



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

- Mestrado

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM PROJETO DE ENGENHARIA DE PRECISÃO

por

Jadilson Alves de Paiva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

João Pessoa - Paraíba

agosto, 2010

JADILSON ALVES DE PAIVA

**APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM
PROJETO DE ENGENHARIA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-Graduação em engenharia
mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador : Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

P149a Paiva, Jadilson Alves de .

Aplicação da tecnologia do vácuo em projeto de engenharia de precisão /Jadilson Alves de Paiva. - - João Pessoa: [s.n.], 2010.
150 f.

Orientador: João Bosco de Aquino Silva.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT.

1.Engenharia mecânica. 2.Tecnologia do vácuo. 3.Aplicações do vácuo. 4.Mesas de vácuo..

UFPB/BC

CDU: 621(043)

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM PROJETO DE ENGENHARIA DE PRECISÃO

por

Jadilson Alves de Paiva

Dissertação aprovada em 23 de agosto de 2010

Período letivo 2010.2

João Bosco de Aquino Silva
Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador – UFPB

Francisco
Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO
Examinador Interno – UFPB

José Carlos de Lima Júnior
Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JUNIOR
Examinador Externo – UFPB

Neilor César dos Santos
Prof. Dr. NEILOR CÉSAR DOS SANTOS
Examinador Externo – IFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

A todos os meus professores, do distante jardim da infância aos mais recentes que lecionam no curso de Pós-Graduação de Eng. Mecânica, que ao longo da minha vida acadêmica, colaboraram para que eu possa alcançar esta etapa tão importante da minha vida profissional.

Ao professor João Bosco de Aquino Silva que acreditou no meu trabalho e pelos preciosos ensinamentos.

Aos colegas de turma pelas incansáveis horas de estudo de domingo a domingo.

A administração do centro de tecnologia, em especial, Jesse Miranda de Figueiredo.

APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM PROJETO DE ENGENHARIA DE PRECISÃO

RESUMO

O presente trabalho trata do resgate da literatura sobre a tecnologia do vácuo englobando os seus fundamentos básicos, dispositivos de geração, medição e o estado da arte em aplicações na área de engenharia de precisão seguido de um projeto e desenvolvimento de mesas de vácuo aplicadas em máquinas-ferramenta. Com relação aos fundamentos, é descrito o seu contexto histórico, teorias clássicas e classificação desta tecnologia por faixas de aplicações. É mostrado os geradores e medidores de vácuo mais utilizados evidenciando a sua construção, funcionamento e aplicações dentro das mais variadas áreas. São apresentadas aplicações na engenharia de precisão que abrangem as escalas macro, micro e nano, ressaltando a importância da tecnologia do vácuo em cada aplicação. No projeto e desenvolvimento de mesas de vácuo, é descrita e aplicada uma metodologia própria que consiste em dimensionar mesas de vácuo capazes de fixar peças mediante a usinagem em máquinas-ferramenta. O desenvolvimento desta metodologia foi motivada em função da carência de artigos técnicos e científicos que concernem os estudos sobre mesas de vácuo dando ênfase aos seus parâmetros de projetos. São dimensionadas mesas de vácuo com núcleos vazados, quadrado e hexagonal em função de duas condições de usinagem que utilizam diferentes magnitudes de forças. Por meio de simulação numérica computacional, são avaliados os esforços de deslocamento e tensão em cada mesa de vácuo dimensionada, de forma a eleger uma mesa que atenda a critérios de rigidez, peso e homogeneização do fluxo de vácuo para cada magnitude de forças de usinagem.

Palavras chaves – Tecnologia do vácuo, Aplicações do vácuo, Mesas de vácuo.

APPLICATION OF VACUUM TECHNOLOGY IN PRECISION ENGINEERING DESIGN

ABSTRACT

This work presents the state of the in vacuum technology which covers the fundamentals, devices for generating, measuring and major applications in precision engineering. Also, the design and development of vacuum tables applied to machine tool is shown. With regard to fundamentals, it is described the historical background, classical theories and classification of this technology by bands of applications. It is shown most widely used vacuum generators and gauges, showing their construction, operation and applications within various areas. Applications of vacuum technology in precision engineering that span the macro, micro and nano scales are presented, highlighting their importance in each application area. In addition, a methodology to design and development of vacuum tables to fixture workpieces in machine tools, is described and applied. The development of this methodology was motivated due lack of technical and scientific articles that concern the studies on vacuum tables with emphasis on its design parameters. In this work, vacuum tables with hollow, square and hexagonal cores were analyzed by considering two different magnitudes of machining forces. The displacement and stress that each vacuum table configuration is submitted were determined by using numeric simulation based on the finite element method for both machining conditions.

Keywords: Vacuum technology, Vacuum applications, Vacuum tables

SUMÁRIO

Índice das Figuras.....	iv
Índice das Tabelas.....	xi
Lista de Símbolos.....	xii
Lista de Abreviaturas.....	xv
1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO GERAL.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 UM BREVE HISTÓRICO SOBRE A TECNOLOGIA DO VÁCUO.....	5
2.3 CONCEITOS BÁSICOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO.....	10
2.4 OBJETIVOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO.....	19
2.5 FAIXAS DE PRESSÃO DE VÁCUO.....	21
2.5.1 Baixo Vácuo.....	22
2.5.2 Médio Vácuo.....	24
2.5.3 Alto Vácuo.....	27

2.5.4	Ultra-Alto Vácuo.....	30
3	DISPOSITIVOS DE GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE VÁCUO.....	35
3.1	INTRODUÇÃO.....	35
3.2	BOMBAS DE VÁCUO.....	35
3.2.1	Bombas Mecânicas Rotatórias com Vedação a Óleo.....	38
3.2.2	Bombas Mecânicas de Anel D'água.....	40
3.2.3	Bombas Mecânicas Roots.....	41
3.2.4	Bombas Mecânicas Moleculares.....	42
3.2.5	Bombas de Difusão.....	44
3.2.6	Bombas de Iônicas.....	46
3.2.7	Bombas de Criogênicas.....	49
3.3	MEDIDORES DE VÁCUO.....	50
3.3.1	Vacuômetro de Bourdon.....	53
3.3.2	Vacuômetro Capacitivo.....	54
3.3.3	Vacuômetro de Pirani.....	55
3.3.4	Vacuômetro de Ionização de Cátodo Quente.....	56
3.3.5	Vacuômetro de Ionização de Cátodo Frio.....	58
4	APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM ENGENHARIA DE PRECISÃO.....	59
4.1	INTRODUÇÃO.....	59
4.2	CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DE PRECISÃO.....	59
4.3	TERMOFORMAGEM.....	61
4.4	PROTOTIPAGEM.....	62
4.5	METROLOGIA.....	66

4.6	NANOFABRICAÇÃO.....	72
4.7	FIXAÇÃO.....	73
5	PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MESAS DE VÁCUO.....	76
5.1	INTRODUÇÃO.....	76
5.2	DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE FIXAÇÃO (FASE 1).....	76
5.2.1	Determinação da Força de Fixação para o Caso 1.....	79
5.2.2	Determinação da Força de Fixação para o Caso 2.....	86
5.3	DESENVOLVIMENTO E PROJETO DAS MESAS DE VÁCUO (FASE 2)...	89
5.3.1	Mesa de Vácuo de 150 x 150 mm.....	90
5.3.2	Mesa de Vácuo de 140 x 140 mm.....	98
5.3.3	Mesa de Vácuo de 98 x 98 mm.....	102
5.3.4	Mesa de Vácuo de 94 x 94 mm.....	105
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	109
5.5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VÁCUO.....	119
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
6.1	CONCLUSÕES.....	121
6.2	DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	122
6.3	TRABALHOS FUTUROS.....	122
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Configuração genérica de sistemas de vácuo.....	10
2.2	Configuração de um sistema de ultra-alto vácuo.....	11
2.3	Relação entre pressões.....	13
2.4	Distribuição de velocidades para o nitrogênio em 0°C, 25°C e 400°C.....	15
2.5	Distribuição de velocidades para diferentes gases a 25°C.....	16
2.6	Caminho livre médio de uma molécula.....	17
2.7	Sistema de baixo vácuo utilizado em robô manipulador.....	23
2.8	Produto final obtido em termoconformação a vácuo.....	24
2.9	Sistema de médio vácuo aplicado em uma estufa.....	26
2.10	Sistema de médio vácuo aplicado em embalagens a vácuo.....	26
2.11	Sistema de alto vácuo.....	29
2.12	Sistema de alto vácuo aplicado em um tubo de raios catódicos.....	30
2.13	Sistema de ultra-alto vácuo.....	33
2.14	Sistema de ultra-alto vácuo aplicado em um difratômetro de raio-X.....	34
3.1	Classificação das bombas de vácuo.....	36
3.2	Intervalo de pressões de alguns tipos de bombas de vácuo.....	37
3.3	(a) Bomba de palheta dupla, (b) bomba de pistão rotatório.....	38
3.4	Funcionamento de uma bomba rotativa com lastro de gás.....	39

3.5	Bomba de anel d'água de simples estágio.....	40
3.6	Bombas roots de um estágio.....	41
3.7	Bomba molecular.....	43
3.8	Bomba turbomolecular.....	44
3.9	Bomba de difusão.....	45
3.10	Bomba iônica.....	46
3.11	Funcionamento de uma bomba iônica.....	47
3.12	Detalhe da superposição de camadas de titânio e moléculas de gás.....	48
3.13	(a) Bomba de cátodo com cavas, (b) bomba triodo.....	49
3.14	Bomba criogênica.....	50
3.15	Classificação dos medidores de pressão.....	51
3.16	Medidores de pressão de acordo com a faixa de vácuo.....	52
3.17	Vacuômetro de Bourdon	53
3.18	Vacuômetro capacitivo	54
3.19	Medidor Pirani.....	56
3.20	Circuito de medida para um Pirani	56
3.21	Cabeça de ionização do medidor Bayard-Alpert.....	57
3.22	Medidor Penning.....	58
4.1	Etapas de conformação a vácuo.....	62
4.2	Processo de vacuum casting.....	63
4.3	Produto obtido do vaccum casting.....	64
4.4	Processo do EBF3.....	65
4.5	Produtos obtidos do EBF3.....	66
4.6	Esquema do sistema global de comparação.....	67

4.7	Profilômetro ótico.....	68
4.8	Medidor NEMS.....	69
4.9	Funcionamento da vibração do cantilever.....	70
4.10	Micromanipulador MEMS.....	70
4.11	Esquema de um microscópio eletrônico de escaneamento (SEM).....	71
4.12	Caracterização de uma superfície de uma nanoestrutura.....	71
4.13	Processo de EBL.....	72
4.14	Distribuição de pressões em uma ventosa.....	74
4.15	Mesa de vácuo.....	75
4.16	Mandril a vácuo.....	75
5.1	Metodologia de desenvolvimento e projeto de mesas de vácuo.....	76
5.2	Componentes da força de usinagem no fresamento cilíndrico tangencial discordante.....	78
5.3	Decomposição das forças de fresamento no dinamômetro.....	79
5.4	Decomposição da força de usinagem no fresamento de topo discordante.....	80
5.5	Magnitude das forças para o cálculo da força de fixação de vácuo (caso 1).....	80
5.6	Resultantes axial e transversal durante a usinagem (caso 1).....	81
5.7	Magnitude das forças axiais para o aço-duro sobre aço-duro (caso 1)...	82
5.8	Influência da geometria da superfície da placa superior da mesa de vácuo.....	84
5.9	Dimensões da placa superior da mesa em aço (caso 1).....	84

5.10	Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre alumínio (caso 1)	
		85
5.11	Dimensões da placa superior da mesa em alumínio (caso 1).....	85
5.12	Magnitude das forças para o cálculo da força de fixação de vácuo (caso 2).....	86
5.13	Resultantes axial e transversal durante a usinagem (caso 2).....	87
5.14	Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre aço-duro (caso 2).....	87
5.15	Dimensões da placa superior da mesa em aço (caso 2).....	87
5.16	Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre alumínio (caso 2).....	88
5.17	Dimensões da placa superior da mesa em alumínio (caso 2).....	88
5.18	Mesa de vácuo de 150 x 150 mm.....	90
5.19	Mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado.....	91
5.20	Mesa de vácuo com MEF aplicada.....	92
5.21	Condições de contorno com base engastada e diferença de pressão de 100 kPa.....	92
5.22	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005.....	93
5.23	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005.....	93
5.24	Mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado.....	94
5.25	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005.....	95

5.26	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005.....	95
5.27	Mesa 150 x 150 mm com núcleo hexagonal (colméia).....	96
5.28	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para aço AISI 1005.....	97
5.29	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para aço AISI 1005.....	97
5.30	Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	98
5.31	Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	98
5.32	Mesa 140 x 140 mm com núcleo quadrado.....	99
5.33	Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	100
5.34	Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	100
5.35	Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014.....	101
5.36	Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014.....	101
5.37	Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo vazado para AISI 1005.....	102
5.38	Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo vazado para AISI 1005.....	103

5.39	Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo quadrado para AISI 1005.....	103
5.40	Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo quadrado para AISI 1005.....	104
5.41	Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo hexagonal para AISI 1005.....	104
5.42	Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo hexagonal para AISI 1005.....	105
5.43	Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	106
5.44	Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	106
5.45	Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	107
5.46	Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	107
5.47	Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014.....	108
5.48	Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014.....	108
5.49	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	112
5.50	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	112

5.51	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	113
5.52	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014.....	113
5.53	Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014.....	114
5.54	Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para alumínio 2014.....	114
5.55	Mesa de vácuo de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido.....	116
5.56	Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido.....	117
5.57	Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido.....	117

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Relações dos graus de vácuo com as grandezas físicas do ar a temperatura ambiente.....	18
2.2	Faixas de pressão de vácuo.....	21
5.1	Dimensões das mesas de vácuo.....	89
5.2	Resultados do desenvolvimento e projeto das mesas de vácuo.....	109
5.3	Relação da rigidez/peso primeiro caso.....	110
5.4	Relação da rigidez/peso segundo caso.....	111
5.5	Comparação entre aço e alumínio para a mesa de 150 x 150 mm.....	115
5.6	Dimensões das mesas de vácuo selecionadas pelo critério rigidez/peso.....	115
5.7	Comparação entre os perímetros de núcleos hexagonais.....	118
5.8	Configurações das mesas de vácuo selecionadas.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Coefficiente de atrito	
A	Área de contato submetida à diferença de pressão.....	$[m^2]$
a_p	Profundidade de corte.....	$[mm]$
δ	Deslocamento.....	$[mm]$
dn/dv	Distribuição de velocidades das moléculas por volume	
d_o	Diâmetro molecular (m).....	$[m]$
F	Força resultante da atmosfera externa.....	$[N]$
F_{ap}	Força de apoio.....	$[N]$
F_{at}	Força de atrito.....	$[N]$
F_c	Força de corte.....	$[N]$
F_f	Força de avanço.....	$[N]$
F_p	Força passiva.....	$[N]$
F_t	Força ativa.....	$[N]$
F_u	Força de usinagem.....	$[N]$
f_z	Avanço por dente.....	$[m/mim]$
k	Constante de Boltzman.....	$[J/K]$
K	Rigidez.....	$[N/mm]$
K/P	Relação de rigidez por peso.....	$[mm]$

λ	Caminho livre médio.....	[m]
m	Massa da partícula.....	[kg]
N_p	Número total de partículas	
n	Densidade.....	[mol/m ³]
N	Força normal.....	[N]
N_1	Número de moléculas inicial	
N_2	Número de moléculas final	
p	Diferença de pressão.....	[Pa]
P	Peso.....	[N]
$p_1 - p_0$	Pressão inicial atmosférica.....	[mbar]
$p_2 - p_0$	Pressão final atmosférica.....	[mbar]
P_1	Pressão inicial.....	[Pa]
P_2	Pressão final.....	[Pa]
P_a	Força de avanço.....	[N]
P_{ap}	Força de apoio.....	[N]
P_c	Força de corte.....	[N]
P_p	Força passiva.....	[N]
P_t	Força ativa.....	[N]
P_u	Força de usinagem.....	[N]
S	Vazão do sistema de vácuo.....	[l/s]
T	Temperatura.....	[K]
$t_2 - t_1$	Tempo de produção do vácuo.....	[s]
v	Média aritmética das velocidades das moléculas.....	[m/s]
V	Volume da câmara de vácuo.....	[l]

V1	Volume inicial.....	[m³]
V2	Volume final.....	[m³]
V_p	Velocidade de pico das moléculas.....	[m/s]

LISTA DE ABREVIATURAS

AFM	Microscópio de forma atômica
CNC	Comando numérico computadorizado
EBF3	Fabricação de formas livres por feixes de elétrons
EBL	Litografia por feixe de elétrons
FDM	Deposição de material fundido
HV	Alto vácuo
ITO	Substrato de índio com óxido de estanho
LOM	Laminação de objetos para modelos
MEF	Método dos elementos finitos
MEMS	Sistemas microeletromecânicos
NEMS	Sistemas nanoeletromecânicos
Pabs	Pressão absoluta
Pbar	Pressão barométrica
Pman	Pressão manométrica
PMMA	Polimetacrilato de metila
SEM	Microscópio eletrônico de escaneamento

SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização seletiva por laser
STM	Microscópio de escaneamento de tunelamento
TIG	Gás inerte de tungstênio
UHV	Ultra-alto vácuo

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Nas ultimas décadas, o avanço tecnológico tem crescido de forma a atender a demanda por produtos cada vez mais sofisticados no intuito de satisfazer as exigências dos consumidores. Recursos, escala de integração, miniaturização, design e custos, são algumas das características que norteiam a melhoria destes produtos. Neste sentido, os processos de projeto e fabricação tem se adequando a obter menores tolerâncias dimensionais. Para Venkatesh & Izman (2007), não basta apenas o uso das melhores ferramentas de máquina para a fabricação dos produtos com a exatidão desejada, e sim, a utilização das tecnologias avançadas de máquinas de alta precisão compatíveis com cada processo, nas quais são designadas pela engenharia de precisão.

A engenharia de precisão é uma disciplina preocupada com o aperfeiçoamento contínuo de técnicas de processamento para a melhoria de produtos, e está vinculada diretamente com o avanço da tecnologia (SMITH & CHETWYND, 1992). Segundo Venkatesh & Izman (2007), o avanço das técnicas de usinagem possibilitaram a fabricação de alto desempenho, agregando valores a produtos, como os exemplos de componentes de precisão para computadores, eletrônica e energia nuclear. No entanto, esta fabricação pode exigir tolerâncias na ordem de μm que compreendem a microtecnologia, e para os casos da nanotecnologia, as tolerâncias em nm são padrões. Em paralelo, os dispositivos de medição também sofrem avanços, devendo possuir desempenho capaz de medir as tolerâncias exigidas de cada processo de fabricação, quer seja em escala visível a olho nu ou em escala atômica. Contudo, estes avanços têm sido prejudicados por obstáculos inerentes a precisão da fabricação mecânica, assim como o nível de controle da atmosfera, que são cada vez

mais agravantes quando a escala de precisão é elevada. Para Smith & Chetwynd (1992), é necessário um maior cuidado com os projetos mecânicos, em que podem ser incluídos conceitos não triviais da prática normal de engenharia. Dependendo da aplicação, as exigências de condições controladas de temperatura, umidade e vibração não são suficientes, sendo necessário então, o controle da atmosfera presente. Como exemplos da problemática, a atmosfera não controlada contamina os processos de fabricação através de oxidação da superfície em contato com o meio além de formar camadas de depósitos moleculares, que em certos casos, inviabiliza todo o processo, como na fabricação de dispositivos semicondutores. As partículas sólidas em suspensão desviam os feixes de luz, e quando aplicada na metrologia sem contato, dificulta a questão do aumento da exatidão. Dispositivos miniaturizados na escala nanométrica ou até micrométrica, são completamente contaminados pelas moléculas do meio. Portanto, o controle da atmosfera a partir da tecnologia do vácuo é um das disciplinas fundamentais em certas aplicações da engenharia de precisão.

A tecnologia do vácuo tratada inicialmente pelos antigos como curiosidade filosófica, hoje, é uma tecnologia indispensável ao mundo moderno (CHAMBERS *et al*, 1998). Por se tratar do controle da atmosfera no sentido de extrair moléculas do meio, esta tecnologia traz melhoramentos e viabilidade a processos que são afetados pela atmosfera padrão (DEGASPERI, 2002). Com isso, aplicações que possuem problemas de controle de partículas sólidas em suspensão, oxidação, formação de camadas moleculares sobre uma superfície, choques moleculares, remoção de gases ativos e fixação de peças e ferramentas, são alguns dos problemas beneficiados por esta tecnologia (PAIVA *et al*, 2010). Aliada a engenharia de precisão, a tecnologia do vácuo permitiu a quebra de barreiras que limitavam o uso de aplicações exigentes além de melhoramentos de outras já existentes, promovendo o avanço tecnológico. Destacam-se a medição de massas com sensibilidade em escala zeptograma (10^{-21} g), a fabricação e manipulação de máquinas micro e nanomecânicas e chips eletrônicos. Limpezas de superfícies por secagem a vácuo, controle de umidade e retirada de gases ativos são desejados em algumas aplicações. As medições sem contato de dispositivos complexos e calibrações de medidores mostram maior desempenho quando submetidos à atmosfera controlada. Microscopia por varredura eletrônica e usinagem por feixe de elétrons ganharam mais resolução, tornando-se padrões usuais em baixas escalas de visualização. A prototipagem rápida de peças complexas apresenta melhores resultados com relação ao acabamento superficial e homogeneidade

interna de distribuição de massas. Nas aplicações em escalas macroscópicas, a fixação a vácuo permite mobilidade, rapidez e maior área efetiva de medição, além de não danificar as superfícies de peças e ferramentas aplicadas em máquinas-ferramenta e objetos em indústrias e estabelecimentos.

1.2 OBJETIVO GERAL

Levantamento bibliográfico dos fundamentos da tecnologia do vácuo e do estado da arte da aplicação desta tecnologia em engenharia de precisão e o desenvolvimento de uma metodologia para projetar mesas de vácuo no sentido de substituir os fixadores tradicionais de peças em máquinas-ferramenta.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever as principais aplicações da tecnologia do vácuo em engenharia de precisão.
- Estabelecer uma metodologia de projeto e desenvolvimento de mesas de fixação a vácuo aplicado em máquinas-ferramenta.
- Simulação computacional dos deslocamentos e tensões a que estão submetidas às mesas de vácuo para diferentes magnitudes de forças de usinagem.
- Dimensionamento do sistema de vácuo aplicado à mesa de fixação de peças.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada do seguinte modo:

O capítulo II consta da revisão da literatura sobre os fundamentos da tecnologia do vácuo. Inicialmente é dada uma visão histórica desde os princípios até a consolidação desta tecnologia. São apresentados os conceitos básicos, objetivos e classificações da tecnologia do vácuo nas mais variadas aplicações.

O capítulo III consta da revisão da literatura sobre os dispositivos de geração e medição de vácuo. São apresentados os aspectos construtivos e funcionais das mais variadas bombas de vácuo para cada faixa de pressão, seguido dos respectivos medidores de vácuo.

O capítulo IV consta da revisão da literatura sobre a aplicação da tecnologia do vácuo em engenharia de precisão. As aplicações em escalas macro, micro e nano abrangem as tecnologias de fabricação, medição e fixação.

O capítulo V consta de uma metodologia de projeto e desenvolvimento de mesas de vácuo aplicadas em máquinas-ferramenta. A partir de forças reais de usinagem, são desenvolvidas mesas de vácuo de diferentes núcleos utilizando materiais como aço e alumínio, e os seus esforços de deslocamento e tensão são analisados através de computação numérica para selecionar as mesas mais indicadas para cada magnitude de forças de usinagem.

No Capítulo VI apresenta-se a conclusão deste trabalho de pesquisa com sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica a respeito dos fundamentos da tecnologia do vácuo. O capítulo inicia com a apresentação do histórico desta tecnologia seguido de conceitos básicos essenciais. Nas seções 2.4 e 2.5 são apresentados os objetivos e classificações da tecnologia do vácuo conforme a literatura.

2.2 UM BREVE HISTORICO SOBRE A TECNOLOGIA DO VÁCUO

Na antiguidade (322 -384 aC), Aristóteles definiu o vácuo como sendo o “vazio” ou uma espécie de “espaço privado de corpo” como uma impossibilidade lógica da natureza, uma vez que filósofos e gregos antigos acreditavam na matéria como uma substância contínua (SAUNDERS & BROWN, 2002). Este entendimento de substância e outras filosofias levantadas por Aristóteles, como a questão dos quatro elementos do reino da terra formados por ar, terra, fogo e água serem substâncias inalteradas, afastaram o conceito de vácuo por aproximadamente 1900 anos (RYANS & ROPER, 1986).

A filosofia de Aristóteles foi aceita ao longo dos séculos como escrituras de formação em que foram ensinadas rigorosamente por Jesuítas e acadêmicos sem espaço para questionamentos (RYANS & ROPER, 1986). Portanto, isto mostra a dificuldade do povo antigo perceber a variação da densidade do gás com a pressão assim como o ar exercer uma pressão sobre um corpo.

Somente a partir do século XVII é que foram demonstrados os primeiros experimentos para entendimento e validação do vácuo, derrubando a teoria filosófica de Aristóteles de que “a natureza tem horror a vácuo” (RYANS & ROPER, 1986).

Iniciado por Gasparo Berti em 1641, o mesmo construiu um barômetro de água bruta em que não obteve êxito com os resultados por não saber interpretá-los (REDHEAD 1999). Mais adiante em 1643, Torricelli mostrou e explicou através do seu experimento o surgimento do vácuo através de um tubo contendo mercúrio em sua totalidade, em que foi emborcado dentro de um recipiente contendo mercúrio. Ao emborcar o tubo que tinha um metro de comprimento, o mercúrio deixou um espaço vazio na extremidade superior do tubo demonstrando a existência do vácuo, e ao equilibrar com a pressão atmosférica, foi verificada uma coluna de 760 mm de mercúrio. Este valor é uma referência de pressão atmosférica utilizada nos dias de hoje como pressão ao nível do mar, no qual foi conferido em 1648 através dos experimentos de Pascal e Perier (GAMA, 2002). Os mesmos utilizaram o experimento de Torricelli como medidor de pressão atmosférica ou conhecido como barômetro, demonstrando que esta pressão varia com a altitude. Atualmente, os barômetros utilizam o mesmo princípio de funcionamento Torricelliano.

Segundo Ryans & Roper (1986) Otton Guerick contribuiu para o início da engenharia da tecnologia do vácuo em 1654 através da criação da primeira bomba de vácuo no tão famoso experimento dos hemisférios de Magdeburg. Este sem dúvida foi um dos experimentos mais importantes dentro da história da tecnologia do vácuo, comovendo padres, acadêmicos de formação filosófica e o imperador da Alemanha. Assim como o experimento de Torricelli, Otton Guerick teve grande repercussão dentro do que era pensando sobre vácuo, já que no século XVII, a filosofia e a religião norteavam a ciência neste tempo. Ryans & Roper (1986) afirmam que para ser ter a total compreensão da magnitude da contribuição de Gerick para a ciência, há apenas vinte anos atrás do experimento dos hemisférios, o considerado pai da física moderna Galileu Galilei fora acusado de heresia pela inquisição papal. No entanto, o mesmo foi forçado a aceitar que a teoria de Nicolau Copérnico sobre que a terra se move ao redor do sol era errada.

Através de uma bomba de vácuo, Gerick retirou uma quantidade parcial de ar existente de dentro dos dois hemisférios de 119 cm de diâmetro e selados com tiras de couro e molhadas com mistura de cera e terebentina (GAMA, 2002). Através da diferença de pressão criada entre a atmosfera externa e interna aos hemisférios, Gerick tinha acabado de criar um sistema de vácuo típico, formado por uma bomba, tubulação e câmara de

vácuo. Como prova da geração do vácuo, duas pares de oitenta cavalos não foram suficientes para separar os hemisférios, exceto quando Gerick abriu uma torneira de entrada de ar, comprovando a ação da força da atmosfera externa em relação à diferença de pressão. Diante dos fatos, o experimento dos hemisférios se tornou incontestável, famoso e difundido na Europa, sendo publicado posteriormente em 1657 nos livros de mecânica, pneumática e hidráulica, abrindo portas para outros experimentos e descobertas em outros países (RYANS & ROPER, 1986). Outros estudos foram realizados por Gerick demonstrando que o som não se propagava no vácuo assim como uma vela não queimava.

A bomba de Guerick era composta basicamente por um cilindro contendo um pistão, com funcionamento semelhante a uma seringa que era acionada manualmente por uma alavanca ou mão de força (HARSCH, 2007). Não era uma bomba eficiente, porém, foi capaz de demonstrar os efeitos do vácuo diante da natureza (HARSCH, 2007). Com o passar dos anos, outros cientistas evoluíram e adaptaram a bomba de vácuo de Gerick para as necessidades do avanço tecnológico corrente, utilizando melhores dispositivos de vedação que se estendeu até o final do século XIX (GAMA, 2002).

Outros tipos de bombas de vácuo com princípios de funcionamento diferentes ao de Guerick foram desenvolvidos por Jean Baptiste Dumas em 1825 utilizando a substituição do ar existente de um recipiente por vapor de água condensado através do resfriamento do recipiente. Em seguida Robert Wilhelm Bunsen introduziu o conceito de jato de líquido a alta velocidade no bombeamento de gás, que é utilizado atualmente pelas bombas de vapor com ejetores a vácuo.

Mas somente com o desenvolvimento da física através dos estudos com os gases ionizados e tubos de descargas elétricas que deram origem a física atômica é que a tecnologia do vácuo teve um desenvolvimento acentuado, que a impulsionou para o meio científico (DEGASPERI, 2002). Com esta demanda para a pesquisa, fez-se um maior desenvolvimento das bombas de vácuo assim como os sistemas de vácuo no sentido de atender as novas aplicações que exigiam maiores pressões de vácuo. Como na produção das primeiras lâmpadas que exigiam um ambiente com vácuo para que o filamento incandescente pela alta temperatura não oxidasse na presença de oxigênio dentro do bulbo. E utilizando o mesmo princípio de construção das lâmpadas, surgiram as válvulas termiônicas que tiveram a capacidade de controlar níveis e formas de condução da corrente elétrica no vácuo dentro do bulbo (STEMPNIAK, 2002). Os arcos voltaicos também podem ser controlados e extinguidos de contatos elétricos quando submetidos a uma

pressão de vácuo, largamente utilizados em dispositivos de manobra como contatores (BOXMAN *et al*, 1995). A partir disto, surgiram as bombas mecânicas e de vapor atendendo as mais variadas aplicações de baixo e médio vácuo.

Para obtenção de maiores pressões de vácuo, os estudiosos perceberam que existiam bem mais dificuldades que deveriam ser relacionadas com outras variáveis que não eram observadas nos sistemas anteriores. Mas a partir dos estudos na área de cinética dos gases e o desenvolvimento das teorias atômicas e quânticas, os estudiosos começaram a entender os mecanismos e a dinâmica dos gases em baixa pressão, levando a criar sistemas de vácuo mais complexo e adequados a faixa de alto vácuo (DEGASPERI, 2002). Com isso, aplicações mais sofisticadas nas mais variadas áreas utilizam desses sistemas, onde surgiram às bombas de reações químicas por absorção, adsorção, iônicas e criogênicas.

Em paralelo a evolução das bombas, os dispositivos de medição também sofreram aperfeiçoamentos e desenvolvimentos específicos para faixas de pressões de vácuo. A começar pelo primeiro medidor de pressão atmosférica de *Torricelli* e utilizando o mesmo princípio de funcionamento por altura de coluna, os tubos em “U” medem pressões até 10^{-3} mbar. Com o passar de 200 anos, Mcleod inventa o manômetro que foi referência até o final do século XX medindo pressões até 10^{-4} mbar utilizando o mesmo princípio dos medidores de coluna, só que através de um fator de compressão do gás, conseguiu obter cerca de 10 vezes mais resolução de medição (GAMA, 2002).

Os manômetros mecânicos utilizam a diferença de pressão para mover dispositivos mecânicos que indicam o valor de pressão de vácuo, porém, este tipo de medidor não é sensível e somente é utilizado em sistemas de baixo vácuo. Nos casos de medições em pressão de alto vácuo, Pirani desenvolveu o seu medidor com princípio de funcionamento compatível com as características do gás nesta faixa de pressão, através da medida da condutividade térmica do gás em função da variação de pressão, chegando a medir até 10^{-5} mbar (O'HANLON, 2003). Respectivamente dentro da obtenção de pressões ainda mais baixas, surgiram os medidores de Knudsen, ionização de gás a cátodo quente e frio, chegando a 10^{-11} mbar. Para o estado da arte em medições de pressões até 10^{-18} mbar que compreende uma pressão na faixa de ultra-alto vácuo, Lafferty promove melhoramentos dos medidores de cátodo quente obtendo o incrível limite de 10^{-18} mbar (GAMA, 2002).

Ainda na questão da evolução do sistema de vácuo, os componentes também tiveram fator decisivo para a obtenção de pressões de vácuo cada vez maior. Todavia, não

bastavam apenas bombas e medidores sofisticados, mas os elementos de vedação, condições das paredes das câmaras e tubulações, materiais envolvidos e técnicas completam os mais variados sistemas de vácuo (O'HANLON, 2003). A comparar pelos primeiros elementos de vedação utilizados por Gerick na sua experiência que utilizou tiras de couro embebidas em cera e terebentina, outros elementos foram desenvolvidos a medida do aumento das pressões de vácuo. Como o exemplo de câmaras de vácuo de vidro totalmente seladas e fundidas ao tubo de conexão do sistema de bombeamento, são aplicadas substâncias absorvedoras internamente a câmara no intuito de melhorar o vácuo (GAMA, 2002). Borrachas, anéis de silicone, gaxetas e plásticos são os dispositivos de vedação mais comuns nos sistemas de baixo e médio vácuo (O'HANLON, 2003). Para os sistemas que utilizam ultra-alto vácuo, é utilizada atualmente a técnica de aquecimento do sistema de vácuo para desprender as moléculas do gás. Neste caso, todos os dispositivos são de metal, inclusive os anéis de vedação que geralmente são de cobre, além de câmaras e tubulações possuírem superfícies polidas como forma de desprender mais facilmente as moléculas de gás (O'HANLON, 2003). Portanto, para cada faixa de vácuo específica, se configurou diferentes tecnologias para os dispositivos de vácuo em função da complexidade, e naturalmente, grupos de aplicações foram também distribuídos em função do nível de exigência de vácuo.

Atualmente a tecnologia do vácuo não está apenas empregada na física e engenharia como esperado historicamente, mas também em diversas outras áreas como medicina, química, alimentos, odontologia, biologia e agropecuária, e que aos poucos, outras áreas vão necessitando desta tecnologia. Segundo Chambers *et al.* (1998) a tecnologia do vácuo é considerada hoje em dia como um elemento indispensável ao mundo moderno por permitir o desenvolvimento da microeletrônica e nanotecnologia, além do melhoramento de inúmeros processos já existentes.

Finalizando, os cientistas e estudiosos da tecnologia do vácuo durante a história tiveram o esforço de obter pressões cada vez mais baixas além de melhorar a qualidade do vácuo. Fazendo um paralelo de hoje com o início de tudo através das palavras de Aristóteles, e mesmo diante de tanta evolução, os mecanismos do vácuo absoluto propriamente dito ainda são desconhecidos, e, no entanto, intuitivo dentre as várias teorias da física clássica e moderna (SAUNDERS & BROWN, 2002). Ryans & Roper (1986) defendem que é impossível se chegar ao vácuo absoluto por causa das imperfeições dos

sistemas, mas, a grande diferença é que o vácuo é tratado hoje como um conceito concreto, e que no desenvolver desta tecnologia, muitas coisas ainda serão descobertas.

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO

Qualquer sistema de vácuo é composto basicamente por três elementos já definidos por Guerick na antiguidade através de sua primeira experiência com os hemisférios. E como visto historicamente, a tarefa de todo sistema de vácuo é de produzir e garantir baixas pressões no interior de uma câmara de vácuo. A Figura. (2.1) ilustra um sistema genérico formado por câmara, tubulação e bomba de vácuo.

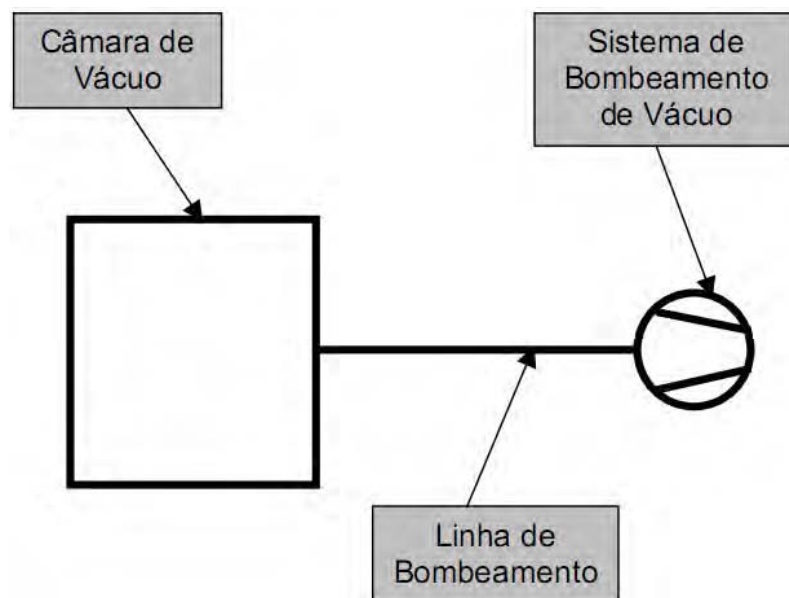


Figura 2.1. Configuração genérica de sistemas de vácuo

Degasperi, 2002, p. 17

A bomba de vácuo tem por finalidade criar uma diferença de pressão dentro da tubulação e câmara de vácuo em relação ao coletor de aspiração da bomba, causando um desequilíbrio de pressões no sistema. Ou seja, na entrada da bomba existe uma pressão menor que em qualquer ponto da tubulação e câmara de vácuo (MOUTINHO *et al*, 1980). Esta diferença de pressão promove um fluxo de gás contido no sistema, no sentido de evacuar a quantidade de gás proporcional a esta diferença criada pela bomba.

Conseqüentemente, quanto maior a diferença de pressão, menor será a quantidade de gás existente dentro do sistema de vácuo.

O papel da tubulação nos sistemas de vácuo é de conectar não só bomba de vácuo a câmara, mas também, criar todo um circuito interligando os dispositivos inerentes do sistema (O'HANLON, 2003; CHAMBERS *et al*, 1998). Em certos casos, a tubulação pode ser flexível para atender a mobilidade da aplicação envolvida, ou então de forma rígida podendo ter janelas de acesso, tomadas de pressão e válvulas específicas como no caso de sistemas de vácuo mais complexo, conforme apresentado pela Fig. (2.2).

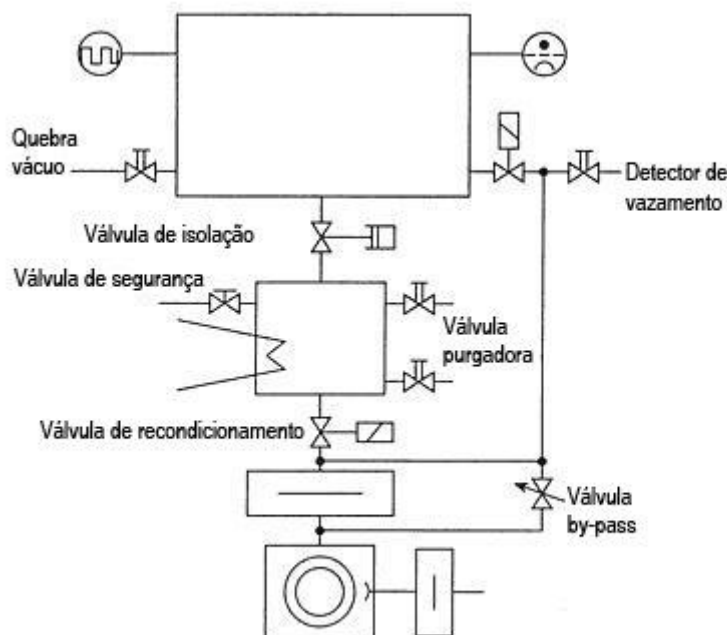


Figura 2.2. Configuração de um sistema de ultra-alto vácuo

Chambers *et al*, 1998, p. 156

A câmara é o elemento de maior interesse no sistema de vácuo, pois é nela que as experiências e as aplicações são realizadas, uma vez que proporciona um ambiente fechado com atmosfera controlada. É o elemento que fecha o circuito do sistema de vácuo, e os outros dispositivos envolvidos devem produzir e garantir a baixa pressão requerida na câmara. A câmara de vácuo deve suportar os esforços causados pela atmosfera externa quando submetida à diferença de pressão. Como a pressão tem característica escalar, agindo em todas as direções e em qualquer ponto, a câmara de vácuo é submetida aos

esforços da atmosfera externa em todas as suas paredes, causando uma deformação e tensão no sentido de implodi-la (ÇENGEL & CIMBALA, 2007; WYLEN *et al*, 1998).

O cálculo da força em função da pressão é bem conhecido na literatura, portanto, a força que a atmosfera exerce sobre um objeto submetido a uma diferença de pressão pode ser facilmente calculado através da Eq. (2.1), similar aos exemplos de êmbolos que contém gás no seu interior.

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Onde:

p - Diferença de pressão (Pa)

F - Força resultante da atmosfera externa (N)

A - Área de contato submetida à diferença de pressão (m²)

A Equação. (1) mostra que para uma mesma diferença de pressão, pode-se ter forças diferentes e proporcionais à área de contato, com isso, as paredes da câmara de vácuo devem possuir espessura suficiente para resistir aos esforços. Segundo Degasperri (2002), o uso do vácuo pode criar diferenças de pressões da ordem de 10⁵ Nm⁻², podendo ser utilizado não só para criar um ambiente de atmosfera controlada, mas também para fixar objetos e conformar plásticos aquecidos, além de uma série de outras aplicações que se beneficiam da força gerada pelo vácuo.

A norma DIN 1343 determina que a pressão atmosférica padrão (Patm) em relação ao nível do mar é de 101,325 kPa no sistema internacional ou 1013,25 mbar costumeiramente utilizado por fabricantes e que segundo Lafferty (1998) é uma unidade múltipla e submúltipla especial do Pascal. Ou ainda, pode ser encontrado como 760 torr, sendo esta, uma unidade antiga em homenagem a Torricelli, que aos poucos está entrando em desuso.

Para Ryans & Roper (1986) qualquer sistema que obtenha uma pressão abaixo da atmosférica padrão é definida como pressão de vácuo. Portanto, a diferença de pressão do sistema é calculada através da diferença entre as pressões atmosférica e de vácuo obtida na câmara. A Figura. (2.3) apresenta que a menor pressão que pode ser obtida teoricamente no interior de uma câmara é de 1013,25 mbar. Considerando que a pressão barométrica local

(P_{bar}) seja igual à atmosférica padrão, sabendo que esta mede a pressão atmosférica em relação ao nível do mar.

A pressão absoluta (P_{abs}) mede a pressão em relação ao vácuo absoluto, em que sempre é uma medida positiva. Já a pressão manométrica (P_{man}) em sistemas de vácuo, mede o decréscimo de pressão em relação à pressão barométrica local, sendo esta uma medida negativa. Portanto, sistemas de vácuo podem ser dotados de diferentes referências, que podem levar a medidas positivas ou negativas, com isso, é importante interpretar a natureza de referência de medida do sistema empregado.

Conforme Ryans & Roper (1986) o vácuo absoluto é um aspecto teórico, pois é impossível de obtê-lo e Adam *et al.* (1998) explicam que as limitações são decorrentes da estanqueidade, limites de sucção da bomba e interação das paredes da câmara com as moléculas do gás.

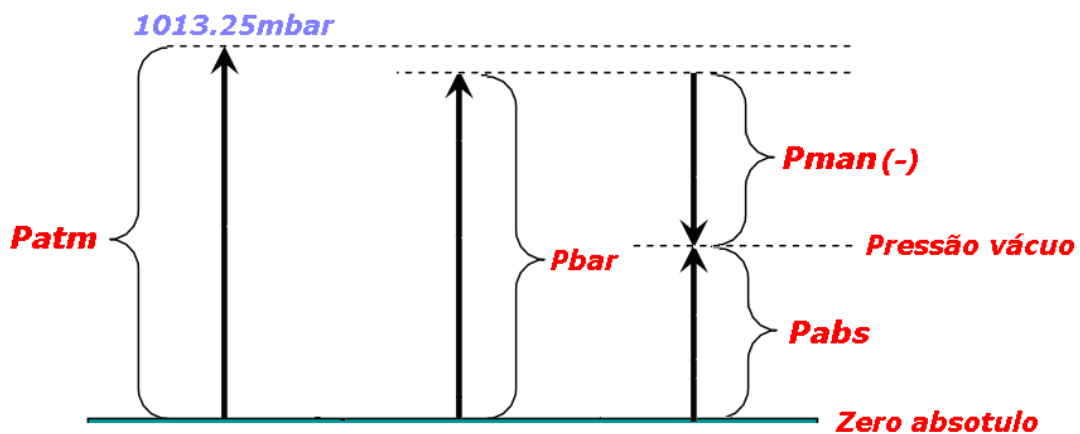


Figura 2.3. Relação entre pressões

Para qualquer volume e pressão utilizados normalmente em laboratórios, existirá um grande número de moléculas (O'HANLON, 2003). Quando submetida à pressão atmosférica padrão a uma temperatura de 22°C, um metro cúbico de gás ideal possui 2.48×10^{25} moléculas, e mesmo em condições de baixa pressão na ordem de 10^{-7} Pa, ainda existem 2.5×10^{13} moléculas (O'HANLON, 2003). Isto quantifica a dificuldade dos sistemas de vácuo evacuar uma grande quantidade de moléculas, e ainda a impossibilidade de retirar todas elas, haja vista os vazamentos e imperfeições dos dispositivos utilizados.

Assim como aplicações se beneficiam da força gerada pelo vácuo discutida anteriormente, a quantidade de moléculas no ambiente é outra característica que atende a

outra classe de aplicações que necessitam de uma atmosfera rigorosamente controlada, na qual depende da quantidade de pressão exigida pela aplicação. De acordo com a teoria cinética dos gases, a pressão no interior da câmara é proporcional à quantidade de colisões moleculares em suas paredes (LAFFERTY, 1998).

Moutinho *et al.* (1980) explicam que a parede de um objeto recebe de uma colisão molecular uma quantidade de movimento ou momento linear que é igual à massa vezes a velocidade da partícula. E como forma de equilibrar o impacto destes choques, é necessária aplicar uma força proporcional a pressão vezes à área de contato da parede com os choques, definida anteriormente pela Eq. (1). Isto explica a força resultante no sentido da maior para a menor pressão que está submetida uma câmara de vácuo através da diferença de pressão. Lafferty (1998) afirma que estes choques moleculares quando considerados como elásticos, ou seja, que não perdem energia para as paredes são refletidos com o mesmo momento linear no sentido oposto se chocando com outras moléculas. As moléculas estão em um estado de constante movimento com todas as velocidades possíveis, mas sem a mesma probabilidade de ocorrência (O'HANLON, 2003). Esta distribuição de probabilidade foi calculada por Maxwell Boltzmann através da Eq. (2.2) (O'HANLON, 2003).

$$\frac{dn}{dv} = \frac{2N_p}{\pi^{1/2}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)} \quad (2.2)$$

Onde:

$\frac{dn}{dv}$ - Distribuição de velocidade das moléculas

N_p - Número total de partículas

k - Constante de Boltzmann (J/K)

T - Temperatura absoluta (K)

m - Massa da partícula (kg)

v - Velocidade das partículas (m/s)

A Figura. (2.4) apresenta a distribuição de velocidades das moléculas para o nitrogênio em três diferentes temperaturas. Podemos observar que dentro das distribuições não existem moléculas com velocidade zero e nem infinita, e que a temperatura tem um

papel fundamental na distribuição. Segundo Lafferty (1998) a temperatura é proporcional a média cinética de energia de translação das partículas. Portanto o efeito do aumento da temperatura é evidenciado pelo aumento da energia de translação das moléculas, tendo consequência na distribuição das velocidades das moléculas em um volume.

Ainda na Fig. (2.4) O'Hanlon (2003) expressa o pico de velocidade das moléculas e a média aritmética através das Eq. (2.3) e (2.4) respectivamente.

$$v_p = (2kT/m)^{1/2} \quad (2.3)$$

$$v = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

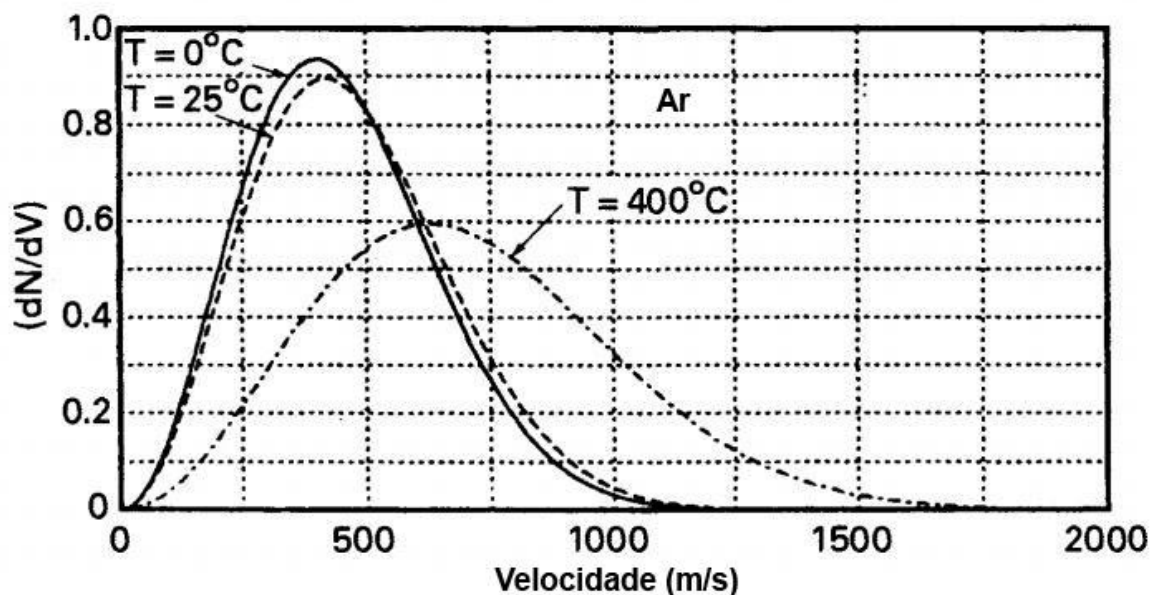


Figura 2.4. Distribuição de velocidades para o nitrogênio em 0°C, 25°C e 400°C

O'Hanlon, 2003, p. 10

A Figura. (2.5) ilustra também a distribuição das velocidades para diferentes gases a uma mesma temperatura.

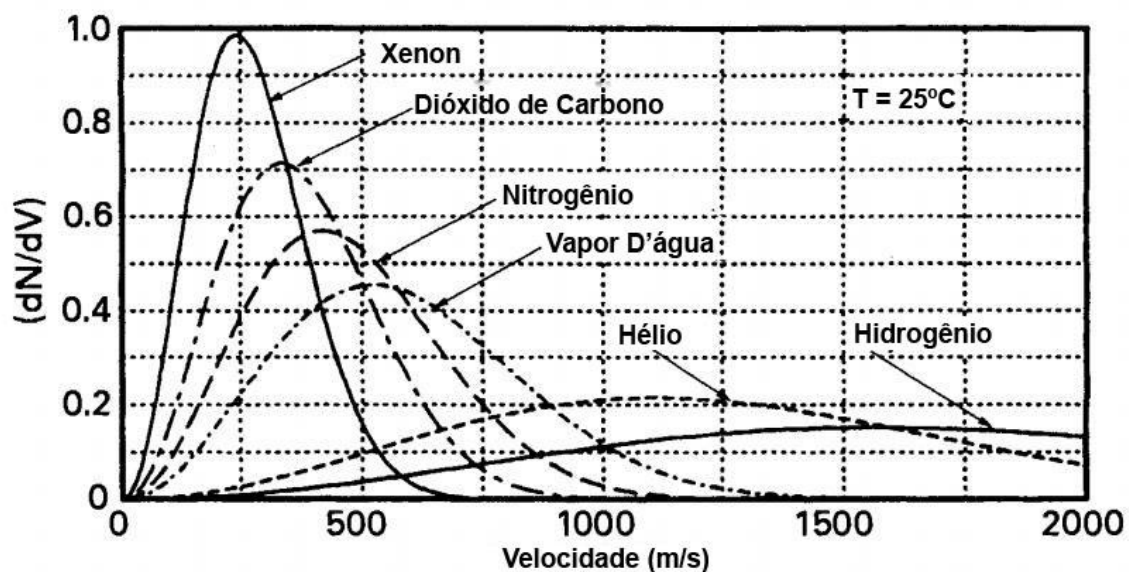


Figura 2.5. Distribuição de velocidades para diferentes gases a 25°C

O'Hanlon, 2003, p. 11

Outros equacionamentos importantes dentro da teoria cinética dos gases são as leis de Boyle, Charles e Avogadro que relacionam pressão, temperatura, volume e número de moléculas em função de um gás ideal (O'HANLON 2003).

A Equação. (2.5) mostra a lei de Boyle para número de moléculas e temperatura absoluta constante.

$$P_1.V_1 = P_2.V_2 \quad (2.5)$$

A Equação. (2.6) mostra a lei de Charles para número de moléculas e pressão constante.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.6)$$

A Equação. (2.7) mostra a lei de Avogadro para temperatura e volume constante.

$$\frac{P_1}{N_1} = \frac{P_2}{N_2} \quad (2.7)$$

O aumento de temperatura ou diminuição na massa provoca um aumento na velocidade e na frequência com que as moléculas colidem umas com as outras ou em paredes próximas (O'HANLON, 2003). Como mostrado na Fig. (2.4) e Fig. (2.5) as moléculas são distribuídas de formas aleatórias e com diferentes velocidades implicando em um percurso diferente para cada molécula. Isto resulta em uma importante propriedade da tecnologia do vácuo, conhecida como caminho livre médio.

O caminho livre médio mensura a média da distância entre duas colisões moleculares sucessivas, que determinam uma série de outras propriedades relacionadas ao fluxo dos gases e denota o nível de complexidade do projeto de sistemas de vácuo assim como o tipo de aplicação que deve ser empregado (DEGASPERI, 2002).

A Figura. (2.6) apresenta um gás onde as moléculas individuais não possuem o mesmo caminho livre médio, portanto, esta grandeza é definida através da Eq (2.8) pela teoria cinética (O'HANLON, 2003).

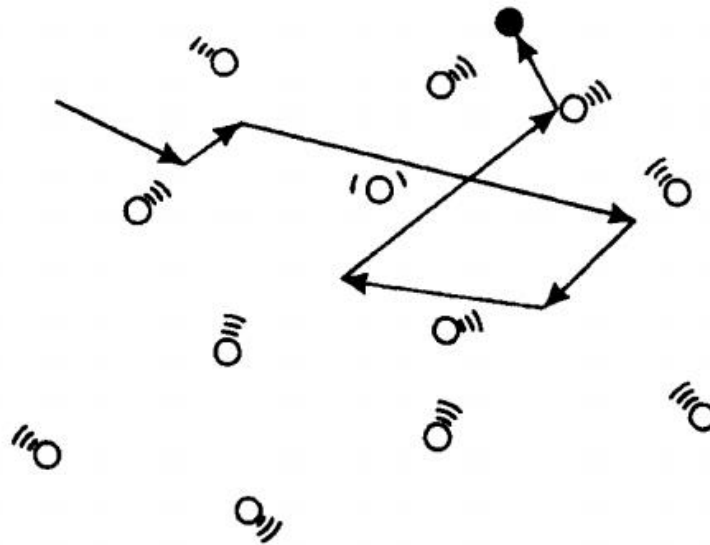


Figura 2.6. Caminho livre médio de uma molécula

O'Hanlon, 2003, p. 12

$$\lambda = \frac{1}{2^{\frac{1}{2}} \pi d_0^2 n} \quad (2.8)$$

Onde:

λ - Caminho livre médio (m)

d_0 - Diâmetro molecular (m)

n - Densidade (Número de moléculas por metro cúbico)

O'Hanlon (2003) afirma que 63% das colisões moleculares ocorrem em uma distância de $0 \leq x \leq \lambda$, enquanto cerca de 37% ocorre entre $\lambda \leq x \leq 5\lambda$, e apenas 0.6% das partículas percorrem distâncias superiores a 5λ sem sofrer colisão. Quanto mais baixa a pressão do sistema assim como a densidade do gás, maior será o caminho livre médio devido à menor quantidade de moléculas presentes no ambiente.

A Tabela. (2.1) apresenta as relações dos graus de vácuo com as grandezas físicas do ar a temperatura ambiente, segundo Moutinho *et al.* (1980).

Tabela 2.1 - Relações dos graus de vácuo com as grandezas físicas do ar a temperatura ambiente

Pressões (mbar)	Faixas de pressão	Caminho livre médio λ (cm)	Nº de moléculas por cm³ n	Nº de colisões por segundo em 1cm² de parede $\frac{1}{4}nv$	Altitude em relação ao nível do mar (km)
10^3	Pressão atmosférica	7×10^{-6}	2×10^{19}	3×10^{23}	Nível do mar
10^2	Vácuo				
1		7×10^{-3}	2×10^{16}	3×10^{20}	45
10^{-1}	Vácuo primário				
10^{-3}		7	2×10^{13}	3×10^{17}	90
10^{-4}	Alto vácuo				
10^{-6}		7×10^3	2×10^{10}	3×10^{14}	160

10^{-7}	Vácuo muito alto				
10^{-9}	Ultra alto vácuo	7×10^6	2×10^7	3×10^{11}	450
10^{-12}		7×10^9	2×10^4	3×10^8	1000
10^{-15}		7×10^{12} (200 anos luz)	20	3×10^5	

Verifica-se na Tabela. (2.1) a existência de uma classificação das faixas de vácuo relacionadas com o comportamento molecular do gás em questão, que mostram mudanças relevantes à medida que a pressão de vácuo é mais baixa. Conseqüentemente, cada faixa de mudança do comportamento molecular estará associado a um grupo de aplicações específicas que vão ficando mais complexas cada vez que a exigência do controle da quantidade de moléculas no ambiente é maior. Estas características serão tratadas com maiores detalhes nas próximas seções.

2.4 OBJETIVOS DA TECNOLOGIA DO VÁCUO

A tecnologia do vácuo tem como focos principais o melhoramento e viabilidade de certas aplicações que são afetadas pela atmosfera padrão (DESGASPERI, 2002). Partindo do pressuposto em que os gases ativos e partículas sólidas em suspensão presentes na atmosfera padrão influenciem estes processos na forma de contaminação e oxidação, estes se beneficiam quando o controle da atmosfera é utilizado.

Hoffman *et al.* (1994) ressaltam os objetivos da tecnologia do vácuo aplicados dentro de quatro classificações físicas conforme a seguir:

- a) Situação de baixa pressão: Dentro desta classificação, a tecnologia do vácuo objetiva a criação de uma diferença de pressão entre os meios internos e externos à câmara de vácuo. Esta diferença de pressão aplicada a uma área de contato gera uma força resultante que é utilizada para deformar, separar, suspender, sustentar, freiar, limpar, transportar, fixar e coletar. Nesta classificação, a tecnologia do vácuo está preocupada apenas no quanto a diferença de pressão é capaz de suportar cargas, não sendo relevante a disposição das moléculas assim como o modo do

fluxo de gás. O contato entre os materiais e o atrito entre eles são objetos de estudo de grande relevância.

- b) Situação física de baixa densidade molecular: Dentro desta classificação, a tecnologia do vácuo objetiva a remoção de moléculas e partículas no intuito de diminuir a contaminação nos processos pela evacuação dos gases ativos presente no ambiente. A evacuação remove os gases quimicamente ativos de dentro da câmara de vácuo, evita reações químicas indesejáveis como a oxidação, além de permitir a formação de atmosferas inertes para fundir, tratar metais e empacotar produtos. Remove também gases ativos dissolvidos nos materiais como a partir da secagem em baixas e altas temperaturas e extração de líquidos e vapores em materiais sólidos.
- c) Situação física de grandes caminhos livres médios: Dentro desta classificação, a tecnologia do vácuo objetiva minimizar o efeito do número de colisões entre as moléculas garantido um ambiente mais livre de perturbações. Esta classificação é utilizada em aplicações mais rigorosas e também naquelas voltadas para as áreas da pesquisa. O estudo da dinâmica das moléculas e o estado do fluxo do gás são de grande importância nesta classificação. O menor número de colisões moleculares permite um menor desvio de feixes de elétrons e de luz. Utilizados em tubos de raios catódicos, raio X, osciloscópios, aceleradores de partículas, espectrômetros de massa e ópticos, máquinas de solda, microscopia eletrônica, evaporadoras para filmes finos, anéis de armazenamento de partículas e separadores de isótopos.
- d) Situação física de longos tempos para a formação de uma monocamada: Dentro desta classificação, a tecnologia do vácuo prioriza os efeitos da formação de uma camada molecular sobre a superfície de um material. A formação desta camada é em função da quantidade de choques moleculares na parede do material, que, no entanto pode ter um tempo estimado dentro de parâmetros conhecidos quando submetida a pressões muito baixas. O principal objetivo é conseguir superfícies limpas, com poucos gases adsorvidos, ou seja, retidos pela superfície do material. Aplicadas em superfícies para o estudo e aplicação de filmes, emissão de elétrons, variação do coeficiente de atrito, estudos em física de superfícies, nanotecnologia, dopagem de materiais e também em estudos aeroespaciais.

Os objetivos da tecnologia do vácuo compreendem uma larga escala de aplicações que vão desde as mais simples até as mais complexas, tendo em vista que a diferença entre cada aplicação é determinada pelo nível de vácuo requerido. Conseqüentemente, cada nível de vácuo exige um tipo de abordagem diferente para o sistema de vácuo empregado, no que diz respeito às bombas, tubulações, materiais e dispositivos que compõem o sistema. Com isso, faixas de pressões de vácuo foram delimitadas de forma a organizar o escopo de cada uma delas.

2.5 FAIXAS DE PRESSÃO DE VÁCUO

A tecnologia do vácuo foi subdividida em faixas de pressões arbitrárias que determinam o nível de abordagem do projeto do sistema de vácuo e o tipo de aplicação envolvida (CHAMBERS *et al.*, 1998). Para Adam *et al.* (1998) cada área de concentração trata estas faixas de maneira particular, ou seja, para os químicos, o vácuo pode estar compreendido apenas nas faixas de 100 a 1 mbar. Para os engenheiros, esta faixa é bem mais genérica e abrangente, compreendendo todo o espectro de aproximadamente dezesseis potências de dez. Para Moutinho *et al.* (1980) e Ryans & Roper (1986) as faixas de vácuo estão subdivididas em quatro categorias, já para outros autores como Chambers *et al.* (1998) e O'Hanlon (2003) as subdivisões podem chegar até quatro e cinco faixas respectivamente. A Tab. (2.2) apresenta a caracterização de cada faixa de pressão de vácuo conforme Ryans & Roper (1986), que será considerada daqui pra frente como referência de faixas de pressões de vácuo.

Tabela 2.2 - Faixas de pressão de vácuo

Faixa de Pressão de Vácuo	Nomenclatura
Atmosfera – 1 mbar	Baixo vácuo / Low vacuum
1 mbar – 10^{-3} mbar	Médio vácuo / Medium vacuum
10^{-3} mbar – 10^{-7} mbar	Alto vácuo / High vacuum (HV)
Abaixo de 10^{-7} mbar	Ultra-alto vácuo / Ultra-high vacuum (UHV)

Quanto maior o nível de pressão de vácuo exigido por uma aplicação, mais detalhado e complexo se torna o sistema de vácuo envolvido, além do maior custo de

implementação e manutenção (O'HANLON, 2003). Adam *et al.* (1998) afirmam também que em cada situação de faixa de vácuo, o gás tem um comportamento cinético diferente. Diante deste fato, é necessário que o projetista de vácuo saiba classificar corretamente a pressão necessária para uma determinada aplicação a fim de não superdimensionar o sistema. Conforme discutido na seção 2.4, cada uma das quatro classificações físicas levantadas por Hoffman *et al.* (1994) está incluída dentro de cada faixa de vácuo apresentada pela Tab. (2.2). As subseções seguintes detalham o nível de abordagem de cada faixa de vácuo.

2.5.1 Baixo Vácuo

Chambers *et al.* (1998) definem o baixo vácuo como sendo uma fração significativa da pressão atmosférica. Esta faixa de pressão é caracterizada pela maior interação entre as moléculas do gás (ADAM *et al.*, 1998). Estas interações são similares ao que acontece no regime de escoamento em fluidos com pressões positivas, ou seja, maiores que a atmosférica. Para O'Hanlon (2003) este regime de escoamento denominado contínuo ou viscoso está subdividido em turbulento e laminar, que são determinados pela medida adimensional do número de Reynolds. Mas como citado anteriormente na seção 2.4, Hoffman *et al.* (1994) classificaram o objetivo desta faixa de pressão como sendo a criação de uma diferença de pressão entre o ambiente externo e interno a câmara de vácuo. Com isso, o estado dinâmico das moléculas não é de grande relevância, uma vez que a variável de maior interesse é a força criada pela pressão de vácuo aplicada em uma área de contato. Para Moutinho *et al.* (1980) as tubulações normalmente tem diâmetros adequados em que o regime turbulento do gás não é importante no projeto.

Como característica de projeto, os sistemas de baixo vácuo são os que possuem menor complexidade e custo em comparação aos outros sistemas que compreendem as outras faixas de vácuo. Isto se dá ao fato da menor quantidade de variáveis envolvidas e fenômenos físicos associados à diminuição de apenas três potências de dez em relação à atmosfera, que contribuem para utilizar componentes e dispositivos de baixo custo. No cálculo da bomba de vácuo, os efeitos de degaseificação, vazamento e permeabilidade dos materiais são desconsiderados em relação à quantidade de gás que se deseja retirar do ambiente (MOUTINHO *et al.*, 1980). Ou seja, uma simples bomba de vácuo acoplada a uma mangueira já é caracterizado como um sistema de baixo de vácuo.

Nesta faixa de pressão são utilizadas bombas de um único estágio que trabalham evacuando gás a partir da pressão atmosférica, conhecidas como bombas rotatórias (MOUTINHO *et al*, 1980). As tubulações podem encontradas com materiais plásticos ou de borrachas flexíveis, e em alguns casos, metálicos. Já as câmaras de vácuo possuem inúmeros formatos e materiais que vão de acordo com cada aplicação. Em certos casos, a câmara se confunde com a tubulação ou então, fazem parte da própria aplicação. A Figura. (2.7) apresenta um sistema de fixação a vácuo formado por um robô com um conjunto de garras com ventosas de borracha. Nesta aplicação a câmara de vácuo é formada pela ventosa juntamente com a superfície do objeto que esta sendo sustentado. A diferença de pressão criada pelas ventosas gera uma força resultante capaz de equilibrar o peso do objeto sustentado. As ventosas são conectadas por mangueiras e concentradas em uma bomba de vácuo rotativa.



Figura 2.7. Sistema de baixo vácuo utilizado em robô manipulador

Fonte: http://www.dalmec.com/br/Aplicacoes/auto/Manipuladores_vidros_br.html

A Figura. (2.8) apresenta mais outro tipo de aplicação que utiliza o baixo vácuo, onde o produto final é formado a partir de uma câmara de vácuo que tem a forma de uma matriz negativa do objeto a ser conformado. A diferença de pressão e o calor conformam a resina ou plástico em direção as paredes da câmara de vácuo dando o formato final do objeto, conhecido como termoconformação.



Figura 2.8. Produto final obtido em termoconformação a vácuo

Fonte: www.engraver.com.br/produtos.asp?cod_site=0&id_produto=43&keyword=Vacuum_Forming

A faixa de baixo vácuo abrange uma gama de outras aplicações que utilizam a diferença de pressão, como os simples aspiradores de pó e dentário, freios, transportadores, deformadores e sistemas pneumáticos e fixadores.

2.5.2 Médio Vácuo

Após a primeira fase de baixa pressão obtida com o baixo vácuo, os sistemas de médio vácuo bombeiam mais gases para obter pressões ainda mais baixas, podendo chegar à ordem de seis potências de dez abaixo da atmosfera. Neste caso, a diferença de pressão mais significativa fica em torno de três de potências de dez que foram obtidas pelo baixo vácuo, e que no máximo, não deve ultrapassar 1013,25 mbar conforme visto na seção 2.3 através da Fig. (2.3). As outras três potências de dez aproximam o valor da pressão final do sistema para mais próximo do vácuo absoluto, ou seja, 1013,25 mbar, analogamente, para as outras faixas de pressões mais baixas que atingem maiores potências de dez. Com isso,

o sistema de médio vácuo deixa de ter o sentido do uso da força gerada pela diferença de pressão, focando apenas na questão da menor quantidade molecular dentro da câmara de vácuo (HOFFMAN *et al.* 1994).

A baixa densidade molecular dentro da câmara de vácuo é utilizada por muitos processos de secagem a vácuo, congelamento pela indústria alimentícia, farmacêutica, e de destilação pela indústria química. Chambers *et al.* (1998) afirmam que muitos destes processos consideram a pressão de vapor líquido como um fator importante que deve ser considerado no projeto. Portanto, é necessária que a pressão do sistema seja inferior a pressão de vapor e a uma temperatura adequada do que se deseja secar, uma vez que temperaturas elevadas podem interferir na integridade dos elementos. A baixa pressão faz com que as moléculas de água e gás adsorvidas nas superfícies de materiais se soltem e se vaporizem no ambiente da câmara até que sejam evacuadas pela bomba, sem que precise trabalhar com temperaturas elevadas na operação de secagem.

A remoção da grande quantidade de gás evita as reações químicas indesejáveis como a oxidação presente na condução da corrente elétrica em filamentos de lâmpadas. A atmosfera inerte favorece também a não contaminação nos processos de fundição, tratamentos térmicos e embalagens de produtos (HOFFMAN *et al.*, 1994).

A Figura. (2.9) apresenta um sistema de médio vácuo aplicado em uma estufa para secagem em áreas clínicas, hospitalar e alimentícia. A câmara de vácuo é formada pelo próprio corpo do forno.

Os projetos de sistemas de médio vácuo exigem maiores cuidados em comparação aos de baixo vácuo, fazendo com que a complexidade e o custo sejam maiores. Nesta faixa de pressão, os vazamentos são mais evidentes assim como a permeabilidade dos materiais começam a ter parcela significativa perante a quantidade de moléculas existentes dentro do sistema, de forma a serem considerados (MOUTINHO *et al.*, 1980).

A utilização de medidores de pressão na câmara de vácuo e em tubulações mostra o funcionamento e possíveis anomalias decorrentes do processo, sendo de extrema necessidade nesta faixa de vácuo. As tubulações são de materiais que possuem pouca absorção, ou seja, que retenha menos moléculas no interior de suas paredes. Logo, materiais como borrachas especiais e tubos de PVC são geralmente utilizados.



Figura 2.9. Sistema de médio vácuo aplicado em uma estufa

Fonte: <http://www.ganalab.com.br/produtos.asp?produto=193>

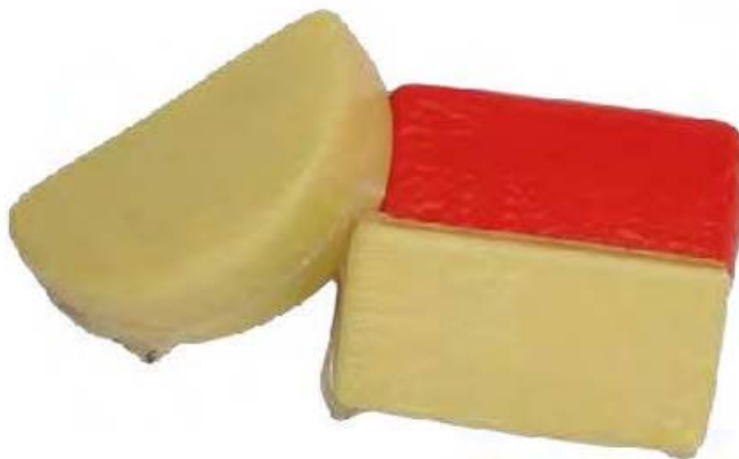


Figura 2.10. Sistema de médio vácuo aplicado em embalagens a vácuo

Fonte: <http://www.selovac.com.br/?item=embalagens>

Moutinho *et al.* (1980) mostram que a condutância nas tubulações ou o inverso da perda de carga varia proporcionalmente com o diâmetro a quarta da tubulação para o regime de escoamento viscoso presente nesta faixa de pressão. Com isso, tubulações de

maiores diâmetros são normalmente utilizadas. Outro ponto importante são os anéis e juntas de vedação, que normalmente são de borracha sintética (O'HANLON, 2003).

Finalizando, a Fig. (2.10) mostra mais outra aplicação do médio vácuo na indústria de embalagens alimentícias. A própria embalagem serve como uma câmara de vácuo acomodando o alimento em um ambiente que impede o contato do produto com o meio externo, como no caso com o oxigênio que favorece o crescimento de microorganismos aeróbicos deteriorantes (FELLOWS, 2006).

2.5.3 Alto Vácuo

O ambiente dentro da câmara de vácuo de um sistema alto de alto vácuo (HV) que pode chegar a nove dezenas de pressão abaixo da atmosfera, possui características bem específicas em comparação ao que foi estudado até agora. Como definido por Hoffman *et al.* (1994) na seção 2.4, esta faixa de pressão predomina o efeito do maior caminho livre médio devido à evacuação das moléculas em suspensão realizadas anteriormente pelas faixas de baixo e médio vácuo. Este efeito faz com que o regime de escoamento do gás deixe de ser viscoso para ser molecular. E segundo Moutinho *et al.* (1980), o fluxo molecular faz com que as moléculas passem pela tubulação sem chocarem umas com as outras, exceto com as paredes do tubo, formando várias monocamadas de moléculas. Este mesmo fato acontece também quando uma superfície é exposta a atmosfera, originando os fenômenos da adsorção e absorção (DEGASPERI, 2002). O'Hanlon (2003) exemplifica que aço e vidro submetidos às condições normais de temperatura e pressão podem acumular até 100 monocamadas. Portanto, o regime de escoamento molecular e os fenômenos que acontecem nas monocamadas norteiam a tecnologia empregada nos dispositivos e componentes inerentes a esta faixa de pressão.

Segundo O'Hanlon (2003) os sistemas de HV apresentam maiores dificuldades de obtenção da pressão final por causa da grande dependência das parcelas de difusão, degaseificação e permeação do materiais. Estas parcelas são consideradas como fontes de gás externas que contaminam o ambiente da câmara de vácuo.

A degaseificação é uma fonte gasosa mais comum nos sistemas de vácuo que compreendem as faixas de médio e HV principalmente (DEGASPERI, 2002). Como a superfície da câmara de vácuo é formada por monocamadas de moléculas que se prende

entre si, parte destas moléculas sofrem dessorção, ou seja, se desprendem, e lentamente vão ficando em suspensão na atmosfera da câmara de vácuo promovendo a degaseificação (DEGASPERI, 2002).

A permeação ocorre quando as moléculas do meio externo atravessam as paredes da câmara de vácuo e chegam ao ambiente interno da câmara de vácuo. Isto ocorre porque as moléculas adsorvidas pelas monocamadas da superfície externa da câmara de vácuo são difundidas para a superfície interna através da agitação térmica (DEGASPERI, 2002). Ao chegar à superfície interna junto com as monocamadas existentes, as moléculas sofrem dessorção. Interstícios, trincas ou qualquer agente físico dessa natureza também favorece a permeação. Logo, os materiais empregados na faixa de HV devem ser especificamente adequados, além de ser utilizadas, técnicas de limpeza de superfícies e condicionamento para atenuar os efeitos de permeação (DEGASPERI, 2002).

Aço inoxidável soldado a partir de processo Tungsten Inert Gas (TIG) e flanges com elastômero selado é quase um padrão na fabricação de câmaras de HV (O'HANLON, 2003). Para os sistemas de baixo custo, é utilizado aço com uma pintura de epóxi laminada a frio além de juntas com dispositivos vedantes de Bruna-N ou silicone para altas temperaturas. Em sistemas de alta qualidade, o Viton é utilizado nas juntas por possuir baixa permeabilidade (O'HANLON, 2003). Outros materiais como vidro ou cerâmica que apresentam baixa permeação podem ser utilizados nas câmaras de vácuo. Segundo O'Hanlon (2003), o tempo de bombeamento até chegar a pressão final de trabalho é determinada pela qualidade dos materiais e condições de limpeza.

Com relação ao bombeamento, as bombas rotatórias utilizadas nos sistemas de baixo e médio vácuo não conseguem abranger um grande espectro de pressões como utilizado na faixa de HV. A partir desta faixa, associam-se duas ou mais bombas de vácuo configuradas em múltiplos estágios, no sentido de manter o sistema economicamente viável (MOUTINHO *et al*, 1980). O funcionamento típico de um sistema de HV é iniciado pelo primeiro estágio que compreende a bomba rotatória, deslocando o gás em suspensão contido no sistema desde a pressão atmosfera até o médio vácuo em regime de escoamento viscoso. Em seguida, o segundo estágio é ativado pela bomba molecular que retém o restante do gás em regime de escoamento molecular. A Figura. (2.11) apresenta um sistema de HV com os componentes e dispositivos caracterizados.

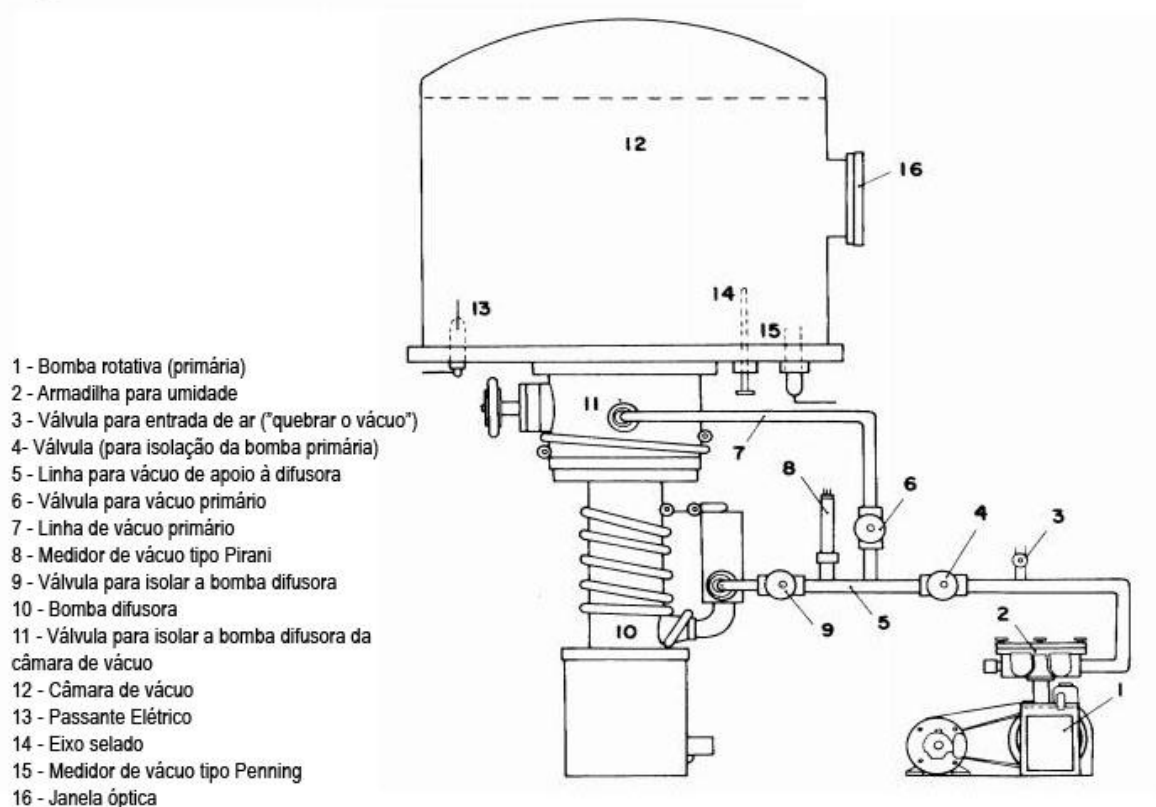


Figura 2.11. Sistema de alto vácuo

Gama apud Roth, 2002, p. 1

Os sistemas de HV compreendem uma grande variedade de dispositivos bem como a sua complexidade no geral atende aos mais sofisticados laboratórios de sistema de produção industrial e equipamentos de grande porte utilizados na pesquisa (LAFFERTY, 1998). O grande espectro de pressões atingido pelo sistema de alto vácuo justifica a magnitude da complexidade e custo agregado ao sistema. Segundo Lafferty (1998), um projeto de alto vácuo envolve as mais variadas ciências, como a engenharia mecânica, elétrica, eletrônica, software e engenharia de vácuo. Conseqüentemente, as aplicações também são mais complexas e exigentes no sentido de que o sistema tenha uma qualidade de geração de vácuo, influenciando em uma seleção adequada de bombas, tubulações, válvulas e outros componentes que interferem na pressão final ou no fluxo de funcionamento do sistema (LAFFERTY, 1998).

A Figura. (2.12) apresenta uma típica aplicação de um sistema de alto vácuo em um tubo de raios catódicos, utilizado em monitores e televisores.

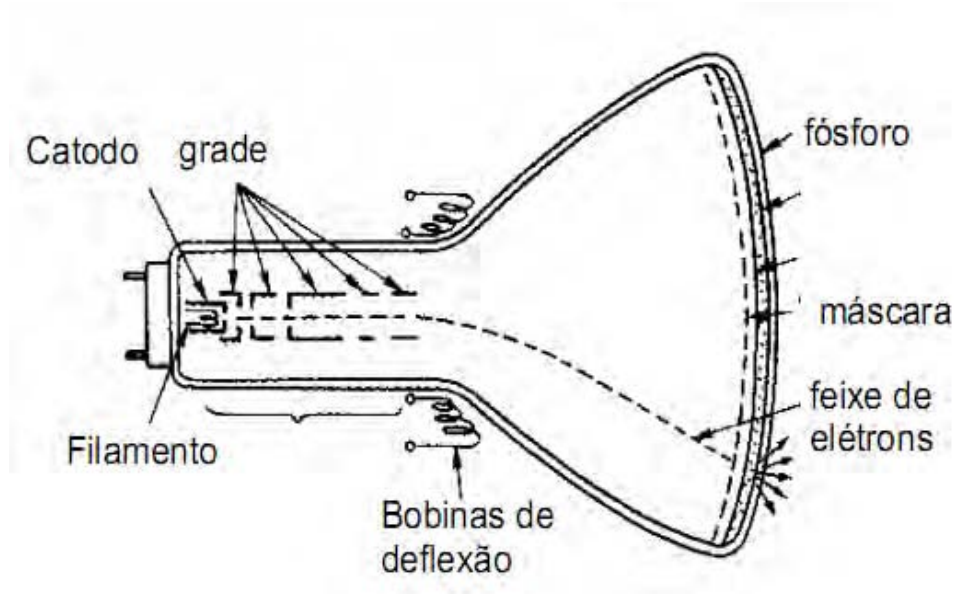


Figura 2.12. Sistema de alto vácuo aplicado em um tubo de raios catódicos

Fonte: Iannini, 2005, p. 4

Formado por um canhão eletrônico que produz elétrons e aquecido por um filamento que os excita, estes são acelerados em forma de feixe de elétrons através de uma diferença de potencial criada entre cátodo e ânodo (IANNINI, 2005). O feixe é acelerado para se chocar com um determinado ponto da tela de fósforo produzindo um fóton da respectiva cor. Com isso, o feixe deve percorrer o tubo sem se chocar com nenhuma molécula em suspensão para que não haja um desvio não previsto assim como a excitação de um ponto indesejado da tela de fósforo. O único desvio sofrido pelo feixe de elétrons é mediante a variação eletromagnética das bobinas defletoras para que a imagem seja formada. Logo, o tubo de raios catódicos é uma câmara alto vácuo encapsulada com vidro de baixa permeabilidade que proporciona uma atmosfera com baixa quantidade de gases em suspensão. Analogamente, as outras aplicações se beneficiam da atmosfera inerte para o transporte de elétrons como raio X, aceleradores de partículas, espectrômetros de massa e dentre outras que já foram citadas na seção 2.4

2.5.4 Ultra-Alto Vácuo

A faixa de ultra-alto vácuo (UHV) ou estado da arte em tecnologia do vácuo é conhecida como a tecnologia essencial para a ciência experimental, e foi a partir dela em

1950 que a ciência moderna teve início aos estudos de controle de partículas em superfície, que atualmente é um dos setores mais ativos da pesquisa em física e química (LAFFERTY, 1998).

As baixíssimas pressões que compreendem o espectro de até vinte dezenas de pressões ou mais, abaixo da atmosfera, atende as mais variadas aplicações da alta tecnologia, amplamente utilizado na indústria e laboratórios (LAFFERTY, 1998).

Como citado na seção 2.3, Hoffman *et al.* (1994) caracterizaram essa faixa como a situação física de longos tempos para formação de uma monocamada, onde o objeto de estudo está focado na contaminação molecular da superfície de materiais.

A utilização de materiais adequados, técnicas de fabricação e procedimentos operacionais do UHV permitem que o sistema atinja baixíssimas pressões, de forma a controlar o tempo de formação da monocamada sobre uma superfície de um material. Lafferty (1998) apresenta dados de que o tempo de formação de uma monocamada a uma pressão de vácuo de 10^{-4} Pa é de 1.9 segundos. Já para pressões da ordem de 10^{-13} e 10^{-17} Pa, os tempos são de 60 anos e 600 milênios respectivamente, todavia, existe a dificuldade de atingir esses níveis de pressões.

Segundo O'Hanlon (2003), os sistemas de UHV devem ser muito limpos e polidos para que sejam obtidas as pressões desejadas, já que partículas da ordem de 10 nm geradas por um processo de limpeza inadequado influencia no rendimento do processo assim como na aplicação específica, uma vez que a quantidade de moléculas nesta faixa de pressão é muito pequena. Chambers *et al.* (1998) afirmam que uma limpeza através de agentes químicos agressivos pode afetar a precisão dimensional da superfície pelo aumento da área de contato da superfície. No projeto de sistemas de UHV, é necessário que os dispositivos e elementos sejam desmontáveis para que sejam realizadas operações frequentes de limpeza, e dependendo da dimensão do sistema, este procedimento deve ser aplicado a partes menores que o compõe (CHAMBERS *et al.*, 1998).

O funcionamento dos sistemas de UHV é semelhante aos de UV em relação à utilização de múltiplos estágios, só que neste caso, utilizam-se outros dois tipos de bombas específicas, conhecidas como criogênica e iônica (LAFFERTY, 1998). As bombas são dispostas sequencialmente em locais específicos do sistema, uma vez que a distribuição de pressão neste caso não é uniforme (O'HANLON, 2003; LAFFERTY, 1998). Outro procedimento importante que faz parte da sequência de estágios é o aquecimento das paredes da câmara e tubulações no sentido de desprender as moléculas residuais presentes

na superfície, conhecido como técnica de dessorção (GAMA, 2002). Restrições técnicas dos materiais em relação à temperatura máxima de aquecimento das paredes da câmara, tubulações, juntas de vedação e o tempo de dessorção das moléculas limitam o tempo final de produção do vácuo, sendo necessário um maior controle sobre os estágios do processo (O'HANLON, 2003; LAFFERTY, 1998). Como exemplo do tempo de obtenção do UHV, Neuenschwander *et al.* (2003) mostram através de um experimento que foi necessário aquecer por 72 h a uma temperatura em torno de 150°C uma câmara de vácuo com dimensões de 930 x 320 x 270 mm.

O projetista de UHV tem que conhecer a fundo os fenômenos físicos dos gases a baixíssimas pressões bem como a sua relação com os materiais dos dispositivos e componentes utilizados no sistema. Tempo e custo são as características mais importantes de viabilidade deste sistema, sendo este, o mais complexo da tecnologia do vácuo.

Com relação às câmaras de vácuo, são utilizados freqüentemente materiais em aço inoxidável AISI 304L e 316L, ou também aço 312 e 347 que possuem aditivos que reduzem a precipitação de carbono, que entanto, possuem custo mais elevado. Além de outros elementos que são soldados em processo TIG e as juntas de vedação são metálicas, utilizando cobre de alta pureza (O'HANLON, 2003).

Os dispositivos de medição compatíveis com esta faixa de pressão possuem funcionamento complexo, e mesmo assim, apresentam limitações, podendo oferecer incorretas leituras decorrentes de sua própria contaminação ao meio (O'HANLON, 2003; LAFFERTY, 1998). Outra questão relevante aos medidores é de saber posicioná-los estrategicamente, além de uma série de recomendações e técnicas que devem ser seguidas até a produção do UHV (O'HANLON, 2003).

O UHV atende as aplicações que se beneficiam de superfícies livres de contaminação, portanto, gases puros, plasmas, carregamento de partículas, fabricação de filmes finos, cabeças de leitura e gravação, indústria de semicondutores, dispositivos opto - eletrônicos, simulações da atmosfera espacial e aceleradores de partículas são as aplicações mais clássicas (LAFFERTY, 1998 ; O'HANLON, 2003).

A Figura. (2.13) apresenta um sistema de ultra-alto vácuo que acomoda um espelho para linhas de luz.



Figura 2.13. Sistema de ultra-alto vácuo
Neuenschwander *et al*, 2003, p. 1

Segundo Neuenschwander *et al.* (2003) o sistema de UHV foi desenvolvido no sentido de evitar a contaminação do espelho, e a geometria da câmara de vácuo foi em função do melhor acesso ao seu interior. As superfícies da câmara de vácuo foram eletropolidas, e os flanges retificados e polidos manualmente para obter uma rugosidade dentro do padrão requerido para a vedação utilizando fio de alumínio que suporta um aquecimento das paredes de até 150°C (NEUENSCHWANDER *et al*, 2003).

A Figura. (2.14) apresenta mais um sistema de ultra-alto vácuo aplicado em um difratômetro de raios - X.

Finalizando, o UHV é uma tecnologia que está no seu limiar de desenvolvimento assim como o da tecnologia como um todo, que é cada vez mais impulsionada pelas exigências das aplicações mais modernas.

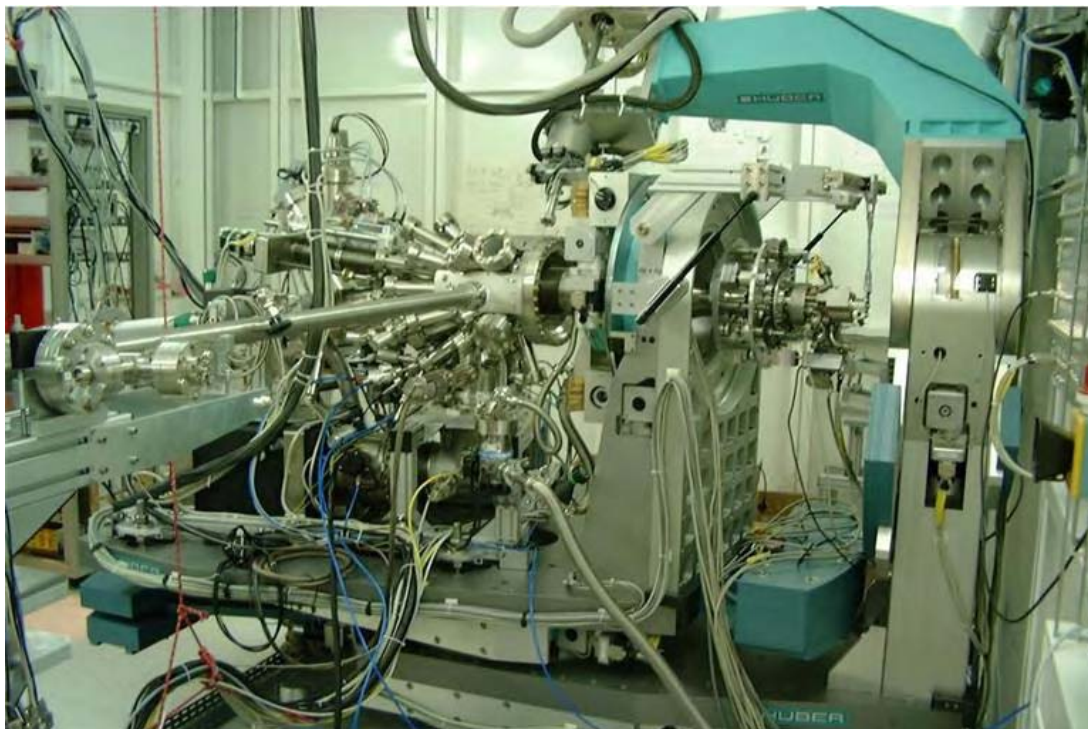


Figura 2.14. Sistema de ultra-alto vácuo aplicado em um difratômetro de raio-X

Fonte: http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/CRG/BM25/BeamLine/experimentalstations/Surface_X-Ray_Diffraction_and_X-Ray_Photoelectron_Spectroscopy

O próximo capítulo explica com mais detalhes os tipos de bombas e os seus princípios de funcionamento, assim como os medidores de pressão aplicados em cada faixa de vácuo.

CAPÍTULO III

DISPOSITIVOS DE GERAÇÃO E MEDIÇÃO DE VÁCUO

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as bombas e os medidores comumente utilizados na tecnologia do vácuo de acordo com as faixas de pressões de trabalho. Detalhes construtivos e funcionais são abordados pelas seções 3.2 e 3.3 que elencam respectivamente as bombas e os medidores de pressões.

3.2 BOMBAS DE VÁCUO

As variedades de bombas de vácuo estão divididas em dois princípios de operação, conhecidas basicamente por bombas de deslocamento de gás e de fixação (ADAM *et al*, 1998).

As bombas de deslocamento trabalham com o princípio de deslocar o gás existente no sistema a partir de pressões atmosféricas até as faixas de baixo e médio vácuo, expulsando o gás para a atmosfera através de transferência de momento linear entre o meio motor e o gás (MOUTINHO *et al*, 1980).

As bombas de fixação trabalham retirando o gás através de processos físico-químicos ou em condições físicas como a baixa temperatura, pelo confinamento de moléculas em suas paredes sem expulsá-las para a atmosfera. Estas bombas trabalham a partir de pressões subatmosféricas utilizando as bombas de deslocamento como estágio primário (MOUTINHO *et al*, 1980).

A Figura. (3.1) apresenta as classificações das bombas de vácuo segundo os dois princípios de operação básicos.

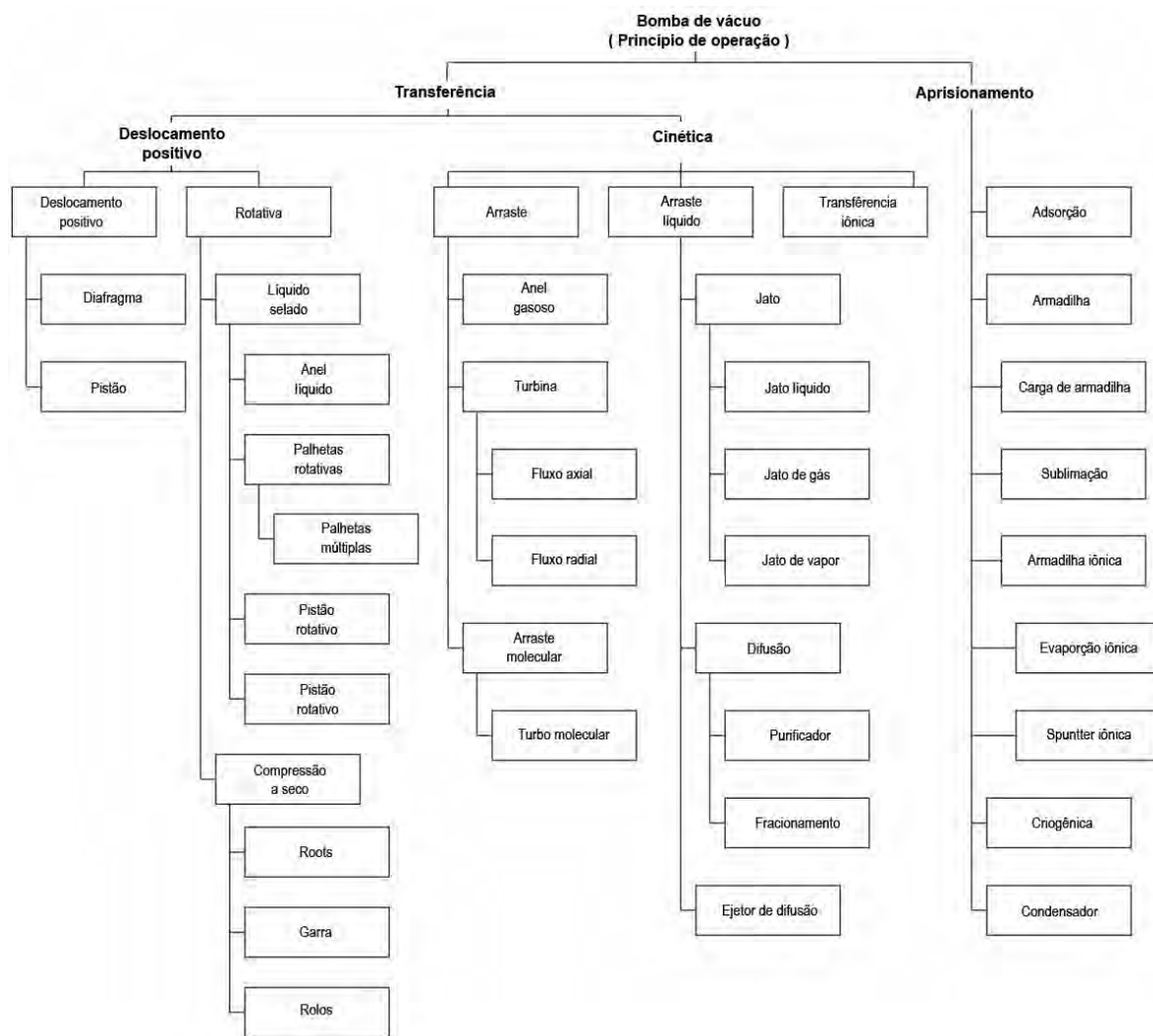


Figura 3.1. Classificação das bombas de vácuo

Adam *et al*, 1998, p.19

A variedade de bombas se dá pela questão do custo e aplicação, uma vez que não existe uma única bomba que atenda a todo espectro de pressões utilizado pela tecnologia do vácuo (MOUTINHO *et al*, 1980).

Para GAMA (2002) e Adam *et al*. (1998), as bombas de deslocamento podem ser subdivididas em três tipos:

- a) Bombas que funcionam através do aumento e diminuição do volume a partir de compressão e expansão: Bombas de palhetas e pistão rotatório.
- b) Bombas que transferem o gás da região de baixa para a alta pressão com o volume interno fixo: Bombas roots e turbomoleculares.

- c) Bombas em que o bombeamento se dá por arraste, viscosidade ou por difusão: Bombas ejetoras de vapor e difusoras.

As bombas de fixação podem ser subdivididas em dois tipos:

- Bombas de aprisionamento do gás através de processos físico-químicos: Bombas Iônicas e de aprisionamento químico.
- Bombas de aprisionamento do gás através de condições físicas de baixa temperatura: Bombas de adsorção e criogênicas.

A Figura. (3.2) apresenta alguns tipos de bombas utilizadas dentro do espectro de pressões da tecnologia do vácuo, lembrando que 1 Torr vale 1,33 mbar.

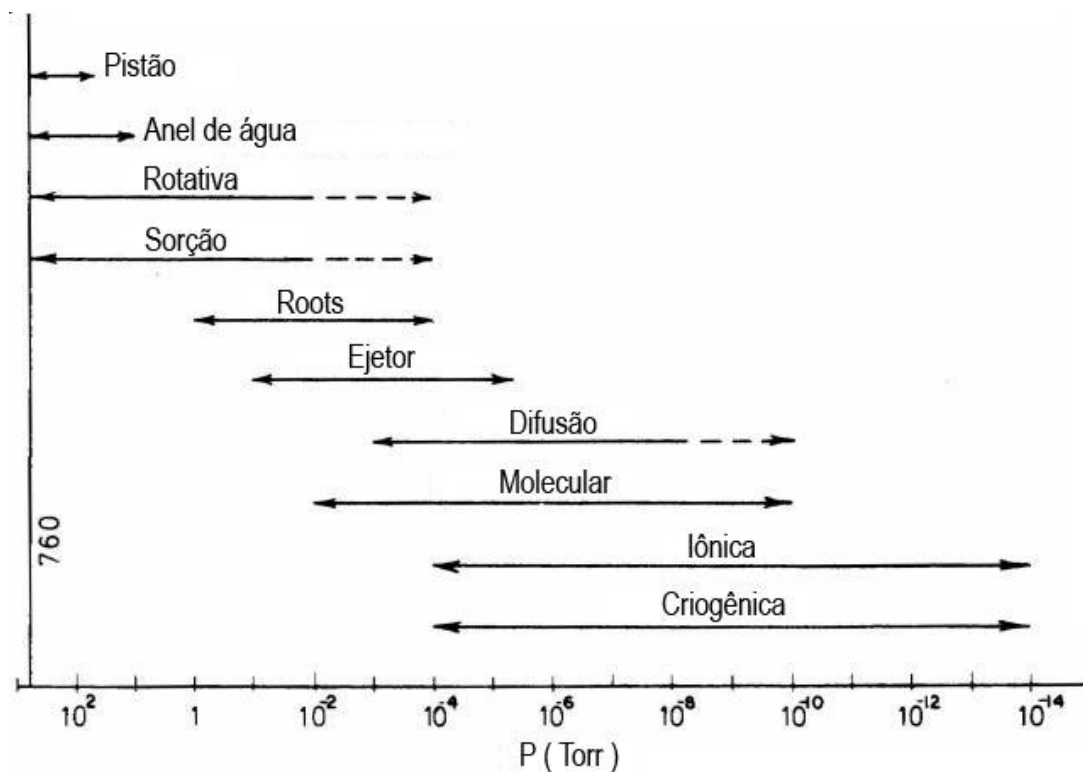


Figura 3.2. Intervalo de pressões de alguns tipos de bombas de vácuo

Gama *apud* Roth, 2002, p. 3

As próximas subseções apresentam os detalhes construtivos e funcionais das bombas de vácuo mais clássicas.

3.2.1 Bombas Mecânicas Rotatórias com Vedação a Óleo

As bombas rotatórias têm o mesmo princípio de funcionamento dos compressores, em que extraem o ar de seu coletor de admissão e o expulsam na atmosfera (MOUTINHO *et al*, 1980).

As pressões de trabalho estão compreendidas de 1013,25 até 5×10^{-2} mbar para as de simples estágio, e de 1013,25 até 5×10^{-4} mbar para as de duplo estágio, com vazões da ordem 10 a 90000 litros por minuto, compreendendo as pressões de baixo e médio vácuo (LAFFERTY, 1998; MOUTINHO *et al*, 1980). As bombas de duplo estágio trabalham dentro de um mesmo encapsulamento formado por dois rotores em série, sendo o primeiro trabalhando a partir da pressão atmosférica e o segundo com pressões mais baixas.

A Figura. (3.3) apresenta dois modelos de bombas rotativas a óleo com palhetas e pistão rotatório.

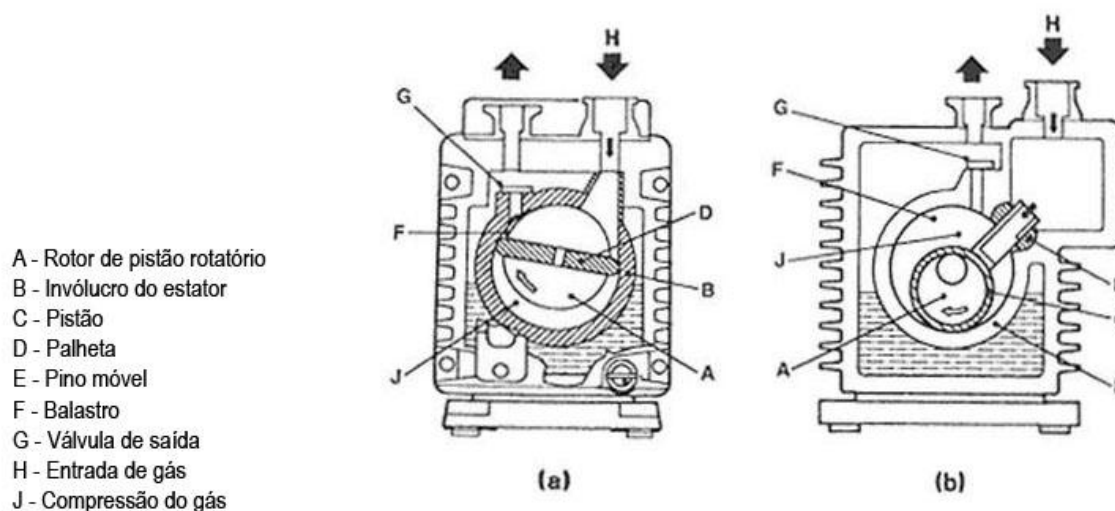


Figura 3.3. (a) Bomba de palheta dupla, (b) bomba de pistão rotatório

Lafferty, 1998, p.144

A partir da Fig (3.3) verifica-se que a bomba de vácuo deve ter uma taxa de compressão suficiente para produzir uma pressão de saída necessária para abrir a válvula de saída, que diminui à medida que a pressão de entrada da bomba cai. Portanto, é utilizado o óleo para preencher o espaço morto da compressão de modo a garantir a taxa de compressão, além de servir como fluido vedante e lubrificante (GAMA, 2002).

Em condições de bombeamento de gases condensáveis como os utilizados em secagem de alimentos, a compressão da bomba condensa parte da mistura do gás, de modo que uma fração é arrastada pelo óleo, contaminando-o, e a outra fração é evaporada no ciclo seguinte diminuindo a eficiência da bomba (MOUTINHO *et al*, 1980; GAMA, 2002). Como forma de evitar estes problemas, é utilizado um balastro de gás posicionando na saída do ciclo de compressão da bomba. Este dispositivo introduz gás na fase de compressão para aumentar a quantidade de gás não condensável na mistura, fazendo com que a pressão de vapor saturado não seja excedida (LAFFERTY, 1998). O balastro também favorece ao aumento de temperatura de funcionamento da bomba devido à quantidade extra de gás na compressão que deve funcionar pelo menos durante 20 minutos para aquecer toda a bomba, sendo esta característica benéfica para a não condensação dos gases (MOUTINHO *et al*, 1980).

A Figura. (3.4) apresenta o esquema de funcionamento de uma bomba que utiliza o lastro de gás.

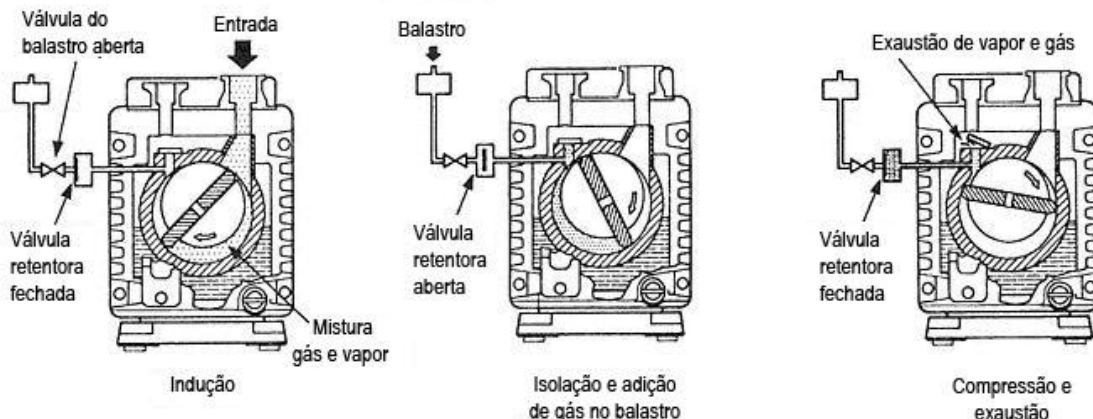


Figura 3.4. Funcionamento de uma bomba rotativa com lastro de gás

Lafferty, 1998, p.145

De acordo com a Fig. (3.4), pode-se observar que no processo de compressão, o ar é admitido pelo lastro misturando-se com o gás comprimido, e posteriormente expulso na atmosfera. O único inconveniente do balastro é a perda de pressão final do sistema devido à introdução inevitável de fugas de gás, no entanto, em sistemas que utilizam bombeamento contínuo, outras técnicas são utilizadas, como a introdução de dispositivos

filtrantes no óleo ou um aquecimento secundário do sistema de vácuo (MOUTINHO *et al*, 1980).

3.2.2 Bombas Mecânicas de Anel D'água

As bombas de anel d'água possuem como características um rotor de múltiplas palhetas posicionado excêntricamente dentro um estator, onde a água funciona como fluido de vedação e refrigeração similar as bombas com vedação a óleo (LAFFERTY, 1988). Estas bombas são normalmente utilizadas para se fazer um pré-vácuo de bombas de ejetores de vapor e bombas roots, tendo como maior finalidade, a evaporação de grandes quantidades de água, como no caso da desidratação de alimentos (MOUTINHO *et al*, 1980). A Figura. (3.5) apresenta um exemplo de uma bomba de anel d'água de simples estágio.

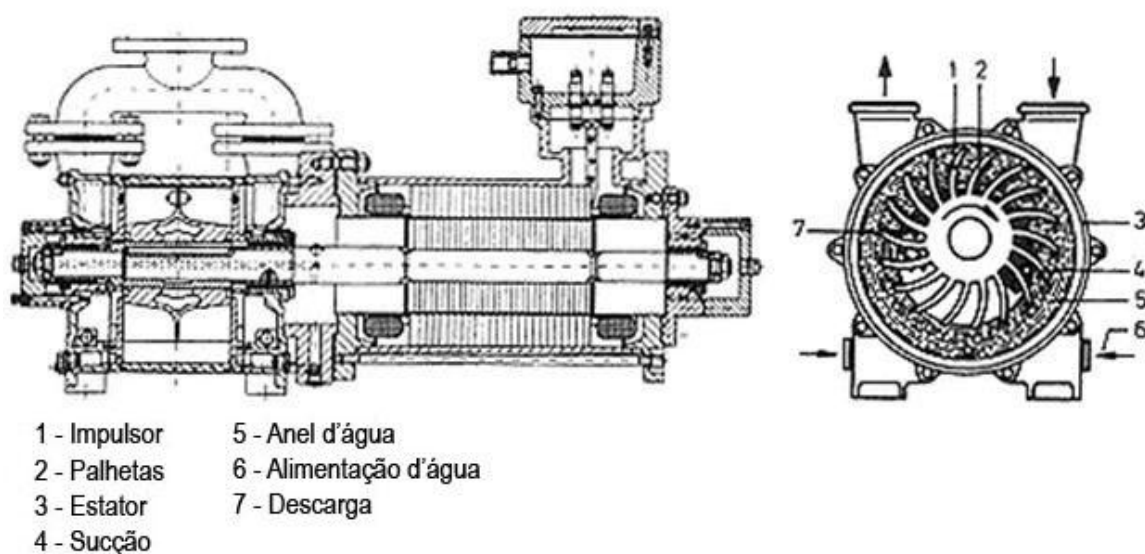


Figura 3.5. Bomba de anel d'água de simples estágio.

Lafferty, 1998, p.152

Moutinho *et al*. (1980) afirmam que a pressão final dessas bombas depende da tensão de vapor da água em relação à temperatura de funcionamento da bomba, portanto, a temperatura da água deve ser controlada para não evaporar-se juntamente com o gás quando submetida a baixa pressão - Como exemplo, para uma pressão final de 23,3 mbar,

a água da bomba deve ser mantida abaixo de uma temperatura de 20°C, e para uma pressão de 73,7 mbar, a temperatura deve estar abaixo de 40°C.

Estas bombas funcionam em faixas de pressões a partir da atmosfera até 40 e 20 mbar para um e dois estágios de bombeamento respectivamente, e com vazões que podem chegar até 4500 litros por segundo (MOUTINHO *et al*, 1980).

3.2.3 Bombas Mecânicas Roots

As bombas roots são utilizadas em série com uma bomba rotativa de vedação como estágio primário no sentido de obter maiores velocidades e menores pressões finais na região de médio vácuo (O'HANLON, 2003). Composto por um estator que abriga dois rotores em forma de oito girando paralelamente em sentidos contrários e sincronizados de forma a não se tocarem, atingem elevadas rotações da ordem de 3000 a 3500 rotações por minuto por não utilizarem fluidos de vedação como óleo ou água (O'HANLON, 2003). A Figura. (3.6) apresenta a arquitetura de uma bomba roots de um único estágio.

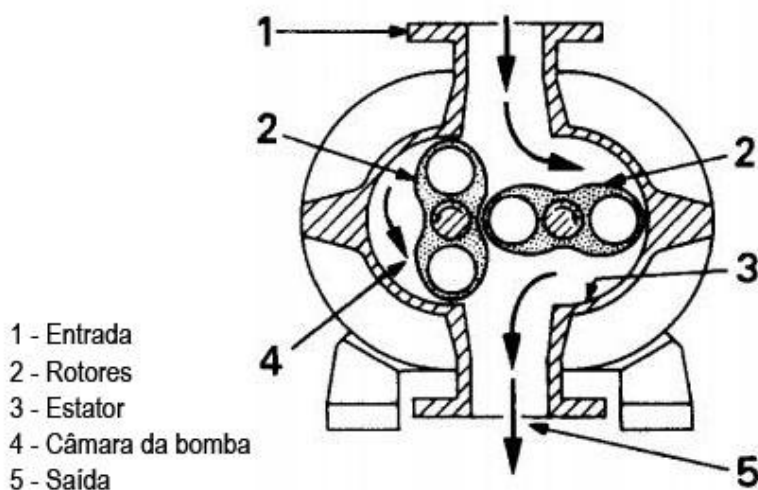


Figura 3.6. Bomba roots de um estágio

O'Hanlon, 2003, p. 189

A velocidade de bombeamento e a pressão final da bomba roots dependem das folgas entre os seus rotores e dos rotores entre o estator, que são normalmente de 0,2 mm, além da pressão final do estágio primário realizado pelas bombas rotatórias (MOUTINHO

et al, 1980; O'HANLON, 2003). Estas folgas tornam a bomba insensível à presença de partículas sólidas em suspensão como pó, além de não apresentar desgastes significativos, por outro lado, o fenômeno da retro-migração limita o funcionamento da bomba em uma faixa de pressão que obriga a utilização de um estágio primário como citado anteriormente (GAMA, 2002). Estas bombas funcionam dentro de uma faixa de vácuo em torno de 1 a 10^{-3} mbar com vazões da ordem de 50 a 25000 litros por segundo (MOUTINHO *et al*, 1980; GAMA, 2002).

3.2.4 Bombas Mecânicas Moleculares

Trabalha com o princípio de funcionamento do arraste molecular, onde os gases são bombeados através da transferência de momento linear da superfície do rotor para as moléculas de gás (LAFFERTY, 1998; MOUTINHO *et al*, 1980). Quando o regime de escoamento do gás é molecular, ou seja, o caminho livre médio das moléculas é maior que a folga entre rotor e estator, as moléculas colidem diretamente com o rotor em movimento, nas quais são arrastadas (LAFFERTY, 1980). Portanto, uma bomba molecular não é capaz de bombear a partir da atmosfera, uma vez que o regime de escoamento não é molecular. Neste caso, grande parte das moléculas existentes no meio iriam se chocar diretamente com as paredes do estator, diminuindo a eficiência, sabendo que a ação desta bomba depende diretamente da frequência de colisões de moléculas com o rotor (LAFFERTY, 1980). Conseqüentemente, esta bomba deve ser apoiada através de um estágio primário que garanta o fluxo molecular de bombeamento.

A Figura. (3.7) apresenta um esquema de uma bomba de arraste molecular que possui um estágio de bombeamento conhecido como bomba molecular. O rotor arrasta as moléculas do volume P1 para o P2, e a pequena folga superior entre o rotor e estator impedem que moléculas do volume P2 migrem para P1 (MOUTINHO *et al*, 1980).

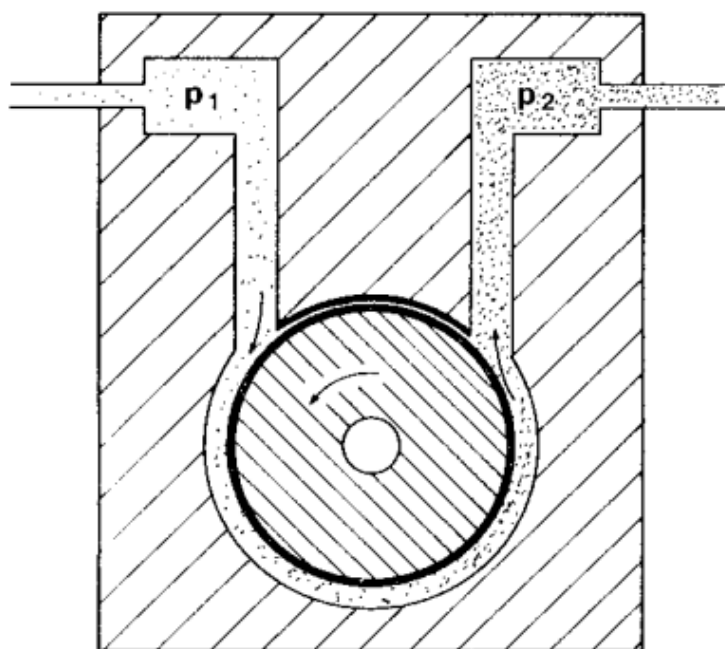


Figura 3.7. Bomba molecular
Moutinho *et al*, 1980, p. 67

Utilizando o mesmo princípio de funcionamento das bombas moleculares, as turbomoleculares têm o propósito de obter maiores velocidades de bombeamento através de vários estágios de compressão (MOUTINHO *et al*, 1980; LAFFERTY, 1988).

A bomba turbomolecular é normalmente utilizada na tecnologia de alto vácuo por apresentar as características de vácuo limpo, constante, de fácil operação e com alto grau de confiabilidade operacional, sendo a única bomba mecânica capaz de atingir pressões da ordem de 10^{-8} Pa quando associada de um estágio primário (LAFFERTY, 1998). As velocidades de bombeamento podem chegar a 4000 litros por segundo (MOUTINHO *et al*, 1980).

A Figura. (3.8) apresenta uma bomba turbomolecular em que sua característica construtiva é evidenciada por vários discos rotores totalizando múltiplos estágios de compressão encapsulados por vários estatores. Estas bombas podem ser encontradas na forma horizontal ou vertical.

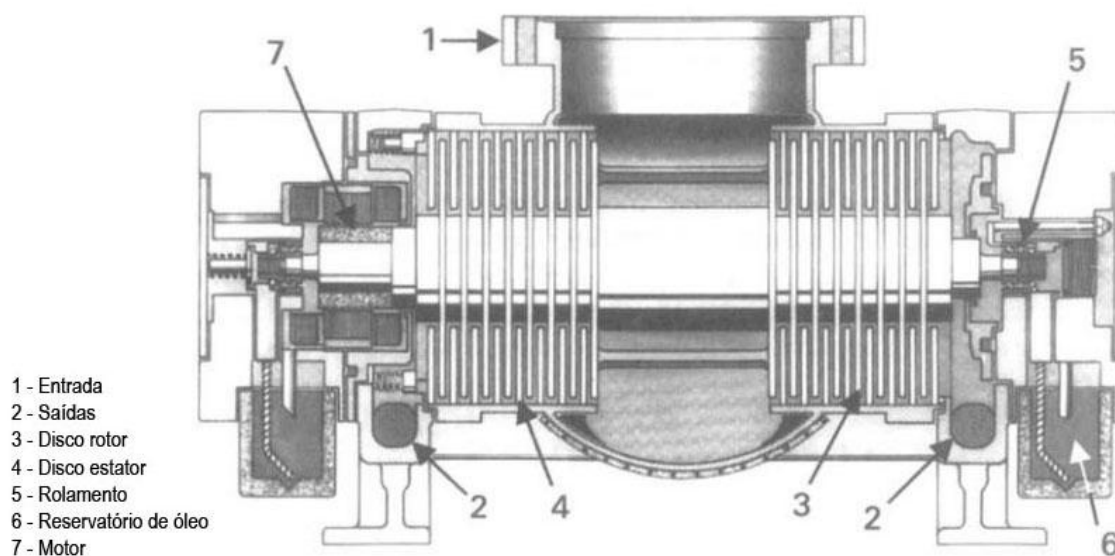


Figura 3.8. Bomba turbomolecular

O'Hanlon, 2003, p. 202

3.2.5 Bombas de Difusão

Uma bomba de difusão é formada por um encapsulamento cilíndrico que abriga uma espécie de chaminé que conduz vapor a vários ejetores seqüenciados em estágios, transferindo gás sem a necessidade de partes móveis como usado nas bombas mecânicas (HOFFMAN *et al*, 1994; MOUTINHO *et al*, 1980; ADAM *et al*, 1998). A Figura. (3.9) apresenta o esquema de uma bomba de difusão.

A base da bomba possui um reservatório ou caldeira contendo um fluido motriz que pode ser de óleo de hidrocarboneto ou ainda de mercúrio, que são vaporizados por uma resistência elétrica (O'HANLON, 2003). A evaporação do fluido através de uma resistência elétrica cria uma diferença de pressão com relação à saída da bomba de forma que os ejetores expulsam o vapor a uma velocidade supersônica para baixo contra as paredes do corpo da bomba (HOFFMAN *et al*, 1994; MOUTINHO *et al*, 1980). As moléculas existentes no interior da bomba e provenientes da câmara de vácuo sofrem colisões do jato supersônico e são transferidas para um flange de saída que conecta uma bomba rotativa para expulsar estas moléculas (HOFFMAN *et al*, 1994). O corpo da bomba de difusão é circundado por uma serpentina que circula um fluido refrigerante com a finalidade de condensar o fluido motriz que se choca contra as paredes, fazendo com que o

mesmo escorra para a caldeira como uma fina película (O'HANLON, 2003, ADAM *et al*, 1998).

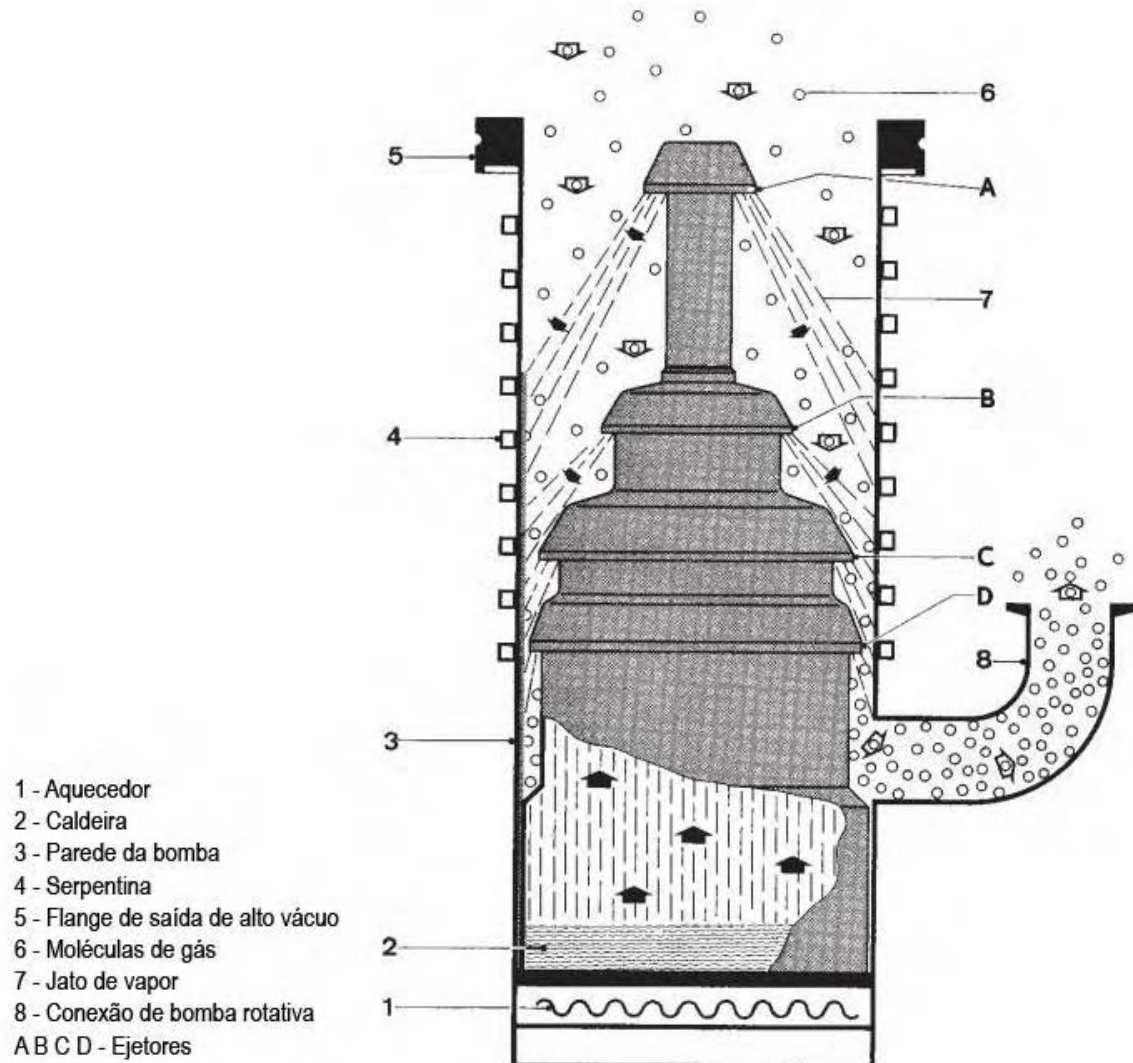


Figura 3.9. Bomba de difusão

Hermann *et al*, 1998, p. 41

Estas bombas são utilizadas em sistema de alto vácuo que necessitam de altas velocidades constantes para a evacuação de diferentes gases, podendo chegar a uma vazão de 100.000 litros por segundo e pressões de 10^{-11} mbar (HOFFMAN *et al*, 1994; MOUTINHO *et al*, 1980).

3.2.6 Bombas Iônicas

As bombas iônicas são utilizadas em sistemas de ultra-alto vácuo e funcionam através do princípio de aprisionamento de moléculas em suas paredes, utilizando o campo eletromagnético e a adsorção como processos de bombeamento (MOUTINHO *et al*, 1980; O'HANLON, 2003).

São compostas basicamente por tubos formando um ânodo e duas placas cobertas de materiais adsorventes de titânio formando dois cátodos. Entre ânodo e cátodo existe um campo elétrico produzido pela diferença de potencial de 5 kV, além de um campo magnético de 0,1 a 0,2 Tels através de imãs permanentes conforme apresentado na Fig. (3.10) (MOUTINHO *et al*, 1980).

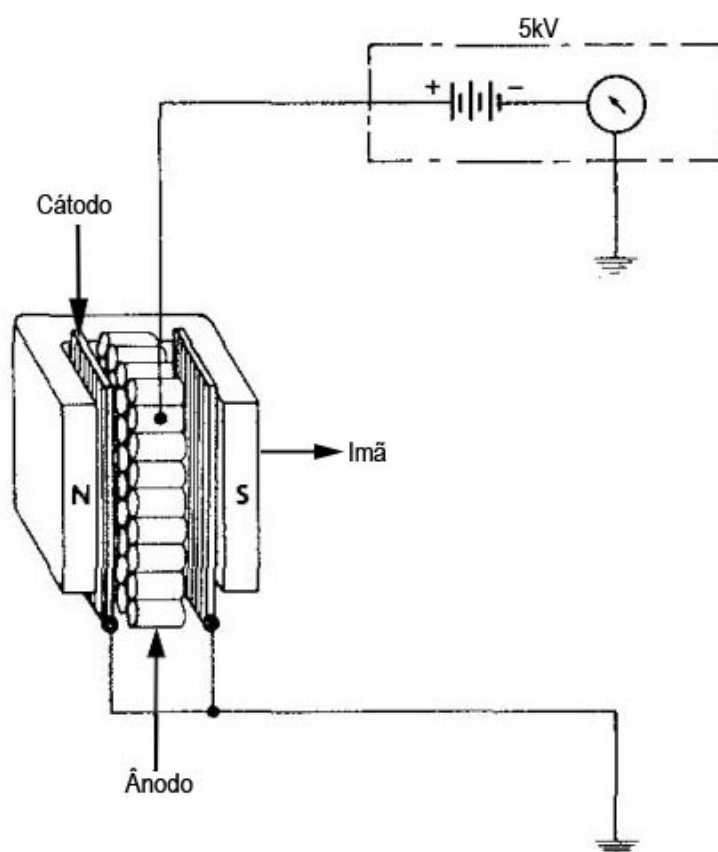


Figura 3.10. Bomba iônica

Moutinho *et al*, 1980, p. 87

O bombeamento se dá primeiramente pela formação dos íons através da presença do campo elétrico entre ânodo e cátodo, com isso, os íons produzidos são acelerados para que sofram choques contra as paredes do cátodo produzindo emissão de elétrons secundários (MOUTINHO *et al*, 1980; O'HANLON, 2003; HOFFMAN *et al*, 1994). Em seguida, estes elétrons produzidos são atraídos para o ânodo, que descrevem uma trajetória helicoidal em função da ação conjunta dos campos elétrico e magnético para não se chocarem com o ânodo, e sim, com moléculas existentes no corpo da bomba produzindo ionização. E por consequência de cada choque, existirá um novo elétron e íon gerado, criando um processo em cascata para se chocarem com outras moléculas (HOFFMAN *et al*, 1994).

Os íons produzidos são atraídos para o cátodo, e devido à alta quantidade de choques, causam a pulverização da superfície do cátodo que se depositam sobre regiões vizinhas do próprio cátodo ou do ânodo (O'HANLON, 2003). A pulverização depositada nas regiões vizinhas apresenta superfície limpa e quimicamente ativa que contribui para a adsorção das moléculas no interior da bomba (MOUTINHO *et al*, 1980). A Figura. (3.11) apresenta o mecanismo de bombeamento iônico.

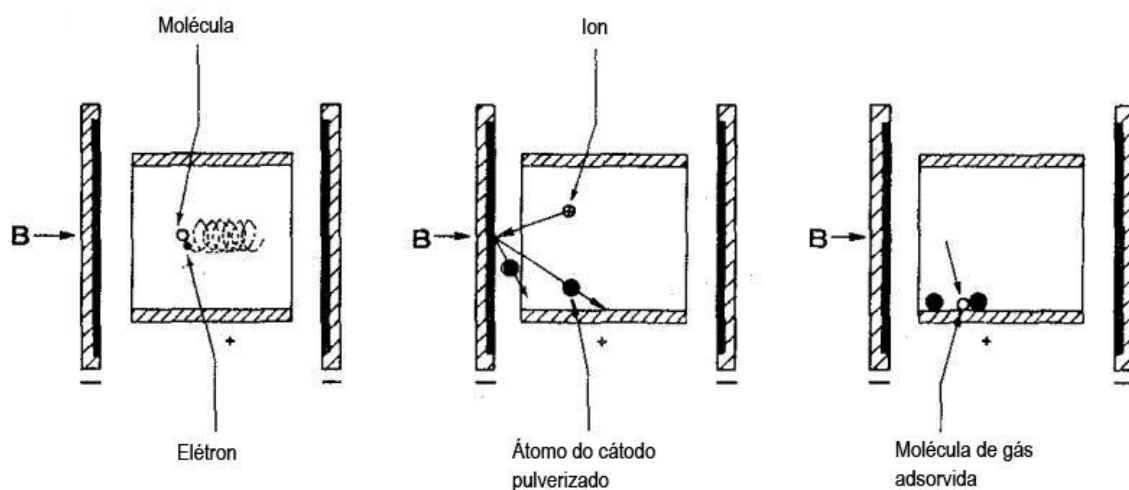


Figura 3.11. Funcionamento de uma bomba iônica

Moutinho *et al*, 1980, p. 87

A Figura. (3.12) mostra mais detalhes da superfície dos cátodos e ânodo após um período de bombeamento, evidenciando o detalhe da superposição de camadas de pulverização do titânio juntamente com as moléculas de gases adsorvidos.

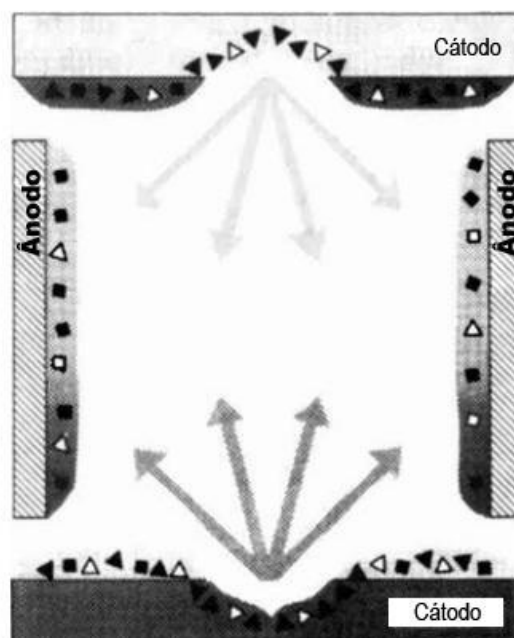


Figura 3.12. Detalhe da superposição de camadas de titânio e moléculas de gás.

O'Hanlon, 2003, p. 257

A partir da Fig. (3.12) pode-se notar que as superfícies do cátodo e ânodo podem ficar saturadas, fazendo com que haja reemissão de gases bombeados anteriormente, portanto, quando se atinge baixas pressões da ordem de ultra-alto vácuo, esta reemissão causa uma instabilidade na pressão final, ocasionando em flutuações, conhecida como instabilidade do argon (MOUTINHO *et al*, 1980; HOFFMAN *et al*, 1994). Diante disso, outras configurações de bombas iônicas foram desenvolvidas no sentido de aumentar a velocidade de bombeamento através de uma maior pulverização catódica. A Figura. (3.13) apresenta exemplos de configurações.

As velocidades de bombeamento variam de 1 a 7000 litros por segundo, no qual depende das dimensões da bomba e do tipo de gás a bombear, e trabalham na faixa de pressão de 10^{-2} mbar a 10^{-11} mbar, exigindo um estágio primário de bombeamento (HOFFMAN *et al*, 1994; MOUTINHO *et al*, 1980).

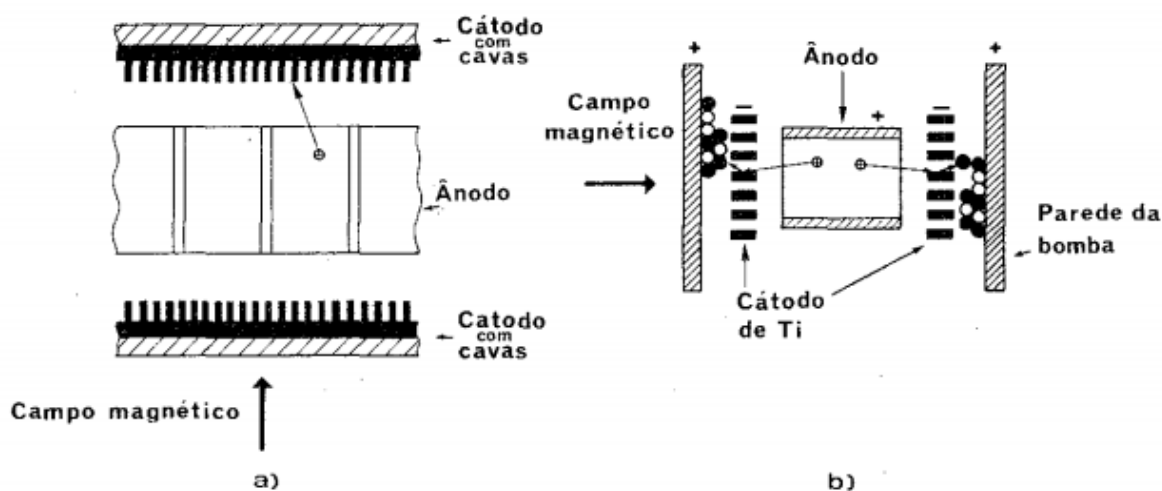


Figura 3.13. (a) Bomba de cátodo com cavas, (b) bomba triodo

Moutinho *et al*, 1980, p. 89

3.2.7 Bombas Criogênicas

As bombas criogênicas são utilizadas em sistemas de ultra-alto vácuo e funcionam através do princípio de aprisionamento de moléculas utilizando a combinação de condensação e adsorção de gases e vapores em superfícies submetidas a temperaturas muito baixas. Basicamente, esta bomba trabalha com uma superfície arrefecida através de um sistema de refrigeração específico que bombeia gases criogênicos para produzir baixas temperaturas que juntamente com a baixa pressão, atingem a tensão de vapor necessária do gás a bombear no interior da bomba de modo a condensá-lo na superfície arrefecida (HOFFMAN *et al*, 1994; O'HANLON, 2003). Quando uma molécula de gás encontra uma superfície a baixa temperatura, ela perde energia cinética incidente para permanecer absorvida na superfície por forças de dispersão chamada de forças de Van der Waals, que garantem a fixação da molécula na superfície, e conseqüentemente, o bombeamento (LAFFERTY, 1998). A quantidade de moléculas presas a superfície dependem de uma série de fatores que envolvem a temperatura de arrefecimento, afinidade química do gás a bombear e da superfície, rugosidade superficial e fluxo incidente das moléculas (LAFFERTY, 1998).

A Figura. (3.14) apresenta um esquema de uma bomba criogênica.

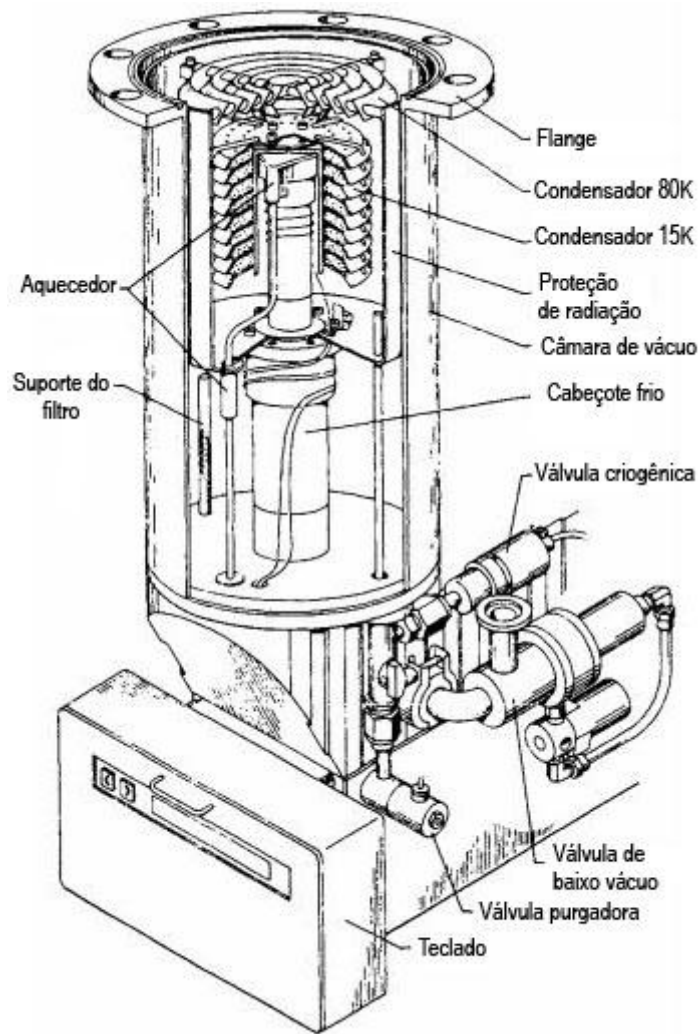


Figura 3.14. Bomba criogênica

Hoffman *et al*, 1994, p. 151

3.3 MEDIDORES DE VÁCUO

A medição de pressão em um sistema de vácuo tem a mesma importância quanto à produção de vácuo, conseqüentemente, o avanço da tecnologia do vácuo não se resume apenas nos dispositivos até aqui citados, mas também, nos medidores de vácuo (CHAMBERS *et al*, 1998). Pelo fato do grande espectro de pressões que a tecnologia do vácuo abrange, existem vários tipos de medidores de vácuo, em que estão divididos adequadamente para cada faixa de pressão em função da resolução e da exatidão de medição.

Basicamente, os medidores de vácuo, ou mais conhecidos como vacuômetros, estão classificados de acordo com o método direto e indireto de medição, conforme apresentado na Fig. (3.15).

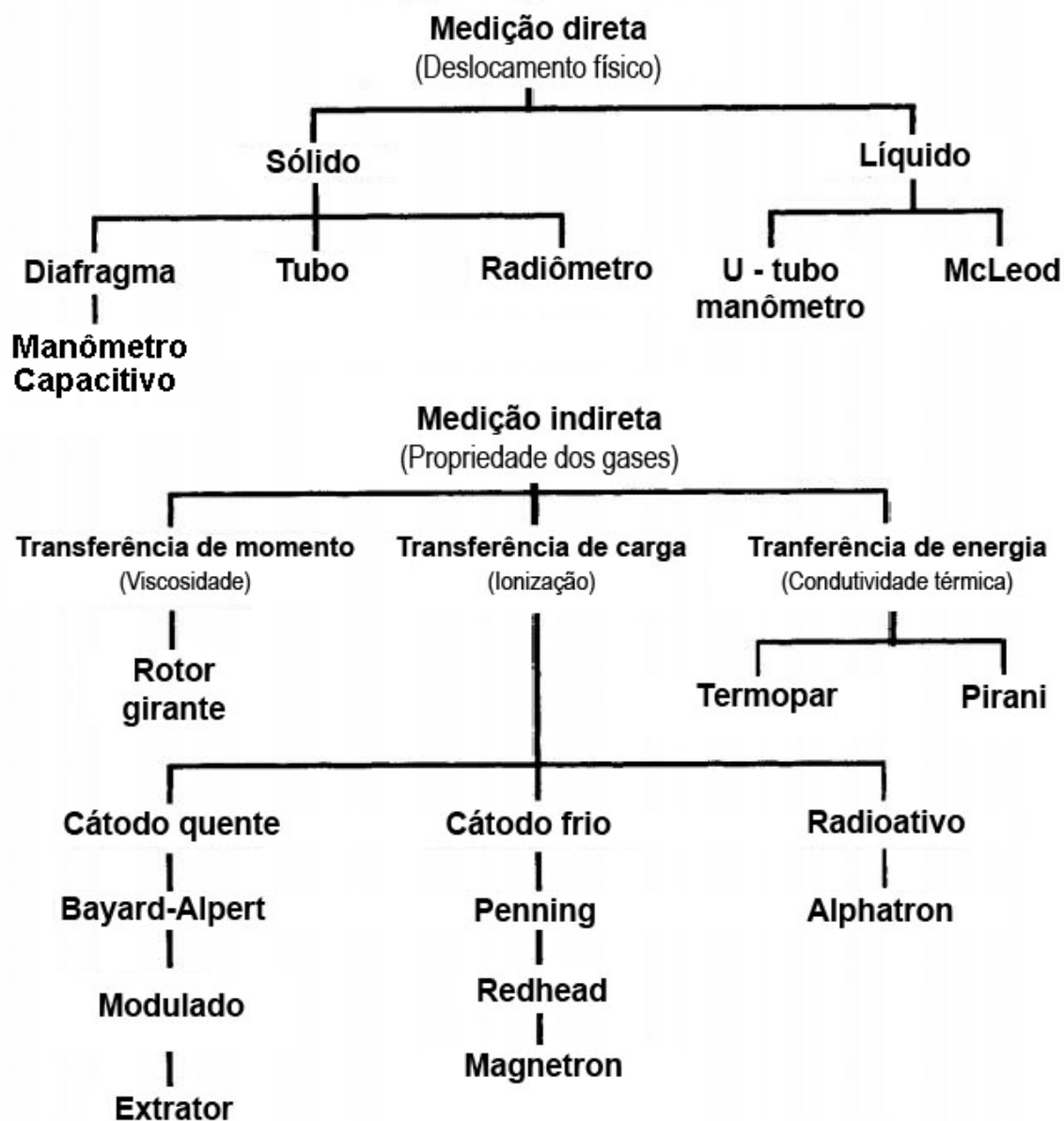


Figura 3.15. Classificação dos medidores de pressão de vácuo

O'Hanlon, 2003, p. 82

A Figura. (3.16) apresenta os medidores adequados para cada faixa de pressão de vácuo.

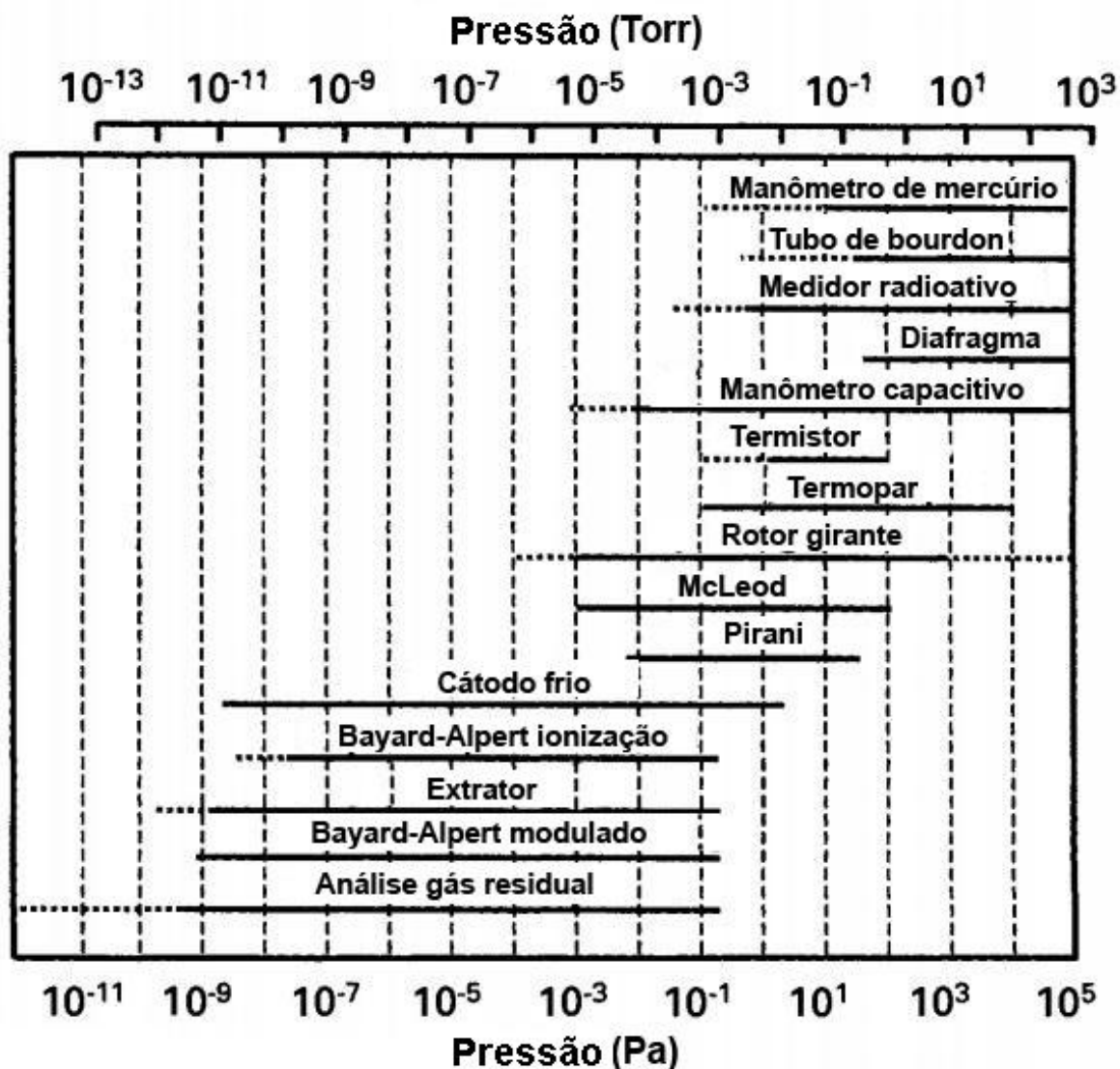


Figura 3.16. Medidores de pressão de acordo com a faixa de vácuo

O'Hanlon, 2003, p. 83

As próximas subseções apresentam os detalhes construtivos e funcionais dos medidores de vácuo mais usuais.

3.3.1 Vacuômetro de Bourdon

Este é um exemplo de medidor de pressão direta, onde o valor do mensurando é dado diretamente pelo instrumento de medição (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

Trabalham basicamente a partir da deformação de um dispositivo sólido com formato de um tubo de paredes finas dobrado, que anexado a um ponteiro registra a diferença de pressão em um mostrador (HOFFMAN *et al*, 1994). A extremidade do tubo está conectada ao sistema de vácuo que se deseja medir, portanto, a partir da geração de vácuo, a diferença de pressão exerce uma força deformando o tubo, que acoplado no ponteiro, indica o quanto a pressão de vácuo está abaixo da pressão atmosférica.

A Figura. (3.17) apresenta o esquema de um medidor de Bourdon.

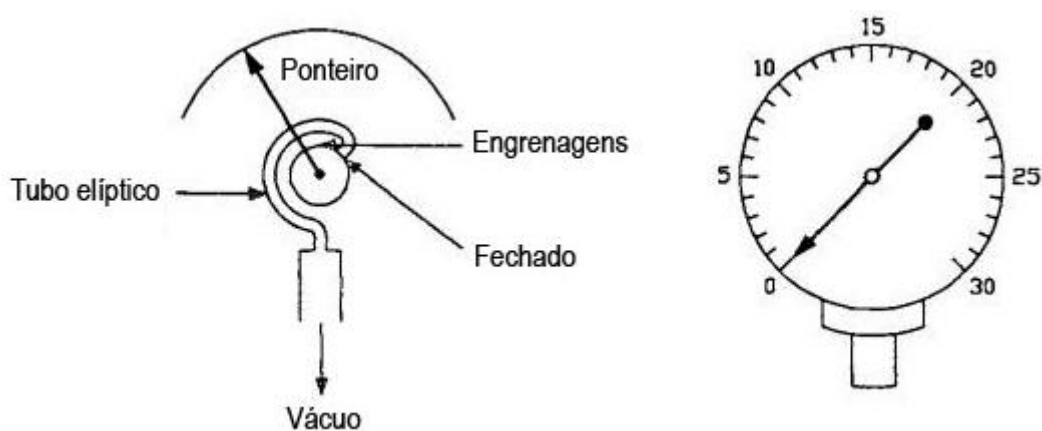


Figura 3.17. Vacuômetro de Bourdon

Hoffman *et al*, 1994, p. 263

De acordo com Hoffman *et al*. (1994), este medidor indica a leitura de pressão de forma linear e independente do tipo de gás que é evacuado, e devido à simplicidade do mecanismo, o mesmo se mostra menos sensível a pressões mais baixas, gerando inexatidão nas leituras. Segundo O'Hanlon (2003), estes medidores são usados apenas como uma medida aproximada de pressão na faixa de baixa de vácuo. Em determinados casos, este sistema mecânico pode ser construído de forma mais elaborada ou acoplados a circuitos eletrônicos para melhorar a exatidão (MOUTINHO *et al*, 1980; HOFFMAN *et al*, 1994). E para o caso da construção do medidor com materiais adequados, pode se medir até gases corrosivos (O'HANLON, 2003).

3.3.2 Vacuômetro Capacitivo

Este medidor funciona basicamente como um capacitor sensível a diferença de pressão, sendo um instrumento de medição direta através de deformações sólidas (O'HANLON, 2003).

A Figura. (3.18) apresenta o esquema de um medidor capacitivo.

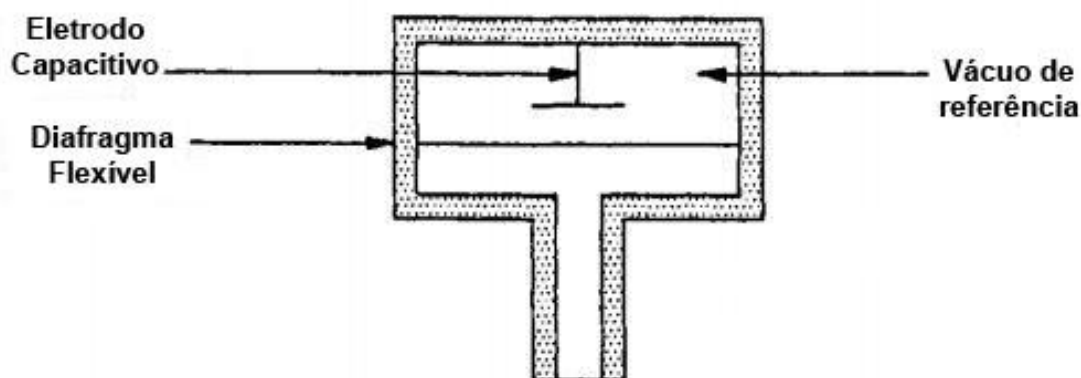


Figura 3.18. Vacuômetro capacitivo

Hoffman *et al*, 1994, p. 264

Conforme a Fig. (3.18), este esquema permite a indicação de uma pressão diferencial em relação a uma pressão de vácuo de referência que pode ser calibrada por outro instrumento de medição. Desse modo, este instrumento pode ser utilizado como um medidor de pressões absolutas, ou como um medidor de pressões diferenciais (O'HANLON, 2003). Ainda na Fig. (3.18), este vacuômetro é formado por um eletrodo fixo que está próximo de outro eletrodo acoplado a um diafragma, de forma que a diferença de pressão faz com que o diafragma aumente ou diminua a distância entre os eletrodos causando a variação da capacitância (HOFFMAN *et al*, 1994). A capacitância depende também da geometria dos eletrodos e do dielétrico que os envolve, mas segundo O'HANLON (2003), a maioria dos gases possui constante dielétrica próxima ao do ar, exceto para vapores orgânicos pesados ou gases ionizados que podem levar a um erro relativo de 0,5%. Este medidor apresenta sensibilidade, repetitividade e simplicidade

capazes de serem utilizados em uma larga faixa de pressão que compreende de quatro a cinco ordens de grandeza de pressão de vácuo a partir da pressão atmosférica e chegando ao médio vácuo (HOFFMAN *et al*, 1994).

3.3.3 Vacuômetro Pirani

Este é um exemplo de medidor de pressão indireta, onde o valor do mensurando é calculado a partir de operações matemáticas envolvendo outras características (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008). Em regime de escoamento viscoso, a condutividade térmica é proporcional apenas a viscosidade do gás, mas em pressões mais baixas onde o caminho livre médio é maior, a condutividade térmica passa a ser dependente apenas da quantidade de pressão existente no sistema, e neste caso, podendo ser usado como medidor de pressão (MOUTINHO *et al*, 1980). Através de um filamento aquecido e envolvido lateralmente por um tubo, a sua resistência varia de acordo com a taxa de transferência de calor, que depende do número de moléculas do ambiente que se choca com o filamento, na qual define a condutividade térmica do gás submetida a baixas pressões (LAFFERTY, 1998). Isto implica dizer que para diferentes gases, a taxa de transferência de calor não é a mesma em função dos graus de liberdade das moléculas, logo, a maioria dos equipamentos são calibrados para o ar, mas no entanto, trazem fatores de conversão para outros gases (MOUTINHO *et al*, 1980). A Figura. (3.19) apresenta o esquema de um medidor Pirani.

A variação da resistência do filamento é medida através de uma ponte de resistores, onde um dos braços da ponte é formado pelo medidor Pirani, ilustrada pela Fig. (3.20). O aumento da pressão diminui a resistência do filamento fazendo com que a ponte entre em desequilíbrio a partir de um ponto de pressão de calibração (MOUTINHO *et al*, 1980). Este medidor é empregado nas faixas de médio vácuo.

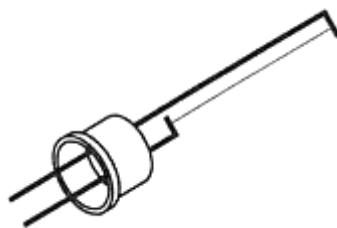


Figura 3.19. Medidor Pirani

Lafferty, 1998, p.405

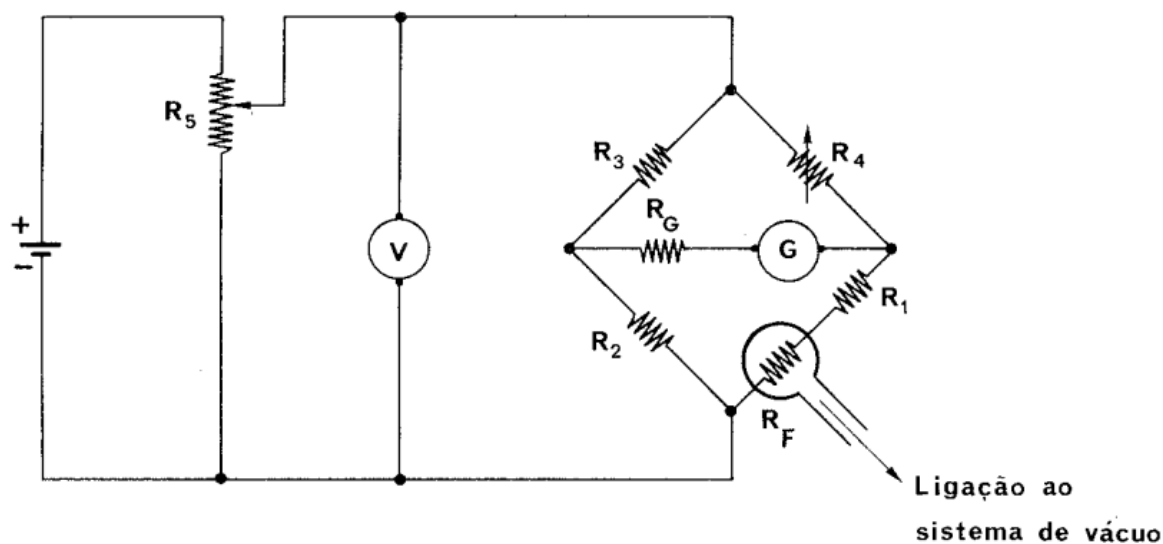


Figura 3.20. Circuito de medida para um Pirani

Moutinho *et al*, 1980, p. 113

3.3.4 Vacuômetro de Ionização de Cátodo Quente

Nas regiões de UV e UHV a densidade de partículas é extremamente baixa, e não sendo possível detectar forças de transferência de momento de energia do gás a uma parede sólida como utilizado nos medidores capacitivos, portanto, na região a partir do médio vácuo, são utilizados medidores de ionização de gases (O'HANLON, 2003).

Estes vacuômetros são formados por um triodo, em que são compostos por um filamento geralmente de tungstênio, grade e coletor que medem a quantidade de ionização do gás por efeitos dos impactos dos elétrons (O'HANLON, 2003). A quantidade de

ionização através da oscilação dos elétrons pelo cátodo interfere nas medidas de correntes do triodo e na diferença de potencial entre grade e filamento, que acoplado a um circuito amplificador, mensura indiretamente a quantidade de pressão (MOUTINHO *et al*, 1980).

Os medidores de cátodo quente projetados para medir pressões até 10^{-11} mbar são conhecidos como cabeça de ionização do medidor Bayard-Alpert conforme apresentado pela Fig. (3.21).

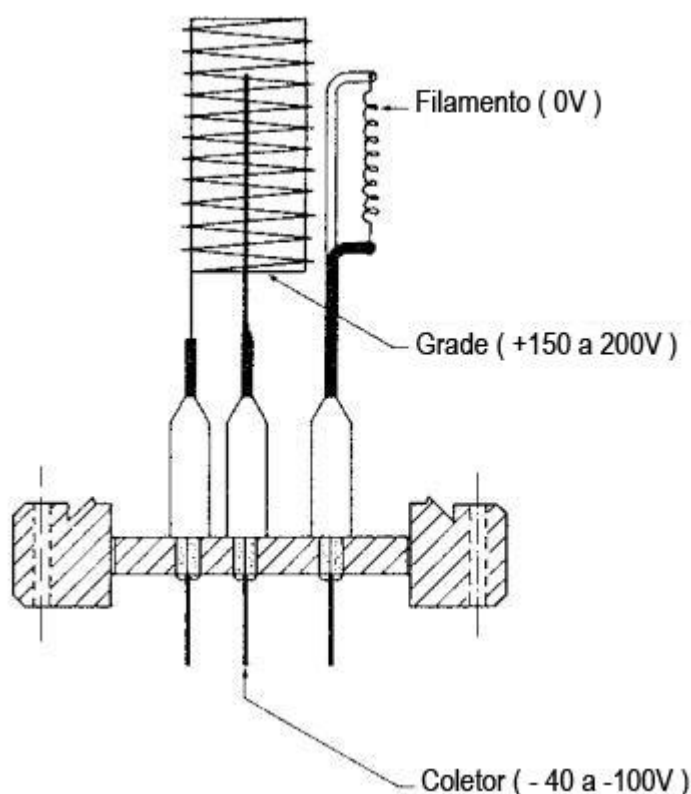


Figura 3.21. Cabeça de ionização do medidor Bayard-Alpert

Moutinho *et al*, 1980, p. 117

Este medidor foi concebido para atenuar a produção de raio X que interfere na sensibilidade de medição, logo, esta atenuação é em função da construção de um coletor com dimensões de um filamento, sendo este, um dos medidores mais populares do UHV (HOFFMAN *et al*, 1994).

3.3.5 Vacuômetro de Ionização de Cátodo Frio

Este medidor foi desenvolvido para medir pressões abaixo de 10^{-3} mbar, visando o aumento da ionização em baixas pressões através de descarga entre cátodo e ânodo, uma vez que o aumento do caminho livre médio diminui esta capacidade (HOFFMAN *et al*, 1994).

O vacuômetro de cátodo frio ou também conhecido como Penning é composto por dois cátodos paralelos no formato de pratos, e um ânodo em forma de anel, embebidos em um campo magnético criado por um ímã permanente (MOUTINHO *et al*, 1980). A combinação do campo magnético e elétrico criado pela diferença de potencial entre cátodo e ânodo fazem com que os elétrons tenham trajetória helicoidal para aumentar o seu percurso e melhorar a capacidade de ionização (HOFFMAN *et al*, 1994). A variação da corrente elétrica entre cátodo e ânodo determina a variação de pressão.

A Figura. (3.22) apresenta o esquema do medidor Penning.

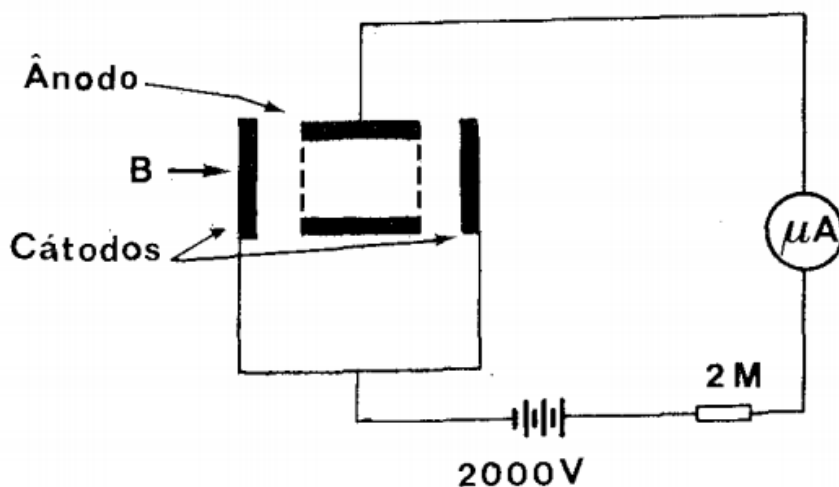


Figura 3.22. Medidor Penning

Moutinho *et al*, 1980, p. 120

O próximo capítulo apresenta a tecnologia do vácuo aplicada em engenharia de precisão

CAPÍTULO IV

APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DO VÁCUO EM ENGENHARIA DE PRECISÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda algumas das mais variadas aplicações da tecnologia do vácuo em engenharia de precisão que compreendem as escalas macro, micro e nanoscópicas, no qual se inicia através da seção 4.2 com os conceitos básicos de engenharia de precisão. As seções posteriores apresentam as aplicações juntamente com o seu funcionamento básico, bem como a relevância da tecnologia do vácuo em cada exemplo. Para maiores detalhes de cada aplicação, deve ser consultada a referência citada.

4.2 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DE PRECISÃO

A crescente demanda para a fabricação de componentes com precisão teve início em 1960, impulsionados pela eletrônica, energia nuclear e de defesa em guerras (VENKATESH & IZMAN, 2007). Atualmente, os produtos fabricados possuem grande complexidade, tanto no número de peças ou componentes que inclui um dispositivo, assim como a sofisticação do desempenho dos dispositivos de operação, destacando-se os componentes eletrônicos, microprocessadores, discos rígidos de armazenamento de dados, ônibus espaciais e aeronaves (DORFIELD & EUN LEE, 2008). Os componentes requerem formas complexas e miniaturizadas com exigentes tolerâncias dimensionais e precisão, assim como elevados padrões de qualidade e confiabilidade, e que devem ao final do processo de fabricação, serem acessíveis aos consumidores a um custo não proibitivo (DORFIELD & EUN LEE, 2008). Todavia, avanços da tecnologia têm sido

constantemente prejudicados no sentido de obter uma precisão mecânica cada vez maior, portanto, quando se trabalha a níveis elevados de precisão, existe a exigência do maior cuidado com os projetos mecânicos, podendo incluir conceitos que ainda não são da prática normal da engenharia (SMITH & CHETWYND, 1992). Diante disso, a engenharia de manufatura e precisão visa um aperfeiçoamento contínuo de usinagem e técnicas de processamento para a melhoria dos produtos (SMITH & CHETWYND, 1992).

Para Venkatesh & Izman (2007) a engenharia de precisão tem como objetivos a fabricação de materiais, componentes, desenvolvimento de processos industriais, concepção, fabricação de máquinas-ferramenta de alta precisão e dispositivos de medição compatíveis com o nível de tolerância exigido de cada aplicação.

Venkatesh & Izman *apud* Nakazawa & Mckeown (2007) elencam itens necessários para atingir uma maior precisão de fabricação de uma peça usando a engenharia de precisão:

1. Criar movimentos de alta precisão
2. Redução dos erros aleatórios
3. Promover montagens automáticas
4. Redução de custos de processo
5. Redução do tempo de processo
6. Prolongamento de vida
7. Diminuição do fator de segurança
8. Melhoramento da intercambiabilidade de componentes
9. Aumento do controle de qualidade através de máquinas com elevados recursos de precisão, de modo a reduzir a inspeção e retrabalhos
10. Atingir maior desgaste de componentes
11. Criar funções independentes uma da outra
12. Aumentar a densidade de integração de elementos em dispositivos
13. Conseguir mais avanços na tecnologia e ciências básicas

Dependendo do tipo de aplicação em engenharia de precisão, faz-se necessário o uso do controle da atmosfera através da tecnologia do vácuo, no sentido de viabilizar e melhorar processos que são afetados pela atmosfera padrão, uma vez que o controle de

umidade, temperatura e vibração não são mais suficientes para atender as exigências. Para Chambers *et al.* (1998), a tecnologia do vácuo é indispensável ao mundo moderno.

As próximas seções apresentam algumas aplicações em engenharia de precisão que utilizam a tecnologia do vácuo.

4.3 TERMOFORMAGEM

A termoformagem a vácuo consiste na conformação de placas e filmes de material polimérico submetidos ao calor e vácuo através de uma máquina termoformadora. Este tipo de conformação é utilizado em diversas aplicações onde requer melhor acabamento superficial e controle rigoroso de espessura, além de ser o mais indicado em comparação aos outros tipos de técnicas de injeção e sopro na produção de peças pequenas e complexas, apresentando menor custo de investimento em moldes e equipamentos (MORAES, 2004).

As etapas de conformação compreendem primeiramente pelo amolecimento do material plástico através de efeito Joule dissipado pelas resistências elétricas presentes no interior de uma pequena câmara de vácuo formada pelo molde. Em seguida, através da diferença de pressão em baixo vácuo criada no interior da câmara de vácuo pelos furos contidos na matriz, o material amolecido preenche os espaços evacuados conformando-se na matriz e dando origem a forma final do objeto, que possui acabamento liso nas duas faces e tendo a sua espessura dependente da própria espessura do filme polimérico conformado (MORAES, 2004).

A Figura. (4.1) apresenta as etapas de termoformagem.

Segundo os fabricantes, a termoformagem é aplicada nas mais variadas soluções, como na produção de copos, bandejas, potes, brinquedos, embalagens de cápsulas de remédio, peças automotivas, indústria de eletro-eletrônica, telecomunicações e de informática com gabinetes, painéis e encapsulamentos de dispositivos.

No capítulo 2 Fig. (2.8) desta dissertação, foi apresentado um exemplo de um objeto termoformado a vácuo.

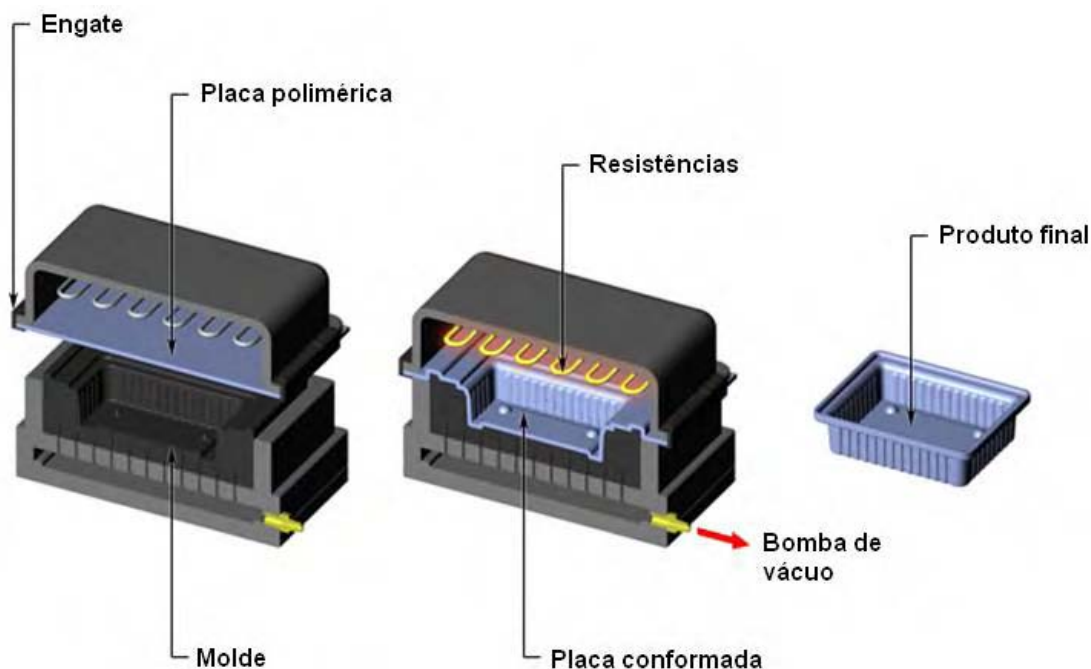


Figura 4.1. Etapas de conformação a vácuo

Fonte: adaptado de <http://www.custompartnet.com/wu/images/thermoforming/vacuum-forming.png>

4.4 PROTOTIPAGEM

A prototipagem rápida ou mais conhecida como impressora 3D a partir de um desenho CAD, já é uma realidade desde 1987 através da técnica de estereolitografia (Netto *et al*, 2003). Com o avanço, outras técnicas como sinterização seletiva por laser (SLS), deposição por extrusão de plástico (FDM) e fabricação de objetos por camadas de papel (LOM), abrem as portas para uma sucessão de outras técnicas que vem se desenvolvendo até hoje.

Como apoio a prototipagem rápida no sentido de complemento às técnicas já existentes, a tecnologia do vácuo foi inserida como suporte na produção de pré-séries de forma indireta denominada de *vacuum casting*. Segundo Silva (2008), o sistema de *vacuum casting* produz maior qualidade dimensional e acabamento superficial em relação a outros sistemas indiretos que não utilizam vácuo. Segundo os fabricantes, este sistema é o mais vendido no mundo, e o mais adequado na produção de peças com detalhes complexos.

O processo em *vacuum casting* começa primeiramente na produção de um modelo em estereolitografia (SLA) na função de molde como uma matriz para a produção de peças

pelo método de *vacuum casting* (SILVA, 2008). Posteriormente, este molde é colocado dentro de uma câmara de vácuo para que seja vazada resina para dentro do molde de forma a preencher todos os espaços vazios. Conforme Silva (2008), a injeção de resina utilizando apenas a ação da gravidade em ambiente de baixa pressão possibilita maior precisão e ausência de problemas no interior da estrutura e na superfície do molde. Neste caso, a baixa pressão evita a contaminação de partículas com a resina além de promover o vazamento mais uniforme devido ao menor atrito do fluido com as poucas moléculas de ar provenientes do médio vácuo. A Figura. (4.2) apresenta os elementos básicos do processo de *vacuum casting*, que se encontram dentro de uma máquina que proporciona a baixa pressão como uma câmara de vácuo.

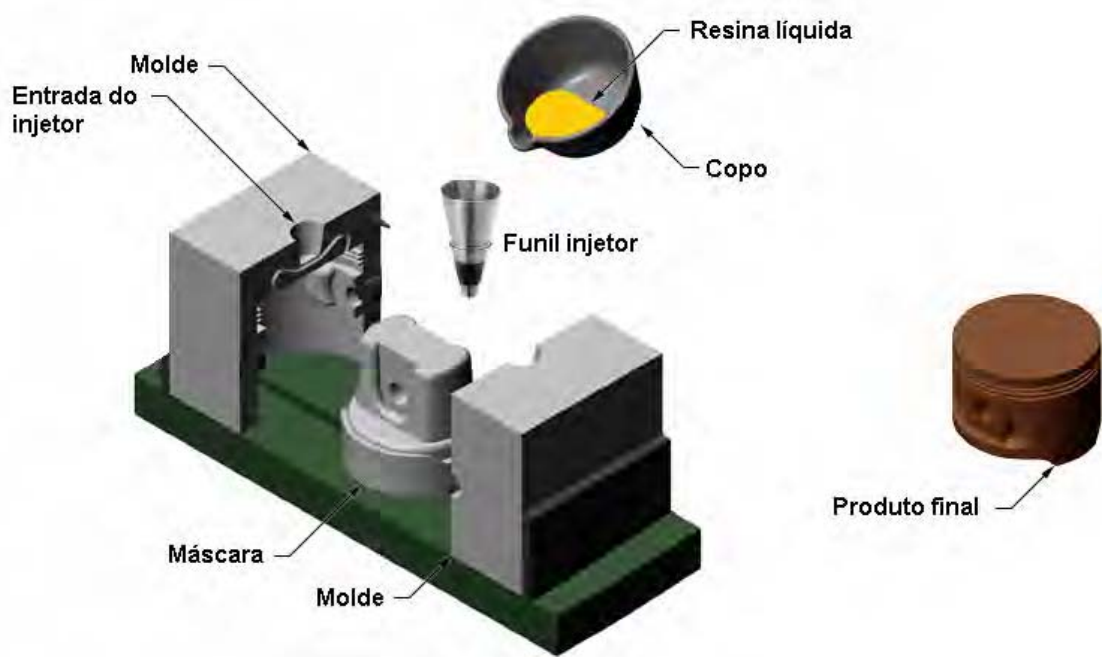


Figura 4.2. Processo de *vacuum casting*

Fonte: adaptado de <http://www.custompartnet.com/wu/images/thermoforming/vacuum-forming.png>

Segundo as empresas, o *vacuum casting* tem aplicações típicas em desenvolvimento de produtos de design com elevada qualidade dimensional. Também é aplicado na produção das mais variadas peças em pequenas escalas em nylon de alta resistência e indústria automobilística.

A Figura. (4.3) apresenta um exemplo de um produto final produzido com nylon de alta resistência através do *vacuum casting*, destacando a complexidade do componente produzido assim como a eficiência da técnica empregada.



Figura 4.3. Produto obtido do *vacuum casting*

Fonte: http://www.mtt-group.com/data/pdf/MTT_Vac_Casting_Systems_Brochure_final.pdf

Denoual *et al.* (2006) afirmam que a qualidade dimensional e a repetitividade do *vacuum casting* permitem a produção de biochips dentro da tecnologia de micromáquinas ou sistemas microeletromecânicos (MEMS), com vantagens superiores a outros métodos que utilizam injeção a pressão positiva em tecnologias de microfabricação.

Ainda dentro do campo da prototipagem, a tecnologia do vácuo permitiu o avanço com a produção de produtos metálicos através da técnica da fabricação de formas livres por feixes de elétrons ou *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF3). Esta técnica permite a possibilidade de fabricar peças metálicas sem o desenvolvimento de moldes, gerando redução de custos nas aplicações existentes como na indústria aeronáutica e aeroespacial e futuramente na fabricação de implantes médicos personalizados para cada paciente. Pode ser utilizado em reparação de peças e adicionamento de detalhes em

componentes simplesmente forjados, além de promover menores tempos de usinagem, desperdício de material e consumo de energia elétrica (TAMINGER & RAFLEY, 2003).

O processo funciona basicamente através de um alimentador que contém o material a ser depositado em forma de fio metálico. Um bico injetor de feixe de elétrons é o responsável por misturar o material do alimentador com o substrato que serve de suporte para a deposição do material (TAMINGER & RAFLEY, 2003). A Figura. (4.4) apresenta os componentes básicos desta técnica que devem está dentro de uma câmara de vácuo.

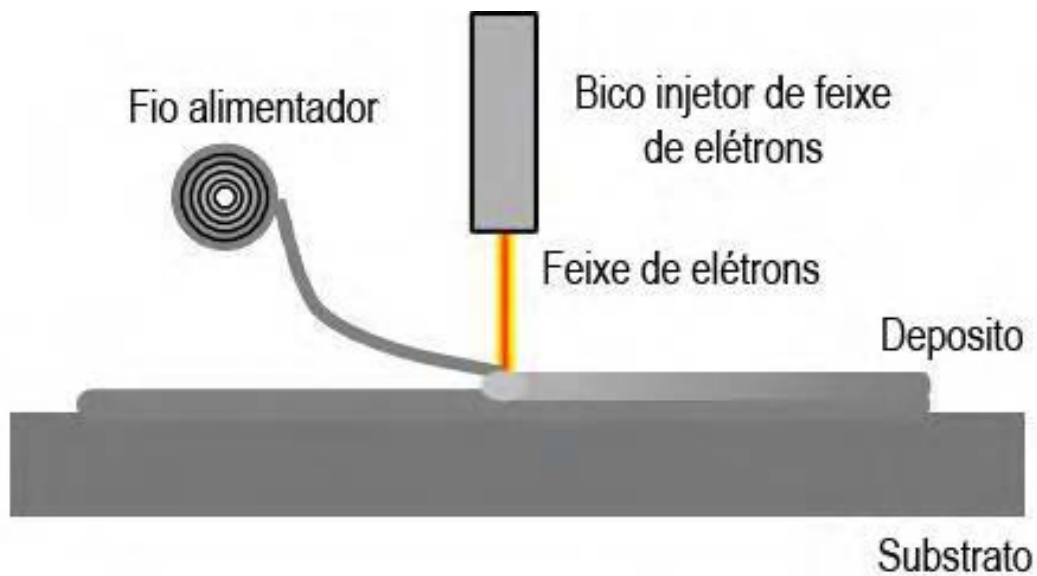


Figura 4.4. Processo do EBF3

Taminger & Rafley, 2003, p. 2

Segundo Taminger & Rafley (2003) esta técnica possui uma eficiência de quase 100% de consumo de matéria prima e 95% do consumo de energia elétrica é transformado em trabalho direto, uma vez que outras técnicas comerciais de laser a diodo possuem baixa eficiência devido a alta reflexão da luz em relação ao material a ser depositado, chegando a apenas 40%. O ambiente em alto vácuo de 10^{-4} mbar permite a baixa contaminação do processo tornando-o limpo sem a necessidade da adição de gases como uma nuvem de proteção para a deposição do material (TAMINGER & RAFLEY, 2003).

A Figura. (4.5) apresenta exemplos de produtos obtidos a partir do EBF3.

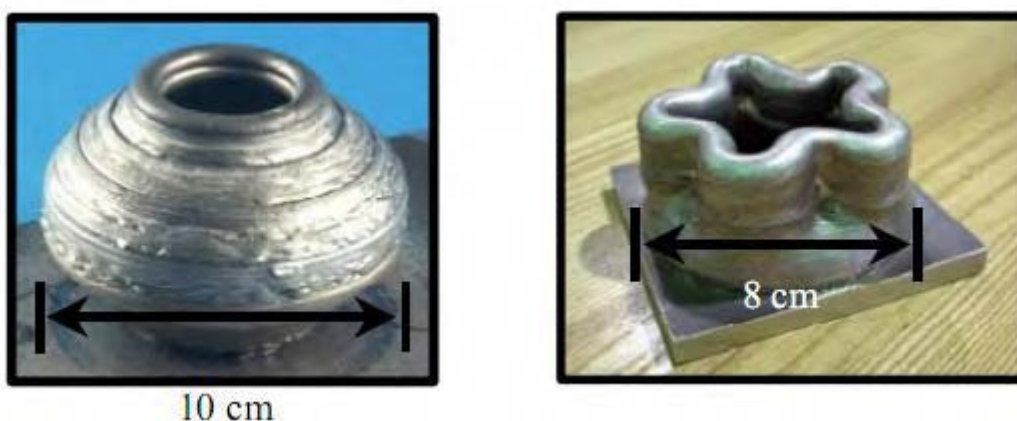


Figura 4.5. Produtos obtidos do EBF3

Taminger & Rafley, 2003, p. 5

4.5 METROLOGIA

Os avanços das áreas de micro e nanotecnologia de miniaturização de dispositivos eletrônicos e mecânicos exigem sistemas metrológicos de alta precisão e exatidão assim como calibradores mais sofisticados para estes sistemas. Neste sentido, Diebold (2001) afirma que a metrologia é o responsável por promover o desenvolvimento e produção das atuais e futuras gerações de tecnologias de dispositivos semicondutores. Nesta escala de miniaturização, os sistemas de medição convencionais por contato não são eficazes, portanto, medições sem contato através de canhões laser e câmeras captadoras são desejadas, assim como condições controladas da atmosfera para proteger as amostras e viabilizar as medições (VENKATESH & IZMAN, 2007; DORFIELD & EUN LEE, 2008; SMITH & CHETWYND, 1992).

A tecnologia do vácuo permite aos instrumentos de medição sem contato uma garantia de menor incerteza de medição (SAWABE *et al*, 2003). A baixa quantidade de moléculas contidas no alto vácuo garante menor perturbação ao feixe laser como forma de estabilizar o comprimento de onda, e que segundo Sawabe *et al*. (2003), o índice de refração é eliminado. A partir disso, Sawabe *et al*. (2003) desenvolveram um interferômetro comparador para a calibração de encoders lineares utilizados em sistemas de posicionamento sofisticados, como os que são utilizados em medição na indústria de semicondutores e metalurgia, chegando a uma incerteza total de medição de 40 nm.

A Figura. (4.6) apresenta uma visão geral do comparador. O deslocamento da mesa é medido através de um interferômetro a laser He-Ne contido em uma câmara de vácuo em conformidade com o princípio de Abbé para acionar o sinal do sensor ou detector de borda a partir da leitura do encoder, e realimentados por um controlador (SAWABE *et al*, 2003). A base da mesa possui sistemas amortecedores de vibrações, e o sistema de alto vácuo formado pelas bombas turbomoleculares e rotativas, garantem a pressão necessária de 8×10^{-5} mbar juntamente com a câmara de vácuo e o tubo por onde trafega a luz do interferômetro para a comparação, além do controle de temperatura, umidade e partículas sólidas em suspensão no ambiente em que o comparador foi instalado (SAWABE *et al*, 2003). Uma câmara CCD capta as bordas de transição da luz halogênia do interferômetro a partir do movimento da mesa.

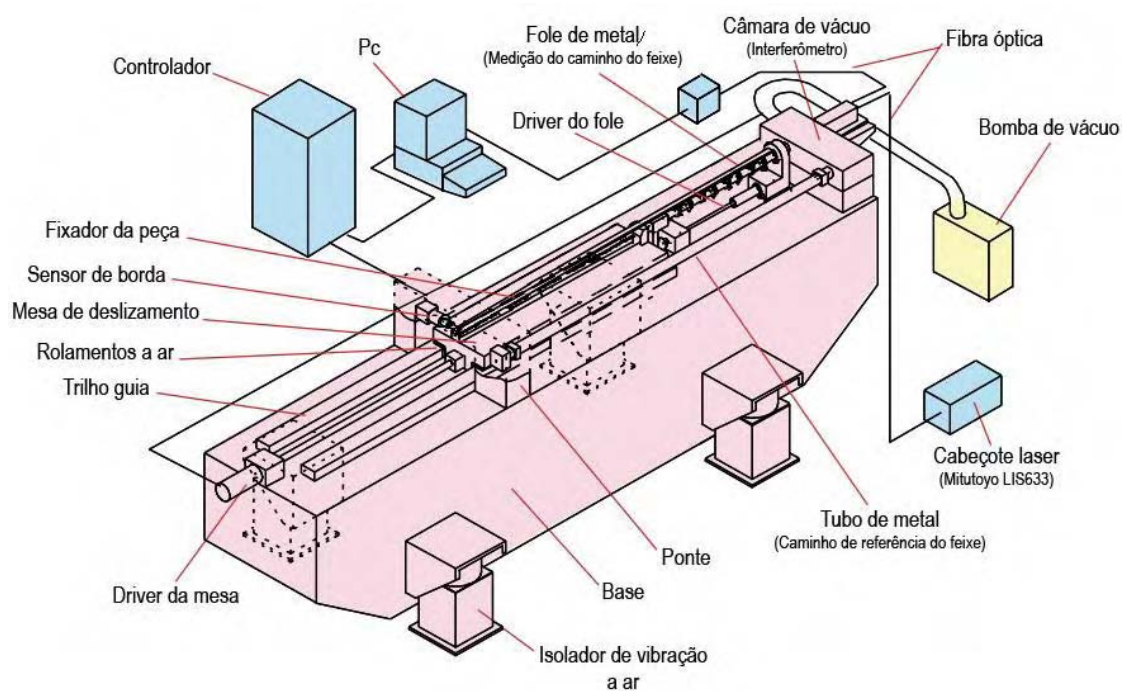


Figura 4.6. Esquema do sistema global de comparação

Sawabe et. al, 2003, p. 321

Fladischer *et al*. (2007) desenvolveram um profilômetro óptico para a caracterização de superfícies complexas, que neste caso, as amostras são de wafers de silício dobrados e possuem fragilidade quando expostos a atmosfera padrão. Portanto, o profilômetro é formado por uma câmara de vácuo que através de uma bomba iônica produz

uma condição de ultra-alto vácuo de 10^{-7} mbar para proteger a amostra (FLADISCHER *et al*, 2007). A Figura. (4.7) apresenta o perfilômetro, que possui uma janela de inspeção para o sensor óptico que capta as diferenças dos comprimentos de onda refletidos da amostra de wafer, em função de uma fonte de luz branca (FLADISCHER *et al*, 2007). As diferenças dos comprimentos de onda determinam a caracterização da forma da superfície do wafer.

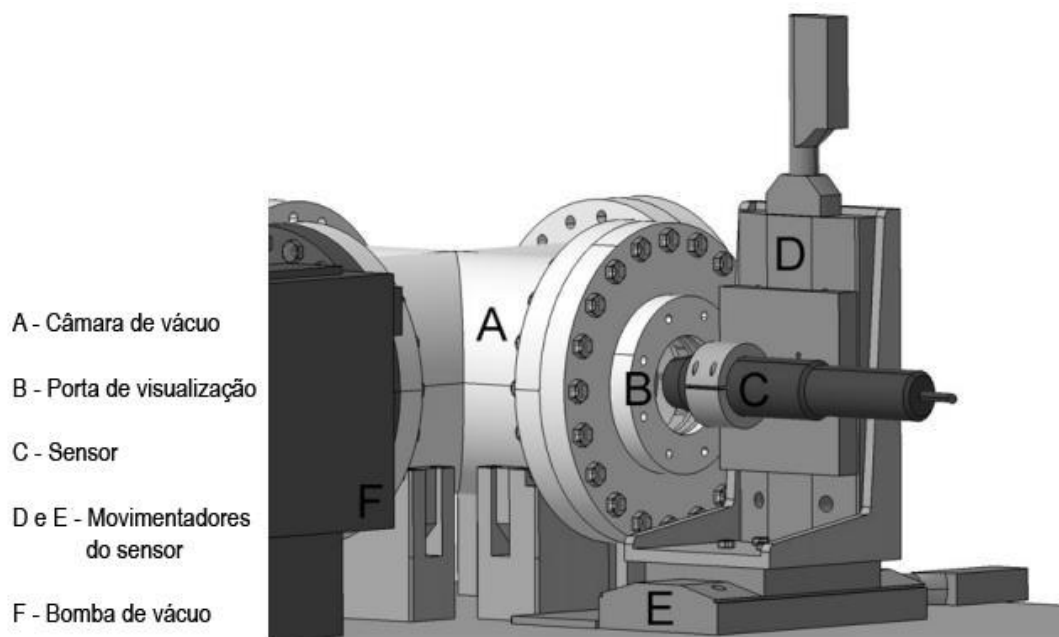


Figura 4.7. Perfilômetro ótico

Fladischer et. al, 2007, p. 183

Yang *et al*. (2006) apresentaram um experimento de medição de massa utilizando um sensor nanoeletromecânico (NEMS) com sensibilidade em escala zeptograma (10^{-21} g) que funciona dentro de um sistema de ultra-alto vácuo criogênico de 10^{-10} mbar. O funcionamento do NEMS é dado basicamente através da quantidade de moléculas de gás adsorvidas por ele, provenientes de um bico injetor devidamente controlado juntamente com um anteparo que bloqueia pulsadamente a vazão de gás. A quantidade de moléculas adsorvidas pelo NEMS deve vibrá-lo com uma frequência idêntica a de ressonância do sensor, que é condicionada em um circuito eletrônico de malha fechada que controla a quantidade de moléculas adsorvidas no NEMS através do bico injetor e anteparo (YANG *et al*, 2006).

A Figura. (4.8) apresenta a estrutura do NEMS e o diagrama de blocos do circuito condicionador e controlador.

Utilizando o mesmo princípio propostos por Yang *et al.* (2006) na utilização de NEMS para medição de massas individuais de gás, Burg *et al.* (2007) desenvolveram um NEMS para medição de massa de biomoléculas e células vivas em um fluido.

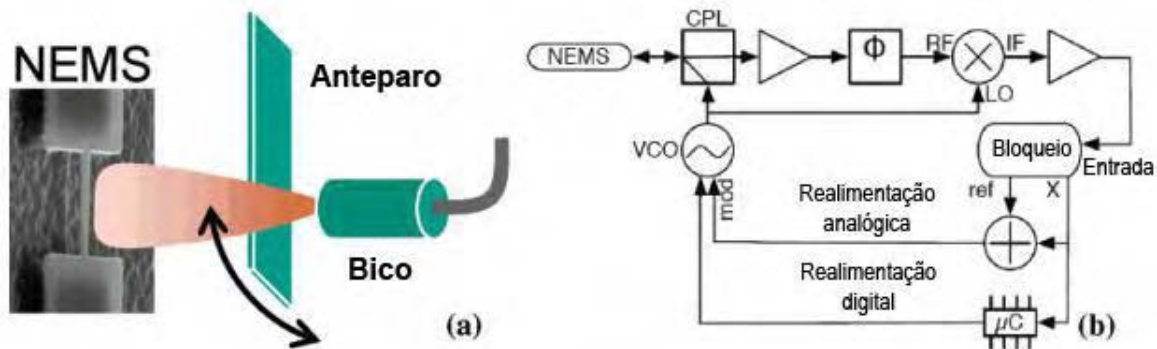


Figura 4.8. Medidor NEMS

Yang *et al.*, 2006, p. 584

Neste experimento, o NEMS é composto por um cantilever feito de silício com microcavidades encapsuladas por onde passa um fluido com células vivas. Este fluido é bombeado nas cavidades para que o cantilever vibre de acordo com a sua frequência de ressonância, e o fluido encapsulado não tem contato como o meio externo. O cantilever é envolvido em alto vácuo para que não haja amortecimento da vibração assim como variações indevidas (BURG *et al.* 2007). A vibração é detectada através de sensores ópticos, e a variação do pico da vibração determina a quantidade de massa que está sendo bombeada. Segundo Burg *et al.* (2007) este experimento tem uma resolução de 10^{-15} g. A Figura. (4.9) apresenta o esquema de funcionamento do sistema.

A tecnologia do vácuo também permite o desenvolvimento e o funcionamento de micromáquinas eletromecânicas (MEMS), representada na Fig. (4.10) por um micromanipulador de precisão com utilização de sensores inerciais dentro de uma câmara de vácuo.

Para o caso da medição de componentes contidos em uma pastilha semicondutora de silício para verificar defeitos assim como a caracterização de elementos dentro das fases de projeto, desenvolvimento e produção, é utilizado um microscópio eletrônico de

escaneamento (SEM) (DIEBOLD, 2001). Este tipo de microscopia permite um escaneamento com resoluções na escala de nanômetros que cada vez mais são aperfeiçoados. A Figura. (4.11) apresenta o esquema deste microscópio, destacando o uso de uma câmara de vácuo para a acomodação da amostra assim como de evitar a dispersão do feixe de elétrons no escaneamento. A Figura. (4.12) apresenta um resultado do escaneamento na caracterização de uma nanoestrutura.

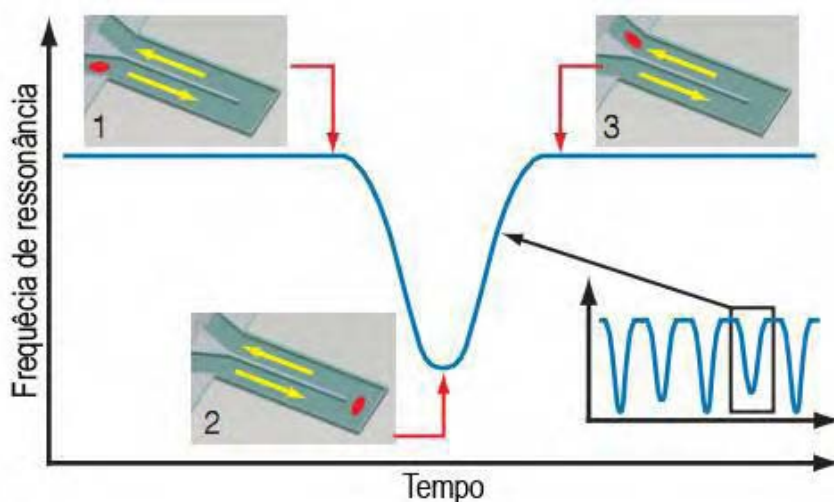


Figura 4.9. Funcionamento da vibração do cantilver

Burg et. al, 2007, p. 1066

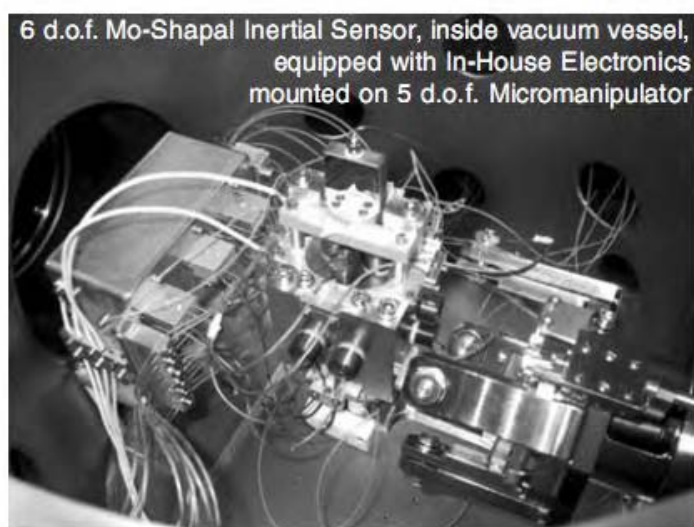


Figura 4.10. Micromanipulador MEMS

Venkatesh e Izman, 2007, p. 369

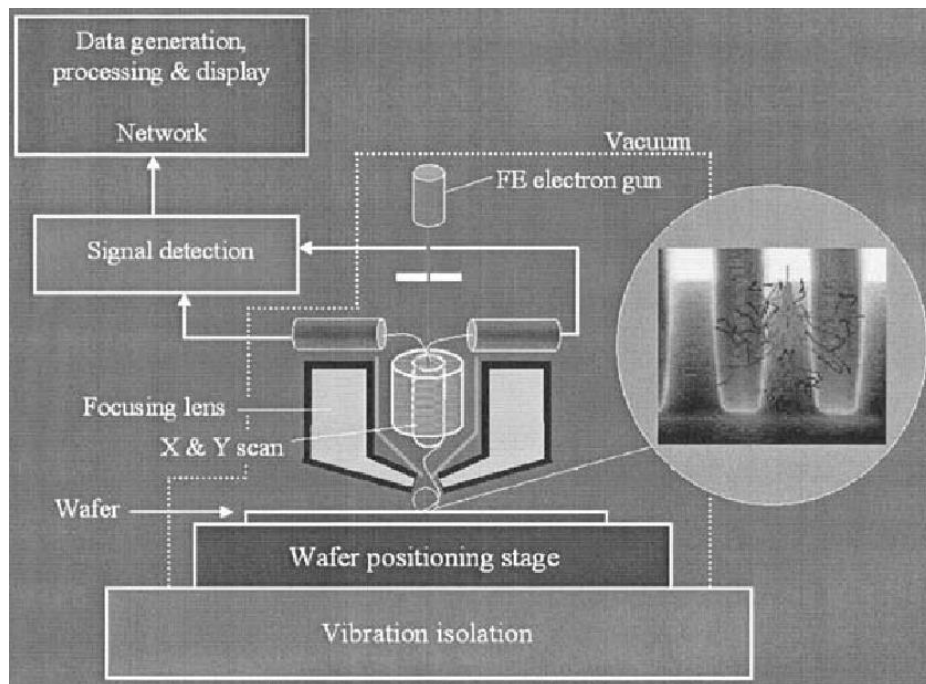


Figura 4.11. Esquema de um microscópio eletrônico de escaneamento (SEM)

Diebold, 2001, p. 2, cap 14

Ainda dentro do campo da microscopia eletrônica, outros exemplos como o microscópio de força atômica (AFM) e o microscópio de escaneamento de tunelamento (STM) também utilizam a tecnologia do vácuo.

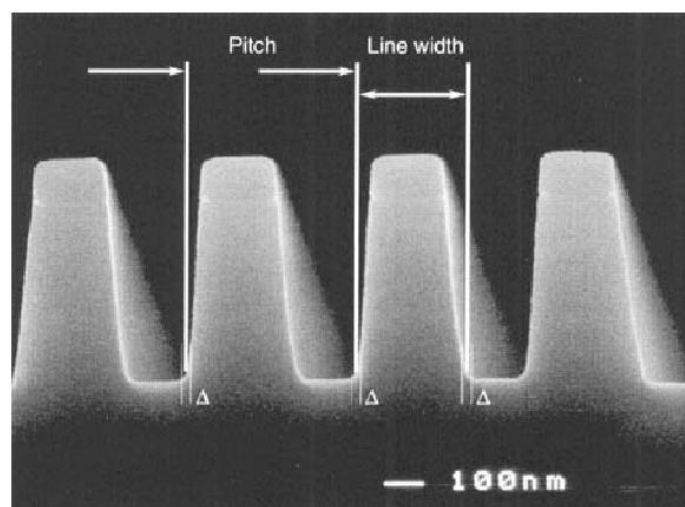


Figura 4.12. Caracterização de uma superfície de uma nanoestrutura

Diebold, 2001, p. 12, cap 14

4.6 NANOFABRICAÇÃO

A área de nanofabricação também é assistida pela tecnologia do vácuo em que oferece uma atmosfera controlada para a litografia por feixe de elétrons ou *Electron Beam Lithograph* (EBL), que segundo Olmos (2008) é a técnica de nanofabricação de estruturas mais utilizada. Consiste basicamente em um feixe de elétrons que varre uma superfície de multicamadas sensível para desenhar uma estrutura que posteriormente é removida para dar forma nanoestrutural em camadas. A Figura. (4.13) apresenta o exemplo de um desenvolvimento básico de uma nanocamada em atmosfera controlada, em que um substrato de índio com óxido de estanho (ITO) é coberto por uma camada sensível de polimetacrilato de metila (PMMA), no qual é bombardeado por um feixe de elétrons que imprime um desenho de uma estrutura que posteriormente é removido.

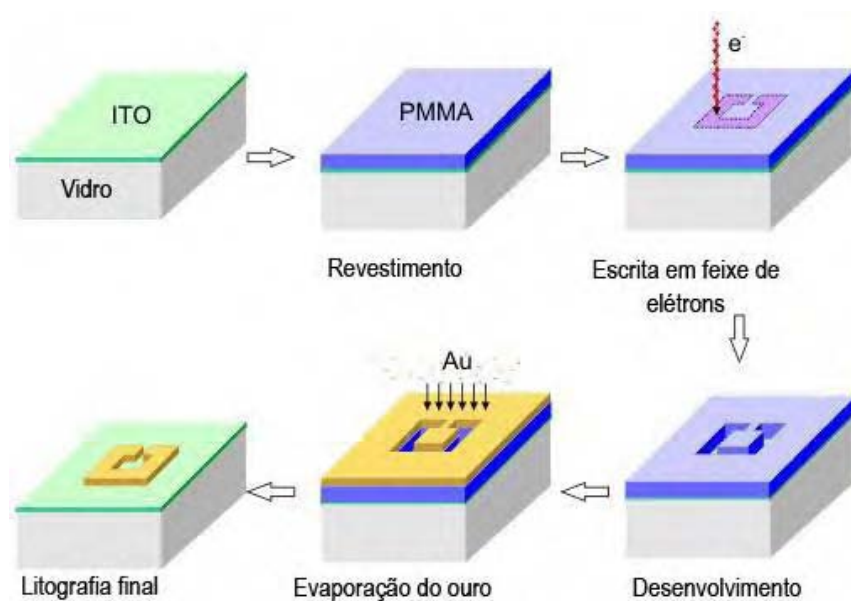


Figura 4.13. Processo de EBL

Fonte: <http://www.aph.kit.edu/wegener/?id=31>

A remoção da parte do PMMA produz uma espécie de máscara que posteriormente é adicionado outro elemento condutor para a produção final da nanoestrutura. Segundo Olmos (2008), este processo possui alta resolução de fabricação devido ao feixe de elétrons possuir um baixo diâmetro de ataque na superfície que se deseja desenhar, podendo chegar a um diâmetro de 1 nm, em vez de 500 nm para o processo de litografia utilizando feixe de

luz sem atmosfera controlada. Este processo ocorre em uma máquina com estrutura similar a de um microscópio de escaneamento, que geralmente são adaptados para a fabricação.

Em casos práticos como o de semicondutores utilizados nos chips de processadores, são utilizadas várias camadas de wafers de silício agregadas a outros materiais, que atualmente, podem totalizar cerca de bilhões de transistores interconectados.

4.7 FIXAÇÃO

Com a utilização de baixo vácuo aplicado em diferença de pressão, é possível fixar objetos e dispositivos dos mais variados tipos e tamanhos. A fixação a vácuo substitui os grampos e parafusos utilizados na fixação tradicional, com as vantagens da mobilidade, rapidez de fixação e maior área de contato para medição, além de não degradar a superfície dos dispositivos e componentes desde que a magnitude do vácuo seja adequada (PAIVA *et al*, 2010).

As ventosas são um exemplo de dispositivos de fixação a vácuo mais tradicionais utilizados nos mais variados seguimentos industriais. Formadas basicamente por um elemento de borracha conectada a uma tubulação oriunda de uma bomba de vácuo, estas se prendem a superfícies lisas, conforme apresentado no capítulo II Fig. (2.7). O material da ventosa submetido a uma pressão de vácuo funciona como um vedante, e o volume interno se comporta como uma pequena câmara de vácuo. Segundo Degasperi (2002), esta diferença de pressão pode chegar até 10^5 Nm^{-2} , que está situada na faixa de baixo vácuo, e através desta diferença de pressão entre a parte externa e interna da ventosa, a atmosfera exerce uma pressão sobre a área de contato da ventosa com o objeto conforme mostrado na Fig. (4.14), criando uma força resultante que deve ser teoricamente igual à força peso do objeto para que o mesmo seja equilibrado.

O uso das ventosas promove maior produtividade e redução de custos por garantir menor tempo de resposta, menor consumo de energia, maior velocidade, mobilidade e também por não danificar superfícies de objetos se comparado aos fixadores tradicionais (PAIVA *et al*, 2010). As ventosas estão inseridas nas mais variadas aplicações industriais para a manipulação de objetos como cerâmicas, caixas de papelão, objetos de pequenas dimensões, plásticos, vidros, papéis e etc. Segundo dados de fabricantes, uma única ventosa com diâmetro de contato de 350 mm de diâmetro de contato pode suspender massas de até 600 kg.

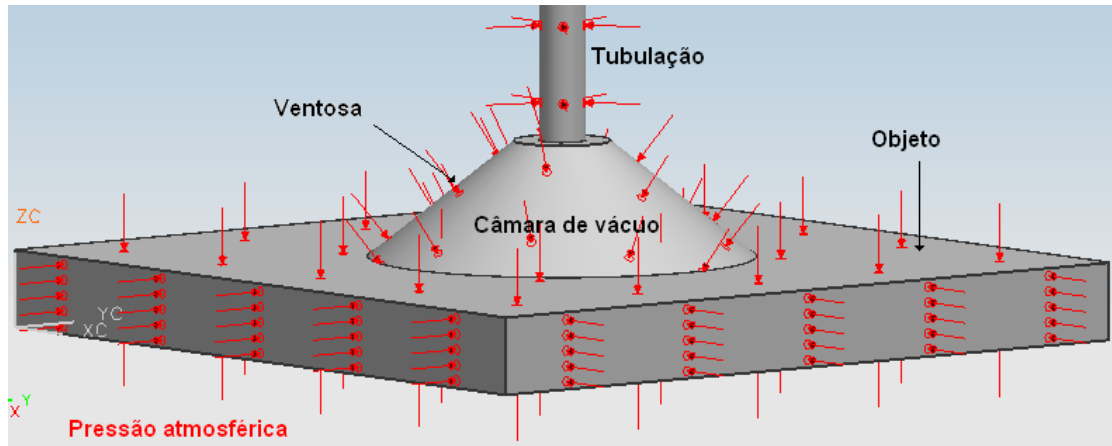


Figura 4.14. Distribuição de pressões em uma ventosa

Outro exemplo de fixação a vácuo é realizado por mesas de vácuo que são freqüentemente utilizadas em máquinas-ferramenta comandadas numericamente (CNC), centros de usinagem e máquinas de medição por coordenadas. Uma mesa de vácuo tem por objetivo garantir a fixação de peças mediante as forças externas, tais como as de usinagem, sem que haja a necessidade da utilização dos fixadores tradicionais, além de promover as vantagens da redução do tempo de montagem, maior área efetiva de medição com ou sem contato e maior precisão de fixação (PAIVA *et al*, 2010). Segundo Mileham *et al*. (1999) a redução do tempo de montagem (setup) é um requisito fundamental para uma maior flexibilidade e produção, que está relacionado com o tempo de fixação da peça a ser usinada.

A mesa de vácuo é formada pela própria câmara de vácuo que possui furos em sua parte superior conforme a Fig. (4.15), para prender as peças pela evacuação do ar residente entre a área de contato da mesa com a superfície da peça, funcionamento semelhantemente a uma ventosa. Os fabricantes utilizam uma película de revestimento na parte superior da mesa para melhorar o isolamento da pressão de vácuo criada pelos furos e a superfície da peça, ou em outros casos são utilizados gaxetas. Outras características importantes da mesa de vácuo são de garantir menores deformações quando submetida à pressão de vácuo assim como cargas externas sobre o objeto fixado, menor peso e estabilidade da pressão de vácuo no sistema (PAIVA *et al*, 2010).

A Figura. (4.16) apresenta mais outro exemplo de fixação utilizado em máquinas-ferramenta de precisão através de um mandril a vácuo que funciona semelhantemente a uma mesa de vácuo.



Figura 4.15. Mesa de vácuo

Fonte: www.systauto.com

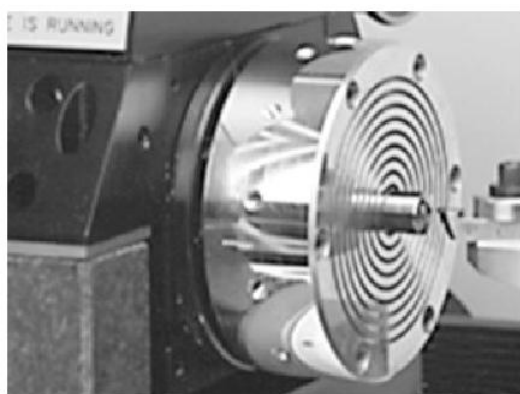


Figura 4.16. Mandril a vácuo

Venkatesh e Izman, 2007, p. 192

O próximo capítulo apresenta uma metodologia de projeto e desenvolvimento de mesas de vácuo aplicadas em máquinas-ferramenta.

CAPÍTULO V

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE MESAS DE VÁCUO

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma metodologia para projeto e desenvolvimento de mesas de vácuo para a fixação de peças, aplicada em máquinas-ferramenta de fresamento de topo, como substituição as mesas tradicionais que utilizam grampos e parafusos. A metodologia é dividida em três fases de projeto onde a primeira determina as forças de vácuo necessárias para a fixação de peças submetidas a diferentes forças de usinagem utilizando materiais como aço e alumínio. A segunda fase segue com o projeto das mesas de vácuo para cada força de vácuo, juntamente com diferentes geometrias de mesas de vácuo, no sentido de avaliar a magnitude dos esforços e selecionar a mesa mais adequada. Finalizando, a última fase compreende a especificação do sistema de vácuo necessário para o funcionamento de todo o processo. A Figura. (5.1) apresenta o esquema da metodologia.

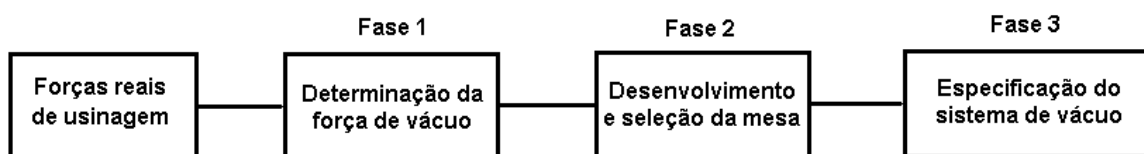


Figura 5.1. Metodologia de desenvolvimento e projeto de mesas de vácuo

5.2 DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE FIXAÇÃO (FASE 1)

Conforme abordado no capítulo 4 seção 4.6, todo sistema de fixação a vácuo deve criar uma diferença de pressão necessária que garanta a fixação de um objeto, bem como a viabilidade do que se quer fixar mediante as características externas de força e peso. A máxima diferença de pressão que pode ser criada por um sistema de vácuo mostrado no capítulo 2 seção 2.3 limita os fixadores a vácuo em quantidade de força de fixação no qual dependem da área de contato de vácuo. Sendo assim, é de grande importância verificar as possibilidades e configurações de fixação.

Paiva *et al.* (2010) mostraram que uma mesa de vácuo com área de contato de vácuo de 4356 mm^2 submetida a uma pressão de vácuo ou diferença de pressão de 100 kPa é capaz de fixar uma carga axial de aproximadamente 435,6 N, e que esta força é proporcional a área de contato, conforme apresentado pela Eq. (2.1). Todavia, os cálculos do referido trabalho foram baseados em função de apenas uma única força axial atuando em apenas um eixo. Entretanto, para a determinação da força de fixação em uma mesa de vácuo aplicada em máquinas-ferramenta de fresamento, é necessário o conhecimento da natureza das forças originadas durante a usinagem. Ferraresi (1977) afirma que estas forças geradas dependem de considerações tecnológicas e físicas da formação do cavaco, e estas considerações são ressaltadas por Ribeiro *et al.* (2006) como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, material da ferramenta, material de recobrimento, geometria da ferramenta, fluido de corte, desgaste da ferramenta, efeitos térmicos, atrito e tensões geradas. A Figura. (5.2) apresenta as forças geradas durante o processo de usinagem em um tipo de fresamento específico conforme a norma DIN 6584, onde segundo Ferraseri (1977) elas são definidas como:

P_u (Força de usinagem) = É a força total que atua sobre uma cunha cortante durante a usinagem.

P_t (Força ativa) = É a projeção da força de usinagem (P_u) sobre o plano de trabalho.

P_c (Força de corte ou força principal de corte) = É a projeção da força de usinagem (P_u) sobre a direção de corte, dada pela velocidade de corte.

P_a (Força de avanço) = É a projeção da força de usinagem (P_u) sobre a direção de avanço.

P_{ap} (Força de apoio) = É a projeção da força de usinagem (P_u) sobre a direção perpendicular à de avanço, situada no plano de trabalho.

P_p (Força passiva ou força de profundidade) = É a projeção da força de usinagem (P_u) sobre uma perpendicular ao plano de trabalho.

A partir da Fig. (5.1) foi observado que as componentes de força têm uma resultante chamada de força de usinagem (P_u), que segundo Ribeiro *et al.* (2006) é de difícil obtenção assim como a sua direção varia de acordo com o processo de usinagem. Diante disso, é mais fácil avaliar as suas componentes nos eixos x, y e z uma vez que estas são fundamentais para a determinação da força necessária para a fixação na mesa de vácuo.

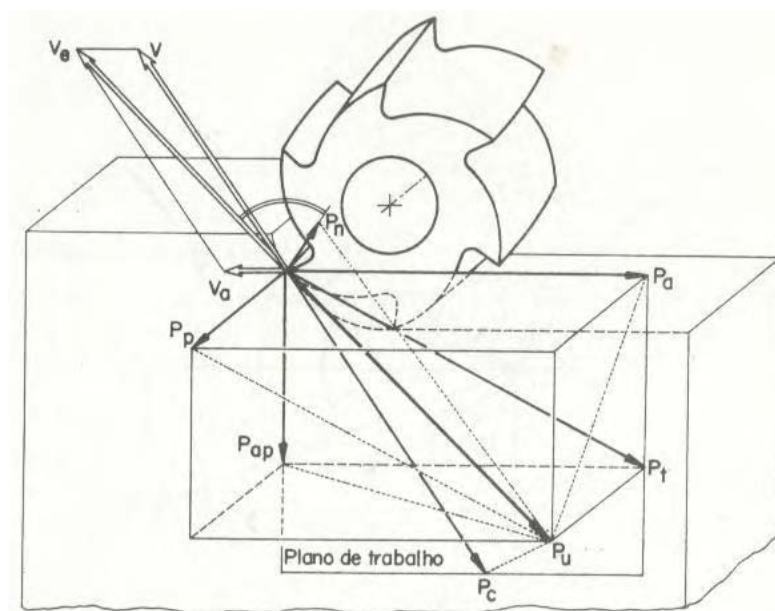


Figura 5.2. Componentes da força de usinagem no fresamento cilíndrico tangencial discordante

Ferraresi, 1977, p. 157

Para a determinação da força de vácuo necessária que deverá ser criada pela mesa no sentido de garantir a fixação durante a usinagem, foram considerados neste trabalho dois estudos de casos reais de magnitude de forças de usinagem em fresamento de topo discordante, que serão abordados nas próximas subseções.

5.2.1 Determinação da Força de Fixação para o Caso 1

Neste caso, foram consideradas magnitudes de forças reais obtidas experimentalmente por Ribeiro *et al.* (2006) através de um dinamômetro piezelétrico instalado na mesa de um centro de usinagem com potência de 9 kW e rotação máxima de 10000 rpm. O dinamômetro foi configurado para registrar os esforços causados pelas forças de usinagem em fresamento de topo, decompostas em três eixos conforme apresentado pela Fig. (5.3). O ensaio foi realizado mediante a utilização de uma fresa de topo com haste de acoplamento com rosca, utilizando uma pastilha de corte GC4040 na usinagem de um tarugo de aço com propriedades similares ao do ABNT H13 e do DIN 1.2367, com velocidade de corte (V_c) de 370m/min, avanço por dente (f_z) de 0,25mm/aresta e profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm a seco (RIBEIRO *et al.*, 2006). Para este caso de fresamento, as componentes de força de usinagem se comportam de acordo com a Fig. (5.4) que, no entanto diferem da Fig. (5.2), evidenciando que cada tipo de fresamento possui diferentes direções de projeções das forças de usinagem. Outro fato importante é que as forças de usinagem são denominadas de forma diferente, mas que no entanto possuem o mesmo significado, assim como P_u ou F_u , P_t ou F_t , P_c ou F_c , P_{ap} ou F_{ap} , P_t ou F_t e P_a ou F_f .

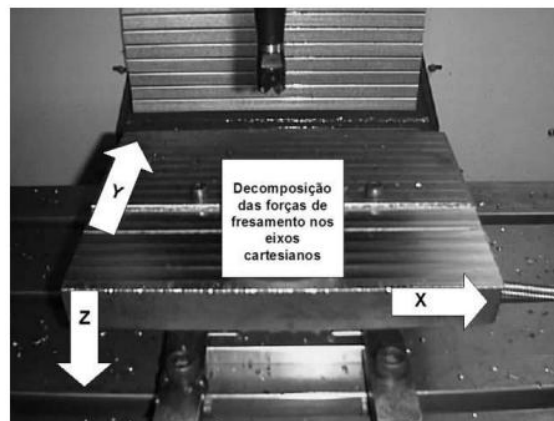


Figura 5.3. Decomposição das forças de fresamento no dinamômetro

Ribeiro *et al.*, 2006, p. 3

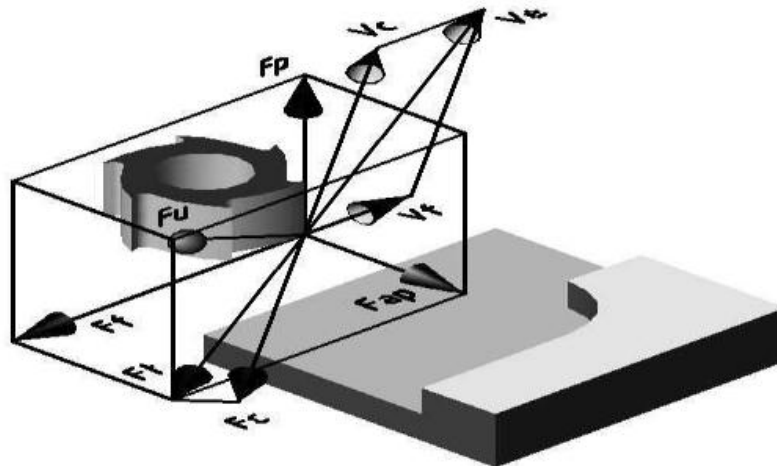


Figura 5.4. Decomposição da força de usinagem no fresamento de topo discordante
Ribeiro *et al*, 2006, p.3

A Figura. (5.5) apresenta os resultados de magnitude máxima das forças de usinagem projetadas nos eixos x, y, z obtidas experimentalmente por Ribeiro *et al* (2006), em que foram utilizadas para o cálculo da força de fixação de vácuo.

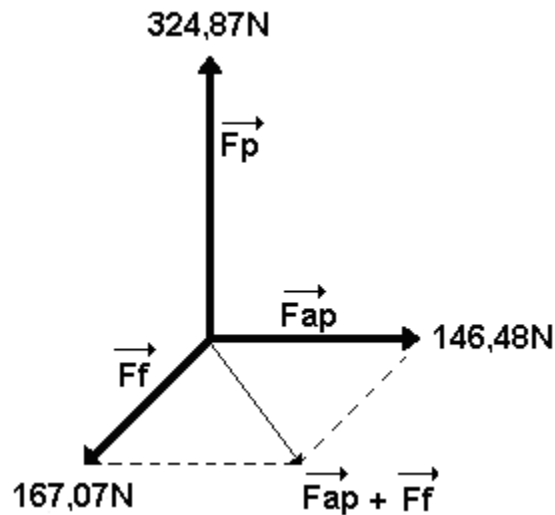


Figura 5.5. Magnitude das forças para o cálculo da força de fixação de vácuo (caso 1)

A Figura. (5.6) apresenta a resultante da força passiva (F_p ou P_p) responsável pelo movimento axial, e a resultante das forças de apoio (F_{ap} ou P_{ap}) e de avanço (F_f ou P_a) responsáveis pelo movimento transversal.

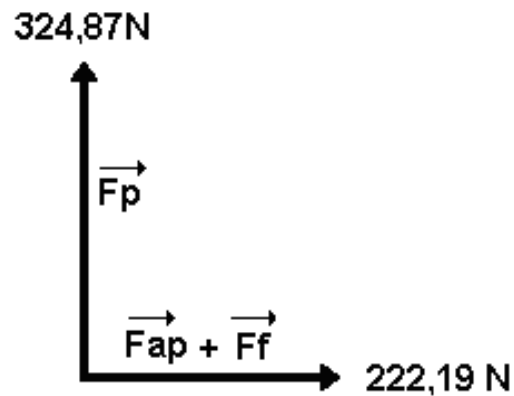


Figura 5.6. Resultantes axial e transversal durante a usinagem (caso 1)

Com base na Fig. (5.6), verificou-se que a força axial pode ser anulada por uma força de mesmo módulo e sentido contrário, e que a força transversal pode ser anulada pela força de atrito entre o material da mesa de vácuo e da peça a ser usinada, originada por uma força normal que está no mesmo sentido da força axial. Portanto, a força de atrito é dada por:

$$F_{at} = \mu \cdot N \quad (5.1)$$

Onde:

F_{at} - Força de atrito, que neste caso é igual a força transversal em (N)

μ - Coeficiente de atrito entre o par de materiais em contato

N - Força normal em (N)

Para o cálculo da força normal (N), foi admitido primeiramente que a mesa e a peça fossem de aço, e segundo Collins (2006) o valor típico do coeficiente de atrito estático entre o par de materiais aço-duro sobre aço-duro é de 0,45. A partir da Eq. (5.1) foi obtida uma força normal de 493,76N, representada pela Fig. (5.7).

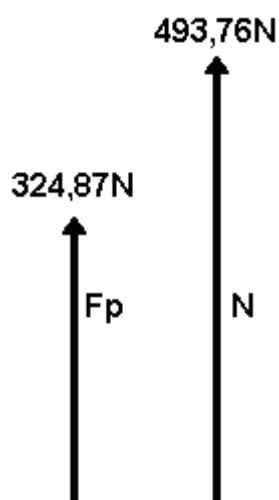


Figura 5.7. Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre aço-duro (caso 1)

As forças representadas pela Fig. (5.7) refletem somente a realidade das forças de usinagem, uma vez que a força peso da peça foi desconsiderada. Convém ressaltar que o fato de não considerar o peso da peça requer que força de fixação de vácuo necessária seja maior, o que contribui para uma maior garantia de fixação da peça. Portanto, a força de fixação de vácuo necessária deve ser no mínimo igual à somatória das forças passiva e normal totalizando 818,63 N, sendo que em sentido contrário. Mas, admitindo um coeficiente de segurança 1,5 que prevê vazamentos no sistema de vácuo e má vedação entre a peça e a mesa, assim como flutuações das forças de usinagem, a força de fixação de vácuo corrigida deve ter uma magnitude de 1227,95 N. Para a determinação da área de contato de vácuo, foi aplicada a Eq. (2.1), sendo consideradas a força de fixação de vácuo corrigida e mais a pressão de vácuo necessária. Foi adotada uma pressão de vácuo necessária de 100 kPa (1000 mbar) ou pressão absoluta de 13,25 mbar, em função das bombas de baixo vácuo apresentarem estabilidade de vazão nesta faixa de pressão, uma vez que as elas podem chegar a uma pressão absoluta de 1 mbar ou menos. Portanto, com a aplicação da Eq. (2.1) foi obtida uma área de contato de vácuo de $0,0122 \text{ m}^2$ que equivale a uma área quadrada com dimensões laterais de aproximadamente $110 \times 110 \text{ mm}$. Neste caso, a diferença de pressão criada pelo sistema de vácuo e aplicada na determinada área de vácuo, geram a força de vácuo corrigida, uma vez que a pressão atmosférica irá agir sobre a peça, empurrando-a contra a mesa de vácuo. A área de contato de vácuo é

garantida através de um rebaixo de 2 mm existente na superfície da placa superior da mesa de vácuo de forma a criar uma pequena câmara entre a mesa e a peça que é delimitada por um perímetro de contato das gaxetas, que funciona como dispositivo de vedação semelhante a uma ventosa (PAIVA *et al*, 2010). Para um contato direto entre a mesa e a peça ao longo de toda sua extensão sem a utilização do rebaixo, a força de fixação seria prejudicada, sabendo que área de contato de vácuo seria teoricamente menor, e de difícil determinação, devido à rugosidade superficial das superfícies em contato da mesa e da peça. Com isso, a área de contato de vácuo ficaria limitada a somatória das áreas dos furos juntamente com as imperfeições das superfícies. Outro fato importante segundo Mossmann *et al.* (2002) é que a lei do atrito afirma que a força de atrito é independente da área de contato entre materiais, sendo nesta situação, dependente dos tipos de materiais usados pela mesa e peça e da força de fixação de vácuo. A Figura. (5.8) apresenta a placa superior da mesa de vácuo em corte ressaltando a sua geometria definida, através da influência do rebaixo para geração da força de fixação, assim como a importância da gaxeta como dispositivo de vedação.

Com base nos cálculos realizados anteriormente com relação à força de fixação de vácuo corrigida e área de contato de vácuo, foram determinadas algumas dimensões em (mm) da superfície superior da mesa de vácuo conforme a Fig. (5.9) para o par de materiais aço-duro sobre aço-duro da peça e mesa respectivamente. Verificou-se que a peça a ser usinada deve ter uma forma espacial paralelepípeda com dimensões laterais suficientes para ultrapassar a área delimitada pelas gaxetas, que compreende no mínimo 130 x 130 mm, ressaltando a planeza assim como a ausência de furos passantes, e altura bem menor que o comprimento de 130 mm, evitando a ação de momentos fletores suficientes a rotacionar a peça. As gaxetas escolhidas são de grafite flexível com seção quadrada de 3,175 mm (1/8") que suportam pressões de até 30 bar. Foram admitidos espessura da placa superior com 5 mm dotada de quatro furos com diâmetro de 4 mm. A próxima seção completa a mesa de vácuo, em que a placa superior é sustentada por paredes formando uma câmara de vácuo.

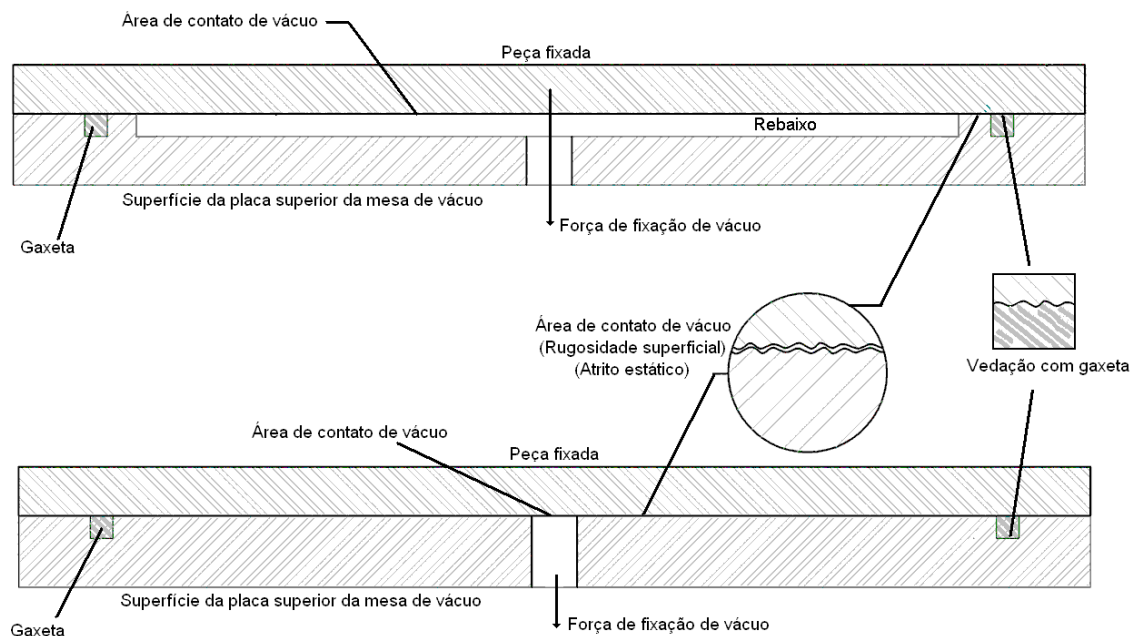


Figura 5.8. Influência da geometria da superfície da placa superior da mesa de vácuo

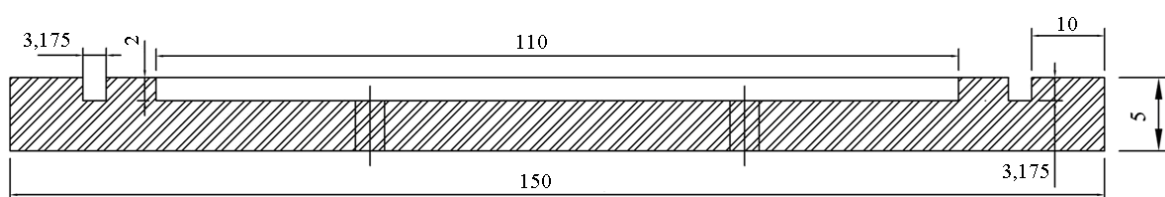


Figura 5.9. Dimensões da placa superior da mesa em aço (caso 1)

Para verificar a influência dos materiais na força de fixação e nas dimensões laterais da placa superior da mesa de vácuo, o alumínio foi admitido como material da mesa que deve fixar a mesma peça de aço submetida às mesmas forças de usinagem apresentadas na Fig. (5.6), assim como a utilização da mesma metodologia de projeto citada anteriormente para aço-duro sobre aço-duro.

Para o cálculo da força normal (N), Collins (2006) define 0,61 como valor típico do coeficiente de atrito estático entre o par de materiais aço-duro sobre alumínio. A partir da Eq. (5.1) foi obtida uma força normal de 364,25N, representada pela Fig. (5.10). A força de fixação de vácuo necessária deve ser no mínimo igual à somatória das forças passiva e normal, totalizando 689,12 N. Mas admitindo o coeficiente de segurança 1,5, a força de

fixação de vácuo corrigida deve ter uma magnitude de 1033,68 N. Aplicando a Equação. (2.1) para uma pressão de vácuo 100 kPa e força de fixação de vácuo de 1033,68 N, foi obtido uma área de contato de vácuo de $0,01034 \text{ m}^2$ que equivale a uma área quadrada com dimensões laterais de aproximadamente $100 \times 100 \text{ mm}$. A Figura. (5.10) apresenta as dimensões da placa superior da mesa de vácuo.

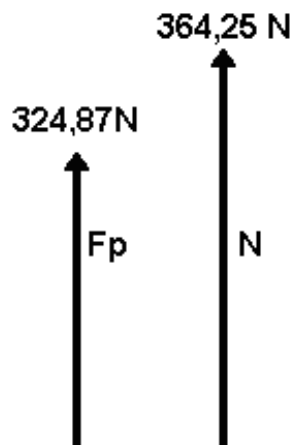


Figura 5.10. Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre alumínio (caso 1)

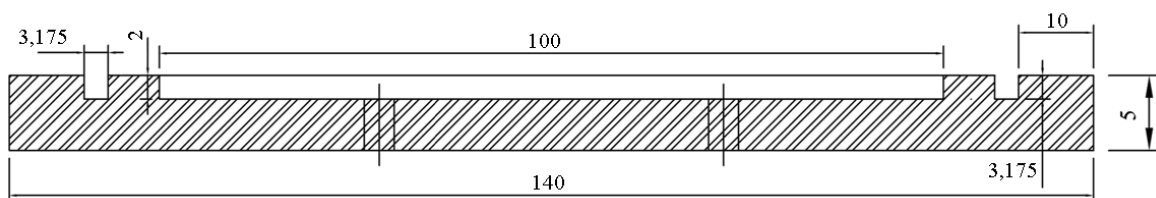


Figura 5.11. Dimensões da placa superior da mesa em alumínio (caso 1)

Com base na Fig. (5.8) e Fig. (5.10), foi observado que as dimensões da placa superior da mesa de vácuo variam de acordo com o tipo de material empregado na mesa e na peça considerando as mesmas forças de usinagem e pressão de vácuo. Portanto, o coeficiente de atrito tem impacto direto na magnitude de força de fixação de vácuo necessária e conseqüentemente nas dimensões da mesa. Observa-se que estas grandezas diminuem à medida que o coeficiente de atrito entre o material da mesa e da peça fixada aumenta.

5.2.2 Determinação da Força de Fixação para o Caso 2

Para verificar a influência da força de usinagem na força de fixação de vácuo e conseqüentemente nas dimensões da mesa, foram consideradas outras magnitudes de forças reais em fresamento de topo investigadas por Banin Jr (2009).

Banin jr (2009) utilizou o mesmo princípio para a medição de esforços de usinagem utilizados por Ribeiro *et al.* (2006), por meio de um dinamômetro no qual registrou os esforços em operação de acabamento causados por uma fresadora de topo na usinagem de um aço SAE 4340. Neste experimento, foi utilizada uma fresadora vertical convencional de rotação máxima de 6.000 rpm e avanço rápido de 1.500 mm/min. A Figura. (5.12) apresenta a magnitude de forças resultantes do processo de usinagem com velocidade de corte (V_c) 150 m/min, avanço por dente (f_z) de 0,05 mm/aresta e profundidade de corte (a_p) de 0.08 mm, utilizando uma pastilha de corte da classe GC 4020 HC a seco. A Figura. (5.13) apresenta as resultantes axial e transversal.

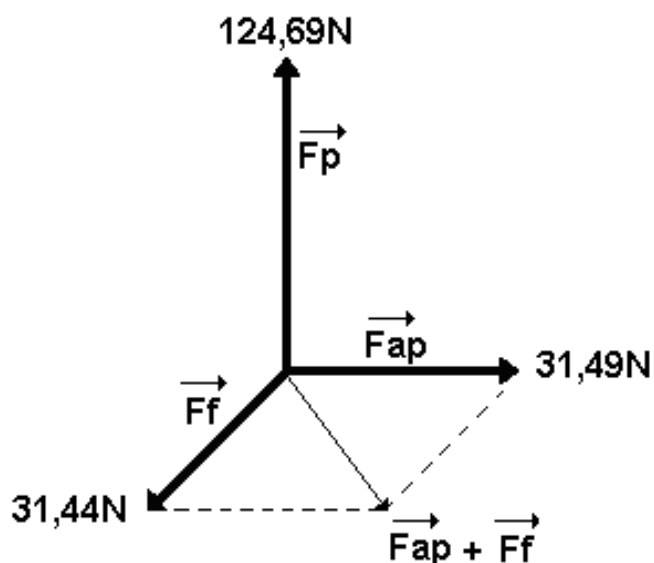


Figura 5.12. Magnitude das forças para o cálculo da força de fixação de vácuo (caso 2)

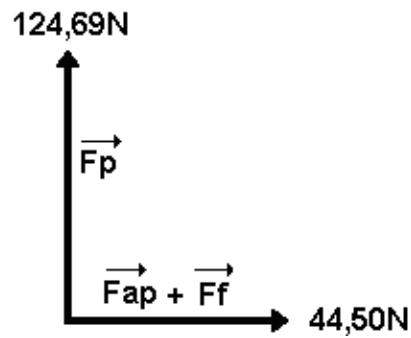


Figura 5.13. Resultantes axial e transversal durante a usinagem (caso 2)

Utilizando a mesma metodologia aplicada no caso 1, a Fig. (5.14) apresenta as magnitudes das forças axiais para o par aço-duro sobre aço-duro.

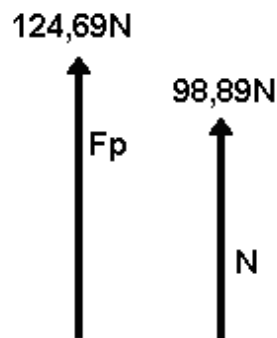


Figura 5.14. Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre aço-duro (caso 2)

Portanto, a força de fixação de vácuo corrigida deve ter uma magnitude de 335,37 N, aplicada em uma área de contato de vácuo com dimensões laterais de aproximadamente 58 x 58 mm, conforme apresenta pela Fig. (5.15).

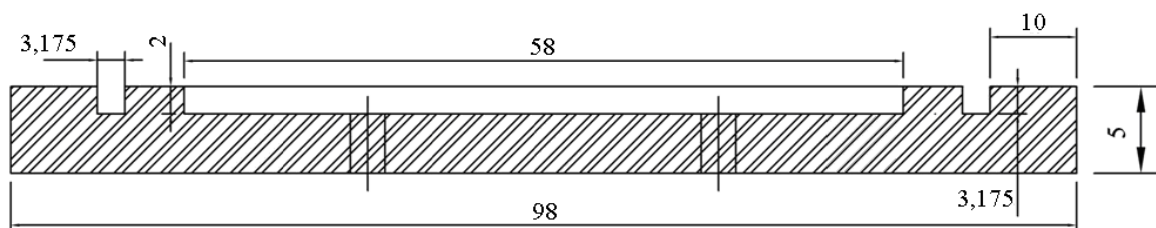


Figura 5.15. Dimensões da placa superior da mesa em aço (caso 2)

Utilizando o par de materiais aço-duro sobre alumínio, a Fig. (5.16) apresenta as magnitudes das forças axiais.

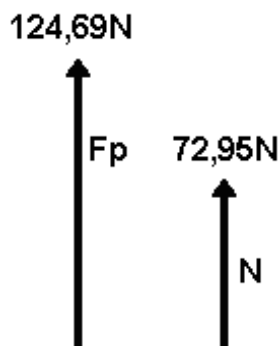


Figura 5.16. Magnitude das forças axiais para o par aço-duro sobre alumínio (caso 2)

Portanto, a força de fixação de vácuo corrigida deve ter uma magnitude de 296,46 N, aplicada em uma área de contato de vácuo com dimensões laterais de aproximadamente 54 x 54 mm, conforme apresenta pela Fig. (5.17).

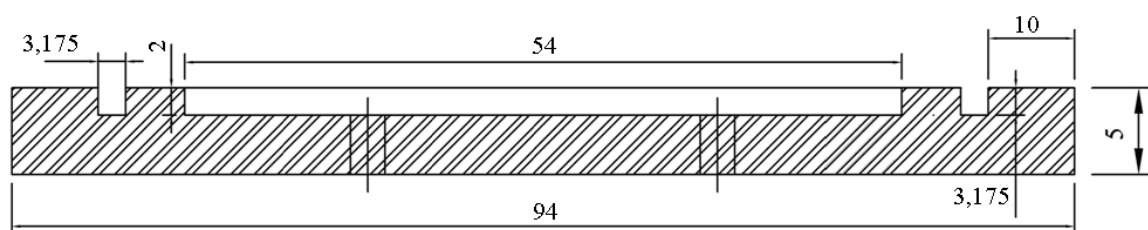


Figura 5.17. Dimensões da placa superior da mesa em alumínio (caso 2)

Com base nos resultados do caso 2 em relação ao caso 1, foi observado que a força de usinagem também tem um impacto direto na força de fixação de vácuo, e conseqüentemente, nas dimensões da mesa de vácuo. A tabela. (5.1) apresenta o resumo geral dos resultados obtidos, nos quais totalizaram quatro dimensões mesas de vácuo.

Tabela 5.1 – Dimensões das mesas de vácuo

Força resultante de usinagem	Material da mesa	Força de vácuo necessária	Força de vácuo corrigida	Dimensões laterais de contato de vácuo	Dimensões laterais da superfície da placa superior
Caso 1 (393,58 N)	Aço $\mu = 0,45$	818,63 N	1227,95 N	110 x 110 mm	150 x 150 mm
	Alumínio $\mu = 0,61$	689,12 N	1033,68 N	100 x 100 mm	140 x 140 mm
Caso 2 (132,39 N)	Aço $\mu = 0,45$	223,58 N	335,37 N	58 x 58 mm	98 x 98 mm
	Alumínio $\mu = 0,61$	197,64 N	296,46 N	54 x 54 mm	94 x 94 mm

A próxima subseção aborda o projeto e desenvolvimento total das mesas de vácuo através de simulação computacional, evidenciando a magnitude dos esforços e relação de rigidez/peso em diferentes geometrias e forças de usinagem.

5.3 DESENVOLVIMENTO E PROJETO DAS MESAS DE VÁCUO (FASE 2)

A partir dos resultados obtidos pela Tab. (5.1) que totaliza quatro dimensões de mesas de vácuo, para cada uma delas, foram avaliados os esforços de deslocamento e tensão, e a relação de rigidez/peso da mesa em três geometrias internas diferentes para determinar qual apresenta o melhor desempenho para cada situação. Os resultados dos esforços foram obtidos por simulação numérica computacional através do pacote NX 7.0¹ que reúne um conjunto de aplicativos CAD, CAE e CAM, juntamente com a ferramenta de análise de elementos finitos NASTRAN. Segundo Leu & Joshi, ele acelera o desenvolvimento de produtos no mercado atendendo a empresas de pequeno a grande porte. Este software integra os princípios de conhecimento de design de produtos industrial, modelagem geométrica, análise avançada de simulação gráfica e engenharia simultânea.

¹ NX 7.0 - SIEMENS

Neste trabalho, o NX 7.0 teve papel fundamental na modelagem e análise, uma vez que uma solução analítica seria inviável, mediante a complexidade geométrica da mesa e de esforços, assim como variações de vários parâmetros e velocidade de operação. As próximas subseções apresentam o projeto e desenvolvimento das mesas de vácuo.

5.3.1 Mesa de vácuo de 150 x 150 mm

A partir das dimensões iniciais definidas para esta mesa segundo a Fig. (5.9), a Fig. (5.18) apresenta a mesa de vácuo em sua totalidade desenhada no NX 7.0.

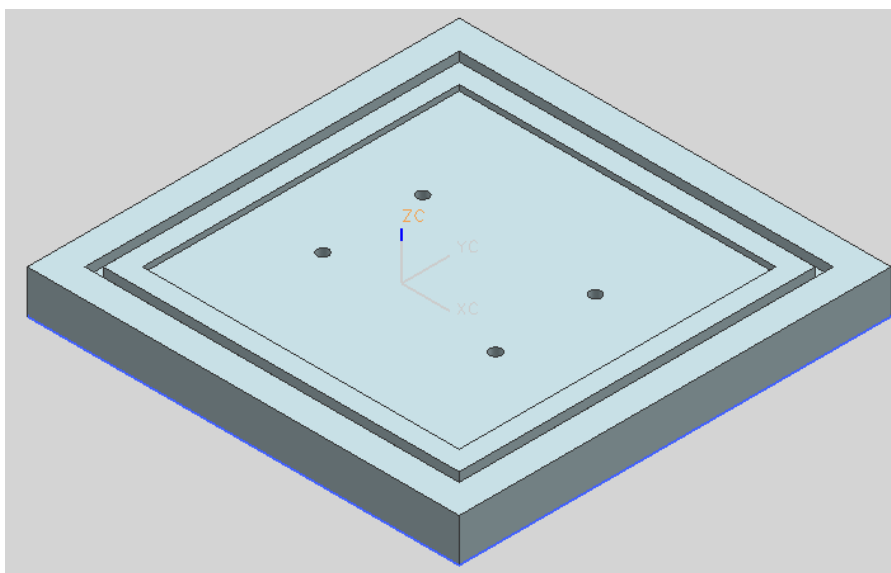


Figura 5.18. Mesa de vácuo de 150 x 150 mm

A placa superior da mesa de vácuo com 5 mm de espessura foi apoiada em paredes laterais com altura de 10 mm, totalizando os 15 mm de altura total. Para melhor efeito de visualização dos resultados com relação ao deslocamento, tensão e geometria interna, não foram admitidos, a placa inferior da mesa de vácuo e o furo da tubulação do sistema de vácuo, uma vez que serão utilizados como condição de contorno de engastamento.

Para investigar os efeitos da geometria do núcleo da mesa de vácuo, sobre as deformações e tensões que a mesa está submetida, foram considerados três tipos de geometrias para o núcleo da mesa; vazado, quadrado e hexagonal. Foi admitido

inicialmente uma mesa de vácuo com geometria interna vazada, na qual está apresentada pela Fig. (5.19).

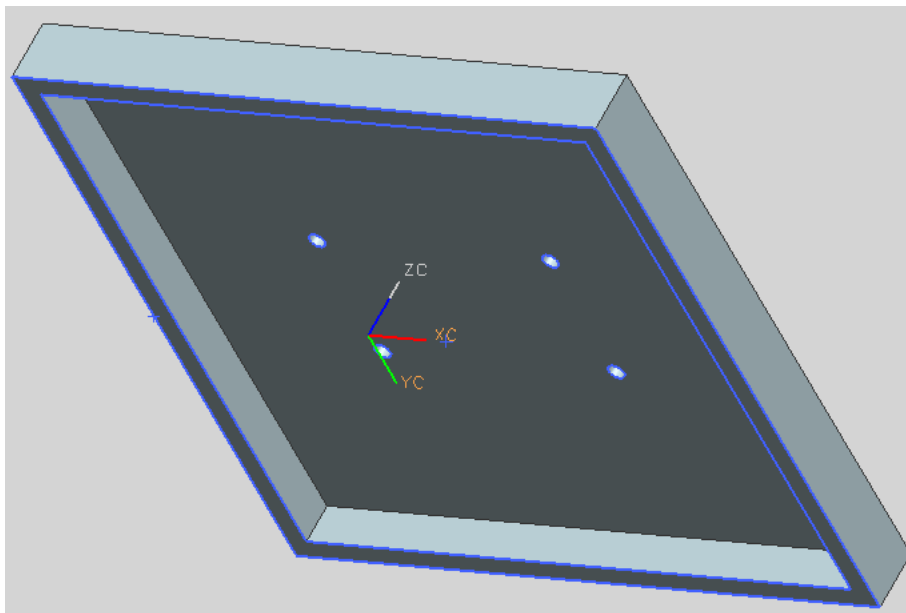


Figura 5.19. Mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado

A partir do desenho finalizado, foi aplicado o método dos elementos finitos (MEF) 3D com geometria tetraedro definido por 10 nós em material isotrópico sólido. A quantidade de elementos bem como as suas dimensões são definidas automaticamente pelo NX 7.0 como otimização de malha. A Figura. (5.20) apresenta a mesa de vácuo com a MEF aplicada. O material de aço escolhido foi o AISI 1005.

Como condições de contorno de simulação aplicadas no NX 7.0, a face inferior da mesa foi submetida à engastamento com nenhum grau de liberdade, e as vinte faces restantes (laterais e geometria da face superior) foram submetidas a uma diferença de pressão distribuída de 100 kPa sem nenhuma condição de engastamento, e não foi considerada a tensão térmica gerada pelo vácuo.

A Figura. (5.21) apresenta as condições de contorno, e a Fig. (5.22) e Fig. (5.23) apresentam os resultados finais de simulação calculadas pelo NASTRAN a partir das equações de condições de contorno geradas pelo NX 7.0, que compreendem respectivamente o deslocamento máximo da mesa e a máxima tensão pelo critério de Von-Mises que foi adotado em todas as análises de tensões.

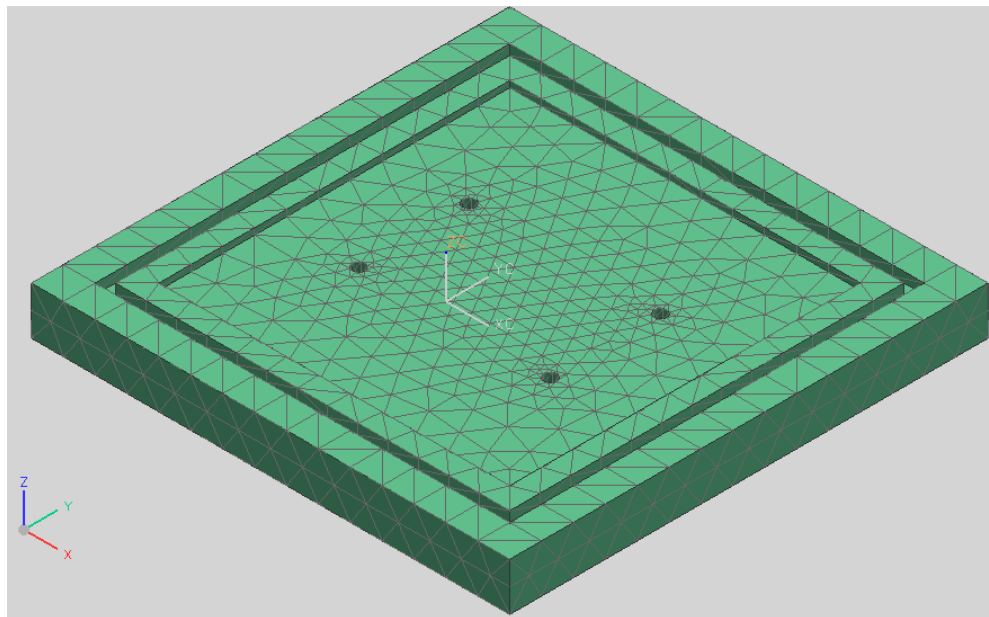


Figura 5.20. Mesa de vácuo com MEF aplicada

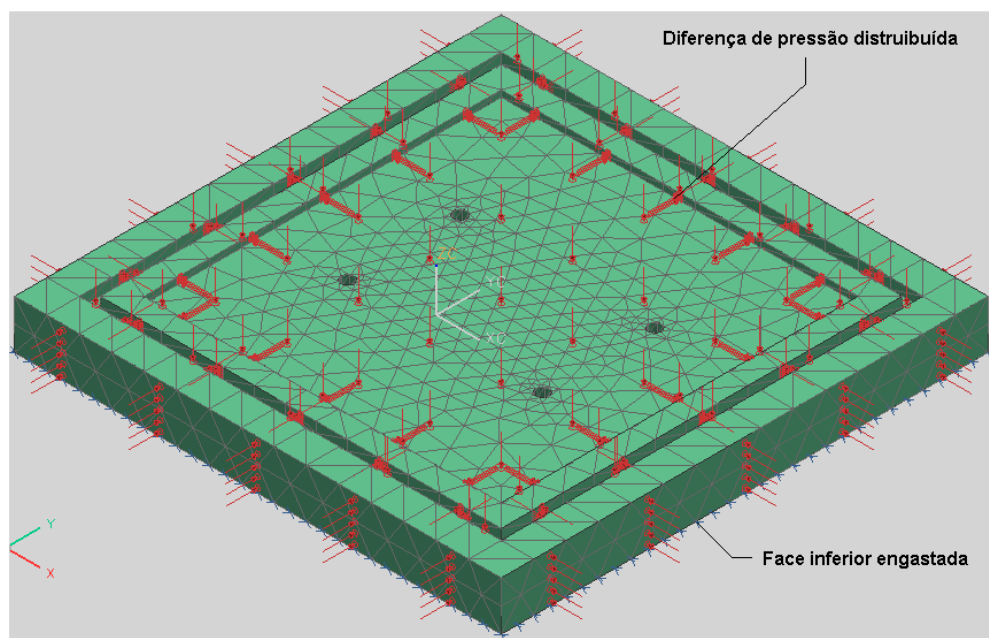


Figura 5.21. Condições de contorno com base engastada e diferença de pressão de 100 kPa

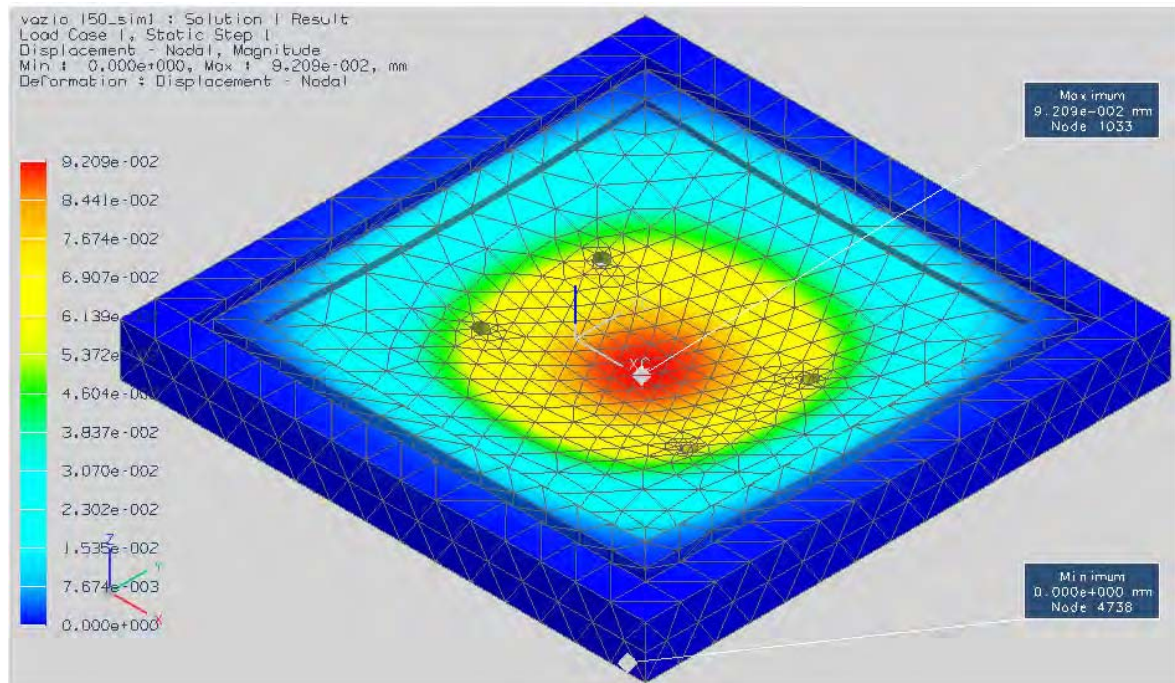


Figura 5.22. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005

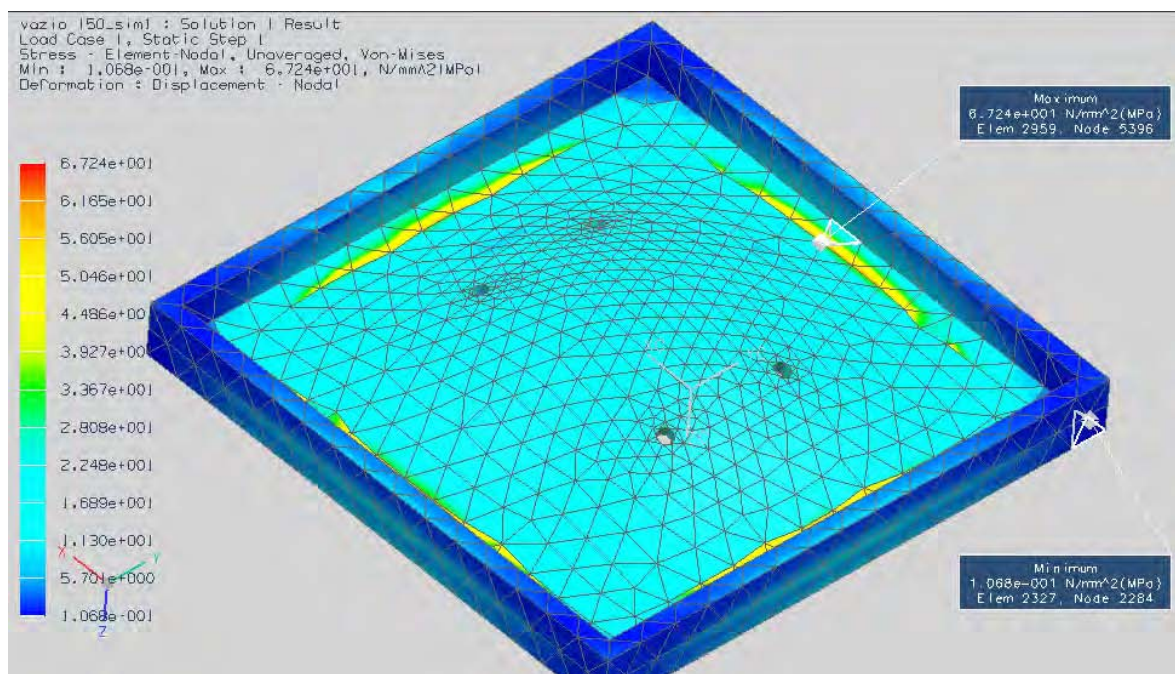


Figura 5.23. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005

De acordo com os resultados obtidos, foi observado que o centro da mesa de vácuo obteve um maior deslocamento, com magnitude de $9,209 \times 10^{-2}$ mm. A máxima tensão de 67,240 MPa foi desenvolvida após o rasgo da gaxeta na parte inferior da placa superior da mesa. Como o aço AISI 1005 possui o limite de tensão de escoamento de 226 MPa, este se encontra com um fator de segurança de 3,361.

Para a geometria de núcleo quadrado, foi admitida a mesma mesa de vácuo apoiada em quadrados conforme a Fig. (5.24).

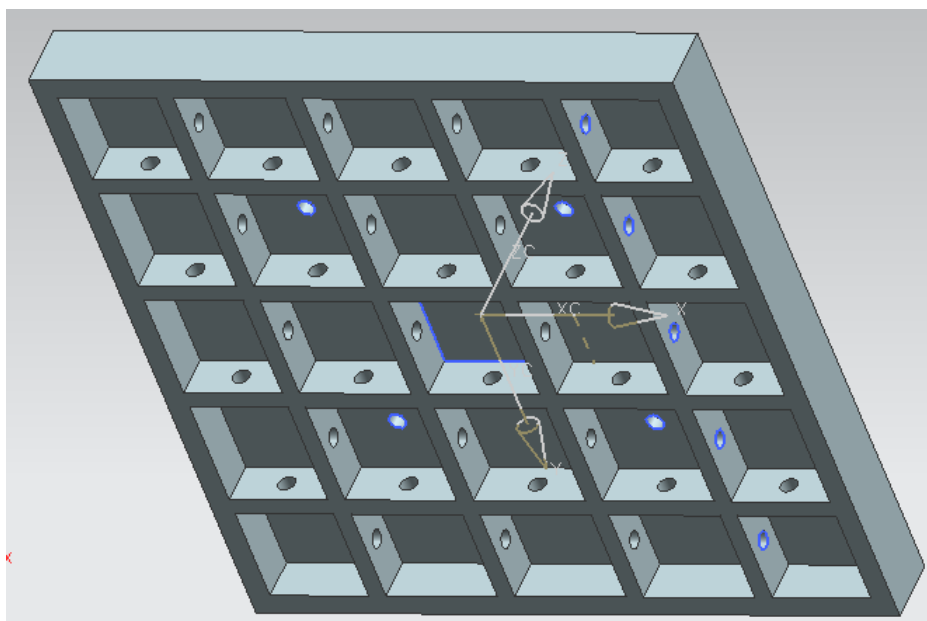


Figura 5.24. Mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado

Foi considerada uma geometria em que cada quadrado tem um perímetro externo de 120 mm com espessura de 2 mm. Cada quadrado possui um furo em cada lado com diâmetro de 4 mm no intuito de facilitar a homogeneização do vácuo através da melhor distribuição do fluxo do ar. A etapa de simulação que compreende as condições de contorno, são as mesmas da simulação anterior assim como a especificação da MEF. A Figura. (5.25) e Fig. (5.26) apresentam os resultados. Conforme os resultados obtidos, foi observado que o furo da mesa de vácuo apresentou maior deslocamento com $2,160 \times 10^{-4}$ mm e a máxima tensão de 2,499 MPa foi desenvolvida na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 90,436.

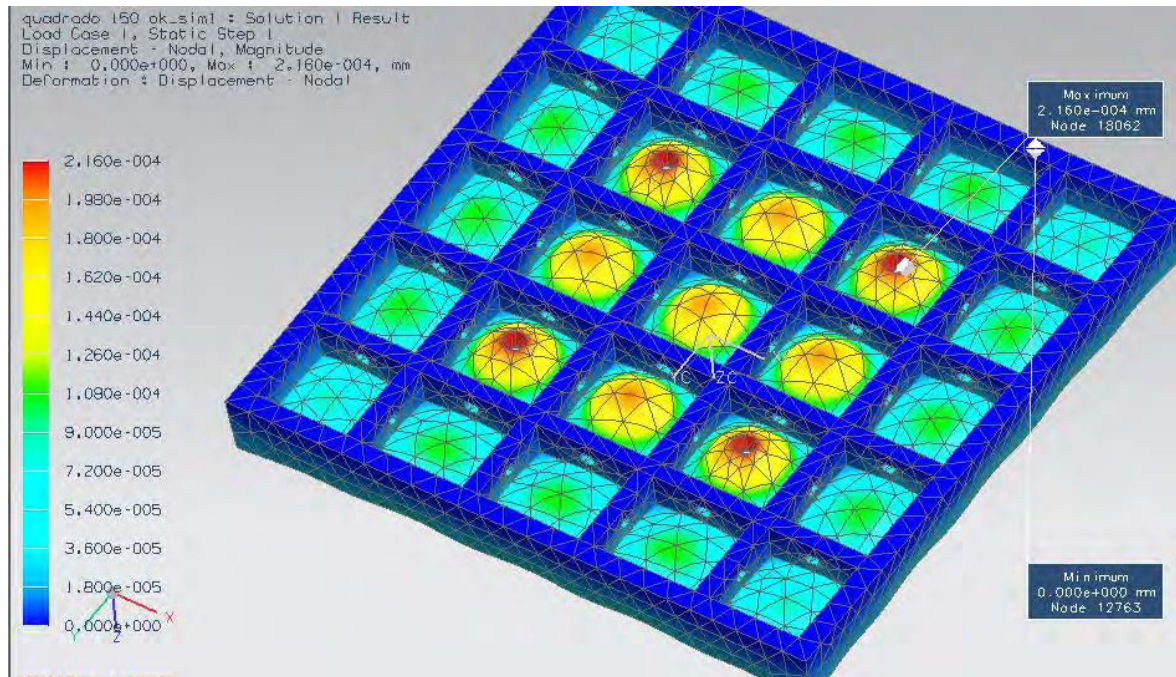


Figura 5.25. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005

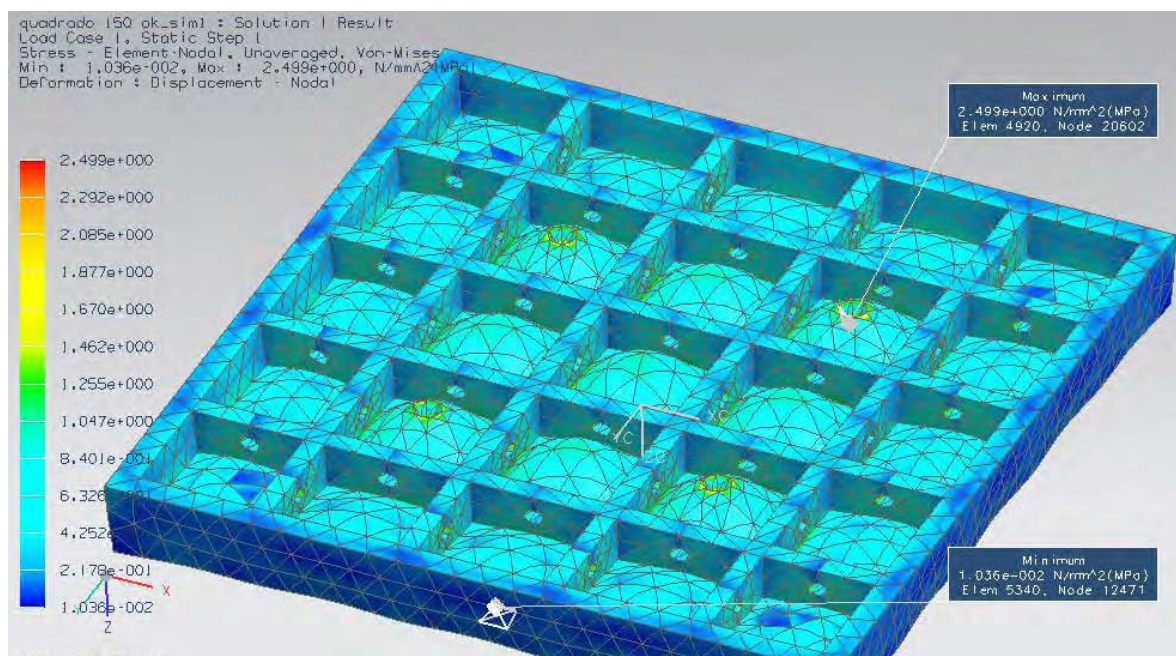


Figura 5.26. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005

Para uma mesa com núcleo hexagonal (colméia), foi admitido para cada hexágono o mesmo perímetro externo de 120 mm e espessura de 2 mm utilizado pelo núcleo quadrado, assim como o diâmetro de 4 mm dos furos em cada lado conforme a Fig. (5.27).

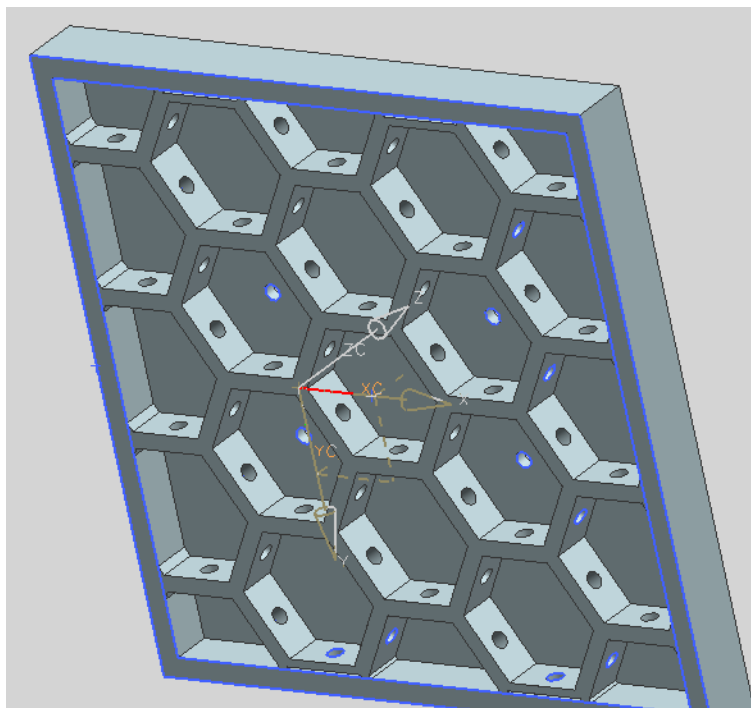


Figura 5.27. Mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal (colméia)

Utilizando as mesmas condições de contorno anteriores, a Fig. (5.28) e Fig. (5.29) apresentam os resultados da simulação. Conforme os resultados obtidos, foi observado que o furo da mesa de vácuo apresenta maior deslocamento com $3,292 \times 10^{-4}$ mm e a máxima tensão de 3,239 MPa foi desenvolvida na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 69,774.

Esta mesma metodologia para o desenvolvimento e projeto de mesas de vácuo com núcleo vazado, quadrado e hexagonal serão aplicados igualmente nas próximas subseções, incluindo as mesmas condições de contorno de simulação. As paredes laterais terão a mesma altura total de 15 mm e espessura de 5 mm assim como os diâmetros dos furos com 4 mm. As espessuras de 2 mm para as paredes do núcleo quadrado e hexagonal também serão as mesmas, e os perímetros irão se adequar de acordo com a redução da mesa de vácuo.

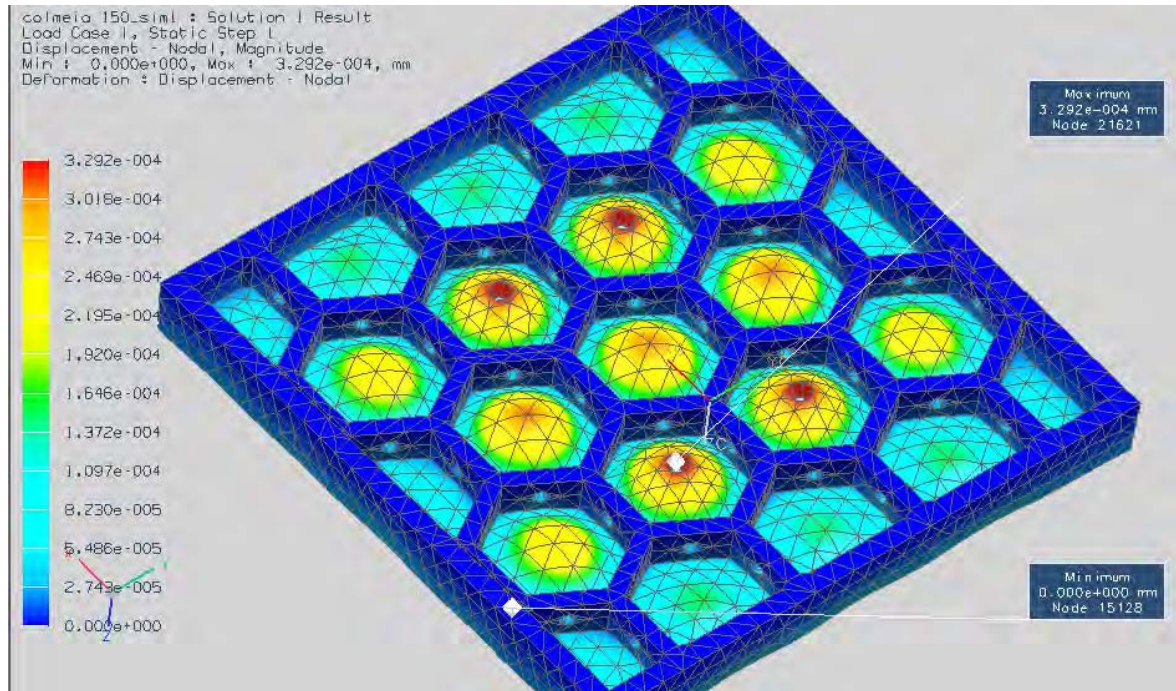


Figura 5.28. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para aço AISI 1005

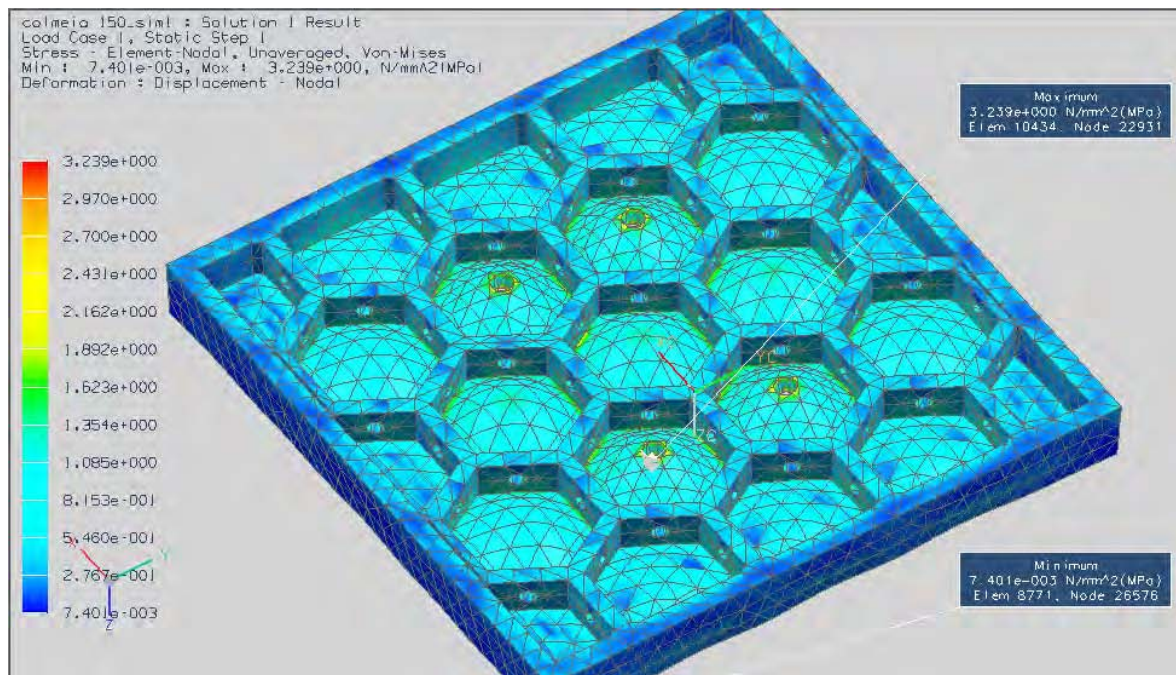


Figura 5.29. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para aço AISI 1005

5.3.2 Mesa de vácuo de 140 x 140 mm

Para uma mesa de vácuo com 140 x 140 mm de alumínio 2014 com núcleo vazado, os resultados de simulação são apresentados pela Fig. (5.30) e Fig. (5.31).

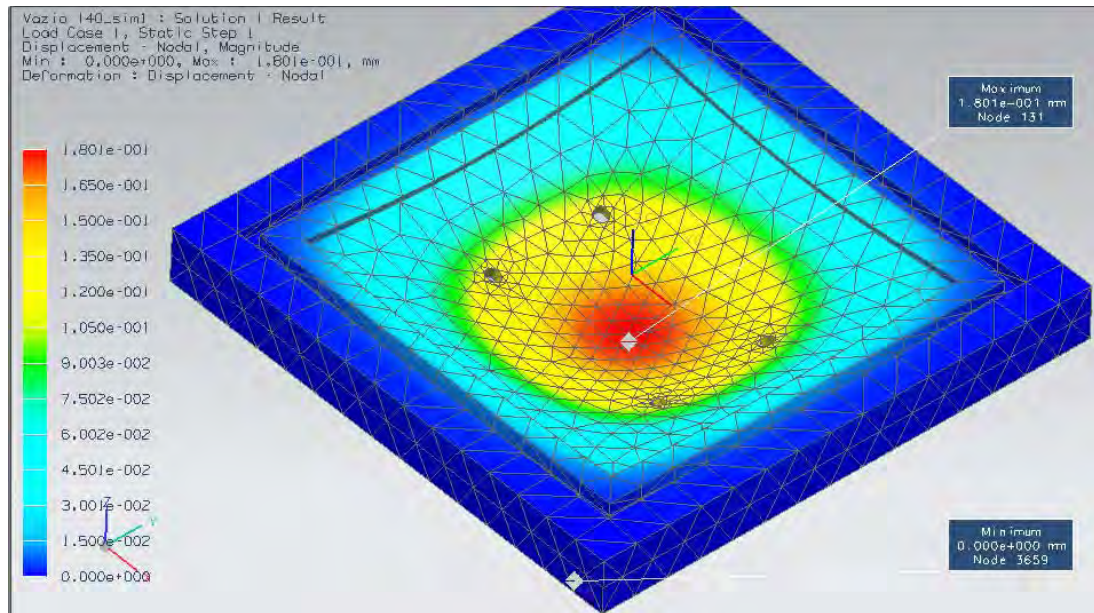


Figura 5.30. Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo vazado para alumínio 2014

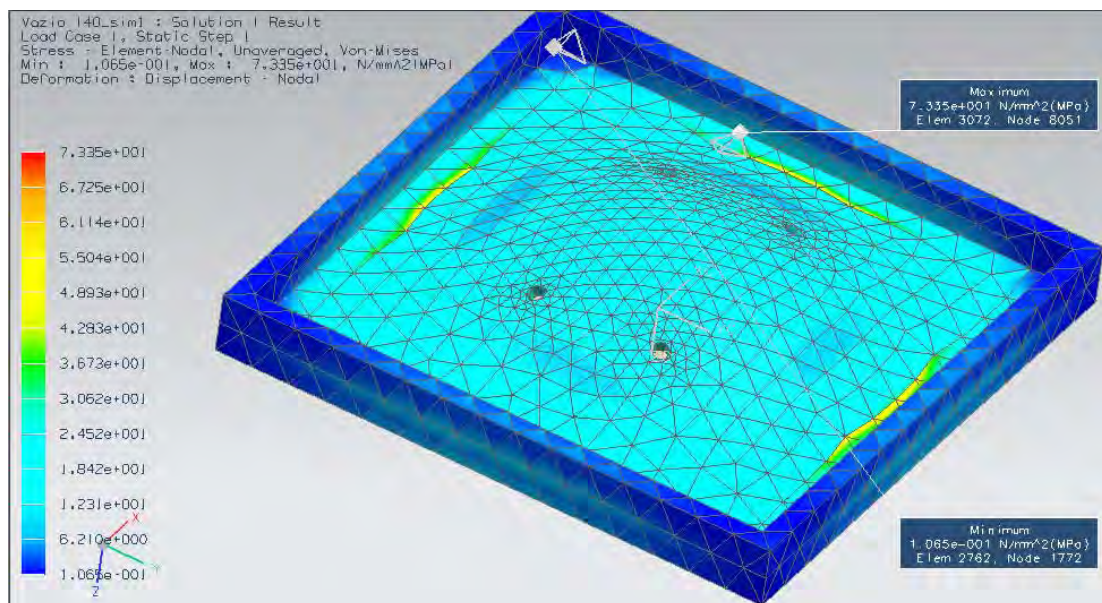


Figura 5.31. Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo vazado para alumínio 2014

O máximo deslocamento de $1,801 \times 10^{-1}$ mm foi encontrado no centro da mesa de vácuo e a máxima tensão de 73,350 MPa foi desenvolvida no início do rasgo da gaxeta, apresentando um coeficiente de segurança de 4,550 uma vez que o limite de escoamento para o alumínio 2014 é de 333,762 MPa.

Para o núcleo quadrado, o perímetro externo foi calculado a partir da razão entre a dimensão lateral da área de vácuo e o perímetro do quadrado admitido anteriormente para a mesa de 150 x 150 mm. Desse modo, a razão de 0,916666 determina de quanto o perímetro do novo quadrado será reduzido, com isso, para a mesa de 140 x 140 mm que possui dimensão de área lateral de vácuo de 100 mm, o novo perímetro do quadrado será de 109,09 mm. A Figura. (5.32) apresenta a mesa de vácuo de 140 x 140 mm com os quadrados de perímetro reduzido.

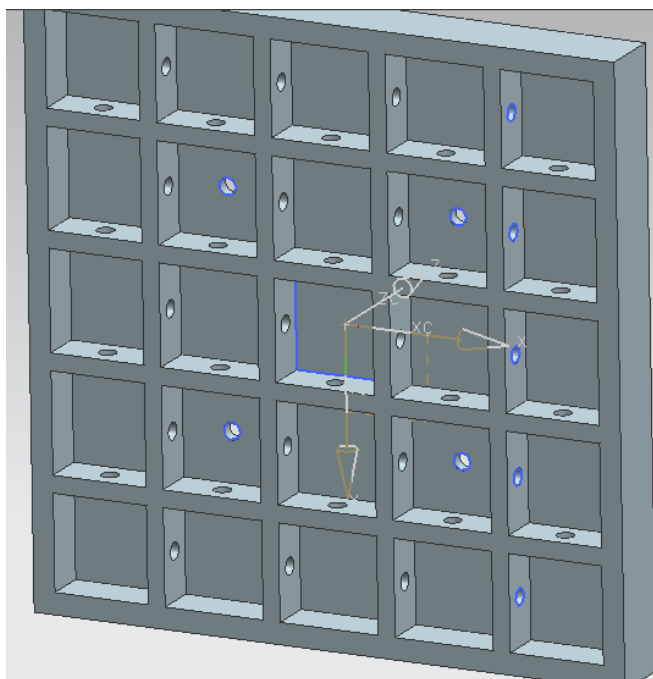


Figura 5.32. Mesa de 140 x 140 mm com núcleo quadrado

A Figura. (5.33) e Fig. (5.34) apresentam os resultados da simulação, em que mostram um deslocamento máximo de $4,080 \times 10^{-4}$ mm no furo, e tensão máxima de 2,213 MPa na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 150,818.

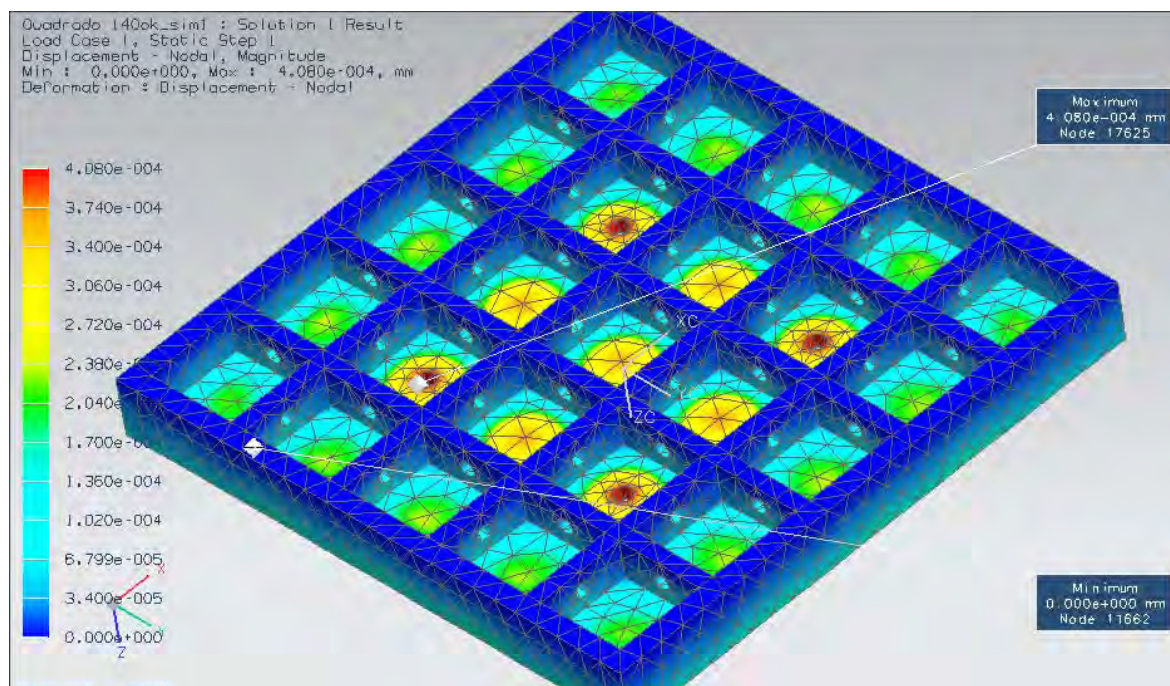


Figura 5.33. Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

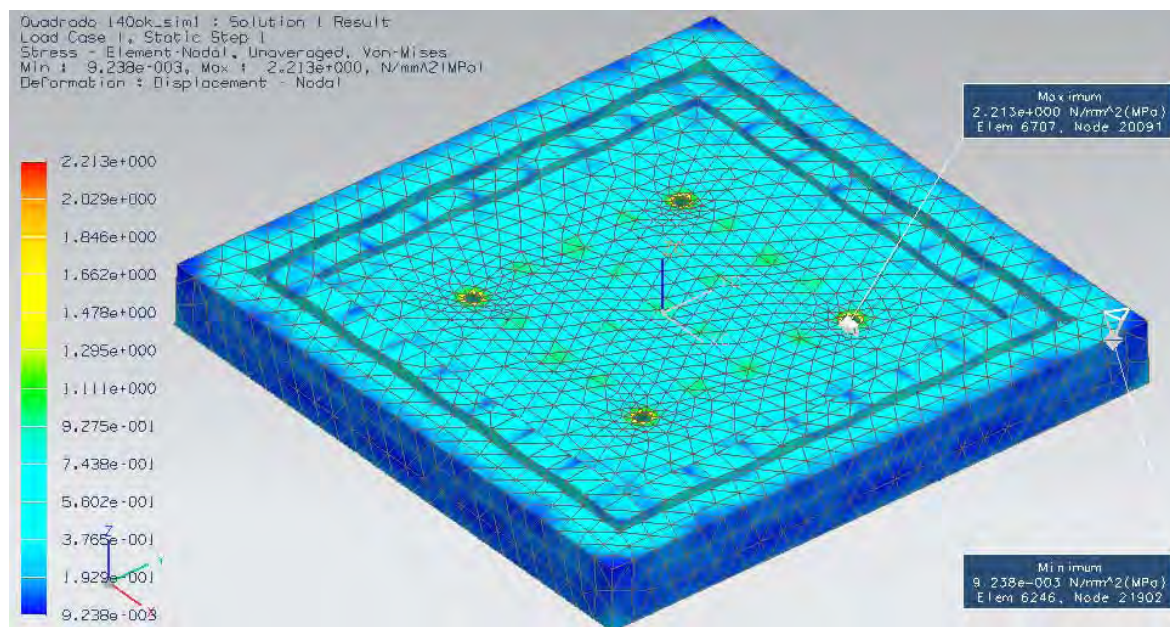


Figura 5.34. Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

Para o núcleo hexagonal utilizando o perímetro de 109,09 mm, a Fig. (5.35) e Fig. (5.36) apresentam os resultados.

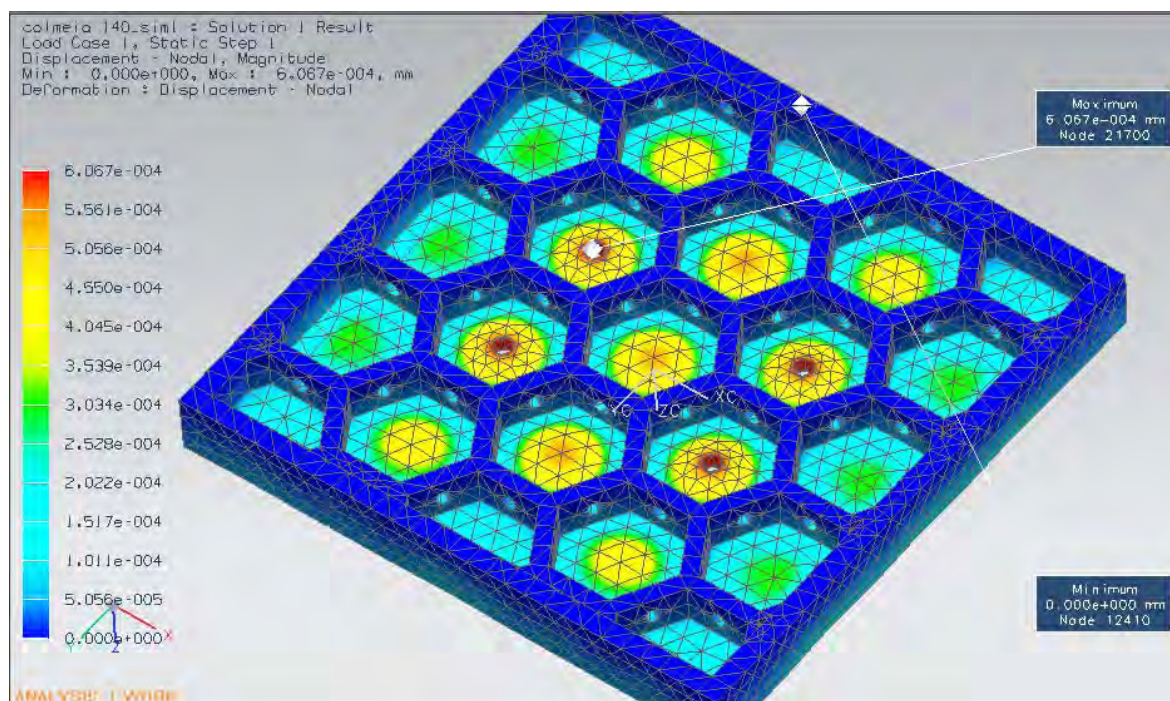


Figura 5.35. Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

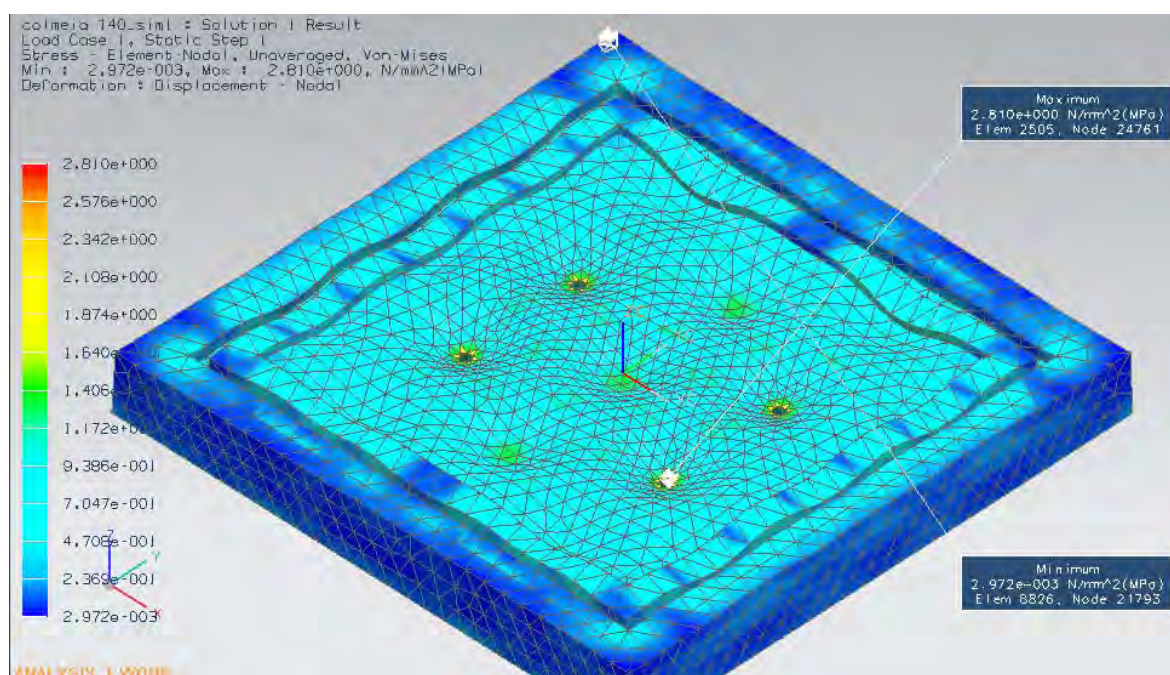


Figura 5.36. Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

Os resultados da simulação mostram um deslocamento máximo de $6,067 \times 10^{-4}$ mm no furo, e tensão máxima de 2,810 MPa na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 118,776.

5.3.3 Mesa de vácuo de 98 x 98 mm

Para uma mesa de vácuo com 98 x 98 mm de aço AISI 1005 com núcleo vazado, os resultados de simulação são apresentados pela Fig. (5.37) e Fig. (5.38). O máximo deslocamento de $1,385 \times 10^{-2}$ mm foi encontrado no centro da mesa de vácuo e a máxima tensão de 20,610 MPa foi desenvolvida na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 10,966.

Para uma mesa de vácuo com núcleo quadrado utilizando um perímetro externo de 63,27 mm, a Fig. (5.39) e Fig. (5.40) apresentam os resultados. O máximo deslocamento de $2,837 \times 10^{-5}$ mm foi encontrado na região entre os dois furos e a máxima tensão de 0,769 MPa foi desenvolvida no furo lateral do quadrado, apresentando um coeficiente de segurança de 293,888.

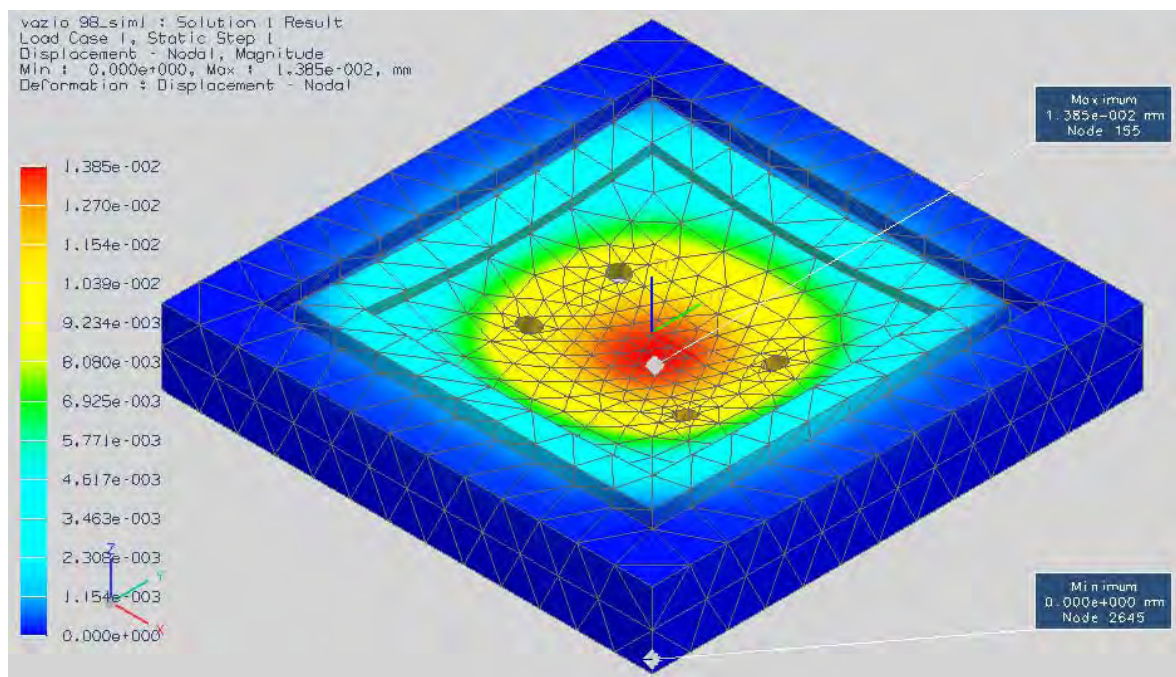


Figura 5.37. Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005

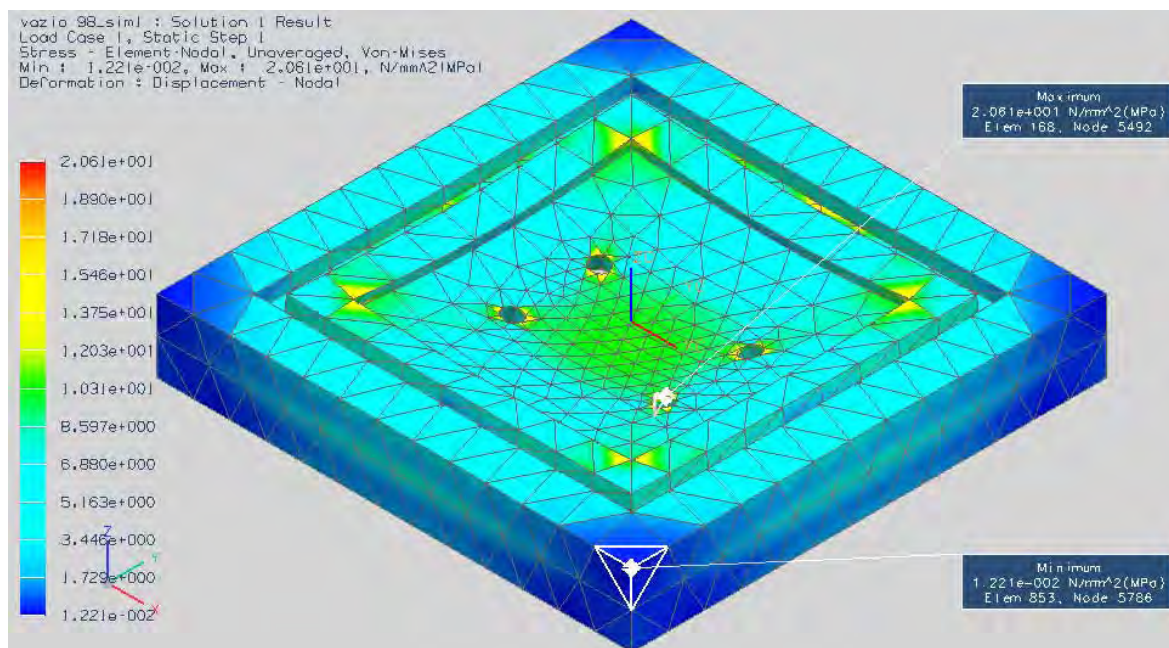


Figura 5.38. Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo vazado para aço AISI 1005

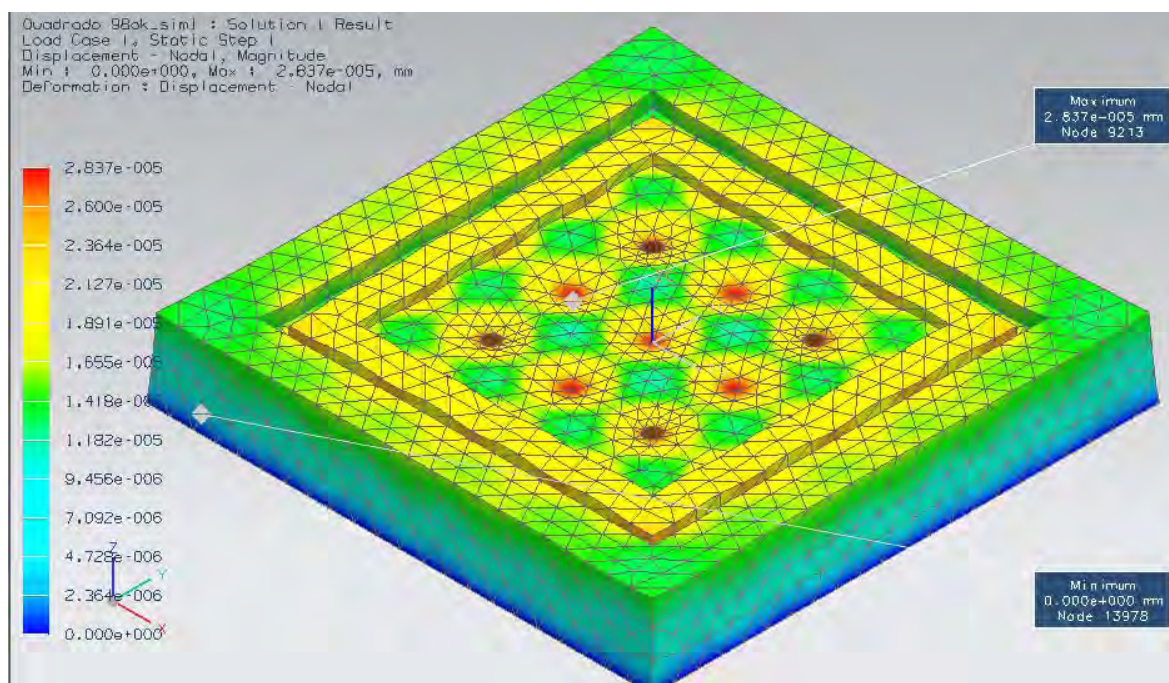


Figura 5.39. Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005

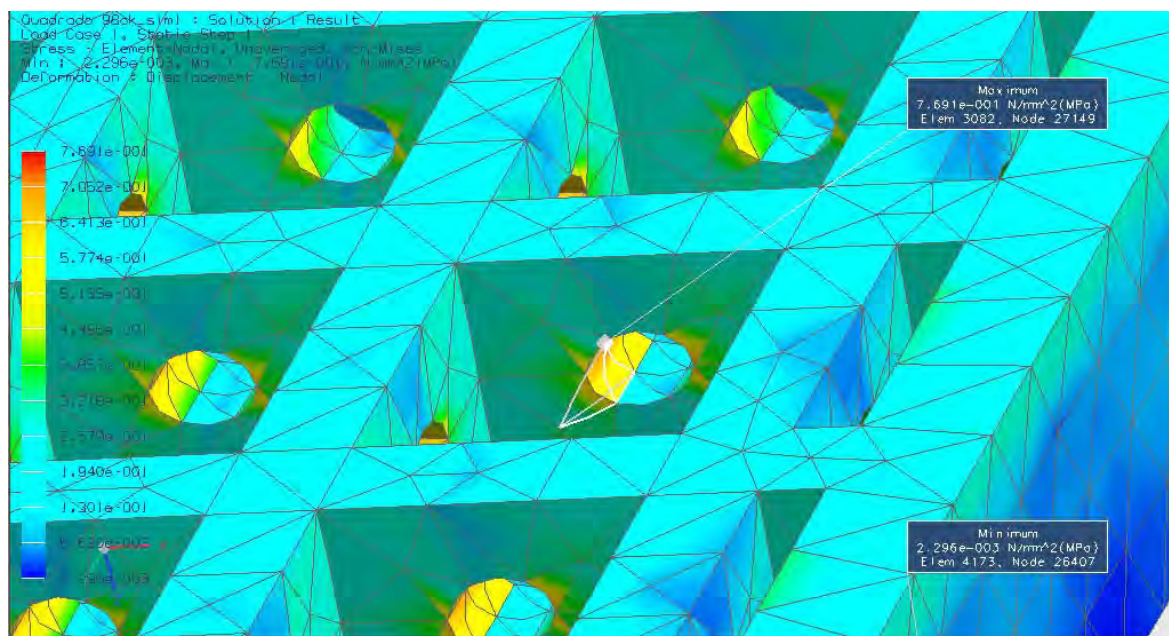


Figura 5.40. Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo quadrado para aço AISI 1005

A Figura. (5.41) e Fig. (5.42) apresentam os resultados para o núcleo hexagonal.

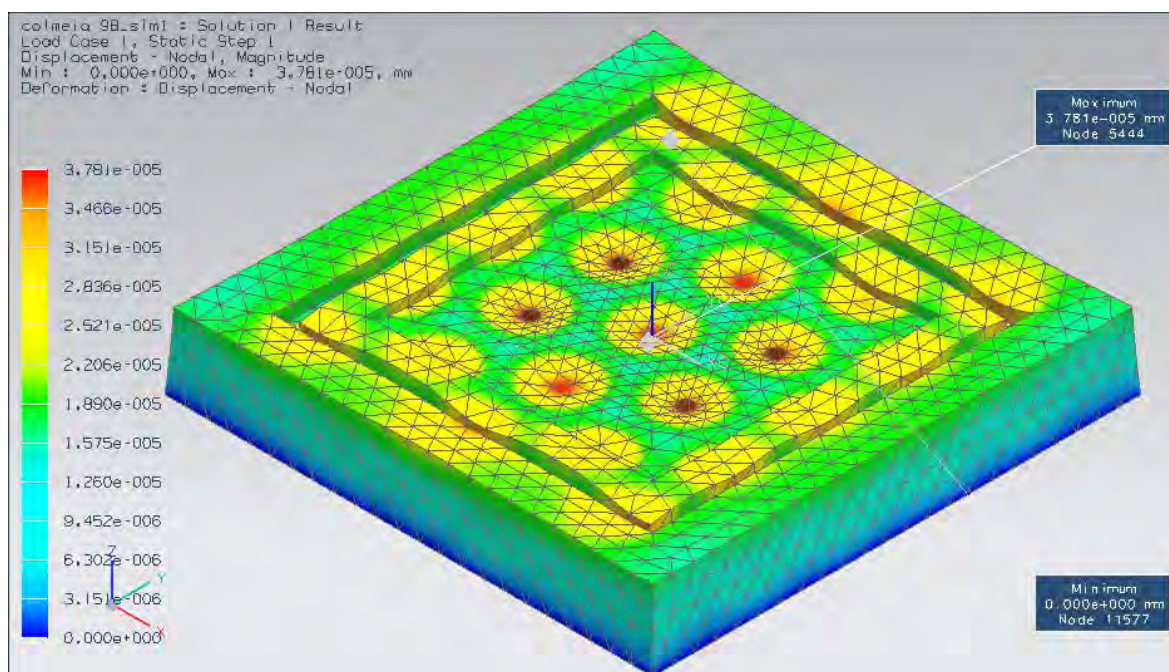


Figura 5.41. Deslocamento na mesa de 98 x 98 mm com núcleo hexagonal para aço AISI

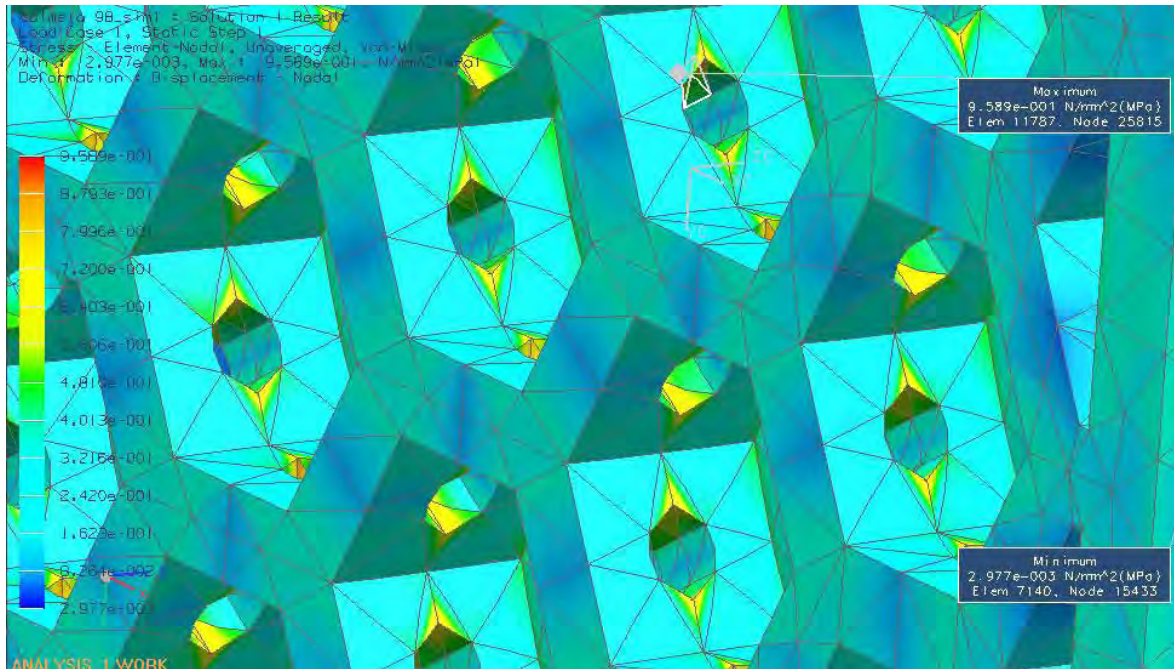


Figura 5.42. Tensão na mesa de 98 x 98 mm com núcleo hexagonal para aço AISI 1005

Para o núcleo hexagonal, o máximo deslocamento de $3,781 \times 10^{-5}$ mm foi encontrado no centro da mesa de vácuo e a máxima tensão de 0,959 MPa foi desenvolvida no furo lateral do hexágono, apresentando um coeficiente de segurança de 235,662.

5.3.4 Mesa de vácuo de 94 x 94 mm

Para uma mesa de vácuo com 94 x 94 mm de alumínio 2014 com núcleo vazado, os resultados de simulação são apresentados pela Fig. (5.43) e Fig. (5.44). O máximo deslocamento de $3,091 \times 10^{-2}$ mm foi encontrado no centro da mesa de vácuo e a máxima tensão de 20,790 MPa foi desenvolvida na borda superior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 16,054.

Para uma mesa de vácuo com núcleo quadrado utilizando um perímetro externo de 58,90 mm, a Fig. (5.45) e Fig. (5.46) apresentam os resultados. O máximo deslocamento de $6,180 \times 10^{-5}$ mm foi encontrado na região entre os dois furos e a máxima tensão de 0,684 MPa foi desenvolvida no furo lateral do quadrado, apresentando um coeficiente de segurança de 487,956.

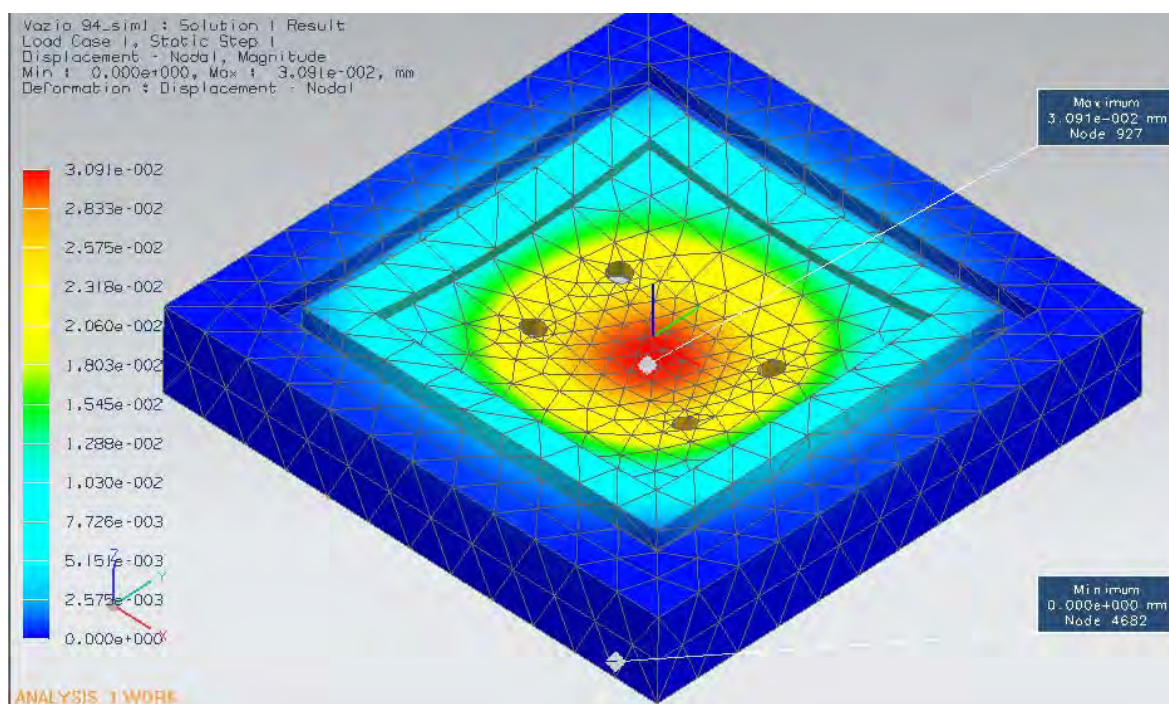


Figura 5.43. Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo vazado para alumínio 2014

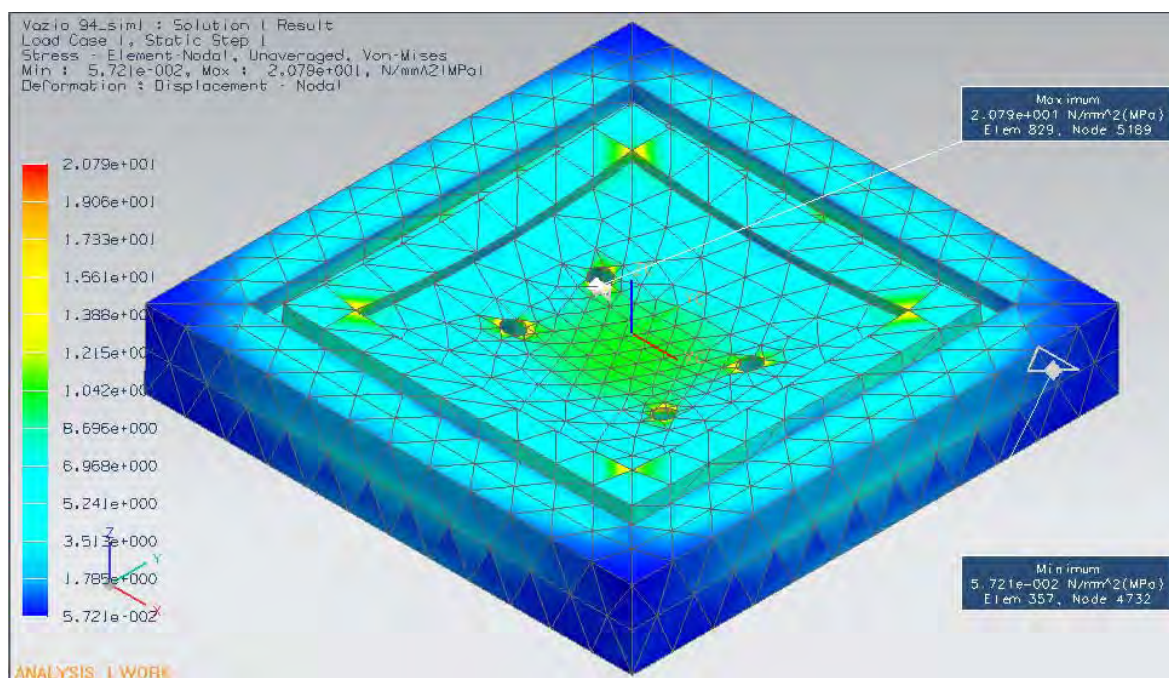


Figura 5.44. Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo vazado para alumínio 2014

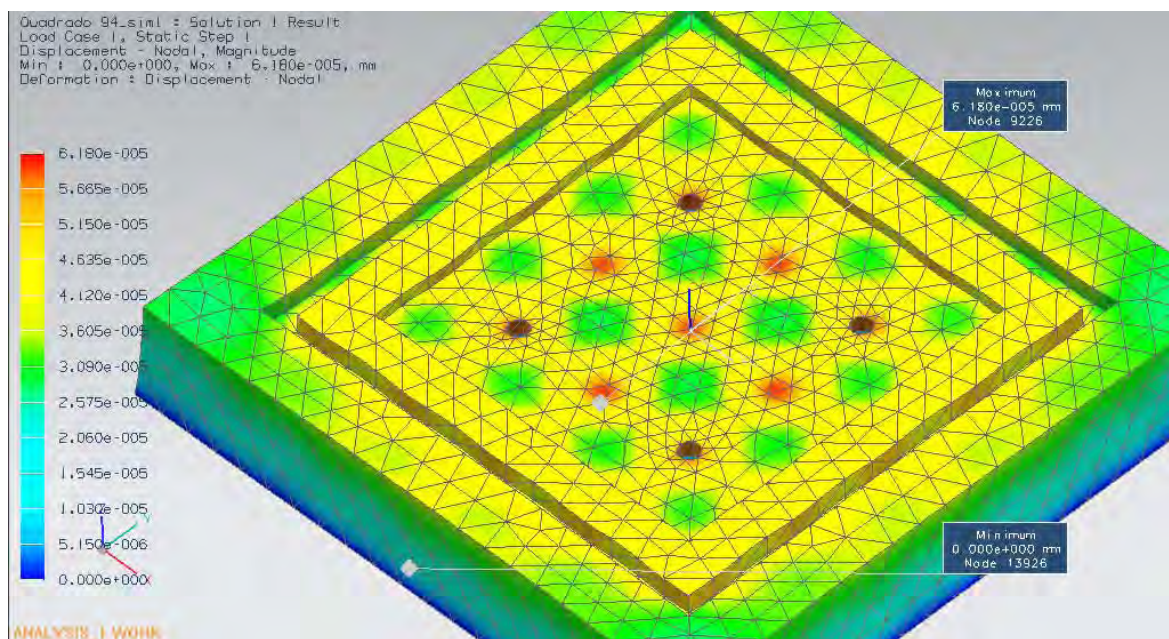


Figura 5.45. Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

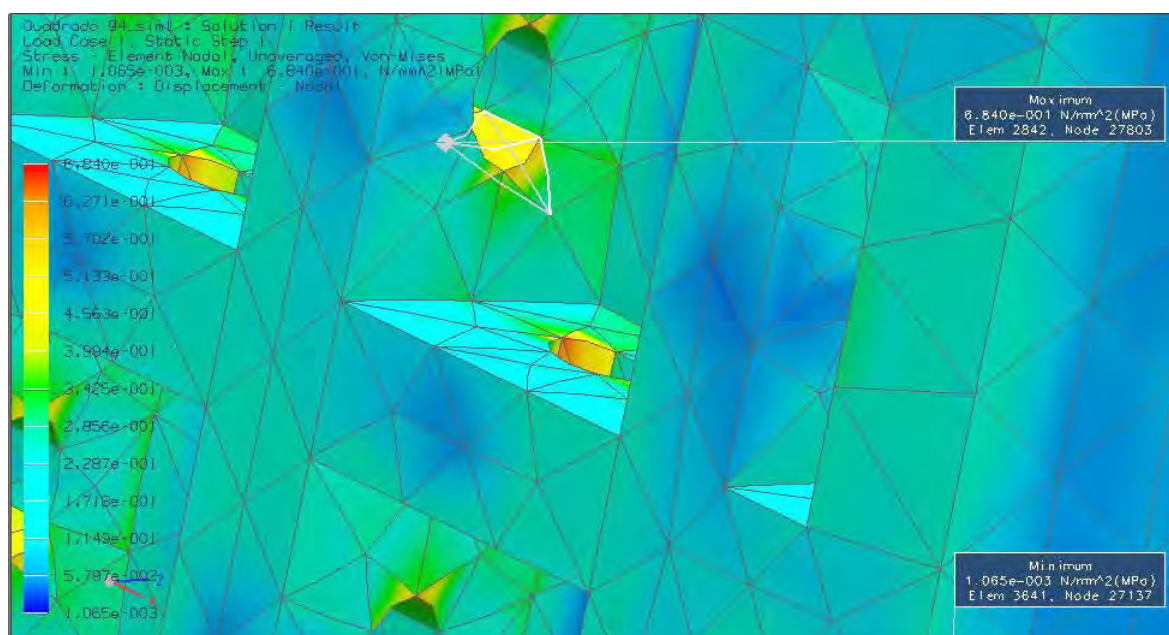


Figura 5.46. Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

Para o núcleo hexagonal, o máximo deslocamento de $8,326 \times 10^{-5}$ mm foi encontrado no centro da mesa de vácuo e a máxima tensão de 0,868 MPa foi desenvolvida

no furo lateral do hexágono, apresentando um coeficiente de segurança de 384,518 que estão mostrados na Fig. (5.47) e Fig. (5.48).

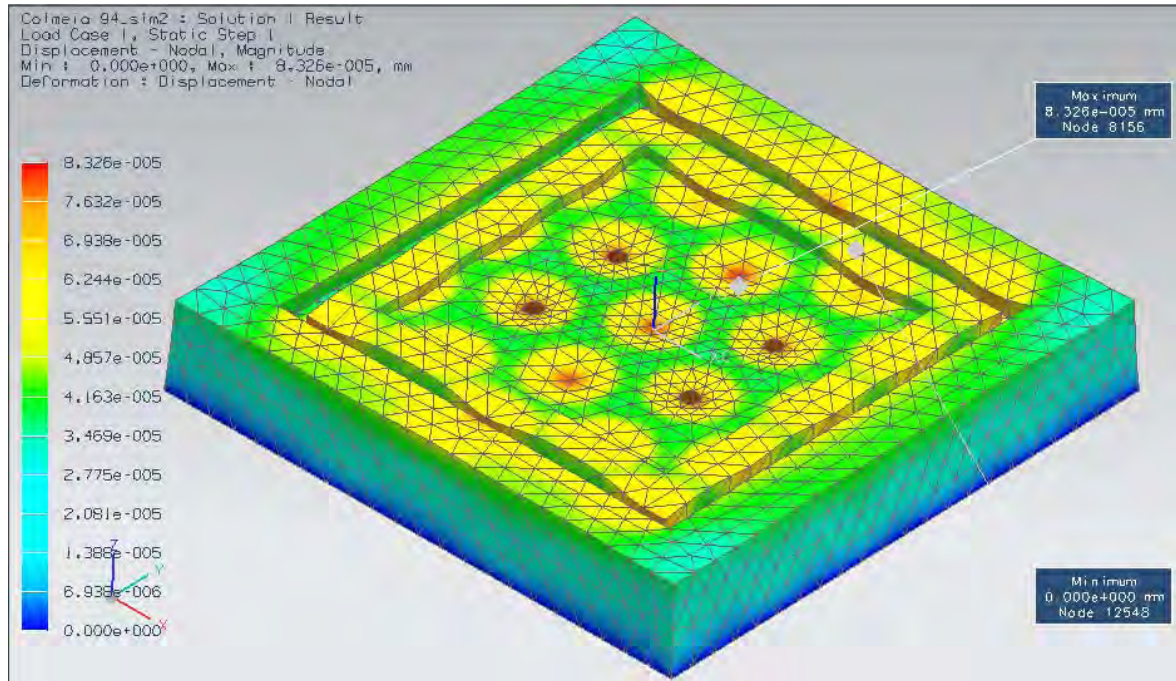


Figura 5.47. Deslocamento na mesa de 94 x 94 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

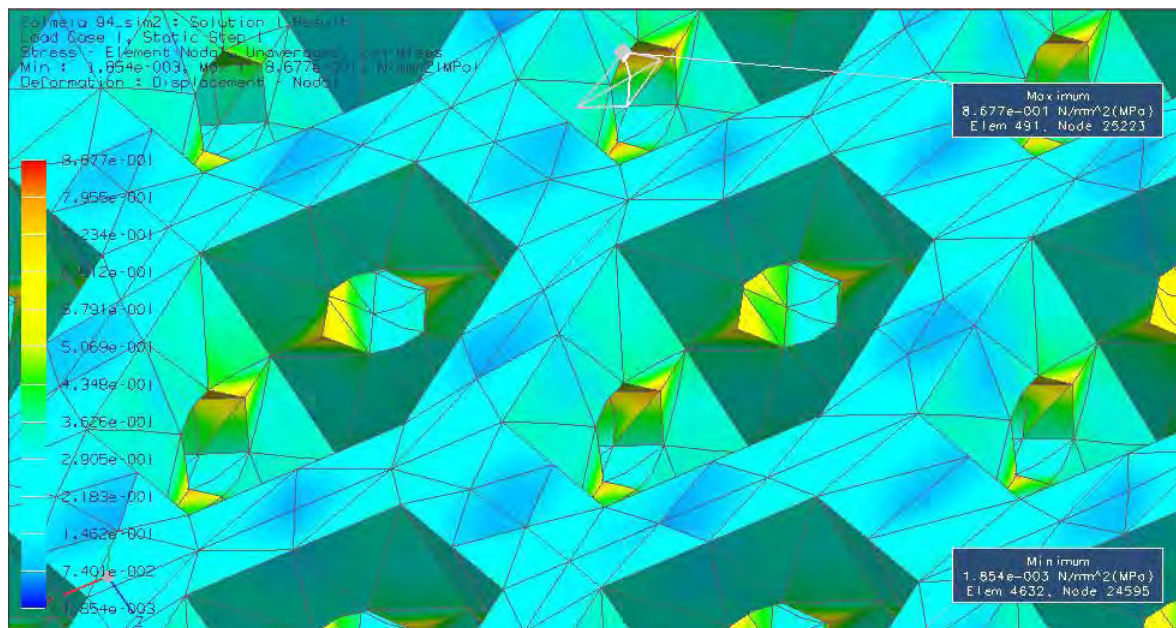


Figura 5.48. Tensão na mesa de 94 x 94 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados obtidos por meio do desenvolvimento e projeto das mesas de vácuo segundo as seções 5.31, 5.32, 5.33 e 5.34, a Tab. (5.2) apresenta o resumo.

Tabela 5.2 – Resultados do desenvolvimento e projeto das mesas de vácuo

Mesa de vácuo / Material	Geometria do Núcleo	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão Máxima (Von-Mises) (MPa)	Coefficiente de Segurança
150 x 150 mm AISI 1005 (Caso 1)	Vazado	$9,209 \times 10^{-2}$	67,240	3,361
	Quadrado	$2,160 \times 10^{-4}$	2,499	90,436
	Hexagonal	$3,292 \times 10^{-4}$	3,239	69,774
140 x 140 mm Alu. 2014 (Caso 1)	Vazado	$1,801 \times 10^{-1}$	73,350	4,550
	Quadrado	$4,080 \times 10^{-4}$	2,213	150,818
	Hexagonal	$6,067 \times 10^{-4}$	2,810	118,776
98 x 98 mm AISI 1005 (Caso 2)	Vazado	$1,385 \times 10^{-2}$	20,610	10,966
	Quadrado	$2,837 \times 10^{-5}$	0,769	293,888
	Hexagonal	$3,781 \times 10^{-5}$	0,959	235,662
94 x 94 mm Alu. 2014 (Caso 2)	Vazado	$3,091 \times 10^{-2}$	20,790	16,054
	Quadrado	$6,180 \times 10^{-5}$	0,684	487,956
	Hexagonal	$8,326 \times 10^{-5}$	0,868	384,518

Os resultados apresentam uma totalidade de doze configurações de mesas de vácuo, sendo seis por cada caso de usinagem nos quais foram tratados na seção 5.2. Portanto, diante das características inerentes de cada configuração e ressaltando que todas elas atendem a margem de segurança de resistência ao escoamento pelo critério de Von-Mises, dois outros critérios foram adotados para eleger apenas uma mesa de vácuo por cada caso de usinagem, totalizando apenas duas configurações de mesa de vácuo. O primeiro critério adotado foi o da razão rigidez/peso que determina a melhor relação do tipo de material utilizado com o seu peso, levando em conta a sua rigidez.

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (5.1)$$

Onde:

K - Rigidez (N/mm)

F - Força aplicada (N)

δ - Deslocamento (mm)

Portanto a Eq. (5.2) apresenta a relação rigidez/peso.

$$\frac{K}{P} = \frac{F}{\delta \cdot P} \quad (5.2)$$

Onde:

P - Peso (N)

A tabela. (5.3) e (5.4) apresentam as relações de rigidez/peso aplicadas nas mesas de vácuo do primeiro caso e segundo caso de usinagem respectivamente. Para o cálculo do peso, foi adotado $g = 10 \text{ m/s}^2$.

Tabela 5.3 – Relação de rigidez/peso primeiro caso

Dimensão da Mesa de vácuo	Material / Massa especif. (kg/mm ³)	Geometria do Núcleo	Volume da Mesa (mm ³)	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
150 x 150 mm	AISI 1005 (7,872 x 10 ⁻⁶)	Vazado	112035,3025	8,82	1,231 . F1
		Quadrado	152264,6832	11,99	386,124 . F1
		Hexagonal	149089,6495	11,74	258,745 . F1
140 x 140 mm	Alu. 2014 (2,794 x 10 ⁻⁶)	Vazado	100138,5275	2,80	1,983 . F2
		Quadrado	137167,9082	3,83	639,943 . F2
		Hexagonal	136005,1075	3,80	433,752 . F2

Conforme apresentado na Tab. (5.3), as maiores relações de rigidez/peso determinam o menor peso da mesa de vácuo sem comprometer a sua rigidez, que, no

entanto, são mais favoráveis para a mesa de 140 x 140 mm de alumínio 2014. Todavia, para uma mesma diferença de pressão de 100 kPa aplicadas a duas diferentes dimensões de mesas vácuo (150 x 150 mm e 140 x 140 mm), resultam em diferentes magnitudes de forças, denominadas por F1 e F2 que estão relacionadas com as áreas de contato da mesa de vácuo com a pressão atmosférica. Neste caso, a complexidade da geometria da mesa de vácuo dificultou a determinação das magnitudes F1 e F2 aplicadas nas relações de rigidez/peso, impossibilitando a comparação direta entre as mesas de 150 x 150 mm de aço e a de 140 x 140 mm alumínio. A problemática semelhante é mostrada na Tab. (5.4) que apresenta as relações de rigidez/peso para o segundo caso de usinagem.

Tabela 5.4 – Relação de rigidez/peso segundo caso

Dimensão da Mesa de vácuo	Material / Massa especif. (kg/mm³)	Geometria do Núcleo	Volume da Mesa (mm³)	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
98 x 98 mm	AISI 1005 (7,872 x 10 ⁻⁶)	Vazado	56724,0725	4,46	16,188 . F3
		Quadrado	90188,1435	7,10	4964,577 . F3
		Hexagonal	83418,2939	6,57	4025,575 . F3
94 x 94 mm	Alu. 2014 (2,794 x 10 ⁻⁶)	Vazado	53141,3625	1,48	21,859 . F4
		Quadrado	84685,4335	2,37	6827,523 . F4
		Hexagonal	78881,2075	2,20	5459,349 . F4

Para garantir a mesma força F1 na comparação da rigidez/peso entre aço e alumínio para a mesa de 150 x 150 mm, no intuito de determinar qual deles é o mais adequado, foi admitido uma mesa de vácuo de 150 x 150 mm de alumínio 2014. A Figura. (5.49), Fig. (5.50), Fig. (5.51), Fig. (5.52), Fig. (5.53) e Fig. (5.54) apresentam os resultados de simulação de deslocamento e tensão para núcleos vazado, quadrado e hexagonal respectivamente. Conforme os resultados, o núcleo vazado apresentou um deslocamento máximo no centro da mesa, com $2,414 \times 10^{-1}$ mm e uma tensão máxima de 65,830 MPa na parte inferior da placa superior da mesa de vácuo, logo após o rasgo da gaxeta, apresentando um coeficiente de segurança de 5,070. Para o núcleo quadrado, o máximo deslocamento de $5,730 \times 10^{-4}$ mm foi encontrado no furo, e a máxima tensão de 2,720 MPa na borda inferior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 122,707. Para o

núcleo hexagonal, o máximo deslocamento de $8,713 \times 10^{-4}$ mm foi encontrado no furo, e a máxima tensão de 3,458 MPa foi desenvolvida na borda inferior do furo, apresentando um coeficiente de segurança de 96,519.

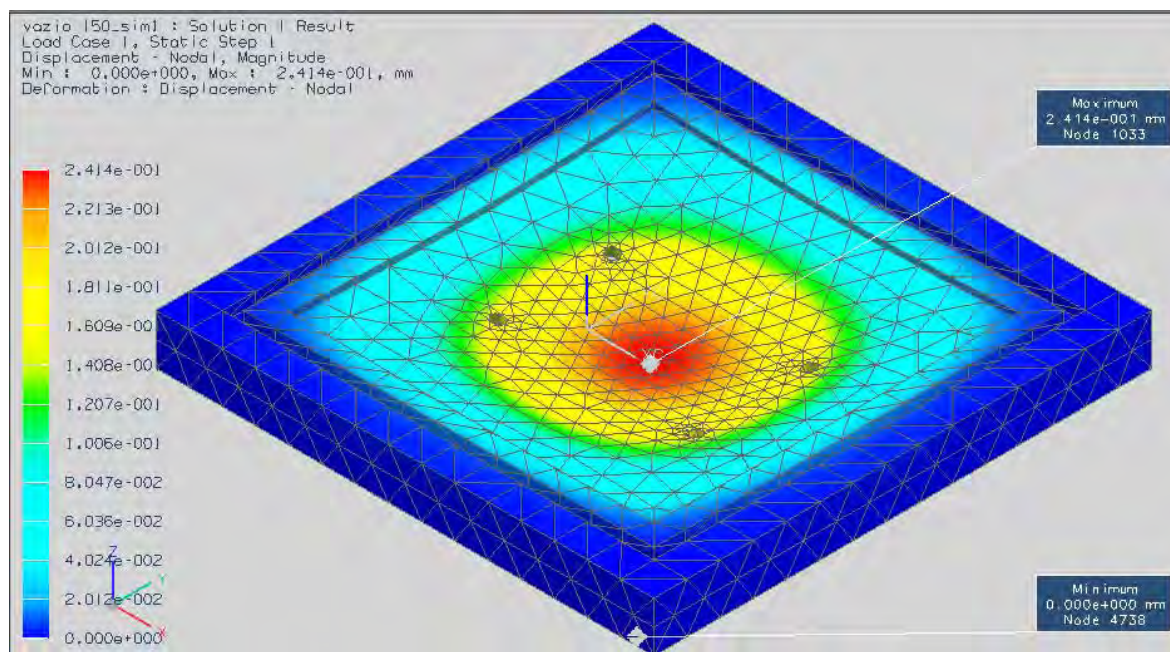


Figura 5.49. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para alumínio

2014

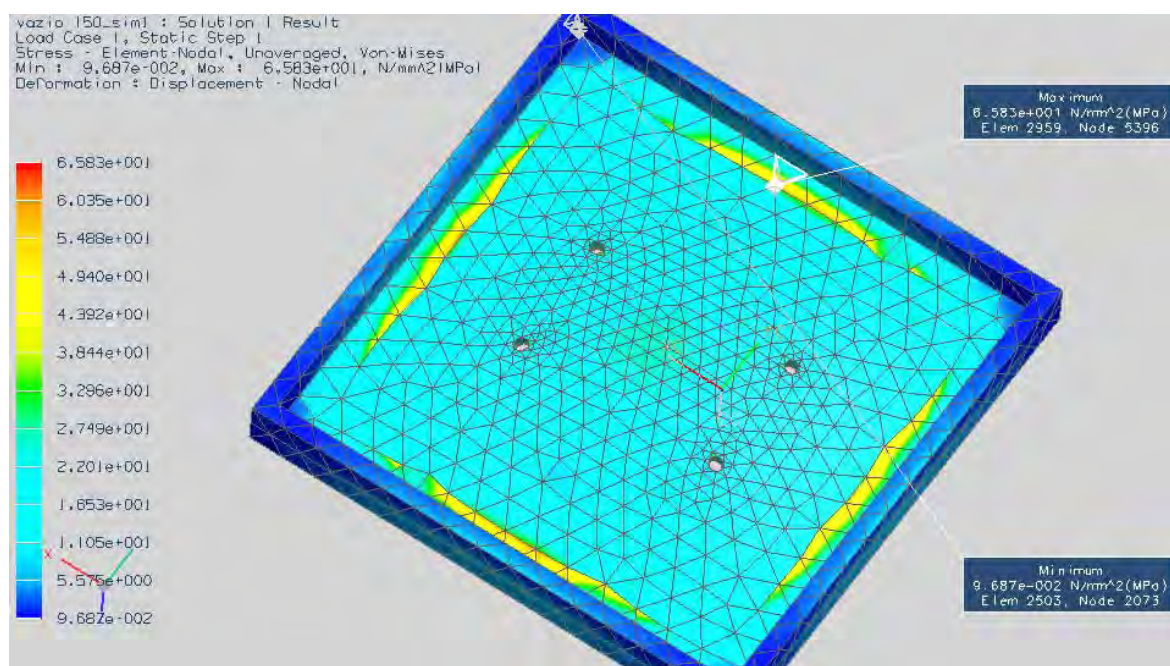


Figura 5.50. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo vazado para alumínio

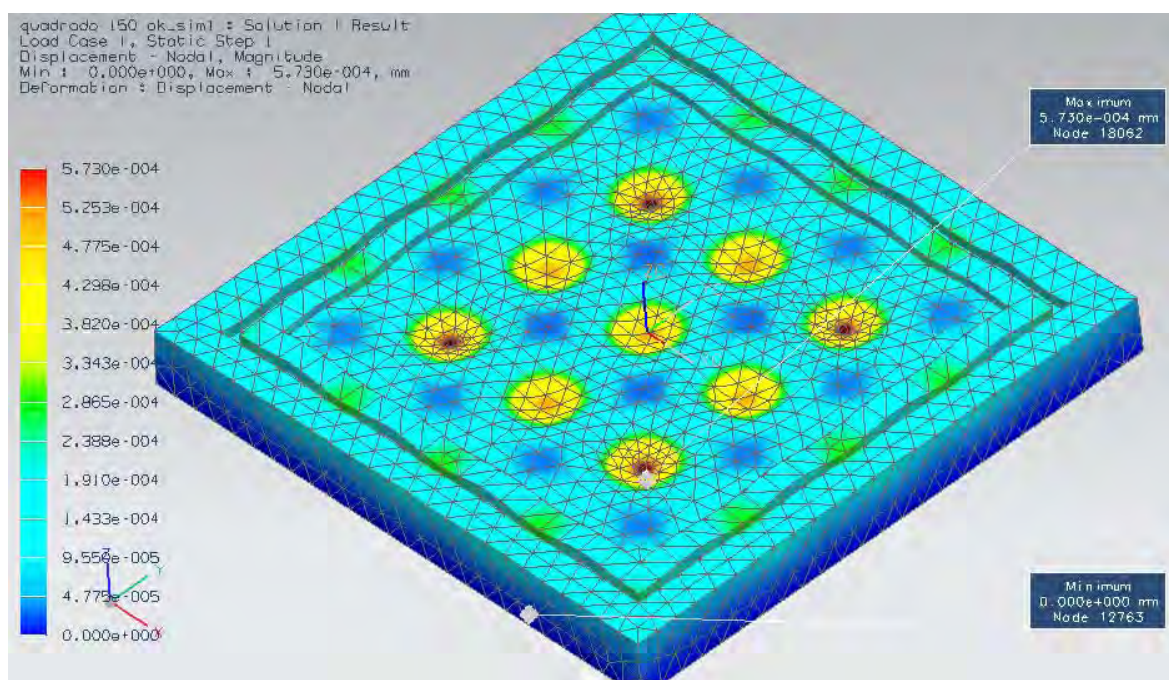


Figura 5.51. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

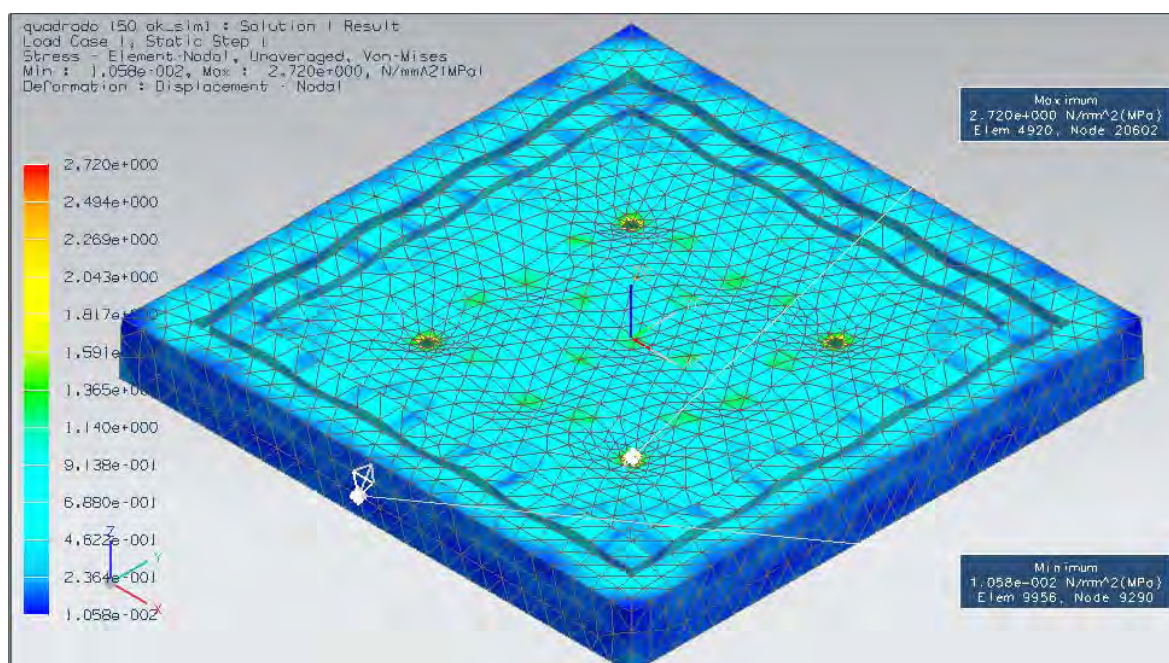


Figura 5.52. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo quadrado para alumínio 2014

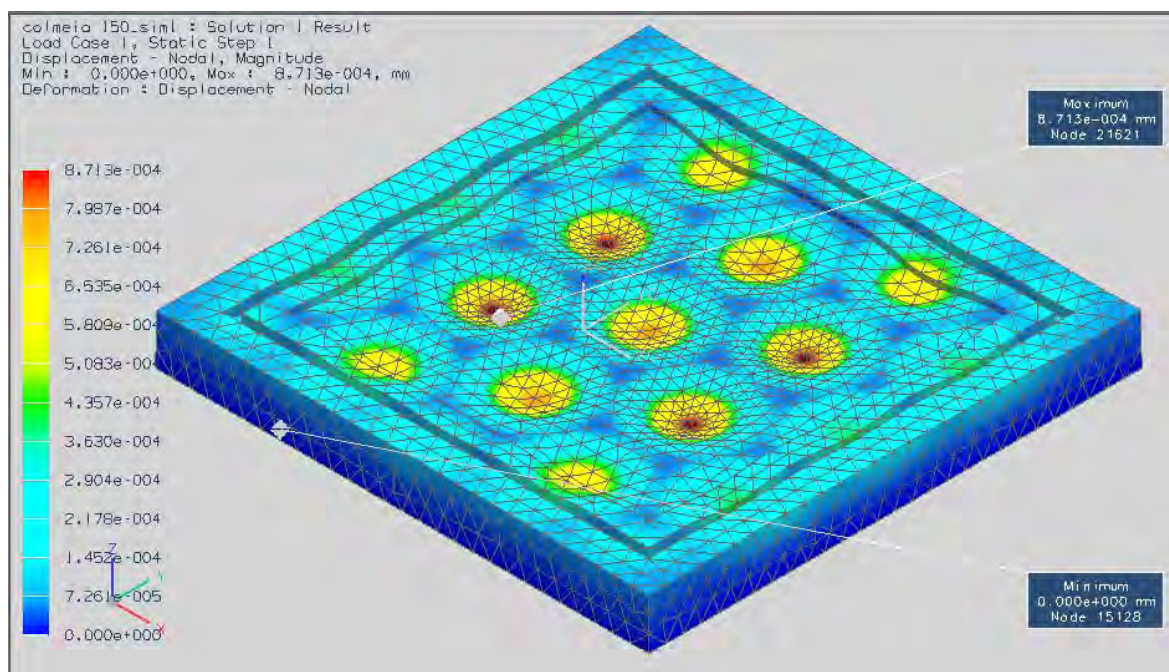


Figura 5.53. Deslocamento na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

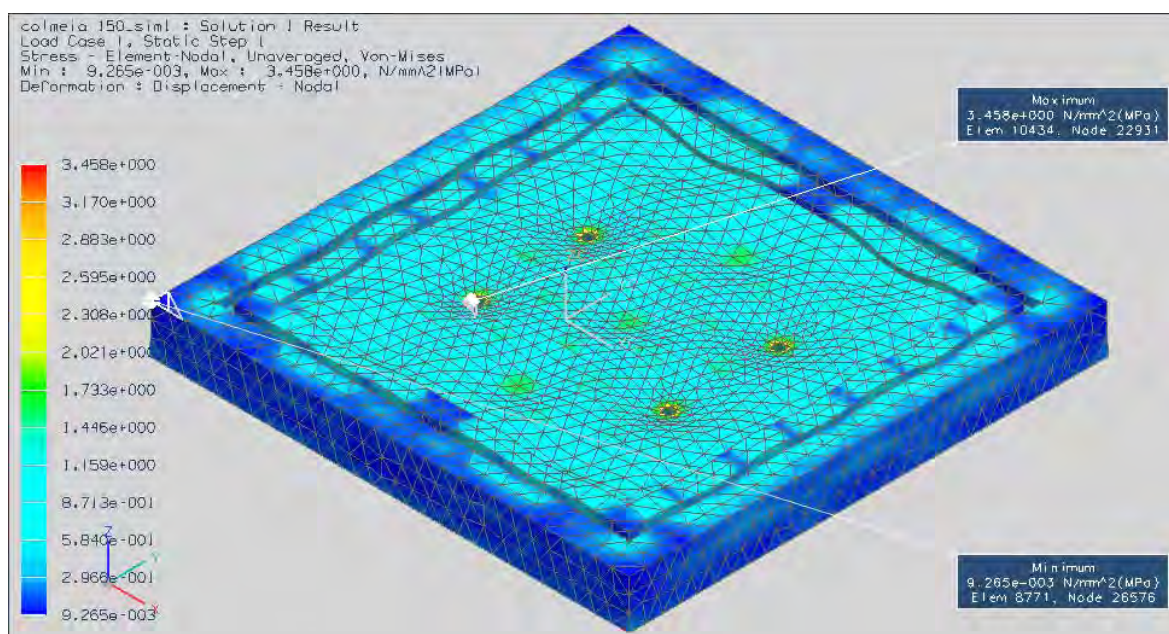


Figura 5.54. Tensão na mesa de 150 x 150 mm com núcleo hexagonal para alumínio 2014

A Tabela. (5.5) apresenta os resultados de comparação entre aço e alumínio da mesa de 150 x 150 mm.

Tabela 5.5 – Comparação entre aço e alumínio para a mesa de 150 x 150 mm

Material	Núcleo	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Coefficiente de Segurança	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
AISI 1005	Vazado	$9,209 \times 10^{-2}$	67,240	3,361	8,82	1,231 . F1
	Quadrado	$2,160 \times 10^{-4}$	2,499	90,436	11,99	386,124 . F1
	Hexagonal	$3,292 \times 10^{-4}$	3,239	69,774	11,74	258,745 . F1
Alu. 2014	Vazado	$2,414 \times 10^{-1}$	65,830	5,070	3,13	1,323 . F1
	Quadrado	$5,730 \times 10^{-4}$	2,720	122,707	4,25	410,635 . F1
	Hexagonal	$8,713 \times 10^{-4}$	3,458	96,519	4,17	275,230 . F1

Diante da comparação da Tab. (5.5) foi observado que mesmo com maiores deformações, o alumínio apresentou maiores relações de rigidez/peso além de possuir aproximadamente 1/3 do peso do aço, sendo assim, o material mais indicado para a construção das mesas de vácuo. Portanto, para a comparação entre as 12 mesas de vácuo apresentadas pela Tab. (5.2), a Tab. (5.6) apresenta as duas dimensões de mesas de vácuo de alumínio selecionadas pelo critério rigidez/peso.

Tabela 5.6 – Dimensões das mesas de vácuo selecionadas pelo critério rigidez/peso

Dimensão da Mesa de vácuo	Material	Núcleo	Volume da Mesa (mm ³)	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
140 x 140 mm	Alu. 2014	Vazado	100138,5275	2,80	1,983 . F2
		Quadrado	137167,9082	3,83	639,943 . F2
		Hexagonal	136005,1075	3,80	433,752 . F2
94 x 94 mm	Alu. 2014	Vazado	53141,3625	1,48	21,859 . F4
		Quadrado	84685,4335	2,37	6827,523 . F4
		Hexagonal	78881,2075	2,20	5459,349 . F4

Conforme apresentado pela Tab. (5.6), cada dimensão de mesa de vácuo possui três possíveis configurações de núcleo, sendo que apenas uma em cada dimensão de mesa deve ser escolhida. Neste caso, foi admitido o segundo critério de seleção, em que prevê qual dos núcleos apresenta a melhor homogeneização do vácuo interno, levando em consideração a rigidez/peso entre cada geometria de núcleo, e segundo os fabricantes de mesas de vácuo pesquisados, os núcleos hexagonais possuem uma melhor distribuição do ar interno. Ainda na Tabela. (5.6), foi observado que as relações de rigidez/peso aumentam a medida em que o perímetro da geometria do núcleo diminui, e que a relação de rigidez/peso do núcleo hexagonal fica mais próxima do núcleo quadrado. Portanto, a geometria hexagonal apresenta as maiores vantagens para os perímetros menores (58,90 mm) de forma que a mesa de 140 x 140 mm foi otimizada com estes núcleos hexagonais reduzidos conforme a Fig. (5.55)

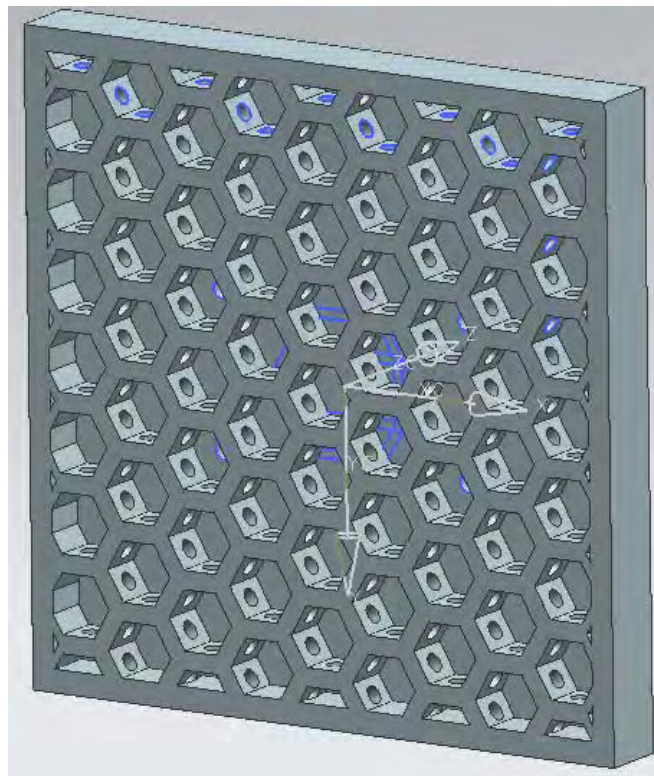


Figura 5.55. Mesa de vácuo de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido

A Fig. (5.56) e Fig. (5.57) apresentam os resultados de simulação para o núcleo hexagonal reduzido.

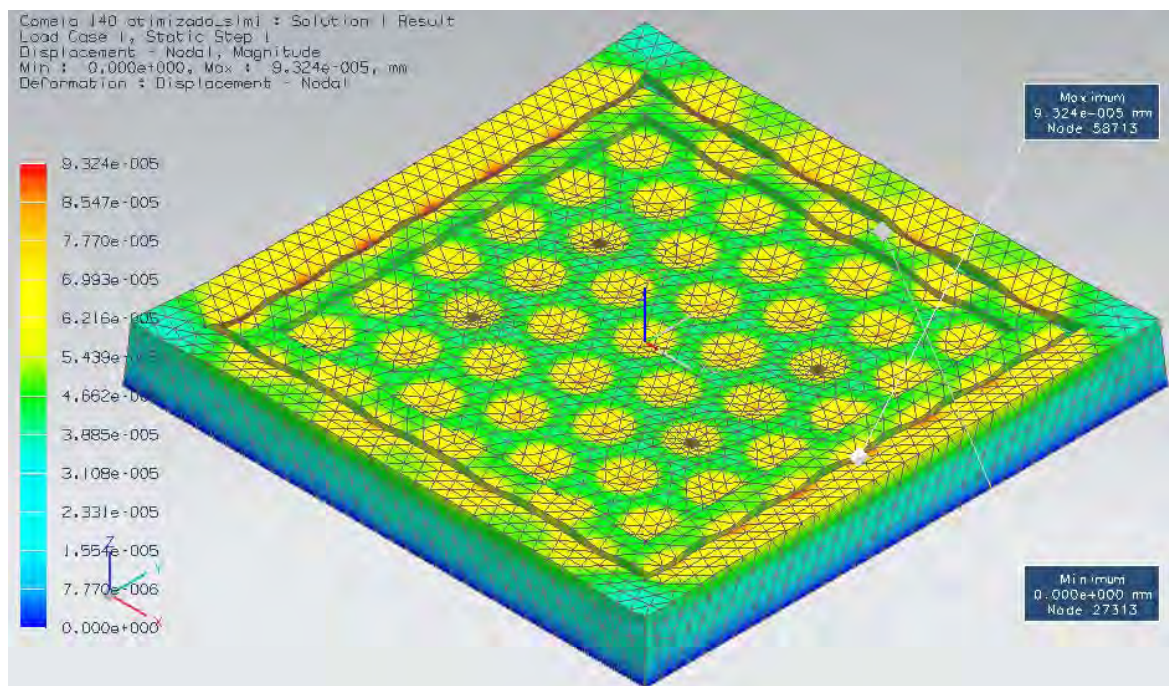


Figura 5.56. Deslocamento na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido

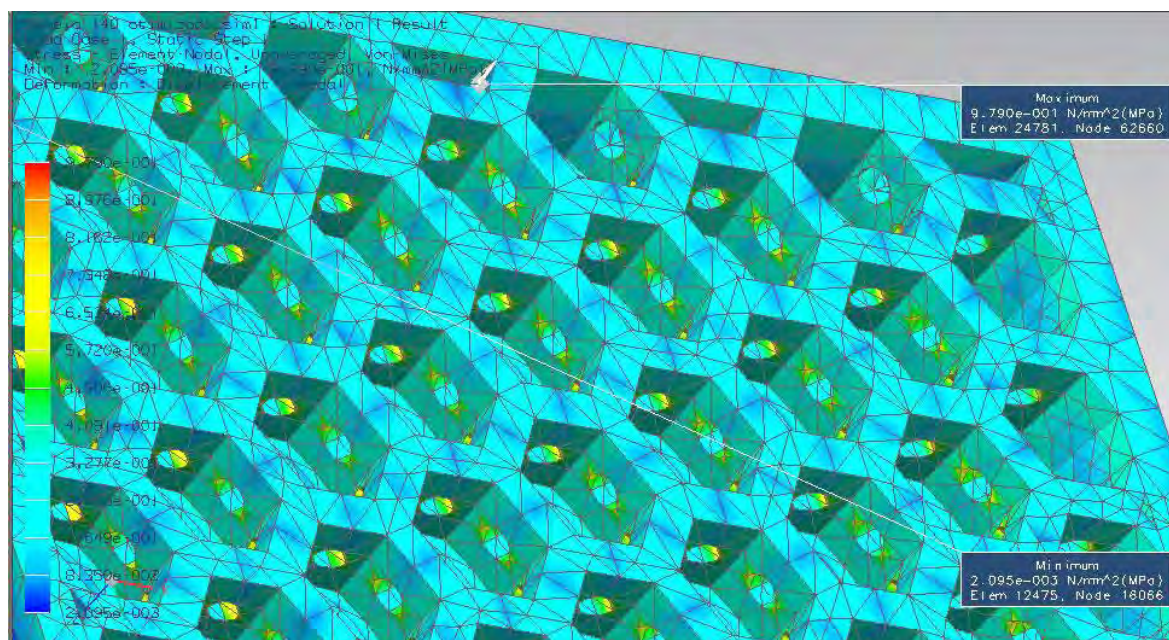


Figura 5.57. Tensão na mesa de 140 x 140 mm com núcleo hexagonal reduzido

Os resultados da simulação mostraram um máximo deslocamento de $9,324 \times 10^{-5}$ mm situada na região do rasgo da gaxeta, e uma máxima tensão de 0,979 MPa. A Tabela. (5.7) apresenta a comparação da mesa de vácuo de 140 x 140 mm confeccionada com os dois diferentes perímetros de núcleos hexagonais.

Tabela 5.7 – Comparação entre os perímetros de núcleos hexagonais

Mesa / Material	Geometria do Núcleo	Perímetro do núcleo (mm)	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
140 x 140 mm Alu. 2014	Hexagonal	109,09	$6,067 \times 10^{-4}$	2,810	3,80	433,752 . F2
140 x 140 mm Alu. 2014	Hexagonal	58,90	$9,324 \times 10^{-5}$	0,979	4,43	2420,995 . F2

Finalizando, a Tab. (5.8) apresenta as duas configurações de mesas de vácuo selecionadas.

Tabela 5.8 – Configurações de mesas de vácuo selecionadas

Mesa / Material	Núcleo	Perímetro do núcleo (mm)	Deslocamento Máximo (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Peso da Mesa (N)	K/P (1/mm)
140 x 140 mm Alu. 2014	Hexagonal	58,90	$9,324 \times 10^{-5}$	0,979	4,43	2420,995 . F2
94 x 94 mm Alu. 2014	Hexagonal	58,90	$8,326 \times 10^{-5}$	0,868	2,20	5459,349 . F4

5.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VÁCUO (FASE 3)

Para garantir a força de fixação aplicada na mesa de vácuo, é necessário que o sistema de vácuo crie uma diferença de pressão entre o meio externo e interno da mesa, para que a pressão atmosférica atue sobre a peça e a mesa. Como foi admitido anteriormente uma diferença de pressão de 100 kPa, e esta se encontra na faixa de baixo vácuo, o dimensionamento do sistema de baixo vácuo compreende basicamente em:

- Câmara de vácuo
- Bomba de vácuo
- Tubulação

Para o dimensionamento da câmara de vácuo, o próprio núcleo da mesa de vácuo se comporta como câmara, e como existem duas mesas de vácuo de diferentes dimensões, o sistema de vácuo foi dimensionado em função da maior mesa, sendo este, o caso mais crítico por conter um maior volume de ar a retirar, uma vez que a geometria de núcleo e pressão de vácuo são idênticas nas duas mesas.

Para o caso do dimensionamento da bomba de vácuo, as grandezas de pressão de vácuo e vazão devem ser determinadas para selecionar a bomba adequada. No entanto, Moutinho *et al.* (1980) sugerem uma equação para obter vazões aproximadas em sistemas de baixo vácuo, conforme a Eq. (5.3).

$$S = 2,3 \frac{V}{t_2 - t_1} \log \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} \quad (5.3)$$

Onde:

S - Vazão (l/s)

V - Volume da câmara de vácuo (l)

$t_2 - t_1$ - Tempo de produção do vácuo (s)

$p_1 - p_0$ - Pressão inicial atmosférica (mbar)

$p_2 - p_0$ - Pressão final absoluta (mbar)

O volume da câmara de vácuo foi aproximado como se a mesa de 140 x 140 mm tivesse núcleo vazado. Esta consideração foi devido à complexidade do modelamento do cálculo das condutâncias internas, que são relativas às conexões entre os hexágonos, nos quais se comportam como pequenas câmaras de vácuo interconectadas. Deste modo, o maior volume da câmara considerado, representa uma compensação das perdas de cargas provocadas pelos hexágonos, totalizando 169000 mm³ ou 0,169 l. Para o caso da pressão final absoluta, esta é a quantidade de pressão que ainda resta no sistema após ter sido retirado os 100 kPa da atmosfera, restando apenas 13,25 mbar. Foi considerado 5 s de tempo de produção de vácuo, ou seja, este é o tempo necessário para que sejam retirados os 100 kPa de pressão, produzindo a força necessária de fixação da peça na mesa de vácuo. Substituindo os dados na Eq. (5.3) foi obtido.

$$S = 2,3 \frac{0,169}{5} \log \frac{1013,25}{13,25}$$

$$S = 0,146 \text{ l/s}$$

Para uma bomba com pressão de vácuo de 100 kPa ou 13,25 mbar de pressão absoluta e vazão de 0,146 l/s, dentre as pesquisadas, foi selecionada uma bomba mecânica rotativa com vedação a óleo utilizando balastro de gás, com vazão de 0,7 l/s e pressão final absoluta de 1 mbar.

Para a tubulação de conexão da bomba a mesa de vácuo, foi selecionada uma mangueira de vácuo de silicone de 1/4" mm diâmetro interno, uma vez que a entrada da bomba de vácuo selecionada é de 1/4".

CAPÍTULO VI

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a tecnologia do vácuo englobando os seus fundamentos, dispositivos de geração, medição e o seu estado da arte nas aplicações da engenharia de precisão. Foi observado que a atmosfera controlada da tecnologia do vácuo possibilitou a evolução das aplicações por meio de mudanças nos processos de fabricação e medição compatíveis com cada aplicação. Fabricação de dispositivos complexos, miniaturização, aumento da exatidão, melhor acabamento, mobilidade, rapidez e flexibilidade foram as principais motivações do uso da tecnologia do vácuo tornando-a indispensável ao mundo moderno.

Neste trabalho, foi apresentando o desenvolvimento de uma metodologia de projeto de mesas de vácuo, aplicado em máquinas-ferramenta no sentido da substituição dos fixadores tradicionais utilizados em máquinas-ferramenta. Os resultados mostraram que as mesas de vácuo são capazes de fixar peças de superfícies planas mediante a operações reais de usinagem de fresamento de topo, com um baixo tempo de fixação se comparado aos fixadores tradicionais, sendo então, uma tecnologia que permite maior produtividade. As mesas de vácuo em alumínio utilizando núcleo hexagonal com perímetros reduzidos apresentaram melhores resultados, uma vez que possibilitam uma redução do peso e das dimensões da mesa, sem comprometer a sua rigidez, além de propiciar uma maior homogeneidade de distribuição do vácuo em seu núcleo. Conseqüentemente, a metodologia desenvolvida destaca as vantagens de produção de mesas de vácuo com baixo peso e dimensões que sugerem o menor custo de produção. A utilização do pacote NX 7.0

e NASTRAN foram de fundamental importância para o desenvolvimento, simulação e análise dos resultados, uma vez que permitiu com objetividade e clareza o entendimento dos resultados, substituindo totalmente uma solução analítica, que neste caso, seria inviável devido a complexidade das geometrias, cargas e quantidade de resultados envolvidos.

6.2 DIFICULDADES ENCONTRADAS

A inexistência de trabalhos referentes ao desenvolvimento e projeto de mesas de vácuo e a bibliografia escassa sobre tecnologia do vácuo aplicada em engenharia precisão, encabeçam as dificuldades encontradas na produção deste trabalho. Como impacto, o desenvolvimento de uma metodologia própria trouxe dificuldade no entendimento físico do sistema assim como uma modelagem mais próxima da realidade para a simulação. Diante da complexidade da geometria, cargas e quantidade de resultados envolvidos no sistema proposto, foi necessária a utilização do pacote computacional NX 7.0 e NASTRAN como ferramenta de apoio, e que por mais que tenha permitindo um entendimento claro e objetivo dos resultados, a aprendizagem de utilização do programa também demandou um tempo considerável.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

As baixas magnitudes de deslocamento, tensão e peso observadas nas análises das mesas de vácuo, abrem janelas para trabalhos futuros no que diz respeito a:

- Fixação, fabricação e medição de dispositivos miniaturizados.
- Projetos de micromáquinas utilizando vácuo como força motriz.
- Fixação de peças irregulares e de maiores dimensões.
- Otimização de mesas de vácuo e sistema de vácuo.
- Utilização de fixadores a vácuo para outros tipos de usinagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, H. et al., 1998, **“Fundamentals of Vacuum Technology”**, Cologne , 198p.

ALBERTAZZI, A., & SOUZA, A.R., 2008, **“Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial”**, Ed. Manole, São Paulo, 407 p.

BANIN, Jr., **“ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS, INTEGRIDADE SUPERFICIAL E FORÇAS DE USINAGEM NO FRESAMENTO DE TOPO DE AÇO SAE 4340 EDURECIDO”**, Msc. dissertação, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo.

BOXMAN, R.L. et al., B.S., 1995, **“Handbook of Vacuum ARC Science and Technology Fundamentals and Applications”**, Ed. Noyes Publications, New Jersey, United States, 742 p.

BURG, T.P. et al., 2007, **“Weighing of Biomolecules, Single Cells and Single Nanoparticles in Fluid”**, Nature, Vol. 446, pp. 1066-1069.

ÇENGEL, Y.A. & CIMBALA, J.M., 2007, **“Mecânica dos Fluidos. Fundamentos e Aplicações”**, 1 .ed, Ed. McGraw Hill, Brasil, 816 p.

CHAMBERS, A. et al., 1998, **“Basic Vacuum Technlogy”**, 2.ed, Ed. IOP, Philadelphia, United States, 189 p.

COLLINS, J.A., 2006, **“Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma perspectiva de prevenção da falha”**, 1.ed, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 760 p.

- DEGASPERI, F.T., 2002, “**Modelagem e Análise Detalhadas de Sistema de Vácuo**”, Msc. dissertação, UNICAMP, São Paulo.
- DENOUAL, M. et al., 2006, “**Vacuum Casting to Manufacture a Plastic Biochip for Highly Parallel Cell Transfection**”, Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 3134-3140.
- DIEBOLD, A.C.; 2001, “**Handbook of Silicon Semiconductor Metrology**”, Ed. Marcel Dekker, New York, United States, 853 p.
- DORNFELD, D., & LEE, D.E., 2007, “**Precision Manufacturing**”, Ed. Springer, Berkley, California, 775 p.
- FELLOWS, P.J., 2006, “**Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Práticas**”, 2.ed, Ed. Artmed, Porto Alegre, 602p.
- FERRARESI, D., 1977, “**Fundamentos da Usinagem dos Metais**”, Ed. Edgard Blucher LTDA, São Paulo, 751 p.
- FLADISCHER, K. et al., 2007, “**An Optical Profilometer for Characterizing Complex Surfaces Under High Vacuum Conditions**”, Precision Engineering, Vol. 32, pp. 185-191.
- GAMA, S., 2002, “**Introdução à Ciência e Tecnologia do Vácuo**” (Apostila da disciplina de tecnologia do vácuo, Curso de Física, Universidade Estadual de Campinas). Disponível em: < <http://webbif.ifi.unicamp.br/apostilas/f640/>>. Acesso em: 10 jun. 2009.
- HARSCH, V., 2007, “**Otto Von Guericke (1602-1686) and His Pioneering Vacuum Experiments**”, Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 78, pp. 1075-1077.

- HOFFMAN, D.M. et al., J.H., 1994, **“Handbook of Vacuum Science and Technology”**, Ed. Physicsbooks. info, Newport News, United States, 835 p.
- IANNINI, R.F., 2005, **“Projeto e Construção de um Medidor de Corrente de elétrons Emitidos no Vácuo por Campo Elétrico para Caracterização de Cátodos Frios Constituídos por Nanotubos ou Nanoestruturas”**, Msc. dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- LAFFERTY, J.M., 1998, **“Foundations of Vacuum Science and Technology”**, Ed. John Wiley & Sons, New York, 728 p.
- LEU, C. L., & JOSHI, A., **“NX5 FOR ENGINEERING DESIGN”** (Department of Mechanical and Aerospace Engineering). Disponível em: < http://web.mst.edu/~mleu/UG-NX5_tutorial_1_Leu__1.pdf >. Acesso em: 5 fev. 2010.
- MILEHAM, A.R. et al., 1999, **“Rapid Changeover – A Pre-Requisite for Responsive Manufacture”**, International Journal of Operations & Production Management, Vol. 19, No. 8, pp. 785-796.
- MORAES, M.F.V., 2004, **“Produção e Caracterização da Blenda Polimérica Biodegradável Poli(hidroxibutirato)[PHB] / Copoliéster Alifático Aromático [Ecoflex] para Aplicações em Embalagens”**, Msc. dissertação, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.
- MOSSMANN, V.L.F. et al., 2002, **“Determinação dos Coeficientes de Atrito Estático e Cinético Utilizando-se a Aquisição Automática de Dados”**, Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 24, No. 2, pp. 146-149.
- MOUTINHO, A.M.C. et al., 1980, **“Tecnologia do Vácuo”**, Ed. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 216 p.

- NETTO, A.C.S. et al., 2003, **“Prototipagem Rápida: uma ferramenta de projeto para a redução do tempo de desenvolvimento e melhoria de qualidade de produtos”**, IV Congresso Brasileiro de Gestão e Desenvolvimento de produtos, Gramado, Brasil, 10 p.
- NEUENSCHWANDER, R. T. et al., 2003, **“Nova Câmara de Vácuo para Espelho das Linhas de Luz do LNLS”**, Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 22, pp. 35-37.
- O’HANLON, J.F., 2003, **“A User’s Guide to Vacuum Technology”**, 3 .ed, Ed. Wiley-Interscience, 516 p.
- OLMOS, C.M., 2008, **“Micro/Nano Fabrication of Polymer-Based Devices”**, Ph.D. thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona.
- PAIVA, J.A. et al., 2010, **“Aplicações da Tecnologia do Vácuo em Engenharia Mecânica”**, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande, Paraíba, 10 p.
- REDHEAD, P.A., 1999, **“History of Vacuum Devices”**, National Research Council, Ottawa, Canada. Disponível em: www.chem.elte.hu/departments/altkem/vakuumtechnika/CERN23.pdf. Acesso em: 20 mai. 2010.
- RIBEIRO, J.L.S. et al., 2006, **“Forças de Usinagem no Fresamento de Aços para Matrizes”**, Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brasil, 10 p.
- RYANS, J.L., & Roper, D.L., 1986, **“Process Vacuum System Design and Operation”**, Ed. MacGraw-Hill, United States, 354 p.
- SAUNDERS, S., & BROWN, H.R., 2002, **“The Philosophy of Vacuum”**, Ed. Oxford University Press, New York, 291 p.

- SAWABE, M. et al., 2003, **“A New Vacuum Interferometric Comparator for Calibrating the Fine Linear Encoders and Scales”**, Precision Engineering, Vol. 28, pp. 320-328.
- SILVA, G.C., 2008, **“Prototipagem Rápida e Ferramental Rápido Aplicados às Peças Utilizadas em Ensaios Estáticos de Embalagens para Acondicionamento e Transporte de Peças Automotivas”**, Msc. dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SMITH, S.T., & CHETWYND, D.G., 1992, **“Foundations of Ultraprecision Mechanism Design”**, Ed. Taylor & Francis Books Ltd, Reino Unido, 320 p.
- STEMPNIAK, R.A., 2002, **“A Ciência e a Tecnologia do Vácuo”**, (Sociedade Brasileira de Vácuo). Disponível em: <<http://www.sbvacu.org.br/artigoRobertoStempniak.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- TAMINGER, K.M.B., & HAFLEY, R.A., 2003, **“Electron Beam Freeform Fabrication: A Rapid Metal Deposition Process”**, Proceedings of the 3rd Annual Automotive Composites Conference, Society of Plastics Engineers, 6 p.
- VENKATESH, V.C., & IZMAN, S., 2007, **“Precision Engineering”**, 2 .ed, Ed. McGraw-Hill, New Delhi, 418 p.
- WYLEN, V. et al., 1998, **“Fundamentos da Termodinâmica”**, 5 .ed, Ed. Edgard Blucher, 536 p.
- YANG, Y.T. et al., 2006, **“Zeptogram-Scale Nanomechanical Mass Sensing”**, Nano Letters, Vol. 6, No. 4, pp. 583-586.