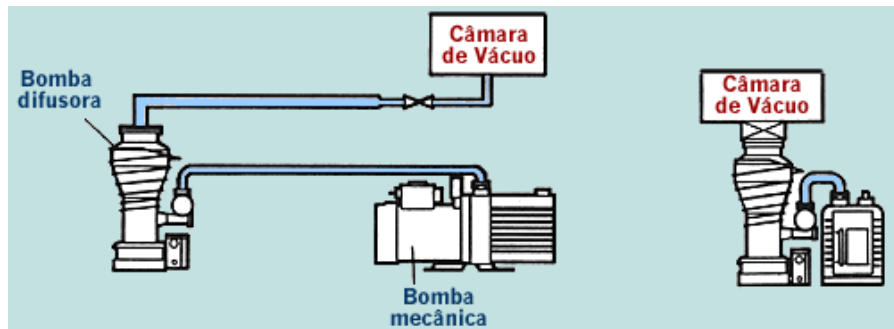


Figura 6.5 - Montagem incorreta (à esquerda) e correta (à direita) de tubulação entre bombas de vácuo. Fonte: Degasperri (2006).

Conforme ilustra a Figura 6.6, bombas mecânicas de vácuo são frequentemente superdimensionadas, resultando em maior investimento inicial, maior consumo de energia e uma velocidade efetiva de bombeamento não otimizada para as necessidades reais do processo. A Figura 6.6 ilustra claramente que apesar do sistema de vácuo à direita apresentar uma bomba de vácuo com velocidade de bombeamento nominal 100 vezes maior em relação ao sistema mostrado no lado esquerdo, suas velocidades efetivas de bombeamento praticamente não diferem uma da outra. No primeiro caso, a velocidade efetiva de bombeamento é 11,21 L/s e no segundo 11,61 L/s.

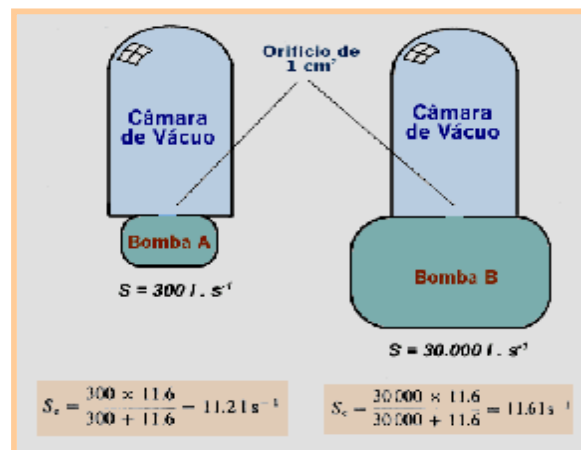


Figura 6.6 – Escolha de bombas de vácuo utilizadas nas montagens de sistemas de vácuo, que opera no regime molecular de escoamento. À esquerda temos uma montagem correta, pois o fator limitante para a velocidade de bombeamento é o diâmetro do orifício e não a velocidade de bombeamento da bomba de vácuo. Fonte: Degasperri (2006).



## 6.7 Componentes auxiliares de proteção às bombas de vácuo

Na Figura 6.7 vemos a descrição das diferentes partes externas que constituem uma típica bomba mecânica de duplo estágio e na Figura 6.9 a representação das diferentes partes internas da mesma.

A bomba rotativa de palhetas apresentada na Figura 6.7 é formada por tubulação de admissão (4), e de descarga (7), um dispositivo de controle do lastro de gás (5) e um seletor de modos (11). Quando a bomba está desligada, uma válvula na admissão veda a entrada e evita assim a aspiração de ar e de óleo para dentro do sistema de vácuo. A bomba possui um sistema retrátil de elevação (3). Podemos inspecionar o nível e o estado do óleo no respectivo cárter através de um visor (8). Este cárter está provido de dois compartimentos de enchimento de óleo (6) e de um bujão de reservatório de drenagem óleo (9). A bomba deve ser montada em apoios de borracha (10) sobre uma placa base.

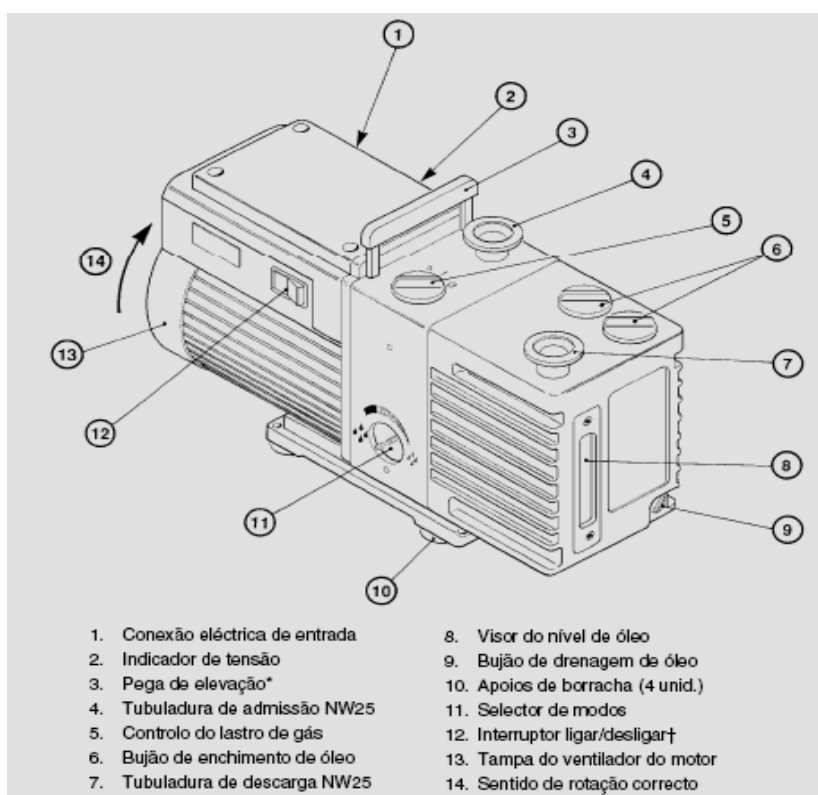


Figura 6.7 . Descrição dos diferentes componentes de uma bomba mecânica de palhetas de duplo estágio, que podem variar de um fabricante para outro. Fonte: Currington e Watson (2005).

Seguindo a ilustração da Figura 6.8, o mecanismo da bomba é acionado diretamente por um motor elétrico monofásico ou trifásico através de um acoplamento

flexível. O motor é completamente selado, e arrefecido pelo ventilador de arrefecimento do motor que dirige o ar ao longo das aletas deste. As bombas são arrefecidas por um outro ventilador fixado no acoplamento do motor.

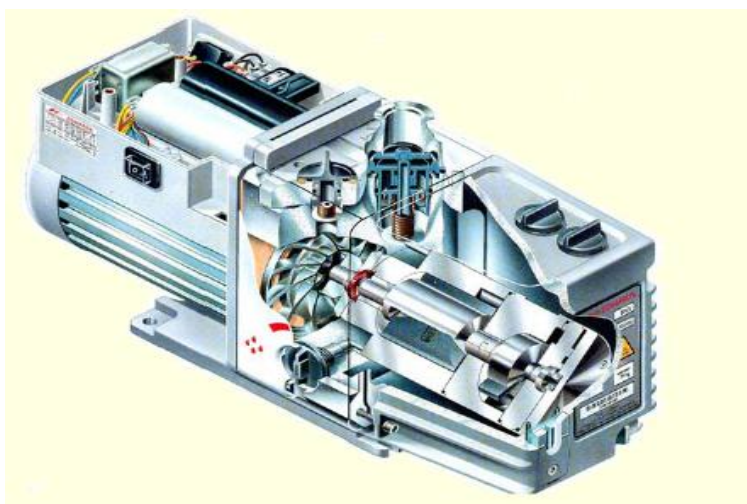


Figura 6.8 Representação das diferentes partes internas de uma bomba de vácuo de palhetas rotativas de duplo estágio. Fonte: Degasperri (2006).

Segundo Currington e Watson (2005), os veios da bomba são de ferro fundido de alta qualidade, seu corpo e o cárter de óleo são de alumínio vazado e todas as superfícies da bomba em contato com os gases bombeados são isentas de cobre, zinco e cádmio. Entre os demais materiais de construção estão os elastômeros à base de fluorcarbonetos, polímeros nitrílicos e silicones quimicamente resistentes, níquel e aço inoxidável.

De acordo com Degasperri (2006), os sistemas de pré-vácuo, que operam desde a pressão atmosférica até pressões da ordem de  $10^{-3}$  mbar, apresentam em geral algumas das seguintes características:

- Câmaras de vácuo com grandes dimensões.
- Atmosfera com poeiras e particulados.
- Vapores corrosivos e agressivos.
- Busca de redução do tempo de processo.
- Processos que exigem grande higiene e atmosferas inertes.

Segundo este autor, muitas das características apontadas acima podem levar a instalação de acessórios e sistemas de proteção às bombas de vácuo, ao processo em vácuo e ao ambiente externo. Estes componentes auxiliares de proteção devem fazer

parte da modelagem do sistema de pré-vácuo, podendo interferir de forma marcante e até decisiva no valor da condutância e assim, no valor da velocidade efetiva de bombeamento. Currington e Watson (2005) sugerem a montagem de alguns acessórios e sistemas de proteção às bombas mecânicas de vácuo, conforme mostra a Figura 6.9 e descrição dada a seguir:

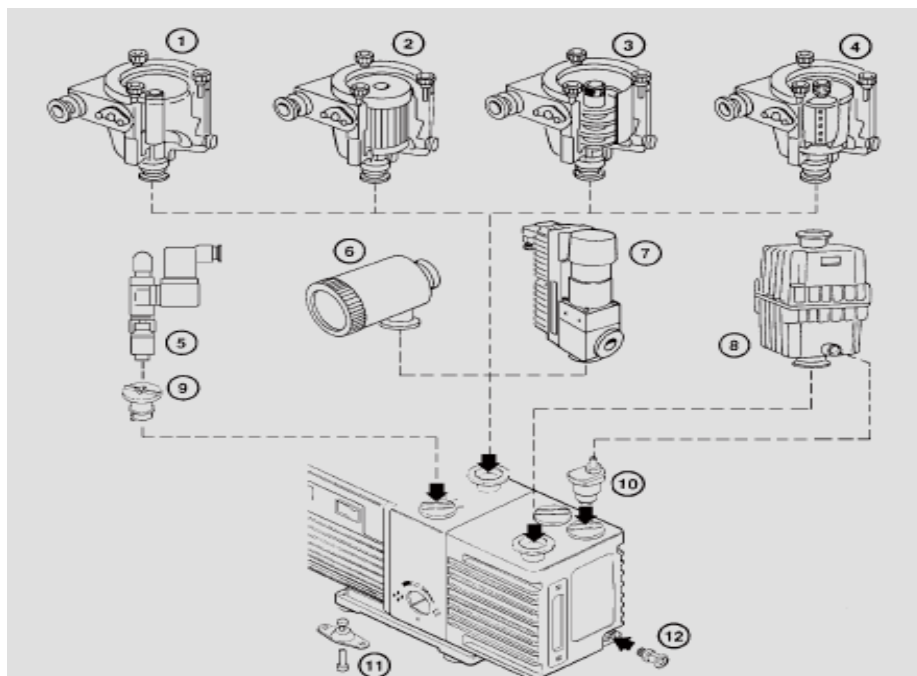


Figura 6.9 Acessórios de proteção das bombas de vácuo de palhetas. Fonte: Currington e Watson (2005).

- (1) Purgador de admissão de gases à bomba: retém gotículas líquidas e impede a sua entrada para o interior da bomba;
- (2) Filtro de poeira de admissão: protege a bomba contra a poeira abrasiva;
- (3) Excicador de admissão: utilizar quando for necessário bombear quantidades limitadas de vapor de água e altas velocidades de bombeamento até uma baixa pressão de vapor;
- (4) Separador químico de admissão: protege a bomba contra gases quimicamente ativos;
- (5) Separador da conduta de entrada: é utilizado para evitar o retorno de vapor de óleo da bomba para dentro do sistema de pré-vácuo;
- (6) Filtro de névoa de óleo da descarga: separa e retém gotículas de óleo na descarga da bomba para evitar uma descarga de névoa de óleo;

- (7) Adaptador de lastro de gás: instalar em lugar do controle do lastro de gás na bomba. O adaptador permite montar uma válvula de lastro de gás comandada por solenóide ou uma alimentação controlada de gás inerte para a bomba;
- (8) Alongador de drenagem de óleo: instalar entre a tubulação de drenagem de óleo da bomba e o reservatório de drenagem de óleo para facilitar a remoção do óleo da bomba;
- (9) Kit de drenagem de óleo por gravidade: instalar entre a tubulação de drenagem do filtro de névoa de descarga e o reservatório de enchimento de óleo da bomba; com o kit instalado, o óleo vindo do filtro de névoa será retornado à bomba quando esta é desligada ou quando o controle do lastro de gás é fechado e não houver gás do processo a ser bombeado;
- (10) Kit do bocal de escape de gases: substitui a flange da descarga.
- (11) Isoladores de vibrações: são acessórios que reduzem as vibrações e o ruído quando a bomba está montada no solo ou num chassis e ajudam a reduzir as tensões quando a área da montagem não é nivelada;
- (12) Válvula de lastro de gás comandada por solenóide: instalar na bomba em lugar do controle do lastro de gás de origem. Esta proporciona controle automático ligar/desligar do lastro de gás e isola a admissão de lastro de gás quando se para a bomba
- (13) Válvula de retenção comandada por solenóide: instalar uma válvula de retenção entre o sistema de pré-vácuo e a admissão da bomba para melhorar a proteção do sistema ao desligar a bomba.

### **6.7.1 Condições de falhas nas bombas mecânicas de palhetas**

Com relação aos problemas de montagem e funcionamento da bombas mecânicas no sistema de pré-vácuo, os mesmos autores citados anteriormente sugerem a seguinte listagem de orientação quanto as falhas e suas possíveis causas:

#### 1ª Falha: A bomba de vácuo não funciona:

- O fusível de alimentação elétrica fundiu.
- A tensão de alimentação elétrica não corresponde à do motor.

- A tubulação da descarga ou filtro de descarga estão obstruídos.
- A temperatura do óleo é inferior a 12<sup>o</sup>C.
- O óleo é muito viscoso.
- O óleo está contaminado.
- A bomba está travada após armazenamento prolongado.
- A bomba foi deixada parada após bombear contaminantes e esta travada.
- O motor está danificado.

2ª Falha: A bomba está ruidosa:

- A tampa do ventilador do motor está danificada.
- Algumas partes do motor estão gastas.
- O óleo está contaminado com partículas sólidas.
- O acoplamento do motor está solto.
- Uma das palhetas está raspando nas partes internas da bomba.

3ª Falha: A bomba não alcançou o vácuo máximo especificado:

- A técnica de medição de pressão ou o manômetro não são adequados ou fornecem uma indicação de pressão incorreta. Por exemplo, um medidor Pirani, quando contaminado pode indicar uma pressão várias vezes superior à pressão efetiva do sistema.

- O óleo da bomba de vácuo apresenta especificação incorreta.
- Existe fuga no sistema de vácuo.
- O seletor de modos e o controle do lastro de gás estão em posições incorretas.
- O nível de óleo está baixo ou apresenta contaminações.
- Os acessórios de vácuo estão sujos ou danificados.
- O filtro de admissão está obstruído.
- A bomba não aqueceu.
- O veio do motor gira no sentido errado.
- A válvula de admissão de gases não abriu.

4ª Falha: A temperatura da superfície da bomba é superior a 100<sup>o</sup>C:

- A temperatura ambiente é muito alta.
- A alimentação de ar de arrefecimento é insuficiente, está obstruída ou é demasiadamente quente.

- A tensão de alimentação elétrica é muito alta.
- O filtro de descarga ou a tubulação de descarga estão obstruídos.
- O óleo encontra-se abaixo do nível mínimo.
- O óleo da bomba está fora de especificação.
- O gás de processo está aquecido ou a sua vazão é muito alta.
- Pressão de admissão alta e constante e temperatura ambiente alta. Se a pressão for permanentemente superior a 100 mbar, a temperatura da superfície da bomba pode atingir 115<sup>0</sup>C quando a temperatura ambiente estiver em torno de 40<sup>0</sup>C.

5ª Falha: o vácuo não se mantém constante depois de desligada a bomba:

- O controle do lastro de gás está aberto.
- A sede da válvula de admissão está danificada.
- A válvula de admissão não foi fechada.
- Os anéis de vedação estão deteriorados.
- Os “O”- rings estão danificados ou ausentes.

6ª Falha: A velocidade de bombeamento é baixa:

- As tubulações de ligação apresentam diâmetro muito pequeno.
- As tubulações de ligação são muito longas.
- O filtro de admissão está obstruído.

7ª Falha: Há uma fuga externa de óleo:

- A vedação do exterior do veio está gasta ou danificada.
- As juntas do cárter do óleo estão deterioradas.
- Há uma fuga de óleo no controle do lastro de gás.
- Há uma fuga de óleo no reservatório de drenagem.
- Há uma fuga de óleo no visor.

### **6.7.2 Montagens e limpeza das partes externas**

Na Figura 6.10 vemos o conjunto do visor de óleo do cárter da bomba e sua correta seqüência de montagem.

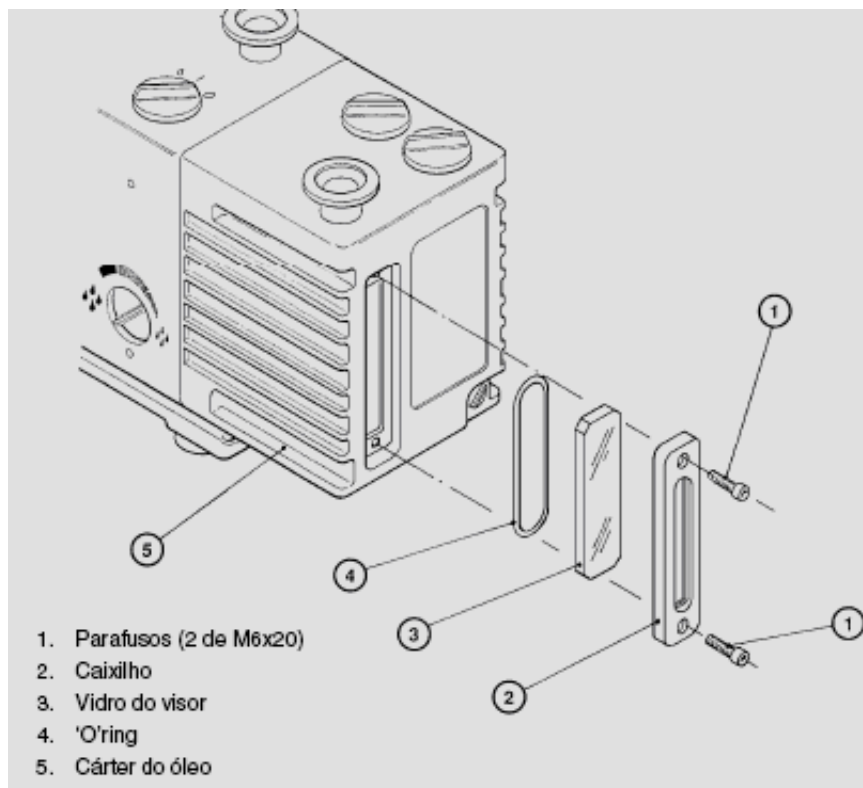


Figura 6.10 – Seqüência de montagem das peças que fazem parte do conjunto do visor de óleo da bomba mecânica de palhetas. Fonte: Currington e Watson (2005).

A limpeza do visor do nível de óleo deve ser feita da seguinte maneira: drenagem do óleo; desapertar os dois parafusos (1) e remover o caixilho (2), o vidro do visor (3) e o “O”-ring (4) do cáter de óleo; limpar os parafusos, o caixilho e o vidro com uma solução de limpeza adequada; limpar o “O”-ring com um pano limpo, seco e sem pêlos; limpar o resíduo de óleo presente no visor no cáter do óleo com um pano; tornar a montar o “O”-ring, o vidro e o caixilho e fixá-los com os dois parafusos; tornar a encher o cáter de óleo da bomba e verificar se o visor não tem fugas de óleo. Na Figura 6.11 vemos o controle do filtro de admissão de gases à bomba de vácuo. Sua inspeção e limpeza deverá ser realizada após desligar o sistema de vácuo, evitando o contato do “O”-ring com a solução de limpeza. O filtro e o anel centralizador deverão ser lavados com a solução de limpeza e posteriormente passar por um processo de secagem. Se necessário, limpar o “O”-ring com um pano limpo, seco e sem pêlos. Montar novamente o conjunto à tubulação de admissão da bomba.

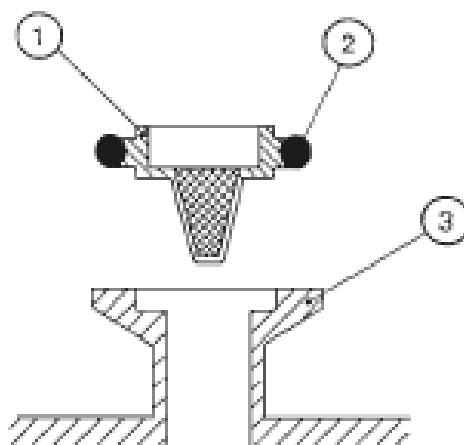


Figura 6.11 Controle do filtro de admissão: (1) conjunto do anel centralizador; (2) "O"-ring; (3) tubo de admissão. Fonte: Currington e Watson (2005).

Conforme ilustra a Figura 6.12, os mesmos cuidados devem ser tomados com relação à montagem, inspeção e limpeza do controle do lastro de gás e tampa e caixa do ventilador do motor. Se a tampa e a caixa do ventilador do motor não forem mantidas limpas, a circulação do ar sobre o motor pode ser dificultada e a bomba pode sobreaquecer.

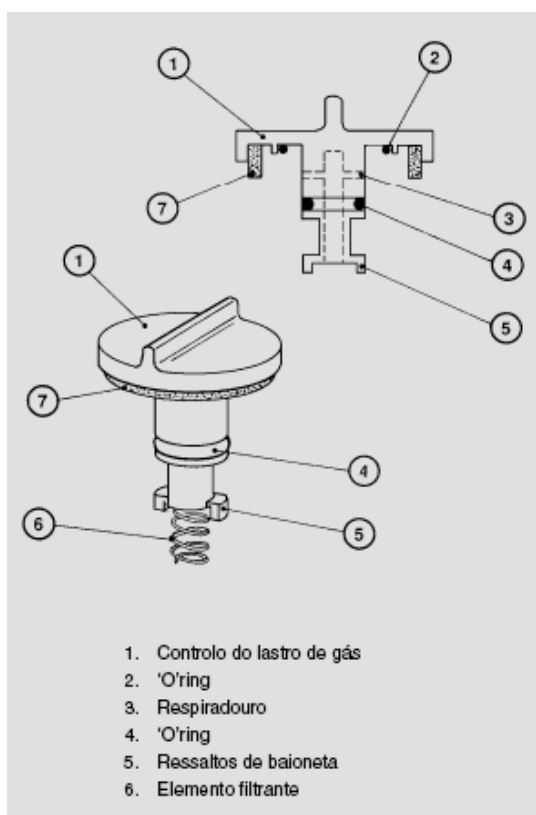


Figura 6.12 Componentes do controle do lastro de gás. Fonte: Currington e Watson (2005).



## 6.8 Montagem de ligações desmontáveis

Conforme apresenta a Figura 6.13, todas as ligações desmontáveis apresentam em comum a existência de duas superfícies polidas entre as quais é colocado um anel de vedação, sendo depois comprimidas uma sobre a outra

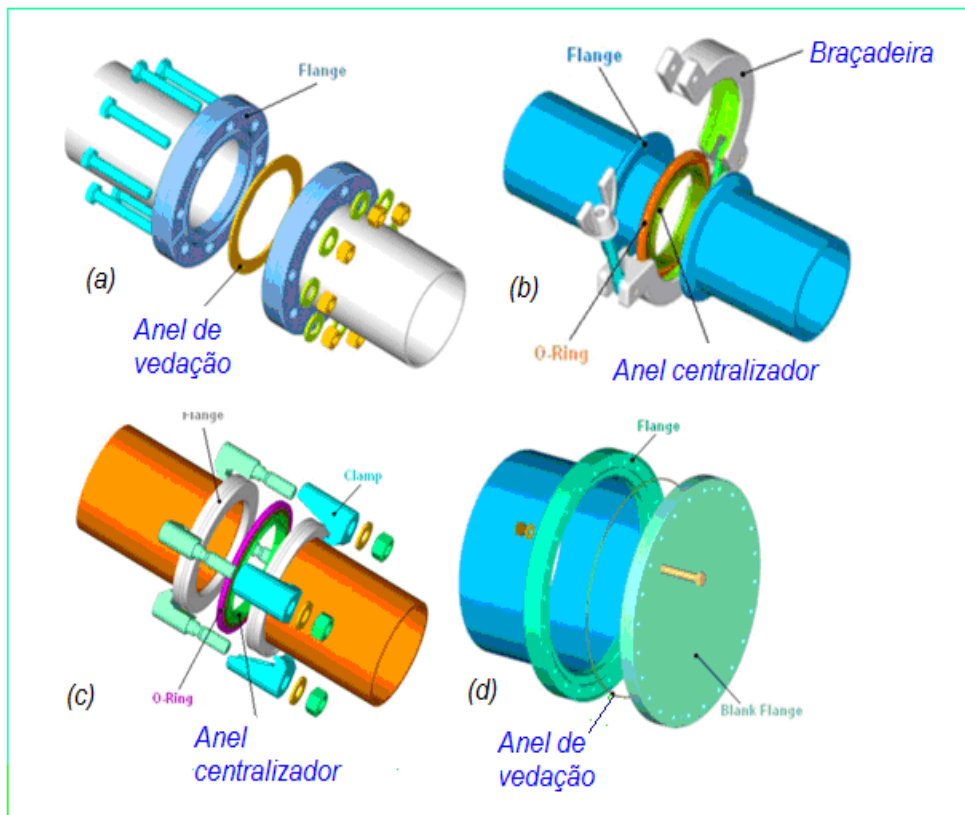


Figura 6.13 Detalhamento da montagem dos componentes auxiliares do sistema de vácuo: (a) CF/Conflat 16-400mm; (b) ISO-KF 0 – 50 mm; (c) ISO-K 63 -630 mm; (d) Wire Seal Flange 250 – 600 mm. Fonte: [www.nd.edu/~nsl/Lectures/urls/Introduction\\_to\\_vacuum\\_gauges.pdf](http://www.nd.edu/~nsl/Lectures/urls/Introduction_to_vacuum_gauges.pdf), acesso em 15/01/2009.

Segundo Moutinho et al (1990), no projeto de ligação é necessário prever a profundidade da cavidade, isto é, o volume em que o anel vai ser apertado, tendo em consideração que os elastômeros são praticamente incompressíveis. O volume da cavidade tem de ser igual ou de preferência superior em 10% ao volume do anel; o diâmetro interno do anel deve coincidir com o diâmetro interno da cavidade mas a sua profundidade tem de ser inferior ao diâmetro da corda que forma o anel. Os anéis de vedação podem ser reutilizados, desde que não estejam excessivamente deformados. Para a sua limpeza passa-se levemente um pano embebido em solvente orgânico. Em qualquer um dos tipos indicados a superfície apresentada pelo anel para o lado do vácuo é muito pequena, de modo que o efeito da degaseificação é desprezível, pelo que usando anéis de borracha natural ou neopreno se pode atingir  $10^{-6}$  mbar e com um

material denominado “viton”  $10^{-9}$  mbar. O elastômero neopreno e a maioria das borrachas podem ser utilizadas em sistemas de vácuo que não atinjam temperaturas superiores a  $100^{\circ}\text{C}$ . Para sistemas que tenham de suportar temperaturas mais elevadas é conveniente utilizar “viton”, que tem uma pressão de vapor mais baixa e pode ser aquecido até  $250^{\circ}\text{C}$ . Em aplicações especiais é necessário eliminar os hidrocarbonetos e outros gases devidos à presença de elastômeros ou aquecer o sistema a temperaturas superiores a  $300^{\circ}\text{C}$  para degaseificar as paredes. Nestes casos recorre-se a anilhas de vedação metálicas, principalmente de cobre, alumínio, prata, ouro ou índio. Quando se utiliza uma anilha metálica, usa-se a ligação tipo flange em que uma das partes tem uma saliência de secção triangular e a outra uma reentrância. A anilha de metal, colocada entre as flanges, é esmagada por aperto. Cada anilha só pode ser usada uma vez. Outros componentes importantes na montagem dos sistemas de pré-vácuo são as válvulas. Elas são definidas como dispositivos destinados a estabelecer, controlar e interromper o fluxo em uma tubulação. São acessórios muito importantes nos sistemas de condução, e por isso requerem cuidados na sua especificação, escolha e instalação. A Figura 6.14 apresenta exemplos de válvulas manuais que podem ser utilizadas em sistemas de pré-vácuo.



Figura 6.14 Exemplos de válvulas manuais que podem ser utilizadas na montagem de sistemas de pré-vácuo. Fonte: [www.rcequipamentos.com.br/produtos.html](http://www.rcequipamentos.com.br/produtos.html), acesso em 19/01/2009.

A válvula manual é acionada pelo operador, ou seja, este tipo de instrumento não pode receber solicitações de comando à distância. Normalmente, associado a estas válvulas, podem ser instaladas chaves de posição que indicam se ela está aberta ou fechada. A válvula solenóide é atracada/desatrada por meio de um sinal elétrico. Este sinal energiza uma bobina interna que provoca um campo magnético capaz de deslocar o pistão da válvula, abrindo ou fechando a mesma. Estas válvulas funcionam em duas

posições: totalmente aberta ou totalmente fechada. A sua especificação normalmente aberta ou normalmente fechada está baseada na segurança do processo e na mecânica do posicionador da válvula, sendo atendida quando há falta de alimentação elétrica. De um modo geral, as válvulas classificam-se em:

- \* Válvulas de bloqueio: são válvulas que se destinam primordialmente a estabelecer ou interromper o fluxo, isto é, só devem funcionar completamente abertas ou completamente fechadas. São exemplos de válvulas de bloqueio: válvulas de gaveta, válvulas de macho, válvulas de esfera, válvulas de comporta.

- \* Válvulas de regulação: são destinadas especificamente para controlar o fluxo, podendo por isso trabalhar em qualquer posição de fechamento. São exemplos de válvulas de regulação: válvulas globo, válvulas agulha, válvulas de controle, válvulas borboleta e válvula diafragma.

- \* Válvulas que permitem o fluxo em um só sentido, como as válvulas de retenção, válvulas de retenção e fechamento e válvula de pé.

- \* Válvulas que controlam a pressão a montante, com as válvulas de segurança e de alívio, válvulas de excesso de vazão e válvulas de contrapressão.

- \* Válvulas que controlam a pressão a jusante, como as válvulas redutoras e reguladoras de vazão e as válvulas de quebra-vácuo.

Nos sistemas de pré-vácuo, geralmente são utilizados válvulas que não precisam de grande condutância como as válvulas de diafragma. Na posição aberta o diafragma de borracha está esticado e permite a passagem de gases ou vapores através da válvula. Na posição fechada o diafragma é comprimido contra a parte inferior e corta a passagem de gases.

Os diafragmas podem ser feitos de vários materiais, sendo usados com frequência o teflon (politetrafluoretileno) e o neopreno (elastômero). Quando for necessário introduzir gases no sistema de pré-vácuo é recomendado o uso de válvulas de agulha. Ela apresenta uma haste de ponta cônica afilada que entra numa sede também cônica até vedar completamente o orifício. Válvulas tipo gaveta, borboleta e prato também podem ser utilizadas em sistemas de pré-vácuo. A válvula de gaveta apresenta grande condutância e uma pequena distância entre flanges. No pré-vácuo permite um fácil acesso ao sistema, facilitando a introdução de uma pequena aparelhagem, durante um tempo relativamente curto. Devido à extensão do percurso da gaveta, é necessário um desenho apropriado e cuidadoso processo de fabricação para que a vedação seja satisfatória. A válvula tipo borboleta, quando completamente

aberta, apresenta uma boa condutância, tendo ainda a vantagem de ter em geral menos superfície para ser degaseificada, e uma distância entre flanges menor que a da válvula de gaveta. A válvula de prato é constituída por um prato com anel de vedação que na posição de fechado fica comprimido contra uma flange. Estas válvulas aparecem associadas aos condensadores colocados sobre as bombas de difusão. O percurso vertical do prato tem de ser suficiente para que a condutância da válvula, quando aberta, não diminua muito a velocidade de bombeamento. A título de ilustração, vemos na Figura 6.15 a representação de um sistema de pré-vácuo empregado para a movimentação de peças, que utiliza válvulas manuais e eletroválvulas.

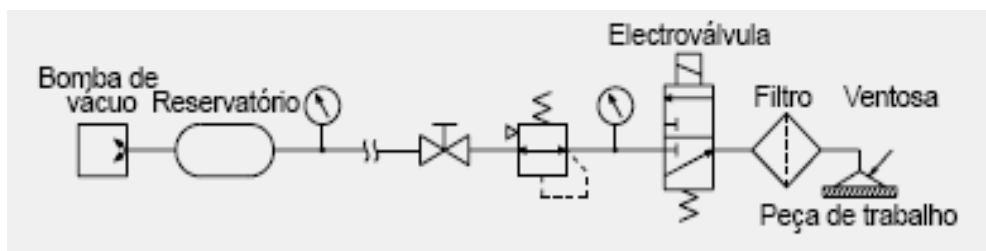


Figura 6.15 Exemplo de sistema de pré-vácuo para a movimentação de peças que utiliza eletroválvulas e válvulas manuais. Fonte: SMC (2008).

A figura 6.16 apresenta alguns exemplos de componentes metálicos utilizados nas montagens das ligações desmontáveis dos sistemas de pré-vácuo.

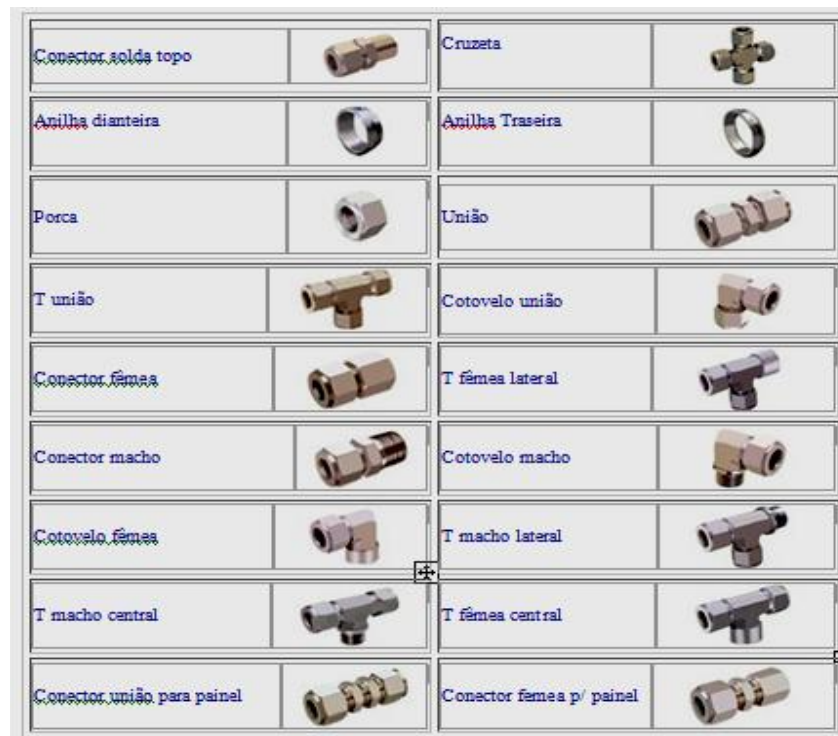


Figura 6.16 Exemplos de peças utilizadas nas montagens de ligações desmontáveis dos sistemas de pré-vácuo. Fonte: [www.rcequipamentos.com.br/produtos.html](http://www.rcequipamentos.com.br/produtos.html), acesso em 19/01/2009.

É aconselhável escolher um número limitado de tipos de ligações desmontáveis e manter o mesmo tipo de ligações em todos os sistemas. A manutenção da uniformização, ao longo do tempo, permite uma estocagem de peças, parafusos, anéis de vedação, válvulas, entre outros, que respondem às necessidades de diferentes tipos de montagens com custos menos onerosos.

### **6.9 Critérios para escolha dos vacuômetros a serem montados no sistema de pré-vácuo.**

Segundo Gama (2002), a tecnologia do vácuo entende-se até cerca de 19 ordens de grandeza abaixo da pressão atmosférica, isto é, aproximadamente  $10^{-16}$  mbar. Não existem medidores para medir intervalos tão amplos de pressão. Na prática, existem vários medidores para diferentes regiões. Cada tipo de medidor é sensível à variação da pressão numa dada região. Quando vamos escolher um medidor para uma determinado propósito devemos levar em consideração os seguintes critérios: (i) a região de pressão para a qual o medidor é desejado; (ii) se queremos medir a pressão total ou parcial; (iii) se a leitura do medidor pode ser dependente do tipo de gás ou não; (iv) a precisão da medida desejada e tipo de montagem a ser efetuada.

Na região do pré-vácuo os principais medidores de pressão são: coluna de mercúrio, vacuômetro de Bourdon, vacuômetro de membrana, medidor de membrana capacitiva e vacuômetros de condutividade térmica. A baixas pressões, a condutividade térmica do gás residual é dependente da pressão, e como tal pode ser usada para medidas de vácuo. São utilizadas frequentemente o medidor Pirani e os medidores tipo termopar. No medidor tipo termopar a variação de temperatura de um filamento é medida diretamente por um termopar. Os termopares são menos frágeis que o Pirani, porém são menos sensíveis às variações de pressão.

Neste trabalho utilizamos a coluna de mercúrio, que opera desde a pressão atmosférica até aproximadamente 2,0 mbar e o medidor Pirani. Este último, é formado por um tubo metálico ou de vidro, e um filamento aquecido instalado no centro do tubo. Mede-se a variação da resistência elétrica deste filamento que está a temperatura de  $120^{\circ}\text{C}$ . A remoção do calor do filamento faz-se por meio dos átomos e moléculas que colidem com o filamento. Estes podem receber energia térmica do filamento e perderem-se em choques com a parede do tubo que está a temperatura mais baixa.

Conforme apresenta a Figura 6.17, o sensor Pirani pode medir pressões até  $10^{-4}$  mbar, dependendo do modelo do equipamento.

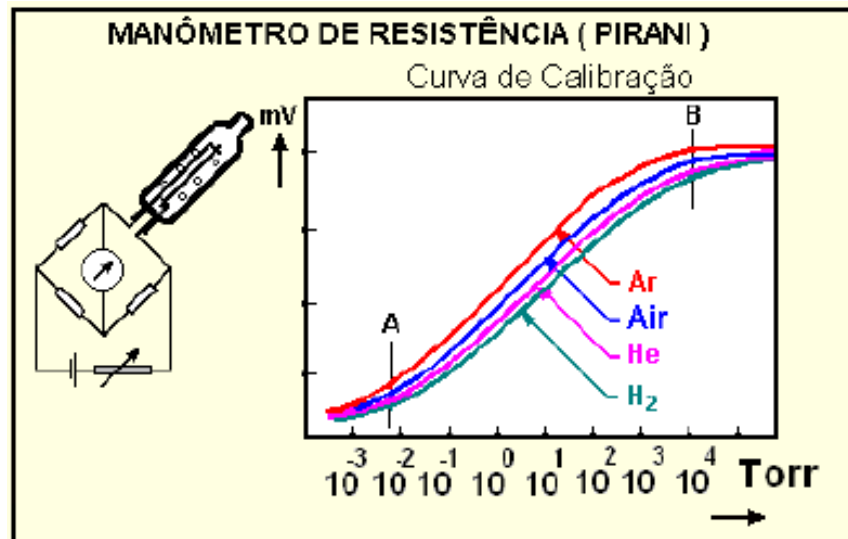


Figura 6.17 À esquerda temos a representação do princípio de funcionamento de um medidor Pirani e à direita podemos observar as curvas de calibração, cujo perfil depende da natureza físico-química do gás. Fonte: MET – Laboratório de Filmes Finos (2008).

O vacuômetro de Bourdon baseia-se no mesmo princípio que os barômetros de pressão atmosféricos de Bourdon. São construídos com um tubo em forma de arco flexível fechado numa extremidade e ligado ao sistema de vácuo na outra. A curvatura do tubo varia com a pressão. Estas variações são indicadas num mostrador por meio de um ponteiro ligado à extremidade fechada. Tratam-se de aparelhos pouco precisos e são usados na região correspondente ao vácuo primário.

O medidor de membrana capacitiva é outro tipo de sensor de vácuo que mede desde a pressão atmosférica até  $10^{-6}$  mbar, com precisão de 0,05% a 3%. Consiste basicamente de uma placa sensora isolada do meio por uma membrana sensível. A variação de pressão exercida pelo meio da membrana, provoca uma deflexão desta em relação à placa sensora. Se mantivermos o dielétrico constante, teremos uma variação da capacidade proporcional à pressão exercida sobre a membrana. O circuito eletrônico básico usado para a medida de variação da capacidade, é um oscilador de corrente contínua onde um condensador é o próprio elemento sensor. Assim, pela variação da capacidade deste, teremos uma variação da frequência do oscilador, que é convertida em tensão. As vantagens deste tipo de medidor incluem: robustez, vida útil longa, maior sensibilidade, maior faixa de operação e pode ser utilizado em temperaturas elevadas e até em alguns tipos de ambientes que bombeiam gases e vapores corrosivos.

## Capítulo 7

### Caracterização de Sistemas de Pré-Vácuo

O presente capítulo descreve a importância da caracterização dos sistemas de pré-vácuo dedicados à pesquisa e atividade industrial. Aborda também a necessidade da identificação e caracterização dos elementos estáticos e dinâmicos que podem interferir na eficiência do bombeamento dos gases e vapores no regime de escoamento viscoso laminar, bem como os métodos e esquemas dos sistemas de pré-vácuo utilizados para a determinação da velocidade de bombeamento das bombas mecânicas. Estes esquemas são a base para o arranjo experimental do estudo de caso desenvolvido no último capítulo da presente dissertação.

#### 7.1 Introdução

A caracterização envolve a determinação do que constitui o caráter distintivo do sistema de pré-vácuo projetado, fabricado e montado. Envolve a dinâmica do processo e refere-se às medições das particularidades que caracterizam um determinado sistema de pré-vácuo em funcionamento. Segundo Valdman et al (2008), a dinâmica dos processos é o estudo dos estados transientes de comportamento com o tempo das variáveis dos processos quando ocorrem alterações súbitas ou não nas condições de operação que afetam a sua eficiência e o seu andamento. Mudanças de pressões, temperaturas, condutâncias, composição de correntes de entrada, bem como perdas de energia e eficiência nos equipamentos são variáveis que interferem no desempenho global de um sistema de pré-vácuo projetado originalmente para condições fixas e estáveis de operação.

Podemos identificar e caracterizar elementos estáticos no sistema de pré-vácuo, isto é, tudo o que não varia durante o processo de bombeamento de gases e vapores, mas que pode interferir significativamente no seu desempenho se não forem devidamente identificados e quantificados, principalmente os seguintes fatores: volume da câmara de vácuo, volume interno das tubulações, diâmetro e comprimento das tubulações, área interna do sistema onde podem ocorrer adsorção de gases, geometria interna da câmara de vácuo, geometria interna do circuito de vácuo, entre outros.

Como exemplo, temos a Figura 7.1, que apresenta exemplos de como a geometria da montagem do equipamento pode contribuir para aumentar ou reduzir o desempenho do sistema de vácuo.

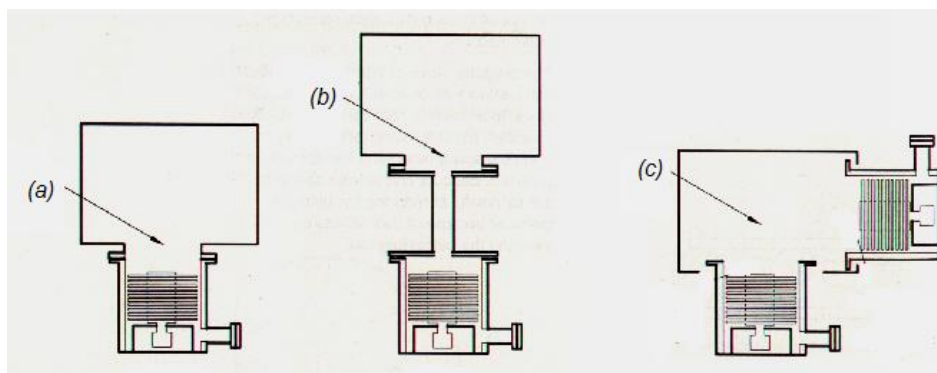


Figura 7.1 Exemplos de sistemas de vácuo: (a) de alta condutância; (b) de baixa condutância; (c) de condutância infinita. Fonte: Degasperri (2006).

A identificação e caracterização dos elementos dinâmicos do sistema de pré-vácuo considera os fenômenos físicos e físico-químicos em sua evolução com o tempo. Assim, por exemplo, temos interesse em conhecer como variam, em função do tempo de bombeamento a uma determinada velocidade efetiva de bombeamento: a pressão, o número de moléculas de gases presentes na câmara de vácuo, a natureza dos gases presentes na câmara de vácuo, a temperatura de uma determinada região ou componente do sistema de vácuo, entre outros.

## 7.2 Importância da caracterização dos sistemas de vácuo

Segundo Fonseca e Matos (2006), cada vez mais processos tecnológicos requerem atmosferas controladas a pressões muito baixas. Estas pressões podem atingir valores  $10^{13}$  vezes inferiores à pressão atmosférica.

Tabela 7.1. Exemplos de aplicações da região do vácuo em função da faixa de pressão.

ULTRA < $10^{-7}$ mbar.	ALTO VÁCUO $10^{-7}$ - $10^{-4}$ mbar.	VÁCUO FINO $10^{-2}$ - 1 mbar.	VÁCUO GROSSO 1 - 1.000 mbar.
	VAPORIZAÇÃO	ELIMINAÇÃO DE GASES E VAPORES NOS LÍQUIDOS	
	METALIZAÇÃO	SECAGEM SOB FRIO (PRODUTOS FARMACÊUTICOS)	
SIMULADORES DE ESPAÇO	RAIOS ELETRÔNICOS	REVESTIMENTO COM RESINAS	
FÍSICA	MICROSCÓPIO ELETRÔNICO	DESTILAÇÃO MOLÉCULAS	
FUSÃO	FABRICAÇÃO DE LÂMPADAS	SECAGEM SOB FRIO (GERAL)	
	FABRICAÇÃO DE VÁLVULAS		FUNDIÇÃO SOB VÁCUO
			SOLDA SOB VÁCUO
			DESTILAÇÃO
			SECAGEM

Fonte: <http://www.hfindustria.com.br/>, acesso em 20/12/2009.



Conforme ilustra a Tabela 7.1. a faixa de pressão em que o sistema de pré-vácuo opera define o sua gama de aplicações. Por exemplo, em processos de polimerização assistida a plasma o monômero é introduzido num ambiente de pré-vácuo entre  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$  mbar e com um campo eletromagnético formado. De acordo com Hernandez (2006) e Lima (2004), para este caso, é fundamental a caracterização da pressão de base, da pressão de reagente e da pressão de trabalho do sistema de pré-vácuo.

A pressão base é a menor pressão que a câmara de vácuo consegue atingir estando totalmente fechado seu sistema de admissão, sem a entrada de gás de processo. Ela está relacionada com a quantidade de gás da atmosfera que se encontra na câmara, logo quanto menor for a pressão base menor será o número de espécies desconhecidas e gases residuais durante o processo.

A pressão de reagente indica a quantidade de reagente que chega à câmara de vácuo com a válvula totalmente aberta. Ela varia muito de reagente para reagente, e em geral possui o valor da pressão de vapor do reagente para a condição e a temperatura em que se encontra à fonte de reagente.

A pressão de trabalho indica a pressão em que se inicia o processo de deposição do filme fino polimerizado no substrato. Ela está relacionada à quantidade de reagente que se encontra dentro da câmara e que será consumido durante o processo de polimerização, podendo então formar o filme. Portanto, pode resultar em aumento da taxa de deposição, contudo, o aumento da pressão provoca diminuição no tempo de residência das espécies ativas em plasma. O aumento da pressão também gera diminuição da energia média dos elétrons, isto porque a quantidade maior de gás provoca aumento da probabilidade de choque dos elétrons com as moléculas do gás de processo.

Kalempa (2005) e Kaviski (2006) explicam que atualmente existe interesse em estudar-se os fenômenos de transporte de massa e calor no escoamento de gases rarefeitos através de tubulações ou capilares cilíndricos longos sujeitos a gradientes de pressão, temperatura e concentração em diferentes intervalos do número de Knudsen. Segundo eles, o estudo dos fenômenos de transporte no escoamento de gases rarefeitos através de capilares é muito importante para o desenvolvimento tecnológico de equipamentos de vácuo, indústria aeronáutica e micro-engenharia. Para estes pesquisadores, o pequeno número de publicações referentes ao estudo de misturas de gases rarefeitos ocorre devido ao fato de que a resolução de problemas associados

ao escoamento de misturas de gases rarefeitos são mais complicados devido ao aparecimento de vários fenômenos tais como a difusão, termo-difusão e baro-difusão.

Na Figura 7.2 vemos o esquema de um sistema de pré-vácuo formado por um medidor de vácuo (em azul), uma câmara de vácuo de aproximadamente 2,1 litros (em amarelo), uma bomba rotativa de palhetas de duplo estágio (em verde) e tubulações utilizadas para união dos respectivos componentes.

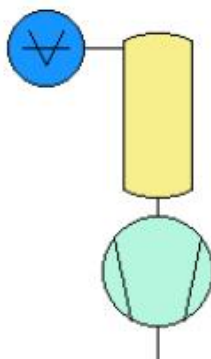


Figura 7.2 Esquema do sistema de pré-vácuo formado por câmara de vácuo de 2,1 litro, medidor de vácuo, bomba mecânica e tubulações. Fonte: Pfeiffer Vacuum (2008), disponível em: [physika.info/physika/documents/Vacu4.pdf](http://physika.info/physika/documents/Vacu4.pdf), acesso em 20/12/2008.

Na Figura 7.3 temos a caracterização do sistema de pré-vácuo esquematizado na Figura 7.2. Nos pontos do gráfico vemos a queda da pressão em função do tempo de bombeamento para a câmara com e sem vazamentos. A partir da leitura deste gráfico podemos saber o tempo necessário para remover os gases não adsorvidos nas paredes da câmara de vácuo e o vácuo máximo que o sistema atingiu com a bomba de vácuo utilizada em sua montagem.

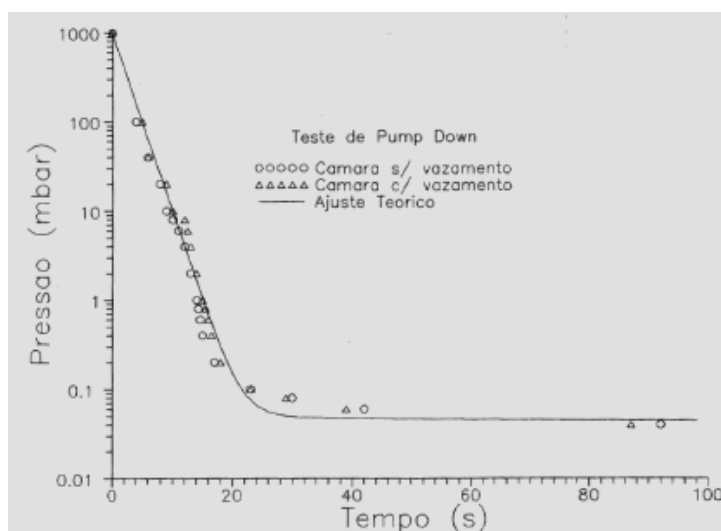


Figura 7.3 Gráfico do decaimento da pressão para a câmara de vácuo de 2,1 litros em função do tempo de bombeamento dos gases. Fonte: Pfeiffer Vacuum (2008), disponível em: [physika.info/physika/documents/Vacu4.pdf](http://physika.info/physika/documents/Vacu4.pdf), acesso em 20/12/2008.

A caracterização do sistema de pré-vácuo pode contribuir para o entendimento e correção dos desvios apresentados pelo equipamento em operação. Os resultados experimentais desta caracterização permitem a comparação da velocidade de bombeamento especificada no catálogo da bomba de vácuo em relação a velocidade efetiva de bombeamento.

A pressão final máxima que a bomba atingiu com o respectivo sistema de pré-vácuo também pode ser comparada com a pressão final máxima declarada pelo fabricante da bomba. Após a estabilização da pressão final máxima atingida, podemos fechar a válvula que une a câmara de vácuo à bomba de vácuo para avaliarmos os vazamentos através da evolução da pressão em função do tempo, conforme ilustram os gráficos da Figura 7.4.

No gráfico da Figura 7.4 aparece a expressão simplificada

$$\ln(P) = (Q_{\text{vaz}}/V).t \quad (7.1)$$

onde **P** representa a pressão em mbar, **V** o volume da câmara de vácuo em Litros, **t** o tempo em segundos e **Q<sub>vaz</sub>** o throughput aproximado de vazamento em mbar.L<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.

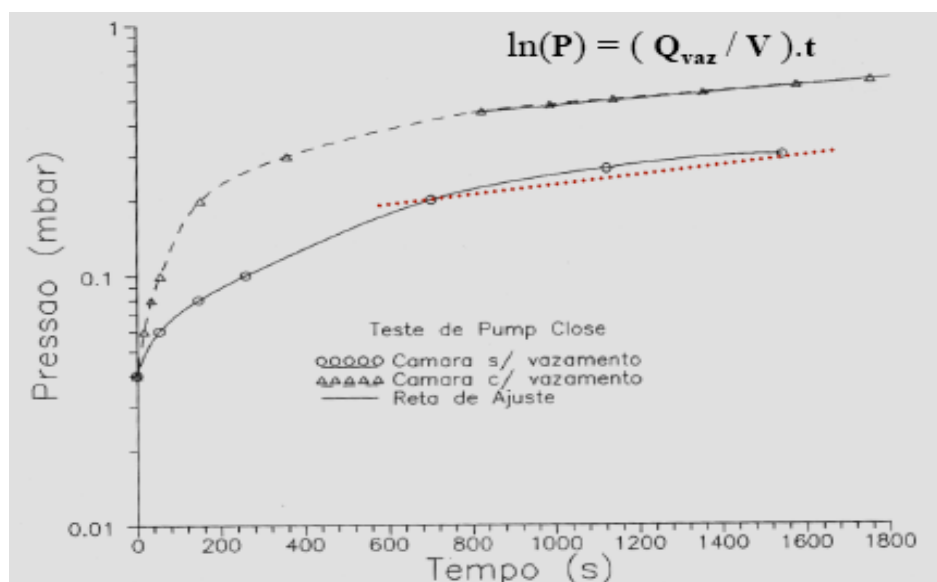


Figura 7.4 Caracterização da vedação ou Throughput de vazamento da câmara de vácuo. Fonte: Pfeiffer Vacuum (2008).

Basicamente existem duas categorias de vazamentos nos sistemas de vácuo: os reais e os virtuais. Ono e Pereira (1992) explicam que os vazamentos reais são aqueles decorrentes da entrada de gases de fora para dentro do sistema,

provocados por furos em dutos ou na parede do sistema, soldas malfeitas, vedações irregulares, etc.

Este tipo de vazamento, que não possui dependência temporal, provoca uma elevação da pressão residual, porém mantendo-a constante. Os vazamentos virtuais são originados no interior do sistema, provocados por gases provenientes de pequenos bolsões como cavidades microscópicas localizadas nas paredes do sistema ou canais que se formam em soldas realizadas, sem o devido cuidado, no interior do sistema. Os gases contidos nesses bolsões são bombeados muito lentamente provocando um decréscimo da pressão residual, que é função da condutância do vazamento. Se o sistema de bombeamento é desligado, os bolsões de gases enchem – se novamente e no próximo acionamento, voltam a provocar o mesmo efeito. O vazamento virtual não pode ser efetivamente detectado e deve ser evitado a partir do projeto do sistema de vácuo.

### 7.3 Condutância

É uma grandeza de fundamental importância para a modelagem dos sistemas de vácuo. Segundo Degasperri (2006), ela é a grandeza que mais caracteriza um sistema de vácuo; todos os aspectos importantes para determinar o escoamento dos gases e vapores estão contidos na condutância. De acordo com este autor, a condutância quantifica a facilidade que os gases e vapores têm de escoar por uma tubulação ou orifício. Ela depende de vários fatores, que são: do regime de escoamento do gás ou vapor, da temperatura, da geometria do tubo e das suas dimensões e da pressão (exceto no regime de escoamento molecular, cujas condutâncias são independentes da pressão). O inverso da condutância é a impedância.

Define-se condutância como o quociente:

$$C = \frac{Q}{|P_2 - P_1|} \quad (7.2)$$

onde: Q é o throughput que passa entre os pontos 1 e 2 de uma tubulação ou orifício, C é a condutância do tubo ou orifício entre os pontos 1 e 2 e  $P_2$  e  $P_1$  as pressões nos pontos 1 e 2, respectivamente.

A condutância de uma dada tubulação esta relacionada com a sua geometria e dimensões e com as condições instantâneas de operação da bomba de vácuo. Via de regra é obtida através da compilação sistemática de dados experimentais ou mesmo via simulações. Na Figura 7.5 vemos a associação de condutâncias em paralelo (à esquerda) e em série (à direita) e as respectivas expressões utilizadas para os seus cálculos nos sistemas de pré-vácuo.

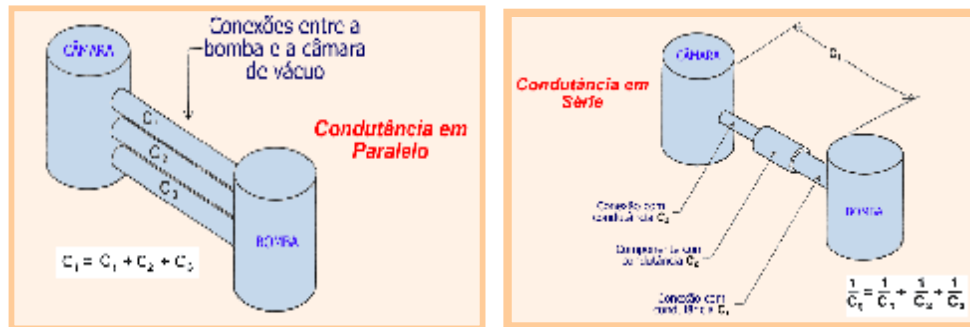


Figura 7.5 Conexões entre a bomba e a câmara de vácuo, em paralelo e em série. Fonte: Degasperri (2006).

Para um sistema de vácuo a associação de elementos em série fornece:

$$\frac{1}{C_{total}} = \sum_i \frac{1}{C_i} \quad (7.3)$$

Para um sistema de vácuo a associação de elementos em paralelo fornece:

$$C_{total} = \sum_i C_i \quad (7.4)$$

As condutâncias podem ser calculadas em função dos fatores geométricos de um determinado componente, por exemplo, um tubo ou orifício. O regime de escoamento é fundamental para a determinação da condutância. Segundo Gama (2002), na prática determina-se a natureza do regime de escoamento em um sistema ou elemento dele através das condições:  $DxP \geq 6 \times 10^{-1}$  (escoamento viscoso),  $DxP < 1,3 \times 10^{-2}$  (escoamento molecular) e  $DxP$  entre  $6,0 \times 10^{-1}$  e  $1,3 \times 10^{-2}$  (regime de escoamento de transição). Segundo Kaschny (2008), nesta regra prática  $D$  é medido em cm e representa uma dimensão característica (por exemplo o diâmetro) e  $P$  denota a pressão em mbar. No fluxo viscoso, o livre caminho médio das moléculas é muito pequeno comparado com as dimensões de um elemento do sistema e as moléculas chocam-se mais entre si do que com as paredes internas do sistema. As irregularidades dos elementos como curvaturas, cotovelos e orifícios, obrigam as linhas de corrente a se contraírem, a fim de permitir o mesmo fluxo sem descontinuidades. A resistência a

essa transmissão de fluxo, e conseqüentemente a condutância, depende do tamanho e da forma de cada irregularidade, da velocidade e da pressão do gás, e por isso, é difícil de ser tratado quantitativamente.

A Figura 7.6 apresenta exemplos de fórmulas práticas comumente utilizadas para determinar a condutância, para o ar a 20°C, de tubos retos com seção circular.

Regime de fluxo viscoso:  $C = 180 \frac{D^4}{L} \bar{P} \text{ litros } s^{-1}$

Regime de fluxo molecular:  $C = 12 \frac{D^3}{L} \text{ litros } s^{-1}$

Figura 7.6 - Fórmulas práticas para a determinação da condutância no regime de fluxo viscoso e no regime de fluxo molecular. Fonte: Gama (2002).

Nas expressões citadas acima, C é a condutância em litros por segundo, P é a pressão média expressa em Torr, D é o diâmetro da tubulação em cm e L é o comprimento em cm.

#### 7.4. Velocidade de bombeamento da bomba de vácuo ( $S_{bv}$ )

A razão na qual um gás ou vapor flui através de um dado plano, por exemplo, ao longo de uma tubulação ou na bomba de vácuo, é descrito em termos da velocidade de bombeamento (S) que é definida como o volume de gás (V), a uma dada temperatura e pressão, cruzando este plano por unidade de tempo (t), ou seja:

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (7.5)$$

A velocidade de bombeamento, expressa em L/s ou em m<sup>3</sup>/h, depende intimamente das características da bomba, e do gás que está sendo bombeado, conforme ilustram os gráficos da Figura 7.7 para o bombeamento de ar e de nitrogênio, respectivamente.

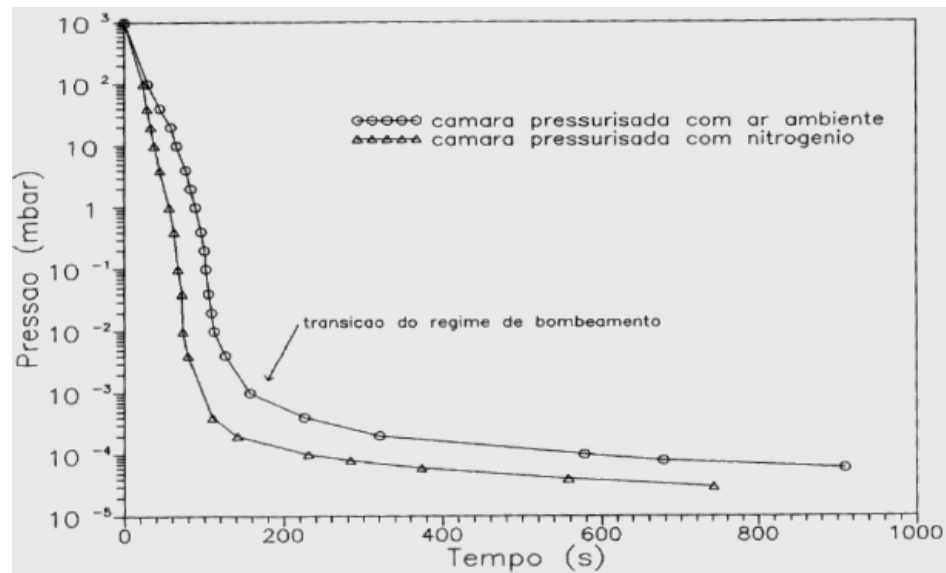


Figura 7.7 Caracterização de um sistema de alto-vácuo composto de câmara de vácuo de aço inoxidável eletropolido de 28,4 litros, bomba turbo-molecular e bomba mecânica de palhetas. Fonte: Pfeiffer Vacuum, 2008.

Nos gráficos da Figura 7.7, após 120 segundos de bombeamento, vemos a transição do regime de escoamento viscoso para o regime de escoamento molecular, também notamos diferenças entre as curvas de queda de pressão em função do tempo de bombeamento do ar e do nitrogênio, respectivamente.

Para a determinação da velocidade de bombeamento de uma bomba de vácuo conectada diretamente à câmara de vácuo podemos utilizar a expressão sugerida por Harris (2004):

$$S = (V/t) \cdot \ln (P_1/P_2) \quad (7.6)$$

onde:  $S$  é a velocidade de bombeamento em l/s;  $v$  é o volume, em litros, da câmara de vácuo,  $t$  é o tempo, em segundos, requerido para bombear o gás de volume da câmara de vácuo;  $P_1$  a pressão inicial, geralmente a pressão atmosférica local em mbar e  $P_2$  a pressão final obtida pelo sistema de vácuo, também em mbar.

A equação que descreve a dependência temporal da pressão em um sistema sob bombeamento em fluxo viscoso é conhecida como equação de Gaede, sendo derivada diretamente da definição de throughput, ou seja:

$$Q_b = P \cdot S + V \frac{dP}{dt} = Q_f \Rightarrow P \cdot S - Q_f = -V \frac{dP}{dt} \quad (7.7)$$

Para  $Q_f$  constante teremos:

$$P = P_{inicial} \cdot e^{-S \cdot t / V} + \frac{Q_f}{S} \quad (7.8)$$

Este resultado corresponde ao bombeamento do gás livre dentro da câmara, sendo conhecido como bombeamento de volume. Existem outros comportamentos, seqüenciais, da pressão em função do tempo, de acordo com o termo  $Q_f$  considerado e a faixa de pressão. Num sistema de vácuo, além do gás do volume, existem outros processos que liberam gases à medida que o bombeamento ocorre. Essas fontes podem ser resultantes de vazamentos, sublimação e evaporação, degaseificação de superfícies internas ou decorrentes de vapores gerados pela própria bomba de vácuo.

Considerando outras fontes de gases a equação 7.8 assume a seguinte forma:

$$P = P_0 \cdot e^{-S \cdot t / V} + \frac{Q_{des}}{S} t^{-1} + \frac{Q_{dif}}{S} t^{-1/2} + K_0 \quad (7.9)$$

$Q_{deorção}$  é via de regra a soma da área de cada material utilizado multiplicado pelo sua respectiva taxa de degaseificação. Os demais termos,  $Q_{difusão}$  e  $K_0$  assumem formas bem mais complexas, dependendo sempre dos materiais envolvidos no sistema de vácuo. O comportamento da pressão em função do tempo para o bombeamento do gás de volume e dos gases que sofreram desorção, difusão e permeação estão representados na Figura 7.8.

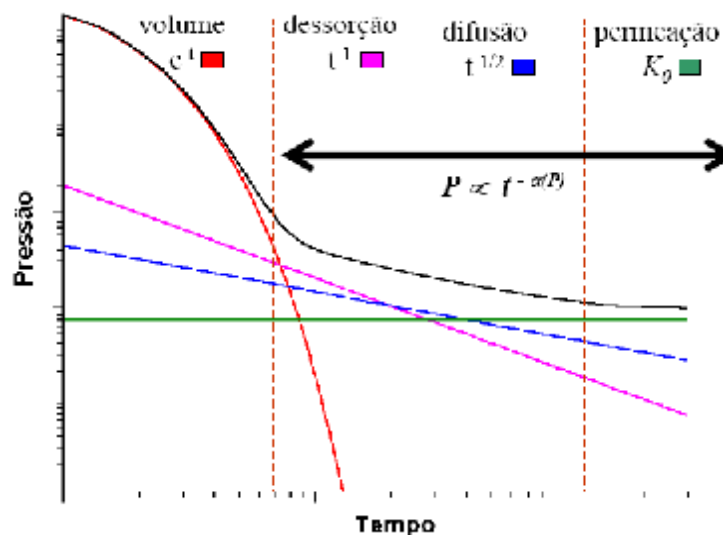


Figura 7.8 Gráfico da pressão em função do tempo levando em conta os diferentes processos de liberação de gases em sistemas de vácuo. A curva negra representa a soma de todos os comportamentos do bombeamento do gás de volume, difusão, desorção, e permeação. Fonte: Pfeiffer Vacuum (2008).



## 7.5 Velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ )

A velocidade efetiva de bombeamento é aquela velocidade de bombeamento que leva em conta todas as contribuições que as condutâncias dos elementos impõem ao escoamento dos gases ou vapores no sistema de pré-vácuo. Define-se a velocidade efetiva de bombeamento como:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{Total}} \Rightarrow S_{ef} = \frac{S_{bv} C_{Total}}{S_{bv} + C_{Total}} \quad (7.10)$$

onde:  $S_{bv}$  é a velocidade nominal especificada para a bomba em uso,  $S_{ef}$  a velocidade de bombeamento efetiva e  $C_{total}$  é a condutância total do sistema de pré-vácuo.

## 7.6 Throughput

A velocidade de bombeamento não fornece informações sobre a quantidade de gás que está sendo efetivamente transportada e que varia significativamente com a pressão. Define-se, portanto, o Throughput pela expressão:

$$Q = \frac{d(p \cdot V)}{dt} = p \cdot \frac{dV}{dt} + V \cdot \frac{dp}{dt} \quad (7.11)$$

Segundo Degasperi (2006), ele ainda pode ser escrito como sendo

$$Q = p \cdot S \quad (7.12)$$

onde  $S$  é a velocidade de bombeamento cujo valor de pressão é  $p$ . Para  $p$  constante temos:  $[Q] = \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s} = \text{J}/\text{s} = \text{W}$ . Então  $Q$  representa o fluxo de energia por unidade de tempo, ou potência ( $W$ ). Assim, o autor citado anteriormente entende que o termo Throughput não tem uma boa tradução para a língua portuguesa; uma possível tradução que preserve o significado físico seja talvez vazão energética.

Para temperatura constante, Throughput é equivalente ao fluxo de massa e portanto ao número de partículas transportadas. Desta forma, Ono e Pereira (1990), definem Throughput como sendo o fluxo de gás através do sistema para uma dada variação de pressão e velocidade de bombeamento, ou seja, é a quantidade de massa que escoar por unidade de tempo e é medida em mbar x litro por segundo.

## 7.7 Métodos experimentais de caracterização

Acciari (2004) considera que em muitos cálculos realizados em tecnologia de vácuo, o valor da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo necessita ser altamente precisa. Ele propõe dois arranjos experimentais para a caracterização da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo. O primeiro arranjo experimental proposto determina a velocidade de bombeamento através da queda de pressão medida em coluna de mercúrio e medidor Pirani. O arranjo experimental proposto está representado na Figura 7.9 e o esquema, que orienta o procedimento de medição da velocidade de bombeamento da bomba mecânica, está formalizado na Figura 7.10.

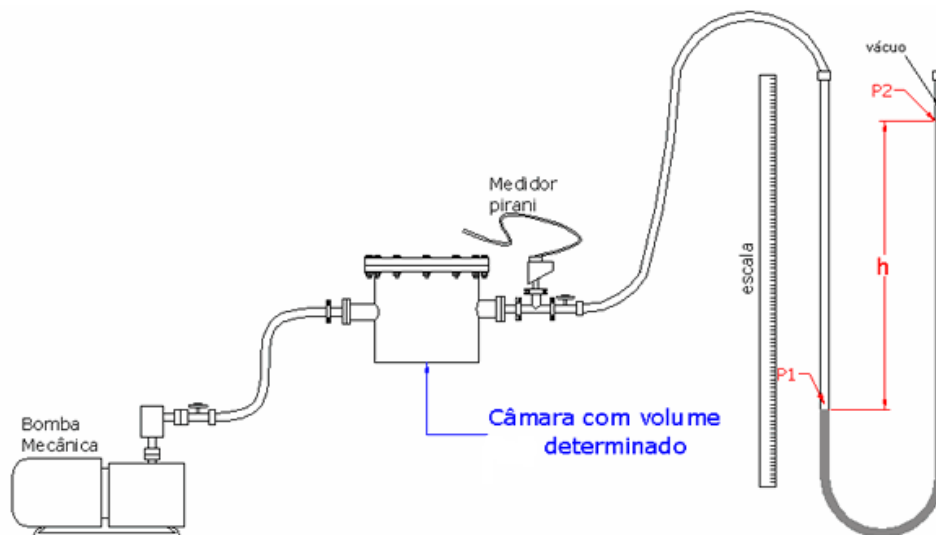


Figura 7.9 Arranjo experimental proposto para a caracterização da velocidade de bombeamento das bombas mecânicas de palhetas. Fonte: Acciari (2004).

Neste caso, o princípio de determinação da velocidade de bombeamento da bomba de vácuo envolve basicamente a medição da pressão atmosférica local e a obtenção do gráfico da queda de pressão em função do tempo. A velocidade de bombeamento deve ser obtida pelo coeficiente angular de uma reta ajustada no gráfico monolog da pressão em função do tempo. A vantagem de plotarmos os valores de pressão num eixo logarítmico está em apresentarmos de forma condensada essa variação da pressão que é definida segundo uma lei exponencial. Dessa forma, os valores de pressão menores que 1 mbar podem ser visualizados claramente no gráfico.

O procedimento experimental para a determinação da velocidade de bombeamento pelo método do coeficiente angular envolve os seguintes passos:

- \* As bombas mecânicas devem estar em regime estacionário;

\* Antes de ligar as bombas, fechar as válvulas V1 e V3 que estão conectadas diretamente às bombas. Isso garante seu isolamento até atingirem o regime estacionário de operação;

\* Utilizar filtros para evitar retorno de óleo das bombas para o sistema ou para os sensores de pressão;

\* Em seguida abrir a válvula de arejamento do sistema de vácuo V4 e a válvula V2 para que a pressão interna na câmara e no tubo do manômetro se iguale a pressão atmosférica. Com o medidor ligado diretamente a câmara verifica-se a pressão;

\* Abrir a válvula V3 lentamente para que se comece a fazer vácuo do lado direito do tubo, tendo cuidado nesse instante pois o throughput da bomba mecânica é alto e faz com que o mercúrio suba bruscamente podendo contaminar as válvulas e tubulações do sistema e vácuo. Concluído o vácuo do lado direito do tubo fecha-se a válvula V4;

\* Depois de todas essas etapas o sistema está pronto para iniciar as medições, para isso abrir a válvula V4 e iniciar a filmagem da queda de pressão em função do tempo com o auxílio de uma máquina fotográfica digital e iluminação adequada, para posterior tratamento dos dados em microcomputador utilizando a planilha Excel.

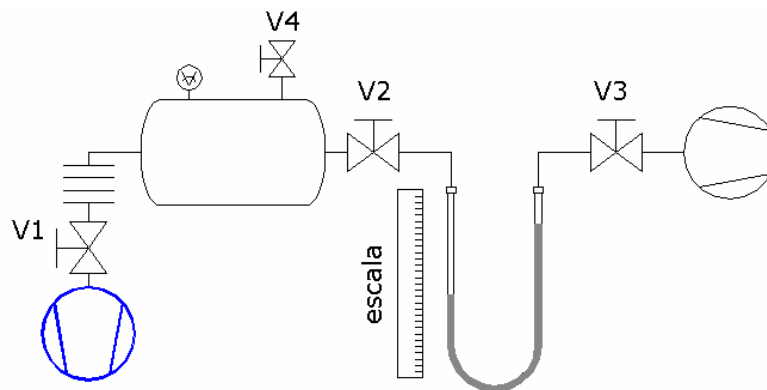


Figura 7.10 Esquema para determinação da velocidade de bombeamento das bombas mecânicas de palhetas. Em azul temos a bomba de vácuo a ser caracterizada. Fonte: Acciari (2004).

Com relação ao processo de medição da queda de pressão em função do tempo, a coluna de mercúrio apresenta maior precisão em relação ao medidor Pirani, reduzindo as incertezas das medidas, principalmente a partir de 500 mbar de pressão. A queda da pressão na câmara de vácuo faz com que o mercúrio suba do lado esquerdo do manômetro fornecendo os valores da pressão em função do tempo. Essa pressão num

determinado tempo, o valor exato do volume da câmara e o valor da pressão atmosférica são suficientes para o cálculo da velocidade de bombeamento.

Utilizando esta metodologia em 2004, Acciari obteve resultados de velocidade de bombeamento considerados consistentes com os valores apresentados nos catálogos dos fabricantes, conforme ilustra a Tabela 7.2.

Tabela 7.2 Valores da velocidade de bombeamento das bombas de vácuo (Sb), obtidos pelo método do coeficiente angular.

Bomba mecânica	Sb (catálogo)	Sb (medido)
E2M1.5	0,6 l/s	0,58 l/s
E2M2	3,4 m <sup>3</sup> /h	3,2 m <sup>3</sup> /h
TRIVAC D16C	13,5 m <sup>3</sup> /h	10,6 m <sup>3</sup> /h

Fonte: Acciari (2004).

Neste estudo Acciari mostrou que os valores de velocidade de bombeamento obtidos experimentalmente encontraram-se próximos aos valores citados nos catálogos dos fabricantes. Para as bombas mecânicas nos modelos E2M1.5 e E2M2 os valores tiveram um erro de 1%. Para a bomba mecânica no modelo TRIVAC D16C o erro foi de aproximadamente 20%, fato explicado pelo elevado tempo de uso e desgaste do equipamento. O segundo procedimento proposto por Acciari recebe o nome de método de pipeta e seu esquema está representado na Figura 7.11.

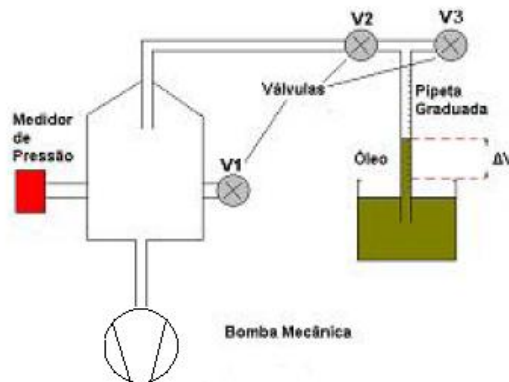


Figura 7.11 Esquema do sistema de vácuo empregado para determinar a velocidade de bombeamento pelo método da pipeta. Fonte: Ono e Pereira (1990).

Antes de se iniciar a operação o sistema deve estar limpo e com boa vedação. Como citado anteriormente devemos ter muito cuidado para evitar que o óleo retorne para a câmara de vácuo se o throughput da bomba a ser caracterizada for alto. Isso além de contaminar a válvula agulha, também poderá contaminar o sistema, pois sabe-

se que a limpeza, preparação e condicionamento de flanges, câmara e tubulações são demorados e trabalhosos. O procedimento do método da pipeta envolve as etapas de preparação do sistema e a de tomada de dados:

**Preparação:**

- Identificar todos os componentes do sistema de pré-vácuo: bombas, medidores, válvulas, entre outros;
- Ligar a bomba mecânica mantendo fechadas as válvulas V1 e V2, deixando apenas a válvula V3 aberta;
- Abrir lentamente a válvula V2 e verificar se o medidor está funcionando;
- Verificar se não existem vazamentos no sistema de pré-vácuo.

**Tomada de dados:**

- Após o sistema atingir o equilíbrio, iniciar as medidas fechando a válvula V3, anotando a pressão lida no medidor (P), o volume da coluna de óleo ( $\Delta V$ ) e o tempo de subida deste ( $\Delta t$ ).
- Abrir imediatamente a válvula V3 depois de efetuada a medida para evitar que o óleo contamine o sistema.
- Abrir lentamente a válvula V2 até atingir um novo ponto de equilíbrio e fazer nova leitura. Repetir o procedimento até cobrir a faixa de pressão entre 0,01 e 0,08 Torr.
- Depois de obter a curva da primeira bomba mecânica, substituí-la por outra para repetir a caracterização.

O método da pipeta para determinação da velocidade de bombeamento obedece à seguinte expressão:

$$S(P) = \frac{P_{atm}}{P} \times \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (7.13)$$

onde:  $S(P)$  é a velocidade de bombeamento;  $\Delta V$  é a variação de volume de óleo na pipeta graduada;  $\Delta t$  é o tempo de subida do volume  $\Delta V$ ,  $P_{atm}$  é a pressão atmosférica em Torr medida localmente e  $P$  é a pressão da câmara de vácuo.

## 7.8 Critérios para a análise dos gases durante o bombeamento

Conforme ilustração da Figura 7.12, a análise de gases durante o bombeamento pode ser realizada de diferentes formas:

*In-line:* Quando a sonda ou sensor está em contato direto com os gases a serem bombeados. Requer menor aplicação de instrumentação e realiza medidas in-situ. Oferece a vantagem de fornecer a análise dos gases em tempo real.

*On-line:* Medidas realizadas em linha com o processo de bombeamento. Necessitam instrumentação fora do sistema de pré-vácuo. Envolvem um tempo curto de análise e podem ser feitas de forma contínua ou intermitente.

*Off-line:* Análise fora do sistema, onde se realiza a tomada de amostras para depois efetuar a realização da análise propriamente dita. Requer um tempo longo de análise e, como esta é feita fora do tempo real, pode levar a diferenças entre o valor da variável presente no sistema de vácuo e a determinada utilizando métodos in-line e on-line.

Sob o ponto de vista da aplicabilidade, a análise em linha aplicada ao processo de bombeamento de gases e vapores, seja in-line ou on-line oferece as seguintes vantagens: (i) Permite o estudo do sistema de forma real e segura; (ii) Fornece uma descrição contínua e mais real do processo; (iii) Permite a implementação de estratégias de controle; (iv) Elimina possíveis problemas com o manuseio de amostras; (v) Não interfere de forma crítica no andamento do processo.

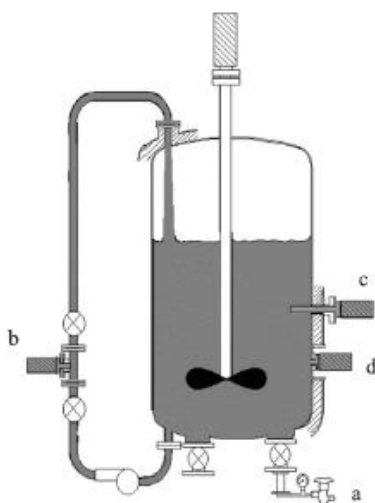


Figura 7.12 Combinação de vários sensores em um mesmo equipamento: (a) válvula de amostragem, necessária para medições “off-line”; (b) uma linha de amostragem que conduz a amostra até um sensor “on-line”; (c) uma sonda interna de parede, caracterizando-se como sensor “in-line”; (d) um sensor de parede, representando um modelo não invasivo. Fonte: Trevisan e Poppi (2006).

## 7.9 Calibração da instrumentação utilizada na caracterização

Segundo Canossa (2009), os instrumentos de calibração devem ser periodicamente aferidos com o respectivo padrão; e durante a medição, as superfícies de contato e do instrumento devem estar adequadamente limpas; as partes móveis devem estar sempre ajustadas e seus deslizamentos devem ser suaves; o manejo deve ser cuidadoso e não se deve exercer pressão excessiva nos instrumentos, evitando-se também choques, para não produzir desajustes; devem ser mantidos cuidadosamente limpos e em estojos adequados; devem ser guardados em lugar exclusivo para instrumentos e protegidos em local seguro e isento de vibrações e de fontes de calor.

Um instrumento calibrado deve ser utilizado nas medições a serem executadas. Havendo um programa de calibração estes equipamentos terão condições adequadas de uso no que se refere à garantia de comparação com padrões de medição.

Sempre que ocorrer danos aos instrumentos, quedas, erros de leitura, estes devem ser segregados e, uma verificação deve ser solicitada ou executada. É necessário ter certeza de que a calibração não foi afetada. Na calibração são relatadas a pressão de referência,  $P_{ref}$  (valor verdadeiro convencional), a pressão indicada,  $P_{ind}$ , a incerteza da medição e o erro relativo:

$$e(\%) = (P_{ind} - P_{ref})/P_{ref}. \quad (7.14)$$

Com o erro relativo, os usuários podem substituir seus medidores por outros que tenham um princípio de funcionamento na faixa de operação do seu sistema de pré-vácuo. No Brasil temos o INMETRO e o INPE credenciados ao desenvolvimento de calibração da instrumentação destinada à metrologia do vácuo. De acordo com Paraguassu e Santana (2004), pela tendência de aumento na demanda de calibrações de medidas de vácuo, é necessário em curto espaço de tempo: (i) aumentar a quantidade dos parâmetros de referência; (ii) estudar a periodicidade de recalibração, objetivando estabelecer a frequência mais adequada de calibração para os medidores de vácuo; (iii) ampliação do escopo dos serviços credenciados para a realização das calibrações; (iv) credenciamento de outros laboratórios na área de vácuo; (v) conscientização da cultura metrológica aos usuários da tecnologia do vácuo quanto à importância da rastreabilidade nas medições; (v) confirmação das especificações técnicas dos diferentes instrumentos de vácuo em função dos seus níveis de exatidão; (vi) atualização da melhor capacidade de medição.

## Capítulo 8

### Estudo de caso envolvendo sistemas de pré-vácuo

#### 8.1. Introdução

Neste capítulo apresentamos um estudo de caso realizado em 2008 no Laboratório de Tecnologia de Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, onde procuramos seguir os principais aspectos da proposta de recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo apresentadas nos capítulos anteriores.

#### 8.2 Construção da câmara de vácuo

A soldagem, o eletropolimento da superfície interna da câmara de vácuo de 46 litros e os demais processos de usinagem foram realizadas pela Empresa PrestVácuo. Na Figura 8.1 temos os principais componentes da câmara de vácuo utilizada neste estudo de caso.



Figura 8.1 Partes da câmara de vácuo de 46 litros, mostrando acabamento interno por eletropolimento. Fonte: PrestVácuo (2008)

#### 8.3 Limpeza e montagem da câmara de vácuo

As diferentes partes internas da câmara de vácuo foram limpas com lenço de papel embebido em álcool isopropílico. Os “o”-ring’s que realizam a vedação da câmara foram limpos com tecido de algodão seco e isento de fiapos.

Com a finalidade de evitarmos contaminações nas superfícies internas do sistema de vácuo foram utilizadas luvas de plástico em todas as fases de limpeza, manipulação e montagem da câmara de vácuo. Na Figura 8.2 vemos as diferentes fases da montagem da câmara de vácuo de 46 litros.





Figura 8.2 – Diferentes etapas da montagem da câmara de vácuo.  
Fonte: Laboratório de Tecnologia do Vácuo da FATEC-SP (2008).

Objetivando a vedação adequada da câmara de vácuo, foram aplicados em todos os “O”-rings uma fina camada de graxa de silicone Dow Corning para alto-vácuo.

#### 8.4 Montagem do sistema de pré-vácuo

Após o processo de limpeza da câmara de vácuo, foram instalados os medidores de pressão que irão monitorar o processo de bombeamento dos gases. O medidor Pirani foi instalado para indicar a pressão mínima final que o sistema de pré-vácuo pode atingir durante o seu funcionamento. A coluna de mercúrio foi instalada com o propósito de monitorar a queda de pressão em função do tempo de bombeamento dos gases. Segundo Fonseca e Matos (2006), até 1,3 Torr a pressão pode ser medida diretamente em colunas de mercúrio, com muito baixa incerteza. Quando a variação de altura de um manômetro de coluna de mercúrio é muito pequena ou inferior a 1,3 Torr as leituras tornam-se extremamente críticas. Entretanto, podemos comprimir o gás que ocupa um volume relativamente pequeno de modo a obtermos uma pressão suscetível de ser medida em uma coluna de mercúrio. Sabendo a razão de compressão do gás é possível calcularmos a sua pressão inicial. Na Figura 8.3 vemos o detalhamento da montagem dos medidores de pressão na câmara de vácuo.



Figura 8.3 Montagem do medidor Pirani,coluna de mercúrio, válvula solenóide e folie metálico. Fonte: Laboratório de Tecnologia do Vácuo da FATEC-SP (2008).

Na parte superior da câmara de vácuo foram instalados uma válvula de acionamento eletrônico, um fole metálico e um medidor Pirani. O fole metálico foi instalado com o objetivo de reduzir as vibrações entre a câmara e a bomba de vácuo, além de ser considerado um reservatório de vácuo.

Conforme Figura 8.4, em todas as bombas mecânicas utilizadas neste estudo foram instalados os filtros de admissão e de exaustão para proteção do sistema de pré-vácuo e do ambiente no entorno dos experimentos.



Figura 8.4 Montagem dos filtros de admissão e exaustão nas bombas mecânicas utilizadas no estudo de caso. Fonte: LTV - FATEC – SP (2008).

### 8.5 Testes de vazamentos da câmara de vácuo

O teste de vazamento é feito através da medição da evolução da pressão na câmara de vácuo depois que ela é isolada do sistema de bombeamento por meio de uma válvula. Este método possibilita a verificação do Throughput de vazamento e a comparação do seu valor em relação ao Throughput em que o sistema de pré-vácuo operará. Tendo os valores da variação da pressão em função do tempo ( $\Delta P/\Delta t$ ) e o volume da câmara  $V_{\text{Câmara}}$ , é possível estimar aproximadamente o valor do Throughput devido aos vazamentos. A expressão utilizada para caracterizar o vazamento do sistema de pré-vácuo é a seguinte:

$$Q = (\Delta P / \Delta t) \times V_{\text{câmara}} \quad (8.1)$$

O procedimento do teste de vazamento envolve basicamente as seguintes etapas:

- Fazer vácuo até o sistema atingir a pressão limite: em média deixamos o sistema em bombeamento por 30 minutos para garantirmos que o vácuo máximo seja alcançado;
- Medir a pressão limite em coluna de mercúrio: este ponto será utilizado como referencial de partida em relação a variação de pressão quando a câmara de vácuo ficar isolada da bomba de vácuo.
- Isolar a câmara de vácuo fechando a válvula agulha entre a tubulação e a bomba de vácuo;
- Acionar o cronômetro ou relógio para medição de  $\Delta t$ .
- Registrar, respectivamente a variação da pressão  $\Delta P$  e a variação do tempo  $\Delta t$ ;
- Calcular o Throughput de vazamento empregando a equação 8.1.

Na tabela 8.1 vemos os resultados do teste de vazamento da câmara de vácuo de 46 litros.

Tabela 8.1 Resultados do teste de vazamento da câmara de vácuo de 46 litros, realizados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Fatec de São Paulo em 2008.

Parâmetros de medição	1ª medida	2ª. medida	3ª. medida
$\Delta P$ (mbar)	5,2	13,3	16,0
$\Delta t$ (segundos)	64800	158400	175238
Q vazamento (mbar.litro/s)	$3,7 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$4,2 \times 10^{-3}$

Com os resultados obtidos no teste de vazamentos podemos afirmar que o Throughput de vazamento é desprezível, tendo em vista que o sistema operará em pré-vácuo, com pressão mínima de operação da ordem de  $10^{-2}$  mbar.

## 8.6 Bombas de vácuo utilizadas no estudo de caso

Nos experimentos do estudo de caso foram utilizadas três bombas mecânicas de palhetas, todas elas com duplo estágio, com velocidades de bombeamento que variaram de 2,4 até 16 m<sup>3</sup>/h.



Figura 8.5 – Bombas de vácuo utilizadas em dois sistemas de pré-vácuo empregados no estudo de caso: Sb 2 m<sup>3</sup>/h (lado esquerdo) e Sb 8 m<sup>3</sup>/h (lado direito). Fonte: LTV da FATEC-SP (2008).

Na tabela 8.2 vemos as principais especificações das bombas mecânicas utilizadas neste estudo de caso.

Tabela 8.2 Especificações das bombas mecânicas de palhetas de duplo estágio utilizadas no estudo de caso.

Bomba mecânica e fabricante	Velocidade de bombeamento m <sup>3</sup> /h	Pressão final com gás ballast (mbar)	Volume de óleo no reservatório (litros)	Potência do motor (kw)	Massa da bomba de vácuo (kg)
E2M2 Edwards	2,4	$3 \times 10^{-2}$	0,55	0,25	18,2
E2M8 Edwards	8,2	$3 \times 10^{-2}$	0,55	0,37	22,8
TRIVAC 16E Leybold	16,0	$3 \times 10^{-2}$	1,25	0,70	30,7

Fonte: Catálogos dos fabricantes Edwards e Leybold

## 8.7 Identificação do regime de escoamento

O escoamento de gases é provocado por um gradiente de pressão ou temperatura. Mesmo um pequeno gradiente na pressão faz com que o gás flua da região de alta pressão para a região de baixa pressão. Segundo Trivelin (2006), um dos aspectos mais importantes do fluxo de gases é que sua natureza pode variar consideravelmente, dependendo da pressão e da geometria da câmara ou da tubulação em que o mesmo está se movendo. A identificação do regime de escoamento é fundamental para os cálculos e dimensionamento do sistema de vácuo. Conforme vemos na Tabela 8.3, o parâmetro PxD serve para identificar o regime de escoamento dos gases e vapores em processo de bombeamento.

Tabela 8.3 Parâmetro PxD utilizado para a identificação do regime de escoamento dos gases.

Parâmetro P x D (mbar.cm)	Regime de escoamento dos gases
$> 6,0 \times 10^{-1}$	Viscoso
Entre $6,0 \times 10^{-1}$ e $1,3 \times 10^{-2}$	Knudsen ou de transição
$< 1,3 \times 10^{-2}$	Molecular

Fonte: Leybold Vacuum, 2002.

Como o regime de escoamento varia com a pressão, o cálculo preliminar dos valores foram obtidos considerando-se a pressão inicial (932,33 mbar) e pressão final medida pelo medidor Pirani ( $\sim 5 \times 10^{-2}$  mbar). Na Tabela 8.4 vemos os resultados do cálculo do fator PxD, considerando: o diâmetro de 3,5 cm do fole metálico; o diâmetro de 0,43 cm do tubo longo; a pressão inicial na câmara de vácuo e a pressão final mínima atingida pelos sistemas de pré-vácuo em operação.

Tabela 8.4 Identificação do regime de escoamento dos gases na câmara de vácuo:

(\*) regime de escoamento viscoso (\*\*) regime de escoamento molecular.

P x D	Para P = 932,33 mbar (início do bombeamento)	Para P = $5 \times 10^{-2}$ mbar (final do bombeamento)
Fole metálico	3263,15 mbar.cm (*)	0,175 mbar.cm (*)
Tubo longo	400,90 mbar.cm (*)	$2,15 \times 10^{-2}$ mbar.cm (**)

## 8.8 Condutâncias das tubulações e do filtro de admissão de gases

Com o objetivo de impor dois níveis de condutância ao sistema de pré-vácuo, tubulações com diferentes comprimentos e diâmetros foram empregadas para unir as bombas mecânicas de palhetas à câmara de vácuo de 46 litros. Para o nível mais alto de condutância as bombas foram ligadas à câmara de vácuo através de um fole

metálico de 48 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro. Para o nível mais baixo de condutância, as bombas de vácuo foram ligadas à câmara de vácuo através de um tubo longo e fino, com 225 cm de comprimento e 0,43 cm de diâmetro.



Figura 8.6 – Sistema de pré-vácuo formado por câmara de vácuo de 46 litros, fole metálico de 48 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro, válvula solenóide, coluna de mercúrio, medidor Pirani e bomba de vácuo com velocidade de bombeamento  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ . Fonte: LTV da FATEC-SP (2008).

As condutâncias das tubulações foram obtidas a partir das dimensões do diâmetro (D) e comprimento (L) das tubulações, em cm e da pressão média (P), em mbar e considerando que o gás presente no interior da câmara é o ar a  $20^\circ\text{C}$ . Para o escoamento viscoso laminar, que caracteriza a região do pré-vácuo, as respectivas condutâncias foram obtidas a partir da equação 8.2:

$$C = 137 \times (D^4/L) \times P \quad (8.2)$$

Assim, para o fole metálico de 3,5 cm de diâmetro e 48 cm de comprimento e considerando  $P_{\text{final}} = 5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ , teremos a seguinte condutância:

$$C = 137 \times [(3,5)^4/48] \times 5 \times 10^{-2} = 21,42 \text{ l/s.}$$

Para o tubo fino e longo de 225 cm de comprimento e 0,43 cm de diâmetro e considerando  $P_{\text{final}} = 5 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ , teremos a seguinte condutância:

$$C = 137 \times [(0,43)^4 / 225] \times 5 \times 10^{-2} = 0,001 \text{ l/s}$$

Para a pressão de 932,33 mbar no início do bombeamento teremos uma condutância de 399320 l/s para o fole metálico e 19,41 l/s para o tubo fino e longo. Portanto, podemos esperar um tempo maior para o bombeamento dos gases na câmara de vácuo que está ligada a bomba de vácuo por meio de um tubo fino e longo. Com estas considerações temos os níveis de velocidade de bombeamento e de condutância utilizados neste estudo de caso, conforme vemos na Tabela 8.5.

Tabela 8.5 – Níveis de condutância e velocidade de bombeamento avaliados no estudo de caso dos sistemas de pré-vácuo montados no Laboratório de Tecnologia do Vácuo da FATEC – SP.

Velocidade de bombeamento (m <sup>3</sup> /h)	Diâmetro da tubulação em cm	Comprimento da tubulação em cm	Condutância da tubulação (l/s) para o vácuo máximo atingido pelos sistemas de pré-vácuo
2,4	3,5	48	21,42
8,2	3,5	48	21,42
16,0	3,5	48	21,42
2,4	0,43	225	0,001

Para o filtro de admissão formado por corpo de alumínio, filtro de aço inoxidável e massa total de 1,2 kg, as condutâncias são as seguintes:

- 15,0 l/s para  $10^{-1}$  mbar de pressão;
- 6,0 l/s para  $10^{-2}$  mbar de pressão.

Nos cálculos da velocidade efetiva de bombeamento utilizaremos 6,0 l/s, como valor de referência para a condutância do filtro de admissão de gases.

### 8.9 Nível de ruído dos sistemas de pré-vácuo

O nível de ruído dos sistemas de pré-vácuo em funcionamento foram medidos utilizando-se o decibelímetro digital da marca Instrutherm modelo DEC 5000.



Figura 8.7 – Decibelímetro digital da marca Instrutherm Modelo DEC 5000, com escala de 30 a 130 dB, precisão +/- 1,5 dB e resolução de 0,1 dB e ponderação A e C. Fonte: Instrutherm, disponível em [www.Instrutherm.com.br](http://www.Instrutherm.com.br), acesso em 29/01/2009.

\* A condutância do filtro de admissão de gases foi obtida no catálogo as Alcatel Vacuum Technology de 2001, página 58.

Na tabela 8.6 vemos os resultados dos níveis de ruído dos sistemas de pré-vácuo, todos medidos a 1 metro de distância da fonte.

Tabela 8.6 – Resultados da medição de pressão sonora dos sistemas de pré-vácuo estudados.

Sistema de pré-vácuo	Velocidade de bombeamento	Ruído a 1 metro
Com fole metálico	2,4 m <sup>3</sup> /h	55,4 dB
Com fole metálico	8,2 m <sup>3</sup> /h	59,1 dB
Com fole metálico	16,0 m <sup>3</sup> /h	65,1 dB
Com tubo fino e longo	2,4 m <sup>3</sup> /h	56,4 dB

Vale destacar que os níveis de ruído, próximo aos sistemas de pré-vácuo em operação, variaram entre 65,4 e 73,2 dB. Conforme vemos na tabela 8.6, o incremento na velocidade de bombeamento das bombas de vácuo resultou em pequeno aumento no nível de pressão sonora. Todos os valores medidos foram inferiores a 80 dB, não sendo considerados críticos do ponto de vista ambiental e de saúde ocupacional.

### 8.10 Avaliação dos gradientes de temperatura

As medidas de temperaturas em diferentes partes do sistema de pré-vácuo foram realizadas com auxílio de um termômetro de mira laser da marca Instrutherm, modelo TI 860, com escala de -30 a 270<sup>o</sup>C, precisão +/- 2<sup>o</sup>C e resolução 0,1<sup>o</sup>C. Na tabela 8.7 vemos o resultado das medidas dos gradientes de temperatura realizadas em 4 diferentes sistemas de pré-vácuo.

Tabela 8.7 Gradientes de temperatura, em <sup>o</sup>C, nos sistemas de pré-vácuo.

Parte do sistema de pré-vácuo	Com fole metálico Sb 2,4 m <sup>3</sup> /h	Com tubo fino e longo Sb 2,4 m <sup>3</sup> /h	Com fole metálico Sb 8,2 m <sup>3</sup> /h	Com fole metálico Sb 16 m <sup>3</sup> /h
Reservatório de óleo da bomba	38,0	36,0	46,5	59,5
Região próximo as palhetas da bomba	37,0	36,5	65,5	54,5
Filtro de admissão dos gases	22,5	24,5	28,0	31,0
Motor da bomba	41,5	43,0	61,0	40,5
Ventilação do motor	17,5	18,0	23,0	18,5
Tubulação principal	19,0	18,5	25,5	20,0
Superfície da câmara de vácuo	18,0	16,5	24,0	20,5



Nestes sistemas, notamos que as correntes quentes estão localizadas nas diferentes partes das bombas de vácuo enquanto as correntes frias estão situadas nas tubulações e na câmara de vácuo.

Estes aspectos são importantes quando pensamos no desenvolvimento de projetos de integração energética promovida por uma rede de trocadores de calor. Em diversos processos industriais assistidos a vácuo a integração energética tem um papel importante na conservação de energia. Segundo Manzini e Vezzoli (2005), atualmente existe uma tendência para a escolha de processos produtivos com menor consumo energético ou que utilizem o calor disperso por algum processo para o pré-aquecimento de alguns fluxos em outros processos. Outra constatação das medições é a de que os sistemas de pré-vácuo com bombas de maior velocidade de bombeamento apresentaram maior amplitude nos gradientes de temperatura.

### 8.11 Cálculo teórico da velocidade efetiva de bombeamento

Para a determinação da velocidade efetiva de bombeamento ( $S_{ef}$ ) precisamos conhecer os valores da velocidade de bombeamento ( $S_{bv}$ ), declarada no catálogo do fabricante, a condutância total ( $C_{total}$ ), da tubulação disposta em série, é formada pela contribuição das condutâncias da tubulação, dos filtros de admissão de gases à bomba e de outros elementos que impõem algum tipo de impedância ao sistema de pré- vácuo. A velocidade efetiva de bombeamento foi calculada a partir da equação 7.10, definida anteriormente como:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{Total}} \Rightarrow S_{ef} = \frac{S_{bv} C_{Total}}{S_{bv} + C_{Total}}$$

Para o sistema de pré-vácuo formado por bomba mecânica com velocidade de bombeamento 2,4 m<sup>3</sup>/h, fole metálico de 48 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro, condutância do filtro de admissão 6,0 l/s e condutância do fole 21,42 l/s, teremos:

$$1/S_{ef} = 1/0,666 + 1/6,0 + 1/21,42 = 1,7149 \Rightarrow S_{ef} = 0,5831 \text{ l/s} = 2,10 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para o sistema de pré-vácuo formado por bomba mecânica com velocidade de bombeamento 2,4 m<sup>3</sup>/h, tubo de 225 cm de comprimento e 0,43 cm de diâmetro, condutância do filtro de admissão 6,0 l/s e condutância do tubo fino e longo de 0,001 l/s teremos:

$$1/S_{ef} = 1/0,666 + 1/6,0 + 1/0,001 = 1001,67 \Rightarrow S_{ef} = 0,001 \text{ l/s} = 0,004 \text{ m}^3/\text{h}$$

Na tabela 8.8 vemos os resultados do cálculo da velocidade efetiva de bombeamento para todas as situações avaliadas neste estudo de caso:

Tabela 8.8 Resultados dos cálculos da velocidade efetiva de bombeamento.

Condutância da tubulação (l/s)	Condutância do filtro de admissão (l/s)	S <sub>bomba</sub> (m <sup>3</sup> /h)	S <sub>efetiva</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Eficiência de bombeamento (S <sub>ef</sub> /S <sub>b</sub> ) x 100
21,42	6,0	2,4	2,10	87,50 %
21,42	6,0	8,2	5,51	67,20 %
21,42	6,0	16,0	8,20	51,25 %
0,001	6,0	2,4	0,004	0,17 %

Assim, notamos que somente no primeiro sistema de pré-vácuo as condutâncias da tubulação e do filtro de admissão não afetaram significativamente a velocidade de bombeamento dos gases. O termo eficiência de bombeamento, definido aqui como  $(S_{efetiva}/S_{bomba}) \times 100$ , pode parecer estranho e sem significado físico, porém serve para indicar se uma bomba de vácuo pode estar sendo bem escolhida para um determinado sistema de pré-vácuo. Na verdade, estes valores calculados devem ser confrontados com os valores obtidos experimentalmente a partir dos gráficos de decaimento da pressão em função do tempo.

### 8.12 Procedimento de caracterização do decaimento da pressão

A caracterização do decaimento da pressão na câmara de vácuo foi realizada abrindo a válvula de acionamento eletrônico apresentada na Figura 8.8. e iniciando o bombeamento do gás contido em seu interior.



Figura 8.8 Válvula de acionamento eletrônico utilizada nos experimentos.  
Fonte LVT-FATEC (2008).

Conforme a Figura 8.9, o decaimento da pressão na coluna de mercúrio e o tempo medido em cronômetro digital foram filmados com a ajuda de uma câmera digital.



Figura 8.9 Coluna de mercúrio (no centro), filmagem do decaimento de pressão (à direita) e cabeça sensora do medidor de pressão Pirani (à esquerda). Fonte: LTV FATEC-SP.

A vantagem de utilizar a câmera digital como uma forma de sistema supervisor é que os dados de pressão e tempo de bombeamento podem ser avaliados simultaneamente quando são reproduzidos em microcomputador assistido por uma planilha eletrônica como o Excel. Vale mencionar que a filmagem deve ser conduzida com iluminação apropriada e o mais paralela possível com a coluna de mercúrio para reduzir os erros de paralaxe.

### 8.12.1. Resultados da caracterização do decaimento de pressão

A grandeza pressão é empregada na maioria dos processos industriais assistidos a vácuo. O resultado de medição da pressão em função do tempo é um parâmetro de avaliação da qualidade do processo de bombeamento de gases e vapores no sistema de pré-vácuo. O resultado da medida de pressão deve apresentar confiabilidade metrológica e níveis de incerteza adequados à tolerância do respectivo processo de bombeamento de gases e vapores. Vários são os fatores que influenciam na medição de pressão na região do pré-vácuo, para os diferentes medidores existentes, principalmente a repetibilidade, reprodutibilidade, influência do gás utilizado na medição, estabilidade de zero, contaminações existentes na pressão residual e comportamento do padrão de referência, entre outros.

Na Figura 8.10 vemos o gráfico do decaimento da pressão em função do tempo de bombeamento para o sistema de pré-vácuo que opera com tubo fino de 225 cm de comprimento e 0,43 cm de diâmetro, com câmara de vácuo de 46,0 litros e bomba mecânica de palhetas com velocidade de bombeamento  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ . Neste caso, foram realizadas duas caracterizações, uma simulando vazamentos (em lilás) e outra sem vazamentos (em azul).

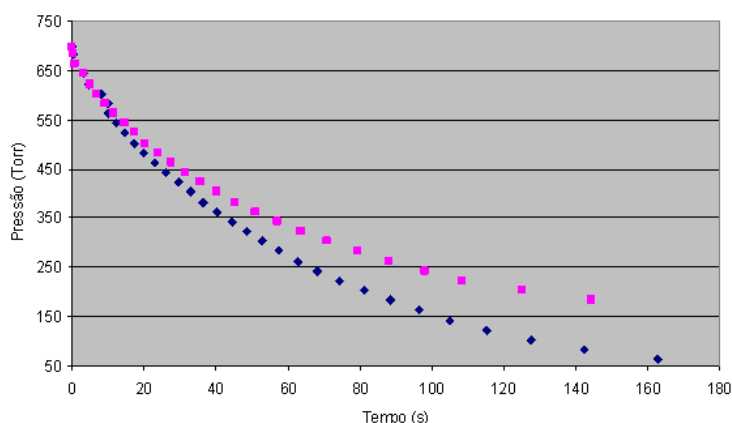


Figura 8.10 - Decaimento da pressão para  $S_b 2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , tubo de 0,43 cm de diâmetro e 225 cm de comprimento: em azul medição sem vazamentos; em lilás medição simulando vazamentos. Fonte: LTV FATEC-SP (2008).

As variações encontradas nos gráficos do decaimento da pressão em função do tempo de bombeamento da Figura 8.10, ilustram a importância da necessidade de uma vistoria prévia em todos os parâmetros que podem introduzir erros nas medições, principalmente condições das válvulas, vazamentos, calibração dos sensores de pressão, entre outros. No próximo experimento verificamos a influência da expansão do gás da câmara para o fole metálico sobre os valores da queda de pressão. Através da

análise dos vídeos da filmagem da medição de pressão em coluna de mercúrio e do gráfico da Figura 8.11 verificamos que ocorreu uma instabilidade e uma variação abrupta da pressão logo que foi aberta a válvula angular eletrônica.

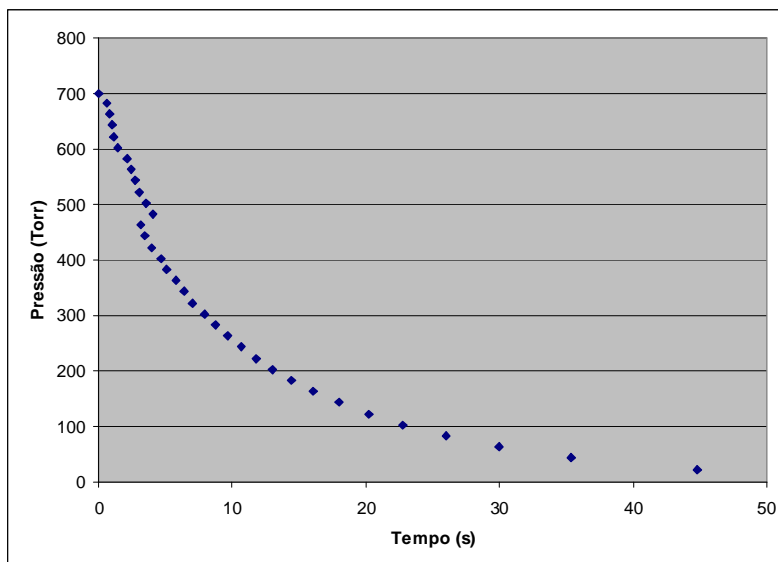


Figura 8.11 – Medida do decaimento da pressão com expansão dos gases da câmara para o fole metálico, realizado no sistema de pré-vácuo formado por bomba mecânica de palhetas com velocidade de bombeamento  $16,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , fole metálico e câmara de vácuo de 46 litros. Fonte: LTV FATEC – SP (2008)

A instabilidade e variação abrupta da pressão é devida a expansão dos gases que ocorreu da região da câmara de vácuo, que estava a pressão atmosférica antes de abrirmos a válvula, para o fole metálico. De acordo com os resultados observados no gráfico da Figura 8.11 notamos que a medição realizada com expansão de gases afeta a robustez do método de medição de pressão que utiliza coluna de mercúrio. Segundo Lanças (2004), a robustez é uma medida da capacidade de um método não sofrer alterações estatisticamente significativas em decorrência de pequenas variações, deliberadamente introduzidas nos parâmetros do procedimento de medição.

No gráfico da Figura 8.12 vemos a caracterização do decaimento da pressão para o mesmo sistema de pré-vácuo, mas desta vez, sem expansão do gás.

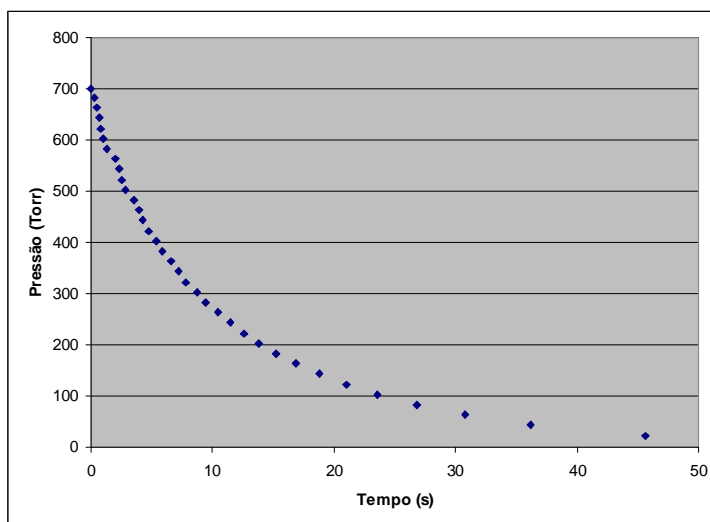


Figura 8.12 – Medida do decaimento da pressão sem expansão dos gases da câmara para o fole metálico, realizado no sistema de pré-vácuo formado por bomba mecânica de palhetas com velocidade de bombeamento  $16,0 \text{ m}^3/\text{h}$ , fole metálico e câmara de vácuo de 46 litros. Fonte: LTV FATEC – SP (2008)

Foi realizado um estudo de repetibilidade com o sistema de pré-vácuo que opera com bomba mecânica de  $8,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , com fole metálico de 48 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro. A repetibilidade representa o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas, de uma mesma grandeza, efetuadas nas mesmas condições, método de medição, observador, instrumento de medida, local, condições de utilização e em intervalo de tempo curto entre medições. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos de parâmetros estatísticos de dispersão de resultados, principalmente a amplitude, o desvio padrão e o coeficiente de variação percentual. Para este caso, foram realizadas 4 medições consecutivas, onde podemos observar os resultados nos gráficos da Figura 8.13.

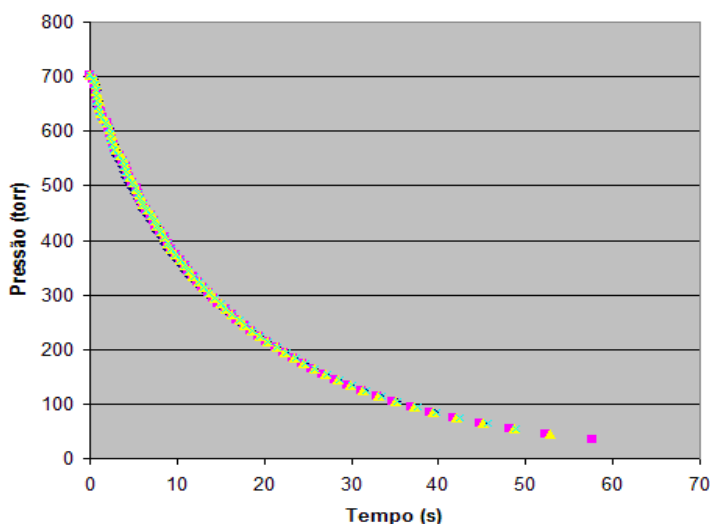


Figura 8.13 Gráficos do estudo de repetibilidade das 4 medições para o sistema de pré-vácuo com fole metálico, bomba mecânica com  $S_b=8,2 \text{ m}^3/\text{h}$  e câmara de vácuo de 46 litros. Fonte: LTV FATEC – SP(2008).

Os resultados dos testes de repetibilidade apresentados na Tabela 8.9 detalham o tempo, em segundos, necessário para os diferentes sistemas de vácuo atingirem uma determinada pressão. Neste caso, para pressões altas a variabilidade da medida foi maior, enquanto para pressões menores ela diminuiu. No início do bombeamento, tivemos uma variação de 23,6% entre medições sucessivas, enquanto para 505 Torr chegamos a 4,72% e para 55 Torr, o coeficiente de variação chegou a 0,8%.

Tabela 8.9 Repetibilidade para o sistema de pré-vácuo com velocidade de bombeamento 8,2 m<sup>3</sup>/h e fole metálico. Em todos os caso medimos o tempo necessário para o sistema atingir uma determinada pressão.

Pressão (Torr)	Teste 1 (s)	Teste 2 (s)	Teste 3 (s)	Teste 4 (s)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Coeficiente de variação (%)
695	0,333	0,400	0,533	0,333	0,094	23,6
685	0,567	0,533	0,633	0,500	0,057	10,2
665	0,733	0,800	0,933	0,700	0,103	13,0
565	2,800	2,900	2,97	2,77	0,138	5,01
505	4,433	4,767	4,967	4,800	0,224	4,72
405	8,167	8,600	8,633	8,533	0,215	2,53
305	13,367	13,567	13,700	13,667	0,150	1,10
205	21,233	21,233	21,433	21,466	0,126	0,59
105	35,000	34,767	35,033	35,267	0,204	0,58
75	41,867	41,767	42,000	42,367	0,262	0,62
55	48,133	48,200	48,767	48,900	0,390	0,80

O segundo estudo de repetibilidade envolve 3 medições consecutivas da queda de pressão em função do tempo de bombeamento para o sistema de pré-vácuo com velocidade de bombeamento 16 m<sup>3</sup>/h e fole metálico. Neste caso uma das medições foi conduzida com expansão de gases da câmara para o fole metálico e as demais sem expansão de gases. Na tabela 8.10 vemos a contribuição desta situação para o incremento da variabilidade da medição.

Tabela 8.10 Repetibilidade para o sistema de pré-vácuo com velocidade de bombeamento 16 m<sup>3</sup>/h e fole metálico. Em todos os caso medimos o tempo necessário para o sistema atingir uma determinada pressão.

Pressão (Torr)	Teste 1 (s)	Teste 2 (s)	Teste 3 (s)	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Coefficiente de variação (%)
683	0,467	0,267	0,567	0,153	35,22
643	0,867	0,667	0,967	0,153	18,32
603	1,267	1,033	1,400	0,186	15,06
503	2,867	2,833	3,567	0,414	13,41
403	5,400	5,433	4,633	0,453	8,78
303	8,000	8,700	7,900	0,493	5,82
203	14,200	13,833	13,033	0,597	4,36
103	24,300	23,600	22,800	0,750	3,18
83	27,500	26,833	26,033	0,734	2,74
63	31,333	30,767	29,967	0,690	2,24
43	36,833	36,166	36,367	0,342	0,94

Segundo Canossa (2009) todo resultado de uma medição possui erros e desvios, mas a sua variabilidade deve ser pequena se comparada com a variabilidade do parâmetro medido. Um sistema de medição sofre a influência de instrumentos, equipamentos, meio ambiente e pessoas que realizam a medição. O estudo destes fatores e seu comportamento ao longo do tempo possibilita o conhecimento da confiabilidade do sistema de medição. Quanto mais os valores de pressão medidos se aproximam do real ou do valor simulado mais confiável é o sistema de medição.

No caso dos dados da Tabela 8.10 percebemos que para pressões maiores, no início do bombeamento, a variabilidade chegou a 35,22%, sendo muito superior em relação ao estudo de repetibilidade feito para o sistema com velocidade de bombeamento 8,2 m<sup>3</sup>/h.



### 8.13 Velocidade efetiva de bombeamento a partir dos dados experimentais

Para o cálculo da velocidade efetiva de bombeamento a partir dos dados experimentais utilizamos os dados do tempo necessário para os respectivos sistemas de pré-vácuo atingirem 63 Torr ou 83,8 mbar, a pressão atmosférica medida localmente ( $P_{atm}$  701 Torr = 932,33 mbar) e a equação 7.6, ou seja,  $S = (V/t) \cdot \ln(P_{atm}/P_{final})$ . Por apresentar menor variabilidade durante a medição a pressão de 63 Torr ou 83,8 mbar foi escolhida para os cálculos da velocidade efetiva de bombeamento dos sistemas de pré-vácuo. Na tabela 8.11 vemos os resultados dos cálculos da velocidade efetiva de bombeamento para todos os sistemas de pré-vácuo avaliados neste estudo de caso.

Tabela 8.11 Determinação da velocidade efetiva de bombeamento a partir dos dados experimentais.

Sistema de pré-vácuo com:	$S_{bomba}$ (m <sup>3</sup> /h) declarado pelo fabricante	Tempo em segundos necessário para o sistema atingir 83,8 mbar	$S_{efetivo}$ (m <sup>3</sup> /h) Calculado a partir dos dados experimentais
Tubo fino longo	2,4	162,8	2,45
Fole metálico	2,4	142,4	2,80
Fole metálico	8,2	45,2	8,83
Fole metálico	16,0	30,7	13,00

### 8.14. Ensaio para avaliar a contribuição da condutância em leituras de pressão feitas em diferentes pontos do sistema de pré-vácuo.

Foi realizado um experimento acoplado um tubo de polietileno, com comprimento de 30 metros e diâmetro de 1/4", entre a bomba de vácuo, com velocidade de bombeamento 2,4 m<sup>3</sup>/h, e a câmara de vácuo de 46 litros. As medidas da pressão em função do tempo de bombeamento foram realizadas junto a câmara de vácuo e próximo da bomba de vácuo, respectivamente. O objetivo deste ensaio foi mostrar que o local onde instalamos os sensores de pressão podem efetivamente contribuir para leituras de pressão e curvas de bombeamento em função do tempo muito distintas devido a contribuição da baixa condutância da tubulação, conforme vemos na Figura 8.14.

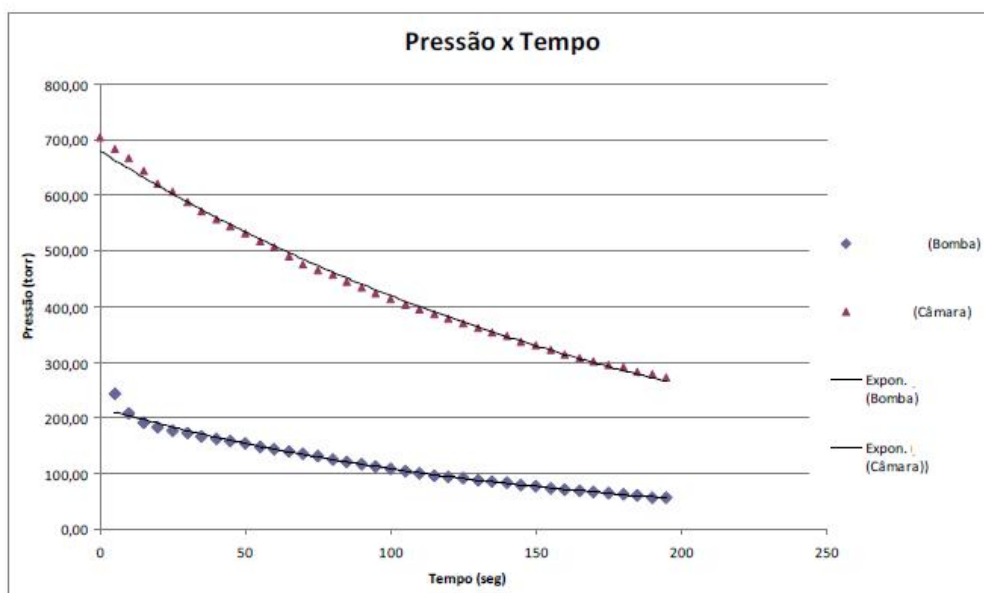


Figura 8.14. Ensaio com tubo fino de 30 metros de comprimento e diâmetro de  $\frac{1}{4}$  de polegada – medições de pressão junto à câmara e próximo da bomba, respectivamente. Fonte: LTV FATEC-2009.

A figura 8.15. apresenta os resultados do ensaio feito com tubo fino metálico de 225 cm de comprimento e 0,43 cm de diâmetro conectado entre a bomba de vácuo, com velocidade de bombeamento  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , e câmara de vácuo de 46 litros. Neste caso vemos uma contribuição menos intensa da condutância em relação aos diferentes pontos de medição de pressão.

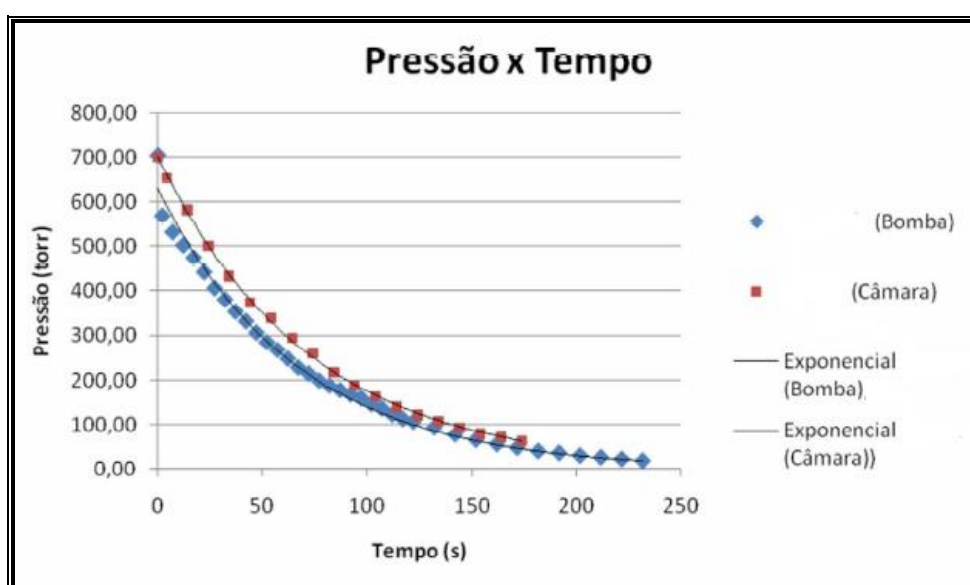


Figura 8.15. Ensaio com tubo fino de 2,25 metros de comprimento e diâmetro de 0,43 cm – medições de pressão junto à câmara e próximo da bomba, respectivamente. Fonte: LTV FATEC-2009.

A figura 8.16. apresenta os resultados do ensaio feito com tubo fino metálico de 48 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro conectado entre a bomba de vácuo, com velocidade de bombeamento 2,4 m<sup>3</sup>/h, e câmara de vácuo de 46 litros. Neste caso vemos que o comprimento e o diâmetro da tubulação não interferem nas medidas de pressão feitas em distintos pontos do sistema de pré-vácuo.

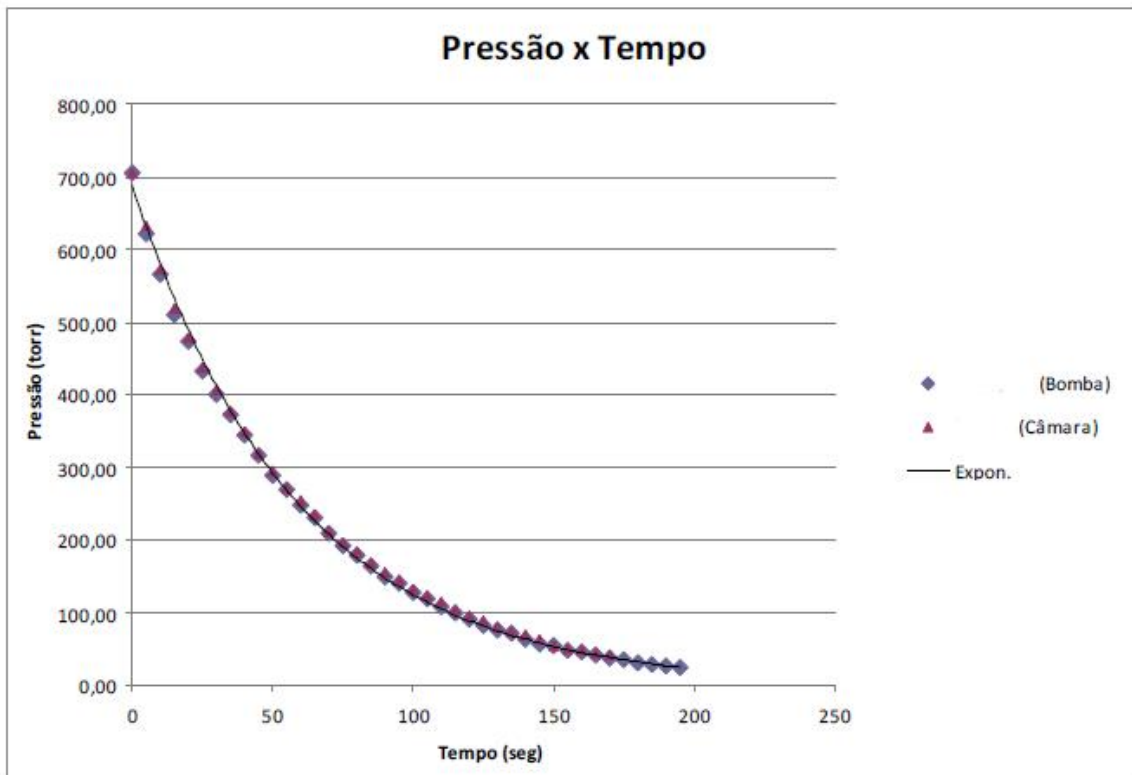


Figura 8.16. Ensaio com tubo fino de 48 cm de comprimento e diâmetro de 3,5 cm – medições de pressão junto à câmara e próximo da bomba, respectivamente. Fonte: LTV FATEC-2009.

### 8.15. Simulação computacional

A equação diferencial fundamental para o processo de bombeamento em vácuo, empregada na simulação do decaimento da pressão em função do tempo foi a seguinte:

$$V_{cv} \frac{dp_{cv}(t)}{dt} = -S_{ef} p_{cv}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8.1.)$$

onde

**V<sub>cv</sub>** é o volume da câmara de vácuo

$\frac{dp_{cv}(t)}{dt}$  é a variação da pressão na câmara de vácuo em função do tempo

**S<sub>ef</sub>** é a velocidade efetiva de bombeamento dada por

$$S_{ef} = \frac{S_{bv} C_{Total}}{S_{bv} + C_{Total}} \quad (8.2.)$$

**P<sub>cv</sub>** é a pressão na câmara de vácuo no instante t

$\sum_{i=1}^n q_i$  é o throughput total, formado por todas as fontes de gases e vapores

**S<sub>bv</sub>** é a velocidade da bomba de vácuo

**C<sub>total</sub>** é a condutância total do sistema de vácuo

Para a simulação do decaimento da pressão em função do tempo as empregamos o programa desenvolvido por Degasperri (2006, p.266) em plataforma computacional MathCAD™.

As curvas do decaimento da pressão em função do tempo a serão apresentadas em escala linear, bem como em escala logarítmica.

Neste estudo utilizamos sistemas de pré-vácuo formados por câmara de vácuo de 46 litros, foles metálicos de 45 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro, bombas mecânicas de palhetas de duplo estágio com velocidades de bombeamento, respectivamente, 2,4 m<sup>3</sup>/h e 8,2 m<sup>3</sup>/h, que iniciaram suas operações à pressão atmosférica e atingiram pressões da ordem de 10<sup>-3</sup> mbar no final do processo de bombeamento. Os resultados obtidos na simulação computacional, apresentados nas Figura 8.17. e Figura 8.18. foram compatíveis com os resultados determinados experimentalmente e descritos pelas Figuras 8.10 e 8.13.

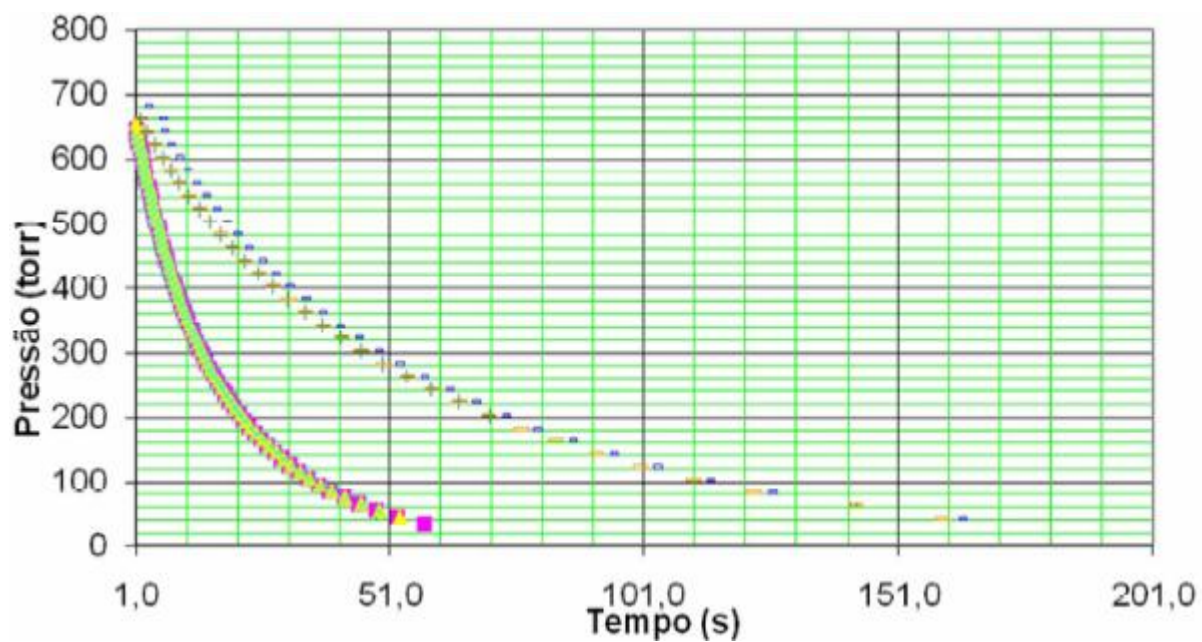


Figura 8.17. Gráfico linear - simulação do decaimento da pressão. Fonte: LTV FATEC,2009.

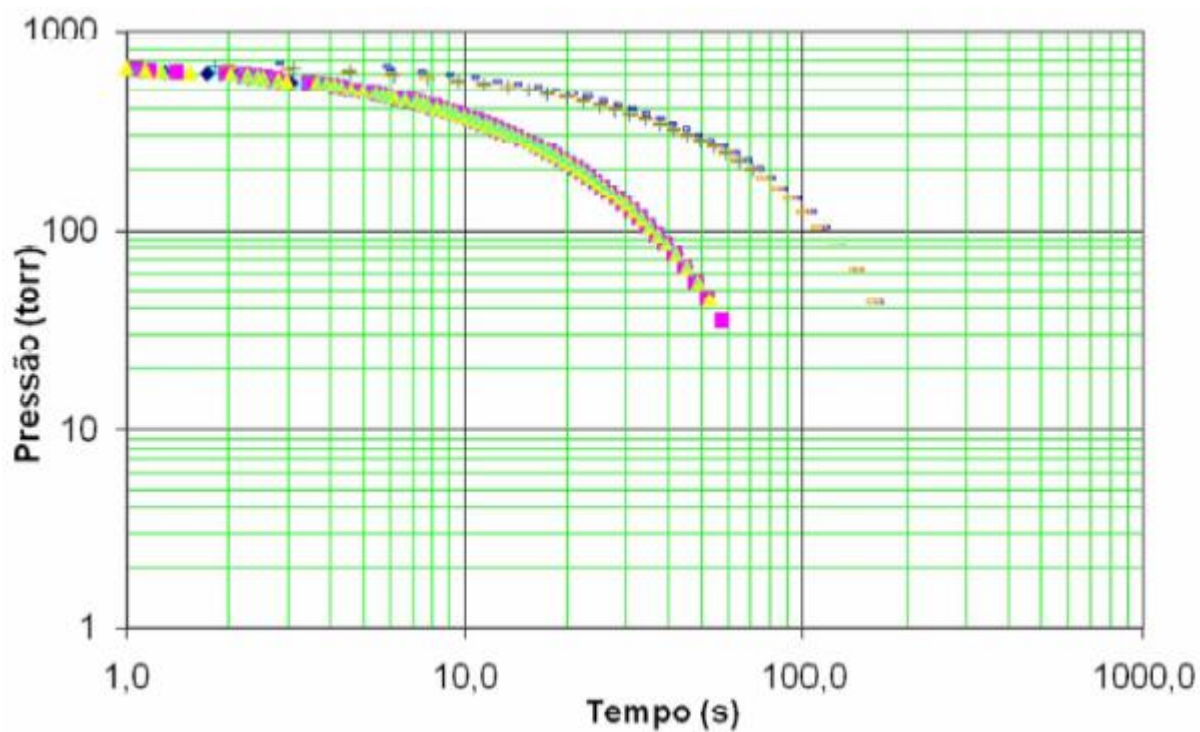


Figura 8.18. Gráfico dilog – simulação do decaimento da pressão. Fonte LTV FATEC, 2009.

## Capítulo 9

### Definição do Escopo do Projeto

O presente capítulo apresenta um questionário que deverá ser respondido pelas pessoas interessadas em desenvolver, projetar, simular, construir, montar e caracterizar sistemas de pré-vácuo. A definição do escopo contribui para assegurar que as especificações e metas de projeto possam ser cumpridas, questionadas e aprimoradas, principalmente nas etapas de simulação, construção, montagem e caracterização dos sistemas de pré-vácuo.

#### 9.1 Introdução

Segundo Prado (2004), projeto é um esforço único e não-repetitivo, de duração determinada, formalmente organizado e que congrega e aplica recursos visando o cumprimento de objetivos pré – estabelecidos. Woiler e Mathias (2008) definem projeto como um conjunto de informações coletadas e processadas, de modo que simulem uma dada alternativa de investimento para testar a sua viabilidade. Menezes (2007) define projeto como um empreendimento único que deve apresentar um início e um fim claramente definidos e que, conduzido por pessoas possa atingir seus objetivos respeitando os parâmetros de prazo, custo e qualidade.

De acordo com Brito (2008) o gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, experiências, ferramentas e técnicas nas atividades do projeto de modo a atingir suas metas e especificações previamente definidas em seu escopo. O escopo é o foco do projeto, ele descreve e define as especificações e etapas de trabalho necessárias para atingir os objetivos e metas pré-estabelecidas. O escopo de um projeto se apresenta como o ponto de partida para a realização de um determinado produto do projeto. O gerenciamento do escopo do projeto irá definir os caminhos que o projeto tem que seguir para alcançar o seu objetivo sem perder o foco. Brito esclarece que o gerenciamento do escopo é a base para a construção dos demais processos de gerenciamento de projeto, pois sem ele, torna-se muito complicado gerenciar a verificação e controle de custos, tempo e mudanças do escopo, pois não fica claro às partes interessadas qual é o limite do projeto, quais são as premissas do projeto, quais são os pacotes de trabalho, prazos de entrega, etc. Para Xavier et al. (2005) o planejamento do escopo é, portanto, o processo de elaborar e documentar a estratégia para o desenvolvimento do trabalho que irá gerar o produto do projeto.

Cada projeto exige um levantamento cuidadoso de ferramentas, fontes de dados, metodologias, processos e procedimentos, e de outros fatores, para garantir que o esforço gasto nas atividades de definição do escopo esteja de acordo com o tamanho, complexidade e importância do projeto. A declaração de escopo fornece um entendimento comum do projeto a todas as partes interessadas, bem como os principais objetivos, especificações e metas do projeto. Quando a declaração de escopo estiver pronta, a equipe do projeto, as partes interessadas, o patrocinador do projeto e o gestor do projeto terão um guia ou ponto de referência para gerenciar a execução do mesmo. Segundo Xavier et. al (2006) a declaração do escopo do projeto deverá ser composta no mínimo dos seguintes itens: objetivos do projeto, descrição do escopo do projeto, requisitos do projeto, limites do projeto, entrega do projeto, organização inicial do projeto, riscos iniciais definidos, marcos do cronograma, limitação de fundos, estimativa de custos, requisitos do gerenciamento, especificações do projeto e requisitos de aprovação. A seguir serão apresentadas algumas questões que devem ser respondidas pela partes interessadas para facilitar a definição do escopo de projeto de sistema de pré-vácuo. A dificuldade em respondê-las pode ser um claro sinal de que a execução do projeto de sistema de pré-vácuo poderá não atender aos requisitos de custo, prazo de fabricação, qualidade e atendimento às metas de operação do processo.

## **9.2. Questões para definição do escopo de projeto**

Assinale com "X" os parâmetros que mais se aproximam dos requisitos para o desenvolvimento do sistema de pré-vácuo pretendido.

### **9.2.1. Características dos gases e vapores a serem bombeados:**

Corrosivos

Explosivos

Inflamáveis

Ácidos

Alcalinos

Contém material particulado

Apresentam baixa pressão de vapor

Apresentam alta pressão de vapor

Inertes

Outra situação diferente:

**9.2.2. Segmento onde o sistema de pré-vácuo será implantado:**

Alimentício  
Farmacêutico  
Petroquímico  
Siderúrgico  
Metalúrgico  
Químico  
Tratamento de superfícies  
Tratamento de óleos isolantes  
Produção de álcool  
Produção de biodiesel  
Fabricação de ampolas de raios X  
Fabricação de lâmpadas  
Embalagens  
Outra situação diferente:

**9.2.3. Objetivo do processo:**

Movimentação de peças  
Transporte de material particulado  
Secagem  
Filtração  
Destilação  
Cristalização  
Aquecimento  
Resfriamento  
Desodorização  
Embalagem e conservação de alimentos  
Impregnação de substâncias  
Termoformação  
Pervaporação  
Vácuo clínico  
Outra situação diferente:



**9.2.4. Tipo de processo:**

Endotérmico

Exotérmico

Outra situação diferente:

**9.2.5. Regime de escoamento dos gases e vapores:**

Viscoso laminar

Viscoso turbulento

Intermediário (Knudsen)

Molecular

Outra situação diferente:

**9.2.6. Tipo de escoamento:**

Em uma fase

Em duas fases

Em três fases

Outra situação diferente:

**9.2.7. Faixa de temperatura do processo:**

Mínima: \_\_\_\_\_

Máxima: \_\_\_\_\_

Mais freqüente: \_\_\_\_\_

**9.2.8. Faixa de pressão do processo:**

Mínima: \_\_\_\_\_

Máxima: \_\_\_\_\_

Mais freqüente: \_\_\_\_\_

**9.2.9. Bombas de vácuo a serem empregadas:**

Mecânica de palhetas

Anel líquido

Roots

Ejetores de vapor

Ejetores a gás

Outra situação diferente:

**9.2.10. Tempo requerido para o processo:**

Segundos

Minutos

Horas

Dias

Outra situação diferente:

**9.2.11. Acabamento interno da câmara de vácuo:**

Aço inoxidável escovado

Aço inoxidável eletropolido

Aço inoxidável jateado

Polímero termoplástico

Compósito polimérico

Vidro

Outra situação diferente:

**9.2.12. Solventes utilizados na limpeza interna da câmara de vácuo:**

Acetona

Hexano

Álcool etílico

Álcool isopropílico

Tricloroetileno

Outra situação diferente:

**9.2.13. Realizará a leitura da ficha de segurança dos solventes?:**

Sim

Não

Parcialmente

**9.2.14. Nível de vazamentos tolerado para o sistema de pré-vácuo:**

$10^{-1}$  mbar.l/s

$10^{-2}$  mbar.l/s

$10^{-3}$  mbar.l/s

$10^{-4}$  mbar.l/s

Outra situação diferente:

**9.2.15. Os gases e vapores liberados do sistema de pré-vácuo deverão ser:**

- Filtrados
- Condensados
- Aquecidos
- Resfriados
- Coletados como produtos
- Coletados como co-produtos
- Lavados
- Desumidificados
- Outras situações:

**9.2.16. Antes de serem admitidos no sistema de pré-vácuo os gases e vapores deverão ser:**

- Aquecidos
- Resfriados
- Filtrados
- Lavados
- Desumidificados
- Tratados em peneiras moleculares (zeólitas)
- Outras situações:

**9.2.17. Tipos de sensores de pressão a serem instalados:**

- Pirani
- Vacuômetro de Bourdon
- Membrana capacitiva
- Coluna de mercúrio
- Outros:

**9.2.18. Os sensores de pressão devem ser instalados:**

- em um único ponto na câmara de vácuo
- nas extremidades das tubulações
- em diferentes pontos na câmara de vácuo
- fora da linha de escoamento de gases e vapores
- Outros:

**9.2.19. Tipo de sensores de temperatura a serem instalados:**

Termopar  
Infravermelho  
Mira laser  
Coluna de mercúrio  
Outros:

**9.2.20. Os sensores de temperatura devem ser instalados:**

em um único ponto na câmara de vácuo  
nas extremidades das tubulações  
em diferentes pontos na câmara de vácuo  
fora da linha de escoamento de gases e vapores  
Outros:

**9.2.21. A câmara de vácuo atenderá aos requisitos de segurança determinados pela Norma Regulamentadora NR 13 da ABNT?**

Sim, totalmente  
Sim, parcialmente. Especificar os requisitos:  
Seguiremos outra norma de segurança. Especificar:

**9.2.22. As tubulações atenderão aos requisitos de segurança determinados pela Norma Regulamentadora NR 54 da ABNT?**

Sim, totalmente  
Sim, parcialmente. Especificar quais requisitos:  
Seguiremos outra norma de segurança. Especificar:

**9.2.23. Aplicará as Normas NBR 10004 a 10007 da ABNT para descarte, armazenamento e transporte dos resíduos gerados nas etapas de fabricação, montagem e manutenção dos sistemas de pré-vácuo?**

Sim, totalmente  
Sim, parcialmente. Especificar os requisitos:  
Seguiremos outra norma de segurança. Especificar:

**9.2.24. Quanto ao sistema supervisório é desejável que ele tenha:**

Microcomputadores conectados a uma rede de comunicação de controladores lógicos programáveis.

Controle remoto através de rede, conectado via WEB, telefonia ou rádio.

Monitores que possibilitem a visualização de gráficos, displays de mensagens, objetos em movimento como motores ou mudança de cores para identificar fluxos e outros movimentos.

Outras situações diferentes:

**9.2.25. A integração energética visa reduzir o consumo de utilidades pelo processo. Os procedimentos empregados para tal propósito serão:**

a seleção da corrente quente com a maior temperatura de entrada e a fria com a maior temperatura de saída.

a seleção da corrente quente com a menor temperatura de entrada e a fria com a menor temperatura de entrada.

efetuar a troca térmica entre as correntes quentes e frias escolhidas respeitando uma variação de 10<sup>0</sup>C.

especificar outra situação diferente:

**9.2.26. Durante a operação o sistema de pré-vácuo utilizará:**

água aquecida

água refrigerada

vapor d'água

ar comprimido

gás nitrogênio

gás oxigênio

gás Hélio

Outros:

**9.2.27. Existe a necessidade de análise dos gases residuais?**

Sim. Justificar:

Não. Justificar:

**9.2.28. Material das tubulações que unem bomba e câmara de vácuo:**

aço inoxidável escovado  
aço inoxidável jateado  
aço inoxidável eletropolido  
cobre  
alumínio  
polímero termoplástico  
compósito polimérico  
especificar outra situação:

**9.2.29. Para a realização da simulação do sistema de pré-vácuo dispõe de:**

planilha Excel  
pacotes de fluidodinâmica computacional  
MathCAD  
MATLAB  
Aspen Dynamics  
Inventário completo das informações quantitativas e qualitativas do processo  
Considerações sobre as fontes de incerteza  
Análise de sensibilidade  
Modelo matemático dos equipamentos  
Especificar outra condição diferente:

**9.2.30. Faixa de velocidade efetiva de bombeamento desejada em m<sup>3</sup>/h?**

1 e 2  
2 e 4  
4 e 8  
8 e 10  
10 e 12  
Especificar outros valores diferentes:

**9.2.31. O diâmetro da tubulação que une bomba e câmara de vácuo é:**

muito pequeno

pequeno

grande

muito grande

Especificar o valor do diâmetro da tubulação:

**9.2.32. O comprimento da tubulação que une bomba e câmara de vácuo é:**

muito pequeno

pequeno

grande

muito grande

Especificar o valor do comprimento da tubulação:

**9.2.33. Qual é a contribuição dos filtros de admissão e de exaustão de gases na redução da condutância?**

muito pequena

pequena

grande

muito grande

Especificar os valores das respectivas condutâncias os filtros:

**9.2.34. No projeto de detalhamento da instrumentação serão definidas as seguintes especificações:**

Tempo de respostas dos instrumentos

Características das válvulas de controle

Alcance dos sinais de entrada e de saída de cada instrumento

Linearidade dos instrumentos em toda a faixa de medição

Fontes de alimentação necessárias, elétrica ou pneumática

Detalhar outros parâmetros que julgar necessário:

### 9.3. Considerações finais

A principal contribuição deste trabalho de dissertação foi a elaboração de recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas de pré-vácuo. De forma mais detalhada, podemos concluir que as principais contribuições desta dissertação foram as seguintes:

Fornecer sugestões para a integração energética em sistemas de pré-vácuo através de uma rede de trocadores de calor, principalmente em processos de secagem, destilação, cristalização e pervaporação, que são muito utilizados na indústria de alimentos, química e farmacêutica.

Avaliar os aspectos ambientais envolvidos nas operações dos sistemas de pré-vácuo, fornecendo sugestões para a redução do ruído, das vibrações e das emissões de gases e vapores durante o seu funcionamento.

Recomendar procedimentos para manter seguro o processo de bombeamento de gases e vapores durante a operação de sistemas de pré-vácuo, evitando riscos de explosões, acidentes e desgaste prematuro nos equipamentos.

Fornecer critérios para a seleção de bombas a serem utilizadas nos sistemas em sistemas de pré-vácuo.

Apresentar elementos a serem considerados nos projetos de sistemas de pré-vácuo, incluindo especificações de bombas, integração energética, projeto de instrumentação e projeto de implantação de sistema supervisório.

Fornecer elementos conceituais sobre simulação e modelagem de processos considerando o modelo matemático dos equipamentos, as fontes de incerteza e a análise de sensibilidade.

Apresentar recomendações sobre procedimentos de limpeza de superfícies e cuidados que devem ser tomados em relação às operações de soldagem e usinagem das peças para que o sistema de pré-vácuo em operação tenha o seu desempenho otimizado em termos de pressão final mínima atingida e manutenção da qualidade do vácuo obtido.

Descrever e ilustrar as principais montagens de sistemas de pré-vácuo que devem ser evitadas para não desencadear problemas que restringem o escoamento de gases e vapores no regime de fluxo viscoso laminar.



Fornecer uma lista de possíveis falhas e causas associadas ao funcionamento irregular das bombas mecânicas que podem comprometer o desempenho dos sistemas de pré-vácuo.

Apresentar informações sobre a montagem de flanges, tubulações e conexões comumente utilizadas nos sistemas de pré-vácuo.

Trazer informações e recomendações de procedimentos para classificar, armazenar, transportar, manipular e destinar os principais resíduos que eventualmente sejam gerados durante a manutenção e operação de sistemas de pré-vácuo, principalmente óleos lubrificantes utilizados nas bombas de vácuo, metais, mercúrio das colunas de medição de pressão e solventes empregados na limpeza dos materiais.

Descrever os resultados do estudo de caso envolvendo sistemas de pré-vácuo com diferentes níveis de velocidade de bombeamento e de condutância, que são relevantes para micro-engenharia e aplicações industriais diversas.

Apresentar dados que interferem na robustez e repetibilidade dos resultados das medidas de pressão quando utilizamos a coluna de mercúrio como sensor da variação de pressão durante o processo de bombeamento de gases e vapores.

### **9.3.1. Trabalhos futuros**

- § Os valores de pressão obtidos nos sistemas de pré-vácuo em operação foram fortemente dependentes da posição onde os sensores foram instalados. Desta forma, como trabalhos futuros sugerimos a caracterização e simulação computacional da distribuição espacial da pressão em função do tempo de bombeamento para os sistemas de pré-vácuo estudados anteriormente.
- § Em relação aos aspectos ambientais da operação dos sistemas de pré-vácuo temos interesse em estudar o desempenho de filtros de admissão e de exaustão em sistemas de pré-vácuo que bombeiam dispersões multifásicas formadas por materiais sólidos particulados, gases e vapores agressivos que são muito comuns na indústria química, de alimentos, de tratamento de superfície, entre outras. Temos interesse em analisar a influência destes elementos na condutância total e no desempenho operacional do sistema de pré-vácuo.
- § Como trabalhamos com escoamento de gases em condições isotérmicas, temos o interesse em estudar posteriormente os mesmos processos em condições não isotérmicas para avaliarmos os efeitos sobre o desempenho do processo em termos de vazamentos, metrologia e direcionalidade.

## Referências Bibliográficas

Acciari, R. Medição da Velocidade de Bombeamento de Bombas de Vácuo. Monografia de Trabalho de Graduação do Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos – MPCE, Laboratório de tecnologia do Vácuo da FATEC – SP, São Paulo, 2004.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12188/2001, Norma Regulamentadora para Sistema de Vácuo Clínico, disponível em: <http://br.groups.yahoo.com/group/tecnosaude/>, acesso em 27/12/2008.

Associação Brasileira de Normas técnicas, Projeto 04:011.07-008, Vasos de Pressão em Serviço – Inspeção de Segurança, 2004, disponível em [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br), acesso em 21/12/2008.

AFONSO, M.R.A. SILVEIRA, V. Resfriamento Rápido a Vácuo de Alfaces (Lactuca Sativa L.), Anais do 3º. Encontro de Energia no Meio Rural, UNICAMP, Campinas, 2003.

ATALA, D.I.P. MAUGERI F. **Processo Fermentativo a Vácuo para a Produção de Etanol** – Fórum Permanente de Agronegócios, UNICAMP, Campinas, 2005.

ALMEIDA, C.M.V.B. e GIANETTI, B. **Ecologia Industrial: Conceitos, Ferramentas e Aplicações**, São Paulo, Edgard Blucher, 2006, 109p.

ASCA, J. **Catálogos dos Componentes de Manipulação por Vácuo**, disponível em [www.ascojoucomatic.com](http://www.ascojoucomatic.com), acesso em 03/11/2008.

ASSIS, A.R. BIZZO H.R., **Recuperação dos Componentes do Aroma de Caju por Pervaporação**, Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Campinas, 27(2), 349-354, 2007

BARCZA, M.V., **Hidrogenação de Óleos e gorduras – Processos Unitários Orgânicos**, disponível em [www.iq.ufrgs.br/lnmo/hidrogenacao.pdf](http://www.iq.ufrgs.br/lnmo/hidrogenacao.pdf) acesso em 12/12/2008.

BELKIS, V. FOLLY, R. SALGADO A. **Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos**, Rio de Janeiro, Ed. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

BOGAERTS, A. **Gás Discharge Plasma and Their Applications. Spectrochimica Acta Part B**, vol. 57, , 2002, p. 609-658.

BORJESSON, J. KARLSSON, H.O.E. TRAGARDH, G. **Pervaporation of a Model Apple Juice Aroma Solution: Comparison of Membrane Performance** J. Memb. Sc, v.119 n.2 p.222-239, 1996.

BRITO, I.R. A Importância da Gestão de Escopo em Projetos, disponível em <http://www.ietec.com.br>, acesso em 30/06/2009.

BUDAVARI, S. The Merck Index, An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals, Merck & Co, 11ª ed, New Jersey, 1996, p.763-764

CÂNDIDO E.M. ALMEIDA S.F.M. REZENDE M.C. **Processamento de Laminados de Compósitos Poliméricos Avançados com Bordas Moldadas**, Polímeros,v.10 n. 1, São Carlos, 2000.

CANOSSA, S. **Análise do Sistema de Medição**, Sercan treinamento e Consultoria, disponível em [scanossa@uol.com.br](mailto:scanossa@uol.com.br), acesso em 20/02/2009.

CEKINSKI, E. URENHA L.C. **Agitação e Mistura na Indústria**, Rio de Janeiro, LTC, 2007, 222 p.

COHEN, A. **Vacuum Forming Applications Using Rapid Prototyping Technology**, Object Geometries Ltd, 2008.

COSTA A.L. Simulação Numérica de um Trocador de Calor de Placas, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, IBP, Rio de Janeiro, 2005.

COSTA, E,C, Secagem Industrial, São Paulo, Edgard Blucher, 1ª. Edição, 2007, 178 p.

COTHREN C.C., MOORE E.E. JOHNSON J.L. One Hundred percent Facial Approximation with sequencial abdominal closure of the open abdomen, Am. J. Surg., 2006, 192(2):238-42.

COULSON, J.M., RICHARDSON, J.F. Tecnologia Química, volume II – Operações Unitárias, 2ªEd. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa , 1968, 889 p.

CURRINGTON, I. **Manual das Bombas Rotativas de Palhetas RV3, RV5,RV8 e RV12 da Boc Edwards**, Crawley, 2005.

DEGASPERI, F.T. Contribuições para Análise, Cálculo e Modelagem de Sistemas de Vácuo, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, Universidade de São Paulo, 2006.

DEGASPERI, F.T. **Curso de Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos – MPCE (Apostila)** Laboratório de Tecnologia do Vácuo da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2006 disponível em [www.fatec.sp.br](http://www.fatec.sp.br) acesso em 02/12/2009.

DELOOPER J.W. **Vacuum Chambers – Best Practices and External Affair**, Princenton Scientific Corp., Princenton, 2008.

DIAS,D.B. MORI M., MARTGNONI, W.P. **Fluidodinâmica Computacional Aplicada ao Estudo de Separadores Ciclônicos**, Campinas, I EPFEQ – Encontro de Pesquisa da Faculdade de Engenharia Química , UNICAMP, 2007.

DUTRA A. C. CHAVES A. A. **Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**, São Paulo, Fundacentro, 2001

FERREIRA M.C., WADA A. TUMA P. **The Vacuum Assisted Closure of Complex Wounds: Report of 3 cases**, Rev. Hosp. Clin. Fac. Med. São Paulo, 58(4): 227-230, 2003.

FONSECA A.P. MATOS A.S. **O Desafio da Metrologia a Muito Baixas Pressões – Metrovac – Laboratório de Tecnologia e Metrologia do Vácuo**, CEFITEC, 2006, disponível em [metrovaccefct.uol.pt](http://metrovaccefct.uol.pt), acesso em 19/11/2008.

FORTUNA A.O. **Técnicas Computacionais para a Dinâmica dos Flúidos – Conceitos Básicos e Aplicações**, São Paulo, EDUSP, 2000.

GAMA S., **Introdução a Ciência e Tecnologia de Vácuo** (Apostila), Sociedade Brasileira de Vácuo, Unicamp, Campinas, 2002.

GIANNINI M. CORSO D. **“Eletra” Vacuum Chamber Design and Fabrication**, Sincrotone Trieste, 1994.

GOBBI M. D. **Introdução aos Fenômenos de Transporte**, Capítulos 1 e 2, CEFET/PR, Paraná, 2007.

HABLANIAN M.H. **High Vacuum Technology – A Practical Guide**, New York, Marcel Dekker Inc, 1990.

HARRIS, N. **Modern Vacuum Practice**, Glasgow, McGrawHill, 2005.

HARRISON K. **Engineering a Better Vacuum Chamber**, GNB Corporation, disponível em [www.gnb.com](http://www.gnb.com), acesso em 11/12/2008.

HAUVILLER, C **Design Rules for Vacuum Chambers**, CERN – Accelerator School on Vacuum Technology, Geneva, 2006.

HERNANDEZ, L.F. **Uso de Filme Fino Adsorvente para o Desenvolvimento de Sistemas de Retenção de Compostos Orgânicos**, 2006, 127 p. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo . Departamento de Sistemas Eletrônicos.

JANKOSKY, I.P. SANTOS, G.R.V. ANDRADE, A. **Secagem da Madeira Serrada de Eucalipto**, XV Jornada Forestales de Entre rios, Concórdia, , 2000.

JURIZATO L.A. PEREIRA P.S.R. **Sistemas Supervisórios**, Nova Odessa, Network Technologies, v. 1-2, 2003, p.105-114.

KALEMPA D. **Fenômenos de Transporte no escoamento de Misturas de Gases Rarefeitos**, Dissertação de Mestrado, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2005.

KASCHNY, J.R., **Tecnologia do Vácuo – Pfeiffer Vacuum**, Apostila disponível em: <http://physika.info/physika/documents/vacu01.pdf> acesso em 25/11/2008.

KAVISKI, E. **Solução de Problemas de Fenômenos de Transporte pelo Método de Monte Carlo**, Dissertação de Mestrado, Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006.

KORETSKY, M.D. **Termodinâmica para a Engenharia Química**, Rio de Janeiro, LTC, 2007, 502p.

LEVINE J.D. DELOOPER J.W. **PPPL – Directives – Vacuum Windows**, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, 2008.

LIDA I. **Ergonomia: Projeto e Produção**, São Paulo, Edgard Blucher, 1998.

LIMA F.E. CORRÊA M. **Correlação entre os Parâmetros de Rugosidade: uma abordagem matemática**, Revista Tecnológica, Fortaleza, v.29, n.1, p.110-116, 2008.

LIMA, R. R. **Polimerização por Plasma de Éter e Ésteres Orgânicos: Caracterização e Possíveis Usos em Microeletrônica**, São Paulo, 2004, 120 p., Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

LONGUINI, M.D. NARDI, R. **Origens Históricas e Considerações Acerca do Conceito de Pressão Atmosférica**, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.19, n.1, 2002, p. 67-68.

LOPES, M.S. WINTER, A. BATISTELLA C.B. **Curvas de Destilação obtidas pelo Processo de Destilação Molecular, 4º**. PDPETRO, Campinas, 2007.

LUGUETA, G.R. **Esterilizador a Vapor com Vácuo – Aspectos Mecânicos e de Instrumentação necessários para a obtenção de um artigo estéril**, disponível em: [http://www.gerson.110mb.com/index\\_arquivos/esterilizador](http://www.gerson.110mb.com/index_arquivos/esterilizador), acesso em 10/01/2009.

MAINIER, F.B. TAVARES S.S.M. **Processo de Eletropolimento de Aços Inoxidáveis para Aplicação nas Indústrias de Alimentos e Fármacos**, disponível em: <http://www.feq.unicamp.br/cobequi/rP20.pdf>, acesso em 08/01/2009.

MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, 2ª**. Edição, Rio de Janeiro, LTC, 2003.

MANO, E.B. **Introdução a Polímeros**, São Paulo, Edgard Blucher, 1986.

MANZINI E., VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**, São Paulo, EDUSP, 2005, 366p.

MENACHO, L.P.M. SILVA L.H. **Refino de Óleo de Farelo de Arroz em Condições Brandas para a Preservação do Orizanol – Ciência e Tecnologia dos Alimentos – Campinas, 27(supl) 2007, p45-53.**

MENEZES, L.C.M., Gestão de Projetos, 2ª. Edição, São Paulo, Atlas, 2007.

MERMELSTEIN N.H. Development of a Vacuum Cooking Appliance for Use in the Professional Catering Business, Valência, Universidade Politécnica de Valência, 2003

MINELLI, E. VERATTI A.B. Tecnologia Aplicada ao Controle de Eficiência Energética em Usinas Nucleares – disponível em [www.eletronuclear.gov.br](http://www.eletronuclear.gov.br), acesso em 12/12/2008.

MOREIRA M.S. Estratégia e Implantação do Sistema de Gestão Ambiental, Editora DG, Belo Horizonte, 2001.

MORELLATO, F. A Influência do Eletropolimento na Limpeza e Desinfecção de Equipamentos das Indústrias de Processo, disponível em: [http://www.humma.com.br/biblioteca/limpeza\\_critica.pdf](http://www.humma.com.br/biblioteca/limpeza_critica.pdf) acesso em 05/01/2009.

MOUTINHO, A.M.C. Tecnologia do Vácuo, Lisboa, Universidade de Lisboa, 1980.

ONO L.K. PEREIRA D. Estudos Experimentais: velocidade de bombas de vácuo, condutância de tubos e vazamentos, São Paulo, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1992.

OKAMURA, E.K. Economia de Água em Bacias Sanitárias, Revista Ciências do Ambiente on-line, v.2,n.1, 2006

ORDÓNEZ, J.A. Tecnologia dos Alimentos - Componentes dos Alimentos e Processos, Vol.1, Porto Alegre, ARTMED, 2005, 294 p.

ORTIZ, O., **Plasma de Gás Natural como Meio Reativo para Polimerização Superficial de Madeira**, Dissertação (Mestrado) Universidade do Estado de Santa Catarina, 2007.

PARAGUASSU, L.H. SANTANA, M.A.A., Metrologia em Vácuo – Suporte para o Setor industrial e para a Qualificação de Produtos da Área de Pesquisa e Desenvolvimento, IV Congresso Latino Americano de Metrologia, Foz do Iguaçu, 2004.

PARK, K.J. OLIVEIRA R.A. Seleção de Processos e Equipamentos de Secagem (Apostila), Unicamp, 2006.

PEREIRA,C.C. Aroma Compounds Recovery of tropical Fruit Juice by Pervaporation: Membrane Material Selection and Process. J.Food Eng. 66, 77, 2005.

PERLINGEIRO C.A.G. Engenharia de Processos – Análise, Simulação, Otimização e Síntese de Processos Químicos, São Paulo, Edgard Blucher, 2005, 198 p.

PINEDO, A.A. MURR, F.E.X. **Influência da Pressão, Temperatura e Pré-Tratamentos na Secagem a Vácuo de Cenoura e Abóbora**, *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, Campinas, 25(4); 2005, 663-643.

PINHEIRO, P.C.C. **Aspectos da Conservação de Energia no Setor de Automóveis e Auto Peças** – I Encontro de conservação de Energia, CEMIG, Belo Horizonte, 1996, 17 p.

PINTO, A.C. GUARIERO L.L.N, REZENDE M.J.C., **Biodiesel: an overview**, *J. Bras. Chem. Soc.*, Vol.1, 16, n6B, 1313-1330, 2005.

PIRES, L. SILVA P.D. GONÇALVES L. **Aplicação da Termografia por Infravermelho ao Estudo Experimental da Convecção Natural em Superfícies Lisas e Nervuradas**, Universidade da Beira Interior, Departamento de engenharia Eletromecânica, 2002.

PIVA, H.L. **Coleta Seletiva e reciclagem de Excedentes Industriais**, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, Departamento de Meio Ambiente da FIESP, São Paulo, 2004.

POLONIO, W.L. GONÇALVES E.M. RAZUK P.C. **Performance de Diferentes Meios Filtrantes primários em filtração a Vácuo para Lodo de Caldo de Cana**, *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, v.23, n.1, 27-31, 2004.

PRADO, D. **PERT/CPM, Série Gerência de Projetos**, INDG, Belo Horizonte, v.4, 2004.

RAJAGOPALAN N. CHEYRAN M. **Pervaporation of Grape Juice Aroma** *J. Membrane Science*, 104, 243, 1995.

RESENDE J.V. RENO M.J., **Impregnação a Vácuo de Amido Gelatinizado para a Preservação de Microestrutura de Melões Congelados**, *Brazilian J. Food Technology*, v 30, n.2 , 2007, p. 86-95.

REZENDE J.B. CUNHA J.R. ANDRADE M.V. **Cobertura Temporária da cavidade Abdominal com Curativo a Vácuo**. *Rev. Col. Brás. Cir.* 2007, set . out; 34(5).

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estação de Tratamento de Água**, 1ª. Ed., São Paulo, Edgard Blucher, 2001

ROSSI, G.C. **Relação entre Parâmetros de Corte e Rugosidade da Superfície Usinada numa Operação de Frezamento de Topo**, São Paulo, EDUSP, 2003, 37 p.

RYANS J.L. ROPER D.L. **Process Vacuum Systems Design and Operation**, McGraw-Hill Book Company, 1986.

ROÇA, R. O. **Tecnologia da Carne e Produtos Derivados**, Botucatu, Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, 2000.

SALGADO, V.G., **Indicadores de Ecoeficiência e o Transporte de Gás Natural**, Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2007.

SANTOS, L.M.M. Avaliação Ambiental de Processos Industriais, São Paulo, Signus Editora, 2006, 130 p.

SAUNDERS, K.J. **Organic Polymer Chemistry**, New York, Chapman and Hall, 1985, 473p.

SCHMIDT F.C., CARCIOFI B.A.M, **Efeito de Impregnação a Vácuo na Transferência de Massa durante o Processo de Salga de Cortes de Peito de Frango**, Ciência e tecnologia do Alimentos, Campinas, 28(2), 366-372, 2008.

SCHRAM D.C., **Plasma Processing and Chemistry**, Pure Appl. Chem., Vol. 74, n.3, p. 369-380, 2002

SHARIPOV F. Rarefied gas Dynamics and Its Applications to Vacuum, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SOUZA A.R., **Estudo de Descargas em Gases: Aplicação ao Tratamento de Superfícies**, Caderno Catarinense do Ensino de Física, Florianópolis, v. 10 n.1: p. 71-87, abril,1993 .

SPAETH L. **Sistema de Esgoto por Vácuo- um sistema moderno que ajuda na recolha de águas residuais**, Roedger Vakuum-und Haustechnik GMBH, Hanan, 2000, 12 p.

STEMPNIAK R.A. A Ciência e a tecnologia do Vácuo – Resumo Histórico e Algumas Aplicações – Sociedade Brasileira do Vácuo, São José dos Campos, 2002.

STOETERAU R.L. **Superfícies Usinadas**, UFSC, São Carlos, 2007, disponível em: [http://www.Lmp.ufsc.br/disciplinas/emc540/AULA-27u-2007-1\\_superfícies.pdf](http://www.Lmp.ufsc.br/disciplinas/emc540/AULA-27u-2007-1_superfícies.pdf), acesso em 09/01/2009.

TABORELLI, M. **Cleaning and Surface Properties**, CERN, Geneva, 2006.

TOMPKINS, H.G., **Vacuum Technology: A beginning**, AVS Education Committee Book Series, 2002.

TRENT E.M. WRIGHT P.F. **Metal Cuting**, Butterworths, US:TER/1, 446 p.

TRIVELIN P.C.O. BENDASSOLLI J.A. **Técnicas com Vácuo - Apostila do Curso de Pós-Graduação em Energia Nuclear na Agricultura**, Piracicaba, 2006.

UCHIMURA, Refino de Glicerina, Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, Instituto de Tecnologia do Paraná, Curitiba, 2006.

UMRATH, W. Fundamentals of Vacuum Technology – Leybold Vacuum Products and Reference Book, Cologne, 2002.

VIANA H.M. AOKI I.V. Projeto Fatorial de Experimentos na Avaliação do Processo de polimerização por Plasma na Obtenção de Pré-Tratamentos em



Sistemas de Pintura para Aço Carbono, 22º. Congresso Brasileiro de Corrosão, Salvador, 2002.

XAVIER C. MAGNO, S. Gerenciamento de Projetos: como definir e controlar o escopo do projeto, São Paulo, Saraiva, 2006.

XAVIER C. MAGNO, S. Metodologia de Gerenciamento de Projetos – abordagem prática, Rio de Janeiro, Brasport, 2005.

WATSON, J.D. Manual da Bomba de Vácuo Rotativa de Palhetas Speedivac 2 da Boc Edwards, Crawley, 2005.

WOILER S., MATHIAS, W.F, Projetos: Planejamento, Elaboração, Análise, 2ª. Edição, Atlas, São Paulo, 2008.

## **Anexo A**

### **Critérios recomendados pela NR 13 para os vasos de pressão**

A NR 13 da ABNT estabelece os seguintes critérios para os vasos de pressão ou câmaras de vácuo:

- Toda câmara de vácuo deve ser instalada de modo que todos os acessórios e indicadores de pressão e temperatura, quando existentes, sejam facilmente acessíveis.
- A câmara de vácuo deve ser dimensionada considerando a pressão diferencial resultante atuando sobre as paredes, que poderá ser maior externamente ou internamente.
- Podem ser construídas de materiais e formatos geométricos variáveis em função do tipo de utilização a que se destinam. Desta forma, podem ser esféricas, retangulares, cilíndricas, quadradas, etc. Construídas em aço inoxidável eletropolido, alumínio, cobre, vidro, acrílico e outros materiais.
- Deve ter afixado em seu corpo, em local de fácil acesso e bem visível, placa de identificação, ano de fabricação, pressão máxima de trabalho admissível, temperatura máxima e mínima de operação, código do projeto e ano de edição.
- Deve possuir manual de operação próprio ou instruções de operação contidas no manual de operação do local onde estiver instalada, em língua portuguesa e de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo: procedimentos e parâmetros operacionais e de rotina, procedimentos para situações de emergência, procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.
- Os instrumentos e controles de vasos de pressão devem ser mantidos calibrados e em boas condições operacionais. Todos os instrumentos e controles que interfiram na segurança do vaso de pressão deverão ser periodicamente calibrados e adequadamente mantidos. A periodicidade de manutenção e a definição de quais instrumentos e controles dos vasos de pressão deverão fazer parte deste item e ser de responsabilidade de profissionais habilitados para cada especialidade.
- Todos os reparos e alterações em vasos de pressão devem respeitar o respectivo código de projeto de construção e as prescrições do fabricante no que se refere a: materiais, procedimentos de execução, procedimentos de controle de qualidade e qualificação e certificação de pessoal. Deve ser considerado como “reparo” qualquer intervenção que vise corrigir não conformidades com relação ao projeto original. Por exemplo: reparos com solda para recompor áreas danificadas, remoção de defeitos em juntas soldadas ou no metal base, substituição de internos ou conexões corroídas.

Deve ser considerada como “alteração” qualquer intervenção que resulte em modificações no projeto original inclusive nos parâmetros dos materiais, mudanças de internos ou conexões, mudança de geometria, etc. Antes da execução de qualquer reparo ou alteração que possam comprometer a segurança do sistema ou dos operadores do equipamento, deverá ser elaborado o respectivo projeto de alteração ou reparo que passará a fazer parte da documentação do mesmo. São exemplos de projetos de alteração ou reparo: alterações de especificações de materiais ou de acessórios, inclusão de outros dispositivos, reparos de soldas, etc.

- Devem ser submetidos a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. A inspeção de segurança inicial deve ser feita em vasos novos, antes de sua entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo compreender exame externo, interno e teste de vazamentos.
- Quando os vasos de pressão forem instalados em ambientes confinados, a instalação deve satisfazer os seguintes requisitos: dispor de pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas; dispor de ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas; dispor de iluminação conforme as normas oficiais vigentes.
- Todo vaso de pressão deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalado, a seguinte documentação devidamente atualizada: prontuário do vaso de pressão a ser fornecido pelo fabricante contendo as seguintes informações: código do projeto e ano de edição, especificação dos materiais, procedimentos utilizados na fabricação, montagem e inspeção final e determinação da pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), dados necessários ao monitoramento da vida útil do vaso, características funcionais, dados dos dispositivos de segurança; ano de fabricação, categoria do vaso, registro de segurança, projeto de instalação, projetos de alteração e reparo, bem como relatórios de inspeção.

## **Anexo B**

**Ficha de dados de segurança para o mercúrio utilizado em metrologia do vácuo**



Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº: 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

### 1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

- Nome do produto: Mercúrio Vivo
- Nome da empresa: Quimidrol Comércio Indústria Importação Ltda.
- Endereço: Rua Dona Francisca, 6505 – Distrito Industrial – Joinville – SC
- Telefone: 0800 - 601 8700 ou (47) 3027-8700
- Telefone para emergência: 0800 - 601 8700 ou (47) 3027-8700
- Fax: (47) 3027-8712
- Elaborado por: Claudia S. Portantiolo – CRQ XIII 13400549

### 2. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES

- Substância: Elemento químico metal – Mercúrio – Hg
- Nome químico ou nome genérico: Mercúrio
- Sinônimo: Mercúrio Metálico, Mercúrio
- Registro no Chemical Abstract Service (Nº CAS): 7439-97-6
- Ingredientes que contribuam para o perigo: Mercúrio 100% (peso)
- Classificação e rotulagem de perigo: Tóxico e corrosivo

### 3. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS

• Principais perigos: O Mercúrio existe como um metal pesado, inodoro, metal líquido prateado branco. É altamente tóxico por tanto à exposição aguda e crônica. A exposição pode causar corrosão dos olhos, da pele e no sistema respiratório, e pode resultar em danos no sistema nervoso irreversível. Prontamente forma amalgamações com a maioria dos metais, exceto o ferro (Fe).

- Efeitos potenciais para saúde:

Rotas de entrada primária: Inalação, contato/absorção de olhos e pele.

Órgãos alvos: Sistema nervoso central, olhos, pele, sistema respiratório, fígado e rins.

- Efeitos agudos:

Inalação: Exposições a altas concentrações de vapor podem causar danos respiratórios sérios. Outros sintomas incluem insônia, fraqueza muscular, anorexia, dor-de-cabeça, labirinto, diarreia, mudanças no fígado, febre, gengivites, dor no peito, respiração difícil, tosse, inflamação bucal (estomatites), salivação, bronquite e pneumonia. Acrodínia (rosada ou doenças Swifts), caracterizada por vermelhidão e descascamento da pele nos dedos dos pés e das mãos, que era comumente vista nas crianças nos anos 1950 e é ainda raramente vista em trabalhadores.

FISPQ Nº: 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 1 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------



Comércio Indústria Importação Ltda

## MERCÚRIO VIVO

FISPQ Nº. 050  
Nov./2007

## FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO

**Ingestão:** Mercúrio geralmente passa através do sistema digestivo rotineiramente. Contudo, grandes somas podem conseguir alcançar no intestino, e exige remoção cirúrgica. Se houver abscesso ou qualquer perfuração ao longo do sistema digestivo, a absorção na corrente sanguínea com mercúrio posterior envenenamento é possível.

**Pele:** A pele pode se tornar seriamente irritada se deixada a permanecer em contato com mercúrio. Absorção da pele ocorrerá na faixa de 2,2% de absorção através dos pulmões.

**Olhos:** Irritação e corrosão.

- **Carcinogenicidade:** IARC, NTP e OSHA não listam mercúrio (Hg) cancerígeno.
- **Condições médicas agravadas pela exposição de longo-prazo:** Desordens no Sistema Nervoso Central.
- **Efeitos Crônicos:** Exposição crônica aparece mais comum que aguda e é primariamente associada com o dano do sistema nervoso central, que pode ser permanente (ex.: paralisia das mãos, lábios, pés...). Sinais iniciais de toxicidade incluem fraqueza, fadiga, anorexia, perda de peso e distúrbios gastrintestinais. Se os níveis de exposição estiverem altos, tremores característicos dos dedos, pálpebras e lábios ocorrem com progressão para tremores generalizados do corpo inteiro. Desordens psíquicas são perceptíveis e caracterizados pelas mudanças de comportamento e personalidade, excitabilidade aumentada, perda de memória, insônia e depressão. Em casos severos, delírios e alucinações podem também ocorrer. Danos de rins são observados com oligúria (saída de urina diminuída) progredindo a anúria (cessão de urina) e pode exigir uma diálise. As córneas e as lentes dos olhos podem assumir uma descoloração amarelada e os músculos extraoculares podem ser danificados. A síndrome tem sido chamado de Síndrome Astenico-Vegetativa ou Micromercurialismo. Sintomas crônicos ocorrem aumentavelmente com exposições até 0,1 mg/m<sup>3</sup> ou mais. **Mutação:** Aneuploidia e outras aberrações cromossomais tem sido observadas nos linfócitos de culturas de sangue completa em trabalhadores expostos ao mercúrio. **Reprodução:** Mercúrio/Hg tem sido detectado em bebês natimortos de mulheres tratadas com Hg para sífilis. Num estudo de seis homens expostos agudamente (ocupacionalmente) ao mercúrio, os níveis de Hg chegaram a 44 mg/m<sup>3</sup>, todos submeteram em função sexual prejudicada. Contato de pele repetitivo pode causar dermatites alérgicas em alguns indivíduos.

- **Nota:** Mercúrio derramado deixará vapor suficiente em tempo extra produzirá envenenamento crônico.

## 4. MEDIDAS DE PRIMEIROS SOCORROS

- **Medidas de primeiros socorros:**

**Inalação:** Retirar a pessoa exposta e levar ao ar fresco e providenciar respiração se necessário.

**Contato com olhos:** Não permitir que a vítima esfregue ou mantenha olhos firmemente fechados. Suavemente levante as pálpebras e lave imediatamente e continuamente com

FISPQ Nº. 050

Versão: 02

Data: Nov./2007

Página: 2 de 9



Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº. 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

grandes quantidades de água até transportada ao atendimento médico. Consultar um médico imediatamente.

**Contato com pele:** Rapidamente retirar as roupas contaminadas. Enxágüe com jatos de água e em seguida lave a área exposta com sabão. Para pele avermelhada ou borbulhada, consulte um médico especialista.

**Ingestão:** Nunca dê algo pela boca a uma vítima inconsciente ou em convulsão. Procurar atendimento médico imediatamente. Em geral, mercúrio passará através do sistema digestivo rotineiramente.

Depois dos primeiros-socorros, arranje apropriadamente um hospital, um paramédico ou coisa parecida logo.

**Nota aos médicos:** BEI: sangue-15µg/L, urina-35µg/g de creatinina. Níveis de urina extremamente altos de 0,5 a 0,85mg Hg/L são indicativos de polineuropatia, e 0,4 a 22µg/L é relatado como nível de sangue letal ao humano. Obtenha urinálise incluindo ao mínimo: albumina, glicose e exame microscópico de sedimento centrifugado. Utilize BAL ou ácido 2,3-dimercaptosuccínico como quelantes. Não use sódio cálcico EDTA devido a nefrotoxicidade. Um eletromiograma pode determinar a extensão da disfunção neural. Tem se notado que exposições ao mercúrio podem predispor as pessoas a desenvolverem a síndrome de túnel de carpal.

<b>5. MEDIDAS DE PREVENÇÃO E COMBATE A INCÊNDIO</b>
---

- **Ponto de ignição:** Não inflamável.
- **Temperatura de auto-ignição:** Não inflamável.
- **LEL:** Não relatado.
- **UEL:** Não relatado.
- **Meios de extinção:** Use agentes adequados para combater fogo.
- **Fogo incomum ou perigos de explosão:** Não relatado.
- **Produtos de combustão perigosa:** Vapor tóxico de Hg e Óxido de Hg.
- **Instruções de combate ao fogo:** Não permita que os resíduos dos métodos de controle de fogo escoam para os esgotos ou lençóis fluviais.
- **Equipamentos de combate ao fogo:** Devido ao fogo poder produzir produtos tóxicos de decomposição térmica, use o aparelho de respiração próprio (SCBA), com uma completa peça facial operado em pressão exigida ou com chave de pressão positiva.

<b>6. MEDIDAS DE CONTROLE PARA DERRAMAMENTO OU VAZAMENTO</b>
--

FISPQ Nº. 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 3 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------





Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº: 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

- **Procedimentos para derramamento e vazamento:** Mantenha um kit de derramamento de Hg prontamente disponível em áreas onde o mercúrio é usado. Notificar o pessoal da segurança. Isolar e ventilar a área, rejeite a entrada e fique pronto.

- **Pequenos e grandes vazamentos:** Siga as instruções no kit de vazamento. Hg, a maioria dos kits já vem com um sifão a vácuo de aspiração orientada com "limpador" de Hg (escova de cobre ou cobre-prateada). Lave a área derramada com uma solução diluída de sulfeto de cálcio ou de ácido nítrico. Se o vazamento não puder ser limpo rapidamente, empanar a parte de cima do mesmo com flores de enxofre (S) ou preferencialmente, polissulfato de cálcio. Isso produzirá uma camada superficial de mercúrio que reduzirá a dispersão do vapor de Hg no ar (ambiente).

- **Exigências regulamentares:** Siga regulamentos aplicáveis OSHA (29 CFR 1910, 120).

#### 7. MANUSEIO E ARMAZENAMENTO

- **Manuseio**

**Precauções de manuseio:** Use EPI quando estiver trabalhando com Hg. Não use em superfícies de trabalho porosas (madeira, concreto cru, etc...) para prevenir vazamentos de alojamentos em fendas ou rachaduras.

- **Armazenamento**

**Exigências de estocagem:** Estoque em área fria, seca e bem-ventilada longe de calor e incompatíveis (S. 10). Estoque em pisos não porosos e lave regularmente com solução diluída de sulfeto de cálcio. Devido o mercúrio formar almagamas com a maioria dos metais, exceto o ferro, os próprios metais podem (e devem ser) pintados com uma fina camada suficiente para evitar esse acontecimento.

#### 8. CONTROLE DE EXPOSIÇÃO E PROTEÇÃO INDIVIDUAL

- **Controles de engenharia:** Onde for possível, anexe procedimentos para prevenir a dispersão do vapor de Hg na área de trabalho.

- **Parâmetros de controle específico:** Mercúrio, 100% (peso).

OSHA PEL-Teto de 0,1 mg/m<sup>3</sup> (vapor de Hg inorgânico), 8 hs. TWA-0,05 mg/m<sup>3</sup> (vapor), pele-desocupado 1989 limite de faixa final.

ACGIH TLVs-TWA – 0,025 mg/m<sup>3</sup> (compostos inorgânicos) e pele.

NIOSH REL-10 hs. TWA – 0,05 mg/m<sup>3</sup> (vapor) e pele.

DFG(Alemanha) MAK-TWA – 0,01 ppm (0,1 mg/m<sup>3</sup>), categoria III – substância com efeitos sistêmicos, começo do efeito acima de 2 hs., meia vida-duração da mudança (fortemente acumulativo).

Limite de pico de exposição – 0,1 ppm (1 mg/m<sup>3</sup>), 30 min. de vapor médio, 1/mudança.

FISPQ Nº: 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 4 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------



Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº. 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

IDLH nível – 28 mg/m<sup>3</sup>.

- **Ventilação:** Providenciar sistemas de exaustão (ventilação) geral ou local para manter as concentrações aéreas abaixo da OSHA PELs (S. 2). Ventilação local é preferida, pois previne a dispersão de contaminantes na área de trabalho, controlando o mesmo na fonte.

- **Controles Administrativos:** Considere os exames pré-estabelecidos e médicos periódicos de trabalhadores expostos com ênfase na pele, olhos, sistema nervoso central, fígado e rins.

- **Proteção Respiratória:** Solicitar aviso profissional prévio à seleção e ao uso de respirador. Siga regulamentações para respirador OSHA (29 CFR 1910,134) e, se necessário, utilize um respirador aprovado em MSHA/NIOSH.

Para valores menor que 0,5mg/m<sup>3</sup>, use qualquer respirador de cartucho químico com cartuchos com toda proteção contra o mercúrio, e equipado com um ESLI (final do indicador de vida útil), ou qualquer SCBA ou SAR (respirador abastecido a ar). Para valores menores que 1,25 mg/m<sup>3</sup>, use qualquer SAR operado com chaveta de fluxo-contínuo, qualquer PAPR (carregado, respirador de purificação-de-ar) com um ESLI. Para valores menores ou até 2,5mg / m<sup>3</sup>, use qualquer SCBA ou SAR com uma completa proteção facial ou qualquer SAR com uma proteção facial bem-justo e operada com chaveta de fluxo-contínuo, ou qualquer respirador de cartucho químico com proteção total, que protegem contra o mercúrio, e equipado com um ESLI. Para valores menor ou igual a 2,8 mg/m<sup>3</sup> use qualquer respirador SAR operado pressurizado ou outro com chaveta de pressão positiva. Para emergência ou operações não-rotineiras (limpando vazamentos, vasos reatores ou tanques de estoque...), utilize um SCBA com total peça facial e operado com demanda-de-pressão ou outro tipo. Aviso respiradores com purificadores de ar não protegem trabalhadores em atmosferas deficientes de O<sub>2</sub> (oxigênio ou ar). Se os respiradores forem usados, OSHA exige um programa escrito sobre proteção respiratória que inclui pelo menos: certificação médica, treinamento, teste adequado, monitoração ambiental periódica, manutenção, inspeção, limpeza e áreas de estocagem convenientes.

- **Equipamentos/Roupas de Proteção:** Use luvas de proteção química, botas, aventais e manoplas feitos de borrachas butil, nitril, fluorcarbono, neoprene, cloreto polivinil, poli – etileno clorinado e/ou policarbonato para prevenir contato de pele prolongado ou repetido. Use óculos de proteção ou de segurança química, pelos regulamentos OSHA de proteção facial e olhal (29 CFR 1910, 133). Lentes de contato não são aparelhos de proteção. Proteção de olhos apropriados deve ser usada ao invés de ou em conjunto com essas lentes de contato. Os tipos de auxílios para proteção devem ser escolhidos especialmente segundo o posto de trabalho em função da concentração e quantidade de substância.

- **Estações de Segurança:** Fazer estações de lava-olhos de emergência, chuveiros de emergência, e/ou facilidades de lavagem disponíveis na área de trabalho.

- **Equipamento Contaminado:** Separar roupas-de-trabalho contaminadas das roupas comuns/passeios, lavar antes de reuso, remover esse material de seus sapatos e limpar os seus EPIs.

FISPQ Nº. 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 5 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------



Comércio Indústria Importação Ltda

## MERCÚRIO VIVO

FISPQ Nº: 050  
Nov./2007

## FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO

• **Comentários:** Nunca coma, beba, ou fume nas áreas de trabalho. Pratique a boa higiene pessoal depois do uso desse material, especialmente antes de comer, beber, fumar, usar o banheiro e aplicar cosméticos.

## 9. PROPRIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS

- Estado Físico: Metal Líquido
- Aparência e Odor: Cor prateada branca e inodoro
- Pressão de Vapor: 0,0018 mmHg a 25 °C
- Peso da atômico: 200,59
- Densidade: 13,534 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C
- Temperaturas específicas ou faixas de temperatura nas quais ocorrem mudanças de estado físico:  
Ponto de Ebulição: 356,72°C  
Ponto de Congelamento: -38,87 °C
- Viscosidade: 15,5 mP a 25 °C
- Resistividade Elétrica: 95,76 µohm a 20 °C
- Solubilidade em H<sub>2</sub>O: 0,28 µmol/L a 25 °C
- Outras Solubilidades: Solúvel em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fervente, ácido nítrico. Reação-levemente em lipídios, e 2,7 mg/L em pentano. Insolúvel em álcool, éter, ácido sulfúrico frio, brometo de hidrogênio e iodeto de hidrogênio.
- Tensão Superficial: 484 dina/cm a 25 °C
- Temperatura Crítica: 1462 °C
- Pressão Crítica: 1587 atm

Obs.: Densidade H<sub>2</sub>O = 1,0 g/cm<sup>3</sup>, temperatura 25 °C (77 °F).

## 10. ESTABILIDADE E REATIVIDADE

- **Condições específicas:**

**Estabilidade:** Mercúrio (Hg) não preteia em temperaturas ordinárias, mas, quando aquecido até perto de seu ponto de ebulição, lentamente se oxida ao óxido de Hg.

**Polimerização:** Polimerização perigosa não ocorre.

**Incompatibilidade Química:** Mercúrio forma ligas (amalgamas) com a maioria dos metais, exceto o ferro (Fe). Incompatível com oxidantes como bromina, 3-bromopropina, metil-silana + O<sub>2</sub>, cloro, dióxido de cloro, ácido nítrico, ou ácido peróxi-fórmico, níquel tetracarbonil +O<sub>2</sub> e

FISPQ Nº: 050

Versão: 02

Data: Nov./2007

Página: 6 de 9



Comércio Indústria Importação Ltda

## MERCÚRIO VIVO

FISPQ Nº. 050  
Nov./2007

## FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO

alcalinos + perclorato de prata (Ag), óxido-etileno, compostos acetilênicos (explosivo), amônia (explosivo), fosfo-dióxido de boro (B), nitrometano e carbeto de sódio assentado.

- **Condições para Evitar:** Exposições a altas temperaturas, superfícies metálicas e/ou incompatíveis.
- **Produtos de Decomposição Perigosa:** Decomposição oxidante térmica de mercúrio pode produzir óxido de mercúrio.

## 11. INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS

- **Informações de acordo com as diferentes vias de exposição:**

**Dados de toxicidade:**

**Reprodução:** Ratos-inalação = 890  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 24hs, por 16 semanas, antes que acasalamento tenha um efeito na espermatogênese.

**Toxicidade dermal aguda:** Homens-pele ( $\text{TD}_{L_0}$ ) = 129 mg/Kg por 5hs contínuas causando zumbido nos ouvidos, dor-de-cabeça e dermatites alérgica.

**Toxicidade oral aguda:** Homens-oral ( $\text{TD}_{L_0}$ ) = 43 mg/Kg causando tremores e icterícia ou outras mudanças no fígado.

**Efeitos de inalação aguda:** Mulheres-inalação ( $\text{TC}_{L_0}$ ) = 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 48 dias causando anorexia, diarreia e insônia. Homens-inalação ( $\text{TC}_{L_0}$ ) = 44300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 8hs causando fraqueza muscular, mudanças no fígado e aumento de temperatura corporal.

**Efeitos crônicos:** Ratos-inalação = 1  $\text{mg}/\text{m}^3$  em 24hs por 5 semanas. Contínuas causando proteinúria.

- Veja NIOSH, RTECS (DV4550000), para dados de toxicidade adicional...

## 12. INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS

- **Efeitos ambientais, comportamento e impactos do produto:**

**Ecotoxicidade:** Peixes ( $\text{LC}_{50}$  = 0,35 mg/L 96hs.); Moluscos ( $\text{LC}_{50}$  = 19 ppm em 96hs.);

Girinos ( $\text{LC}_{50}$  = 0,051 ppm em 96hs.). Mercúrio é transformado em mercúrio-metil pelas bactérias no meio ambiente e passa por uma bio-acumulação prontamente. BCF (Controle Biológico) para peixes de água "doce" é de 63000, para peixes de água salgada é de 10000, e para invertebrados em geral é 100000.

**Degradação ambiental:** Mercúrio é esperado que se volatilize rapidamente quando depositado em superfícies de terra. Uma vez no ar (ambiente aberto e arejado), pode ser transferido a longas distâncias antes de ser redepositado no solo ou em água. Em água, mercúrio aparece ligado aos particulares, onde eventualmente vem a ser depositado nos sedimentos do fundo. Em geral, o mercúrio e sua entrada no ambiente pode ser na forma depositada e também revolatilizado muitas e muitas vezes.

FISPQ Nº. 050

Versão: 02

Data: Nov./2007

Página: 7 de 9



Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº. 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

### 13. CONSIDERAÇÕES SOBRE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO

- **Método de tratamento e disposição:**

**Disposição:** Incineração não é um método apropriado de disposição (arranjo). Água usada pode ser tratada com a adição de cloro (Cl) para oxidar o mercúrio ao seu estado iônico. A água, então, pode ser passada através de um absorvente [um carvão vegetal ativado e concentrado com uma camada de enxofre (S) ou esse mesmo em forma de casca-de-amendoim] para coletar o mercúrio iônico, seguido de destilação para recuperar o Hg. Borohidreto de sódio, que é um agente redutor, pode ser usado para precipitar o mercúrio das soluções perdidas. A bioremediação usando *Pseudomonas putida* também tem sido sugerida essa bactéria. Contate o seu fornecedor ou similar para mais detalhes. Siga os regulamentos estaduais e federais.

### 14. INFORMAÇÕES SOBRE O TRANSPORTE

- **Regulamentações:** Produto perigoso para o transporte, conforme Resolução Nº 420 do Ministério dos Transportes.

Transporte rodoviário no Brasil:

- Número ONU: 2809
- Nome apropriado para embarque: MERCÚRIO
- Classe de risco/divisão: 8
- Número de risco: 80
- Grupo de Embalagem: III

- **Condições Especiais:** Cód. 172.102 ( ver a seguir )

**Autorizações de Embalagens/Empacotamento:**

- a) Exceções – 173.164;
- b) Empacotamento Não – volumoso – 173.164; e
- c) Empacotamento Volumoso – 173.240.

**Limitações de Quantidade:**

- a) Passageiro, Aéreo ou Trem – 35 kg; e
- b) Carga Aérea somente – 35 kg.

**Exigências de Armazenagem:**

- a) Armazenagem – B; e
- b) Outros – 40.97.

### 15. REGULAMENTAÇÕES

- **Informações sobre riscos e segurança:**

**Regulamentos EPA:** Lista de Desperdício Perigoso – RCRA (40 CFR 261.33) = U151.

Lista de Substância Perigosa – CERCLA (40 CFR 302.4) por RCRA, 3001; CWA, S.307 a, CAA, S.112.

Listas de Quantidade Relatada – CERCLA (454 g), SARA 311 ~ 312, Cód. 1,2.

FISPQ Nº: 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 8 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------



Comércio Indústria Importação Ltda

<b>MERCÚRIO VIVO</b>	FISPQ Nº: 050 Nov./2007
<b>FISPQ – FICHA DE INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA DE PRODUTO QUÍMICO</b>	

Lista de Químico Tóxico – SARA (40 CFR 372.65).

Lista de Substância Extremamente Perigosa – SARA ( 40 CFR 355 ).

Regulamentos OSHA: Lista de Contaminante de Ar (Ambiente ) – (29 CFR 1910, 1000; Tab. Z1, Z1A).

- FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico) em conformidade com o Decreto 2657 de 03.07.98/07.01, contém informações diversas sobre um determinado produto químico, quanto à proteção, à segurança, à saúde e ao meio ambiente. Em alguns países, essa ficha é chamada de Material Safety Data Sheet - MSDS. A norma brasileira NBR 14725, válida desde 28.01.2002, apresenta informações para a elaboração e o preenchimento de uma FISPQ. Apesar de não definir um formato fixo, esta norma estabelece que as informações sobre o produto químico devem ser distribuídas, na FISPQ, por 16 seções determinadas, cuja terminologia, numeração e seqüência não devem ser alteradas.

- Transporte de Produtos Perigosos: Decreto Nº 96.044, de 18/maio/1988 (Aprova o regulamento técnico para o transporte rodoviário de produtos perigosos e dá outras providências). Resolução do Ministério dos Transportes Nº 420 de 12/Fev./2004, (aprova as instruções complementares ao regulamento do transporte terrestre de produtos perigosos).

#### 16. OUTRAS INFORMAÇÕES

- Nos locais onde se manipulam produtos químicos deverá ser realizado o monitoramento da exposição dos trabalhadores, conforme PPRA (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais) da NR-9. Funcionários que manipulam produtos químicos em geral, devem ser monitorados biologicamente conforme PCMSO (Programa Médico de Saúde Ocupacional) da NR-7.

- As informações e recomendações constantes desta publicação foram pesquisadas e compiladas de fontes idôneas e capacitadas para emití-las. Os dados dessa Ficha referem-se a um produto específico e podem não ser válidos onde esse produto estiver sendo usado em combinação com outros.

FISPQ Nº: 050	Versão: 02	Data: Nov./2007	Página: 9 de 9
---------------	------------	-----------------	----------------

## Anexo C

Ficha de dados de segurança para óleo de bomba de vácuo



1/5  
 ÓLEO PARA BOMBAS DE VÁCUO – 250 ML  
 Art.: 0892 764 300  
 Revisão em: 22.01.02

Substitui a versão de: 22.01.02

Data de impressão: 16.08.05

## Ficha de Dados de Segurança

Segundo a directiva 91/155/CE

### 1. Identificação da substância / preparação

1.1 Identificação da substância/preparação

**ÓLEO PARA BOMBAS DE VÁCUO – 250 ML**  
 Art.: 0892 764 300

1.2 Utilização da substância/preparação  
 Lubrificante

1.3 Identificação da sociedade/empresa

Nome da empresa  
 Würth-Portugal, Técnica de Montagem, Lda. – Estrada Nacional 249-4 – Abrunheira – 2710-059 Sintra  
 Tel.: +351 219 157 200 Fax: +351 219 151 331

N.º de telefone da empresa em caso de emergência:  
 Tel.: 8h00 - 18h00 (segunda a sexta) + 351 219 157 200

### 2. Composição / informação sobre os componentes

Descrição geral:

Aditivos	Teor (em %)	Simbolo	Frase s R	CAS	EINECS, ELINCS
2.1 Designação química					
...					...

Ver o texto completo das frases R no ponto 16.

### 3. Identificação dos perigos

3.1 Para o Homem

Ver pontos 11 e 15.  
 A preparação não é considerada perigosa de acordo com a Directiva 1999/45/CE.

3.2 Para o ambiente

Ver ponto 12

### 4. Primeiros socorros

4.1 Em caso de inalação

Deixar entrar ar fresco e consultar um médico de acordo com os sintomas.

4.2 Em caso de contacto com os olhos

Lavar bem com muita água, durante vários minutos. Consultar um médico, se necessário.

Manter a Ficha de Segurança disponível.

4.3 Em caso de contacto com a pele

Lavar bem com sabão e água. Tirar imediatamente as roupas contaminadas. Em caso de irritação da pele (vermelhidão, etc) consultar o médico.

4.4 Em caso de ingestão

Não provocar o vômito. Consultar imediatamente um médico.

4.5 Meios especiais necessários para primeiros socorros

n.g.

### 5. Medidas de combate a incêndios

5.1 Meios de extinção adequados

CO<sub>2</sub>

Pó seco





315  
 ÓLEO PARA BOMBAS DE VÁCUO – 250 ML  
 Art.: 1892 764 310  
 Revisão em: 22.01.02

Substitui a versão de: 22.01.02

Data de impressão: 16.08.06

Pulverizador de jacto de água

Espuma

6.2 Meios de extinção inadequados por motivos de segurança

Jacto de água

6.3 Perigos específicos da substância ou preparação, consequências de incêndio/queima ou libertação de gases

Em caso de incêndio, podem ocorrer os seguintes perigos:

Oxidos de carbono.

Fumo.

6.4 Equipamento de protecção especial no combate a incêndios

Aparelho respiratório autónomo.

De acordo com a extensão do incêndio.

6.5 Outras indicações

Eliminar a água de extinção de incêndio contaminada de acordo com a legislação.

## 6. Medidas a tomar em caso de fugas accidentais

Ver ponto 13, e para protecção pessoal ver ponto 8.

6.1 Precauções individuais

Cuidado – perigo de escorregar.

Evitar o contacto com os olhos.

6.2 Precauções ambientais

Se ocorrer uma fuga, construir uma barreira de protecção.

Prevenir infiltrações no solo e em águas superficiais ou subterâneas.

6.3 Métodos de limpeza

Recolher utilizando material absorvente (por ex., aglutinante universal) e eliminar de acordo com o estabelecido no ponto 13.

## 7. Manuseamento e armazenagem

7.1 Manuseamento

Indicações para um manuseamento seguro:

Ver ponto 6.1

Aplicar as regras gerais de higiene no manuseamento de químicos.

Respeitar as indicações do rótulo e as instruções de utilização.

7.2 Armazenagem

Requisitos para armazéns e recipientes:

Não pode ser armazenado em corredores ou em escadas.

Armazenar unicamente produtos selados, na sua embalagem original.

Condições especiais de armazenagem

Ver ponto 10.2

Proteger da humidade e armazenar fechado.

## 8. Controlo da exposição/protecção individual

Manter uma boa ventilação. Utilizar aspiração local ou uma ventilação geral.

Caso estas medidas sejam insuficientes para manter a concentração abaixo dos valores MAK, é necessário utilizar protecção respiratória.

Só se aplica se forem listados aqui valores de exposição máximos permissíveis.

Designação Química	Níveis de classe mineral
AG: 6 mg/m <sup>3</sup> (TLV-ACGIH)	Spb.-Öf.: 10 mg/m <sup>3</sup> (TLV-ACGIH)
BG: ---	Outras indicações: ---

AG = Valor limite no local de trabalho. E = Inação inalável, A = Inação alveolar. | Spb.-Öf. = categoria de valor máximo (=) e factor excedente (1 até 4) para valores de curta duração. | BG = valor limite biológico. Momento de tiragem de amostras: a) sem restrições, b) final da exposição e final da camada, c) em exposição prolongada: após várias camadas anteriores, d) antes da camada seguinte, e) após o final da exposição: ... horas. | ARW = valor de referência para o local de trabalho, H = reabsorção pela pele. Y = Não há risco de danificação de alimentos caso os valores AG e BG não sejam ultrapassados, DFG = Associação Alemã de Investigação (Comissão MAK).

8.2 Controlo da exposição

8.2.1 Controlo da exposição profissional

8.2.1.1 Protecção respiratória:

Não necessária, em condições normais.





4/5  
 ÓLEO PARA BOMBAS DE VÁCUO – 250 ML  
 Art.: 8902 754 310  
 Revisão em: 22.01.02

Substitui a versão de: 22.01.02

Data de impressão: 16.08.05

11.3 Outras informações  
 Sem classificação de acordo com o processo de cálculo.

## 12. Informação Ecológica

Classe de perigo para a água:	1
Autoclassificação:	5m(VWWS)
Persistência e degradabilidade:	n.D.v.
Comportamento em estações de águas residuais:	
AOX:	
De acordo com a composição não contém AOX.	
Toxicidade aquática:	n.D.v.
Ecotoxicidade:	n.D.v.

## 13. Considerações relativas à eliminação

### 13.1 de material/preparação/resíduos

Panos, papéis ou outros materiais orgânicos ensopados no produto representam um perigo de incêndio e devem ser recolhidos, recolhidos e eliminados.

N.º de código de resíduo da CE:

Os códigos de resíduos abaixo indicados são recomendações baseadas numa utilização planeada deste produto. Em determinadas circunstâncias, poderão ser atribuídos outros códigos de resíduos que atendam a condições específicas de utilização e eliminação por parte do utilizador.

13 02 05 Resíduos minerais não clorados de molinos, transmissões e lubrificação

Recomendações:

Dar cumprimento à legislação local e nacional.

Ex.: Instalação incineradora adequada.

Ex.: Além o controlado.

13.2 de material contaminado

Ver ponto 13.1

Dar cumprimento à legislação local e nacional.

15 01 01 – embalagem de papel e cartão

15 01 04 – embalagem de metal

15 01 02 – embalagem de plástico

## 14. Informação relativas ao transporte

Informações gerais

Número da ONU: n.a.

Transporte rodoviário/ferroviário (GGVSE/ADR/RID)

Classe/grupo de embalagem: n.a.

Código de classificação: n.a.

LC: n.a.

Transporte por via marítima

Código GGVSee/IMDG: n.a. (classe/grupo de embalagem)

Poluente marinho: n.a.

Transporte aéreo

IATA: n.a. (classe/perigos secundários/grupo de embalagem)

Informações adicionais:

Não é um produto perigoso de acordo com o Regulamento Geral de Transportes.

## 15. Informação sobre regulamentação

Classificação segundo os regulamentos de Substâncias Perigosas, incluindo as Directivas da UE (67/548/EEC e 98/37/EEC)

Símbolo: Não aplicável

Descrição do perigo: ---

Frases R:



WURTH BRASIL

S/S  
 ÓLEO PARA BOMBAS DE VÁCUO - 250 ML  
 Art.: 1892 764 300  
 Revisão em: 22.01.02

Substitui a versão de: 22.01.02

Data de impressão: 16.08.05

Frases S:

Frases adicionais: n.a.

Restrições a observar: n.a.

#### 16. Outras informações

Estas informações referem-se ao produto quando é entregue.

Classe de armazenagem VCI (Alemanha): 10 - 13

Pontos submetidos a revisão: n.a.

#### Legenda

n.a. = não aplicável / n.v. = não disponível / n.g. = não testado

VbF = Regulamentos para líquidos inflamáveis / MAK = Concentração máxima por local de trabalho em mg/m<sup>3</sup> = ppm

BAT = Tolerância biológica por local de trabalho / TRBF = Regulamentos Técnicos para líquidos inflamáveis

WGK = Classe de perigo para a água

WGK3 = muito perigoso para a água, WGK2 = perigoso para a água, WGK1 = ligeiramente perigoso para a água

VOC = componentes orgânicos voláteis

AOX = componentes de halogénio orgânicos absorvíveis

Este documento foi traduzido de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante. Esta informação não se destina a garantir características definitivas, embora seja baseada no nosso conhecimento actual.

## Anexo D

Ficha de dados de segurança para o álcool isopropílico utilizado na limpeza das peças constituintes dos sistemas de pré-vácuo.



página: 1/6

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

### 1 Identificação da substância/preparação e da sociedade/empresa

Nome comercial: Isopropanol

Código do produto: 2514

Utilização da substância / da preparação: Químicos de laboratório

Fabricante/fornecedor:

Promega Corporation  
2800 Woods Hollow Road  
Madison, WI 53711  
USA  
1-608-247-4330  
1-800-356-9526

MSDS autor: [Regulatory.Affairs@Promega.com](mailto:Regulatory.Affairs@Promega.com)

Informação em caso de necessidade: CHEMTREC 001-703-527-3887

### 2 Identificação dos perigos

Designação dos riscos:



*Xi* Irritante  
*F+* Facilmente inflamável

Avisos especiais sobre os riscos para o homem e o ambiente:

Exerce um efeito narcotizante.

R 11 Facilmente inflamável.

R 36 Irritante para os olhos.

R 67 Pode provocar sonolência e vertigens, por inalação dos vapores.

Sistema de classificação

A classificação está de acordo com as disposições do Anexo B do Regulamento europeu sobre produtos químicos, mas foi completada com dados da literatura especializada bem como com informações dos fornecedores das matérias-primas.

### 3 Composição/informação sobre os componentes

Caracterização química:

Designação CAS n.º

67-63-0 2-propanol

Número(s) de identificação

N.º EINECS: 200-661-7

N.º UE: 603-117-00-0

### 4 Primeiros socorros

Após inalação: Entrada de ar fresco; em caso de queixas consultar o médico.

( continuação na página 2 )

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

Nome comercial: *Isopropanol*

( continuação da página 1 )

*Após contacto com a pele: Em geral o produto não é irritante para a pele.*  
*Após contacto com os olhos:*  
*Enxaguar os olhos durante alguns minutos sob água corrente, mantendo as pálpebras abertas. Em caso de persistência dos sintomas, consultar o médico.*  
*Após Ingestão: Se os sintomas persistirem, consultar o médico.*

**5 Medidas de combate a incêndios**

*Meios adequados de extinção:*  
*CO2, pó extintor ou facto de água. Um incêndio de grandes dimensões deve ser combatido com facto de água ou espuma resistente ao álcool.*

**6 Medidas a tomar em caso de fugas acidentais**

*Precauções individuais: Usar equipamento de protecção. Manter as pessoas desprotegidas afastadas.*  
*Precauções ambientais:*  
*Impedir a infiltração em canalizações, minas ou caves.*  
*Diluir em bastante água.*  
*Evitar que penetre na canalização / águas superficiais / águas subterrâneas.*  
*Métodos de limpeza:*  
*Recolher com produtos que absorvam líquidos (areia, seixos, absorventes universais, serradura ).*  
*Assegurar uma ventilação adequada.*

**7 Manuseamento e armazenagem**

*Manuseamento:*  
*Precauções para um manuseamento seguro:*  
*Em caso de utilização correcta, não são necessárias medidas especiais.*  
*Precauções para prevenir incêndios e explosões:*  
*Mantê-lo afastado de uma fonte de ignição - não fumar.*  
*Encontrar medidas contra carregamento electrostático.*  
*Armazenagem:*  
*Requisitos para espaços ou contentores para armazenagem: Armazenar num local fresco.*  
*Avisos para armazenagem conjunta: Não necessário*  
*Outros avisos sobre as condições de armazenagem:*  
*Mantê-lo o recipiente hermeticamente fechado.*  
*Armazenar em recipientes bem fechados, em local fresco e seco.*

**8 Controlo da exposição/protecção pessoal**

*Indicações adicionais para concepção de instalações técnicas: Não existem outras informações, ver ponto 7.*

*Componentes cujo valor do limite de exposição no local de trabalho deve ser monitorizado:*

**67-63-0 2-propanol**

*VLE Valor para exposição curta: 400 ppm*  
*Valor para exposição longa: 200 ppm*  
*Irritação ocular, do TRS; afecção do SNC*

*Indicações adicionais: Foram utilizadas como base as listas válidas à data da elaboração.*

( continuação na página 3 )

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

Nome comercial: Isopropanol

( continuação da página 2 )

**Equipamento de protecção individual:****Medidas gerais de protecção e higiene:***Manter afastado de alimentos, bebidas e farragens.**Despir imediatamente a roupa contaminada e embobida.**Lavar as mãos antes das pausas e no fim do trabalho.**Evitar o contacto com os olhos.**Evitar o contacto com os olhos e com a pele.***Protecção respiratória:** Não necessário.**Protecção das mãos:***Luvas de protecção.**Escolher o material das luvas tendo em consideração a durabilidade, a permeabilidade e a degradação.***Material das luvas***A escolha das luvas mais adequadas não depende apenas do material, mas também de outras características qualitativas e varia de fabricante para fabricante.***Tempo de penetração no material das luvas***Deve informar-se sobre a validade exacta das suas luvas junto do fabricante e respeitá-la.***Protecção dos olhos:** Óculos de protecção totalmente fechados**9 Propriedades físicas e químicas****Informações gerais**

<b>Forma:</b>	líquido
<b>Cor:</b>	claro
<b>Odor:</b>	tipo álcool

**Mudança de estado:****Ponto / intervalo de fusão:** -89,5°C**Ponto / intervalo de ebulição:** 82°C**Ponto de inflamação:** ≤ 21°C**Temperatura de ignição:** 425°C**Perigos de explosão:***O produto não corre o risco de explosão.**O produto não é explosivo. Contudo, é possível a formação de misturas explosivas ar/vapor.***Limites de explosão:***em baixo:* 2 Vol %*em cima:* 12 Vol %**Pressão de vapor em 20°C:** 43 hPa**Densidade em 20°C:** 0,783 g/cm<sup>3</sup>**Solubilidade em / miscibilidade com****água:** completamente solúvel**solventes orgânicos:** 100,0 %**10 Estabilidade e reactividade****Decomposição térmica / condições a evitar:** Não existe decomposição em caso de emprego correcto das regras.**Reacções perigosas****Reacções com ácidos.**

( continuação na página 4 )



**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

Nome comercial: *Isopropanol*

( continuação da página 3 )

*Reacções com agentes de oxidação fortes.**Produtos de decomposição perigosos: Monóxido de carbono e dióxido de carbono.***11 Informação toxicológica***Toxicidade aguda:**Valores LD/LC50 relevantes para a classificação:***67-63-0 2-propanol**

por via oral	LD50	4570 mg/kg (Rat)
por via dérmica	LD50	13400 mg/kg (Rat)
por inalação	LC50/4 h	30 mg/l (Rat)

*Efeito de irritabilidade primário:**sobre a pele: Não irritante.**sobre os olhos: Efeito irritante.**sensibilização: não é conhecida um efeito estimulante***12 Informação ecológica***Indicações gerais:**Classe de perigo para a água 1 (D) (classificação pelas listas): pouco perigoso para a água**Não deixar chegar substâncias concentradas, ou seja quantidades grandes, às águas subterrâneas, aos cursos de água ou à canalização.***13 Considerações relativas à eliminação***Produto**recomendação: Não se pode eliminar juntamente com o lixo doméstico. Não permita que chegue à canalização.**Embalagens contaminadas:**recomendação: Eliminação residual conforme o regulamento dos serviços públicos.**meio de limpeza recomendado: Água, eventualmente com adição de produtos de limpeza***14 Informações relativas ao transporte***Transporte por terra ADR/RID (transfronteiriço):**Classe ADR/RID: 3 (F+) Líquidos inflamáveis**Nº Kemler: 33**Nº UN: 1219**Tipo de embalagem: II*

( continuação na página 5 )

**Ficha de dados de segurança**  
Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º

data da impressão: 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

Nome comercial: *Isopropanol*

( continuação da página 4 )

**Designação do produto:** 1219 ISOPROPANOL (ÁLCOOL ISOPROPÍLICO)**Transporte marítimo IMDG:**

**Classe IMDG:** 3  
**Nº UN:** 1219  
**Rótulo:** 3  
**Tipo de embalagem:** II  
**Nº EMS:** F-E,S-D  
**Poluente das águas:** Não  
**Nome técnico correcto:** ISOPROPANOL (ISOPROPTIL ALCOHOL)

**Transporte aéreo ICAO-TI e IATA-DGR:**

**Classe ICAO/IATA:** 3  
**Nº de ident. UN:** 1219  
**Rótulo:** 3  
**Tipo de embalagem:** II  
**Nome técnico correcto:** ISOPROPANOL (ISOPROPTIL ALCOHOL)

### 15 Informação sobre regulamentação

**Rótulo de acordo com as disposições comunitárias:**

O produto está identificado e classificado de acordo com as directivas comunitárias e com a lei sobre substância perigosas.

**frases R:**

- 11 Facilmente inflamável.  
 36 Irritante para os olhos.  
 67 Pode provocar sonolência e vertigens, por inalação dos vapores.

**frases S:**

- 2 Manter fora do alcance das crianças.  
 7 Manter o recipiente bem fechado.  
 16 Manter afastado de qualquer chama ou fonte de ignição - Não fumar.  
 24/25 Evitar o contacto com a pele e os olhos.  
 26 Em caso de contacto com os olhos, lavar imediata e abundantemente com água e consultar um especialista.

**Disposições nacionais:****Instruções técnicas (Ar):**

Classe	Quota em %
NK	100,0

( continuação na página 6 )

pagina: 0/0

**Ficha de dados de segurança**  
*Em conformidade com 1907/2006/CE, Artigo 31.º*

data da impressão 26.06.2008

Revisão: 26.06.2008

**Nome comercial:** *Isopropanol*

( continuação da página 5 )

**Classe de perigo para as águas:***Classe de perigo para as águas 1 (classificação pelas listas): pouco perigoso para a água.***16 Outras informações**

*As informações fornecidas baseiam-se no estado actual dos nossos conhecimentos, embora não representem uma garantia das propriedades do produto e não fundamentam uma relação contratual.*

**Departamento que elaborou a ficha de segurança:***Promega Corporation**Environmental Health and Safety Department**2800 Woods Hollow Road**Madison, WI**Ph: (608)274-4330**\* Dados alterados em comparação à versão anterior*

## Anexo E

Informações sobre classificação, armazenamento, transporte e destinação de óleos lubrificantes, solventes e metais descartados após a montagem ou manutenção dos sistemas de pré-vácuo.



## Classificação dos Resíduos segundo NBR 10004 da ABNT

**Resíduos Classe I – Perigosos:** aqueles que, em função de suas características de toxicidade, corrosividade, reatividade, inflamabilidade, patogenicidade ou explosividade, apresentem significativo risco à saúde pública ou ao meio ambiente.

**Resíduos Classe II – Não-Inertes:** aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos ou de resíduos Classe II A – Inertes, podendo apresentar propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

**Resíduos Classe III – Inertes:** quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa segundo a NBR 10.007/1996 – Amostragem de Resíduos Sólidos – e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10.006/1996 – Procedimento para Obtenção do Extrato Solubilizado em Resíduos Sólidos – não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água vigentes, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Fonte: Piva, H.L. 2004.

<b>SOLVENTE</b>	<b>Código de cor</b>	<b>Simbologia</b>
		
<p>É uma substância química ou uma mistura líquida de substâncias químicas capazes de dissolver outro material de utilização industrial.</p> <p>Geralmente o termo <i>solvente</i> se refere a um composto de natureza orgânica. Apesar de sua composição química ser diversa, os solventes têm um certo número de propriedades comuns: são compostos líquidos lipossolúveis, possuem grande volatilidade, são muito inflamáveis, e produzem importantes efeitos tóxicos.</p>		
<b>Fonte de Geração</b>	Oficinas: limpeza de equipamentos. Cabines de pintura: solvente de tinta. Área de Inflamáveis: armazenamento de solventes.	
<b>Classificação</b>	<b>Classe I - Perigosos (NBR 10.004/96)</b>	
<b>Armazenamento</b>	NBR 12.235/88 – Armazenamento de resíduos sólidos perigosos – Procedimento.	
<b>Transporte</b>	NBR 13.221/94 – Transporte de resíduos – Procedimento e NBR 7.500 Simbologia – Símbolos de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.	
<b>Destinação</b>	Recuperação por empresas de recuperação de solventes.	
<b>ASPECTOS PARA A RECICLAGEM</b>		
<p>Em função da gama variada de solventes utilizados no setor produtivo, deve-se evitar ao máximo sua mistura, a fim de se conseguir uma melhor taxa de recuperação.</p> <p>Dependendo do uso, os solventes podem estar contaminados com óleos, graxas, tintas, limalhas de metais e matéria orgânica, os quais atrapalham sua recuperação.</p>		

Fonte: Piva, H.L. 2004.

**ÓLEO LUBRIFICANTE**

Código de cor



Simbologia





O óleo lubrificante representa cerca de 2% dos derivados do petróleo, e é um dos poucos que não são totalmente consumidos durante seu uso. O uso automotivo representa 70% do consumo nacional, principalmente em motores a diesel. Possui utilização na indústria em sistemas hidráulicos, motores estacionários, turbinas e ferramentas de corte. É composto de óleos básicos (hidrocarbonetos saturados e aromáticos), que são produzidos a partir de petróleo especial e aditivos de forma a conferir as propriedades necessárias para seu uso como lubrificantes. Durante seu uso na lubrificação dos equipamentos, ocorre a degradação do óleo e o acúmulo de contaminantes torna necessária sua troca. Além disso, parte do óleo é queimada no próprio motor, devendo ser repostado. No processo de troca do lubrificante, este é drenado para um tanque de acúmulo, para posterior reaproveitamento. Os óleos podem ainda ser reciclados (filtrados para retorno para o mesmo uso) ou rerefinados, gerando óleos básicos para novas formulações.

<b>Fonte de Geração</b>	Produção: lubrificação/vazamentos de máquinas Oficinas: lubrificação/vazamentos de máquinas Área de Inflamáveis: armazenamento de óleo
<b>Classificação</b>	<b>Classe I - Perigosos (NBR 10.004/96)</b>
<b>Armazenamento</b>	NBR 12.235/88 – Armazenamento de resíduos sólidos perigosos – Procedimento.
<b>Transporte</b>	NBR 13.221/94 – Transporte de resíduos – Procedimento e NBR 7.500 Simbologia – Símbolos de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.
<b>Destinação</b>	Recuperação por empresas de reprocessamento de óleo.

**ASPECTOS PARA A RECICLAGEM**

Os contaminantes pesados dos óleos usados são provenientes do desgaste do motor (limalhas), aditivos e borras que se formam devido às altas temperaturas de trabalho, em condições oxidantes; os contaminantes leves são combustíveis não queimados nos motores ou solventes que são coletados no mesmo tambor que os óleos usados. A retirada desses contaminantes pelo processo clássico gera grandes quantidades de borra ácida; já os processos mais modernos utilizam evaporadores especiais e geram resíduos que podem ser usados como impermeabilizantes, revestimentos plásticos e asfálticos.

<b>METAIS</b>	<b>Código de cor</b> 	<b>Simbologia</b> 
<p>Os metais são praticamente 100% recicláveis, excluindo-se apenas os técnicos ou especiais, pois sua composição e combinações específicas inviabilizam sua reciclagem. Dentre os metais passíveis de reciclagem destacam-se:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Metais não-ferrosos:</b> Alumínio, latão, cobre, estanho, cromo, chumbo, ouro, prata e platina, presentes em latas de refrigerantes, esquadrias, painéis, fios elétricos, chumbo etc.</li> <li>• <b>Metais Ferrosos:</b> ferro e aço, presentes em folhas de flandres, portões, geladeiras, veículos, etc.</li> </ul>		
<b>Fonte de Geração</b>	<p>Produção: embalagens de matéria-prima ou produto acabado.            Oficinas: latas ou tambores de óleo, solventes e tintas.            Restaurante/refeitório: latas de mantimentos em geral.            Reformas: calhas, tubulações, pregos e fios.            Área de utilidades: tanques e válvulas.</p>	
<b>Classificação</b>	<b>Classe II - Não Inertes (NBR 10.004/96)</b>	
<b>Armazenamento</b>	NBR 11.174/89 – Armazenamento de resíduos Classes II – Não Inertes e III – Inertes – Procedimento	
<b>Transporte</b>	NBR 13.221/94 – Transporte de resíduos – Procedimento e NBR 7.500 Simbologia – Símbolos de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.	
<b>Destinação</b>	Reciclagem por indústrias siderúrgicas ou terceiros prestadores de serviço.	
<b>ASPECTOS PARA A RECICLAGEM</b>		
<p>1) Mistura de vários tipos de metais pode formar pilhas eletroquímicas que aceleram o processo de corrosão dos metais e, em alguns casos, dificultam o uso para funções mais nobres.</p> <p>2) Contaminação com matéria orgânica, excesso de umidade, plásticos, vidros e areias dificultam sua recuperação. As tintas de estampana de embalagem são destruídas nos fornos de fundição durante o reprocessamento e, portanto, não atrapalham a reciclagem.</p>		

Fonte: Piva, H.L. 2004.



