

100 Dez 19/12/99
LUIZ FERNANDO MONTERO ALVAREZ

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE VENTOSAS
PARA ROBÔS DE PALETIZAÇÃO**

**Projeto de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico**

São Paulo

1999

LUIZ FERNANDO MONTERO ALVAREZ

**OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE VENTOSAS
PARA ROBÔS DE PALETIZAÇÃO**

**Projeto de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do
título de Engenheiro Mecânico**

Orientador:

Prof. Dr. Nicola Getschko

São Paulo

1999

781 neu

A meus pais,
Reynaldo e Eugênia

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos seguintes amigos pela indispensável ajuda:

- Professor Doutor Nicola Getschko, pela constante orientação e pelos valiosos conselhos;
 - Engenheiros Francisco Cardoso e Adolfo Bosque Martinez, pelo total incentivo à realização deste trabalho e ao Eng. Douglas Costa pelos contatos;
 - Engenheiro João Vicente Carchedi Roxo, pelos materiais cedidos, comentários técnicos, incentivo e, sobretudo, amizade
- e aos demais que colaboraram para a elaboração deste estudo.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo analisar os componentes de um sistema de transporte de elementos utilizando ventosas à vácuo, utilizados na paletização automática – notadamente por robôs de paletização. São estudados o conceito e a geração de vácuo, os diversos tipos de geradores de vácuo e ventosas e sugeridos critérios para dimensionamento e seleção desses componentes. Com isto, espera-se aumentar a eficiência do sistema reduzindo, por exemplo, gastos energéticos devido ao superdimensionamento.

É feito um estudo de caso utilizando-se a garra do robô de paletização e seu próprio sistema de vácuo. Este experimento utiliza cinco materiais diferentes, utilizados freqüentemente na indústria: dois tipos de papelão, vidro, metal e madeira polida.

O resultado do teste revela discrepâncias entre valores teóricos e práticos. Tais diferenças ocorrem devido a deformações na ventosa submetida a pressões de vácuo elevadas e carregamentos extremos. Como consequência, um coeficiente de segurança compreendido entre 2.5 e 3.0 é indicado para o dimensionamento correto do diâmetro mínimo da ventosa.

“Abstract”

The objective of this application is to analyse the parts that compose a transport system of materials using suction pads and vacuum in automatic palletizing – especially using palletizing robots. The vacuum concept and its production and the variety of vacuum generators and suction pads are shown in this document. Selection and dimensioning of that components are suggested, too. Thus, the system's efficiency is increased and energy losses are reduced, for instance, due to overdimensioning.

A case study is made using the robot's grip and its own vacuum system. This experience uses five different materials frequently used in industry: two kinds of cardboards, glass, metal and polished wood.

The results of this analysis show some divergence in theoretical and practical results. These discrepancy happen due to deformation in the suction pad submitted to high vacuum pressure and severe external forces. Consequently, a security factor between 2.5 and 3.0 is indicated to the correct dimensioning of the minimum suction pad's diameter.

Agradecimentos

Resumo

“Abstract”

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
2. O Vácuo	4
2.1. Classificação	4
2.2. Analogia com Circuitos Elétricos	5
2.3. Escoamento em Dutos	8
2.4. Tempo de Evacuação.....	11
2.4.1. Tempo de evacuação de um volume para materiais não porosos .	11
2.4.2. Tempo de evacuação de um volume para materiais porosos	13
3. Sistemas a Vácuo Utilizados em Robôs	15
3.1. Topologia do Sistema.....	15
3.2. Geração de Vácuo.....	16
3.3. Geradores de Vácuo.	20
3.3.1. Ventiladores e bombas volumétricas	21
3.3.2. Os ejetores a ar comprimido (venturis)	22
3.4. Comparativo Entre Ventiladores, Bombas Volumétricas e Ejetores a Ar Comprimido.....	24
3.4.1. Critérios de seleção de ejetores a ar – Grau de eficiência	25
3.5. Vazamentos	26

3.5.1. Cálculo da vazão de vazamento e escolha do gerador de vácuo ..	28
4. A Ventosa.....	30
4.1. Princípio de Funcionamento da Ventosa	30
4.2. Estudo da Ventosa	32
4.2.1. Aumento da Força na Ventosa	32
4.2.2. Seleção e Cálculo de Ventosas	33
5. Estudo de Caso.....	40
5.1. Experimento Prático	40
5.1.1. Parâmetros analisados.....	40
5.1.2. Descrição do equipamento	40
5.1.3. Procedimento experimental	41
5.1.4. Levantamento de dados	42
5.2. Análise Teórica.....	46
5.3. Análise dos Resultados - Comparação Entre Valores Teóricos e Experimentais	47
6. Conclusão	49
7. Referências Bibliográficas	50

Lista de Figuras

Figura 1.1: Célula Robotizada de Paletização	2
Figura 2.1: Circuito elétrico de corrente contínua e circuito pneumático análogo	6
Figura 2.2: Sujeição de elemento através de ventosa sem vazamento	11
Figura 2.3: Sujeição de elemento através de ventosa com vazamento	13
Figura 3.1: Célula de paletização	15
Figura 3.2: Lei de Boyle	16
Figura 3.3: Ventilador Centrífugo.....	17
Figura 3.4: Bomba de Pistão	17
Figura 3.5: Bomba de Palhetas	17
Figura 3.6: Bomba "Roots"	17
Figura 3.7: Tubo de Venturi.....	18
Figura 3.8: Ejetor Venturi de quatro estágios.	19
Figura 3.9: Ejetor Venturi integrado à ventosas.....	19
Figura 3.10: Curva característica para o gerador de vácuo Festo VAD-3/8	20
Figura 3.11: Ejetor Simples	22
Figura 3.12: Ejetor Slot.....	22
Figura 3.13: Ejetor Multietapa	23
Figura 3.14: Ejetor Multicaracterística	23
Figura 3.15: Equipamento Utilizado na Determinação Prática da Vazão de Vazamento.....	29
Figura 4.1: Ventosa cônica.....	30
Figura 4.2: Desenho esquemático da ventosa Schmalz SG 30	30

Figura 4.3: Sujeição de elemento por ventosa	31
Figura 4.4: Variação relativa do nível de vácuo com a altitude da instalação ..	33
Figura 4.5: Ventosa cônica.....	34
Figura 4.6: Ventosa em fole	35
Figura 4.7: Aplicações da ventosa em fole	35
Figura 4.8: Ventosa rígida	35
Figura 4.9: Ventosa Cônica.....	36
Figura 5.1: Esquema da instalação	41
Figura 5.2: Variação da pressão interna da ventosa	43
Figura 5.3: Variação da força na ventosa.....	43
Figura 5.4: Variação da força na ventosa (Caixa A)	44
Figura 5.5: Variação da força na ventosa (Caixa B)	44
Figura 5.6: Variação da força na ventosa (Vidro)	44
Figura 5.7: Variação da força na ventosa (Metal)	44
Figura 5.8: Variação da força na ventosa (Madeira).....	45
Figura 5.9: Capacidade de carga teórica da ventosa	46
Figura 5.10: Variação da força na ventosa – valores teóricos e práticos	47

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Tabela de Conversão de Unidades de Pressão ao Nível do Mar....	4
Tabela 2.2: Classificação do Vácuo.	5
Tabela 3.1: Comparação entre geradores de vácuo.....	25
Tabela 3.2: Comparação entre ejetores a ar comprimido.	26
Tabela 3.3: Vazão de vazamento a diferentes pressões para uma área de vazamento de 1mm^2	29
Tabela 4.1: Matérias-primas de ventosas e suas aplicações.	36

1. INTRODUÇÃO

Sistemas a vácuo são vastamente empregados na indústria. O vácuo é utilizado em indústrias químicas e petroquímicas, indústrias alimentícias, indústria aero-espacial, na microeletrônica, ou seja, em todos os processos que necessitam de pressões abaixo da pressão atmosférica ambiente.

Outra aplicação do vácuo é na sucção e transporte de objetos de uma localidade para outra através de ventosas. Neste caso, a automatização desse processo é bastante conveniente, visto que tal movimentação, na maioria dos casos, se dá de forma cíclica.

Um exemplo típico do emprego do vácuo na sujeição de objetos é o processo de paletização, onde diversos objetos (usualmente caixas) são empilhados sobre uma plataforma - o *pallet* - com o objetivo de facilitar a movimentação da carga como um todo.

Um *pallet* costuma acomodar de trinta a cem produtos desde sacos de minério até gêneros alimentícios e todo o processo de paletização (por exemplo, colocação do *pallet* na esteira de saída, alocação dos produtos no *pallet* e liberação do mesmo para remoção pela empilhadeira) pode ser feita automaticamente através de um robô específico para esse fim.

Devido a repetibilidade do processo, o emprego de robôs para essa tarefa é cada vez maior. Além disso, robôs são mais rápidos e precisos, o que os torna economicamente viáveis para diversas indústrias. Atualmente, são empregados principalmente na indústria de bens de consumo (*consumer goods*).

1.1. Objetivos

O processo de paletização consiste, atualmente, em uma única garra de acionamento eletropneumático composta por uma, duas ou três colunas de ventosas e um par de ganchos. A coluna de ventosas é utilizada para efetuar a manipulação do produto a ser paletizado e é formada por dez pares de ventosas controladas par a par. Os ganchos têm a função de movimentar o pallet vazio da pilha de *pallets* para a esteira de saída como pode ser visto na Figura 1.1

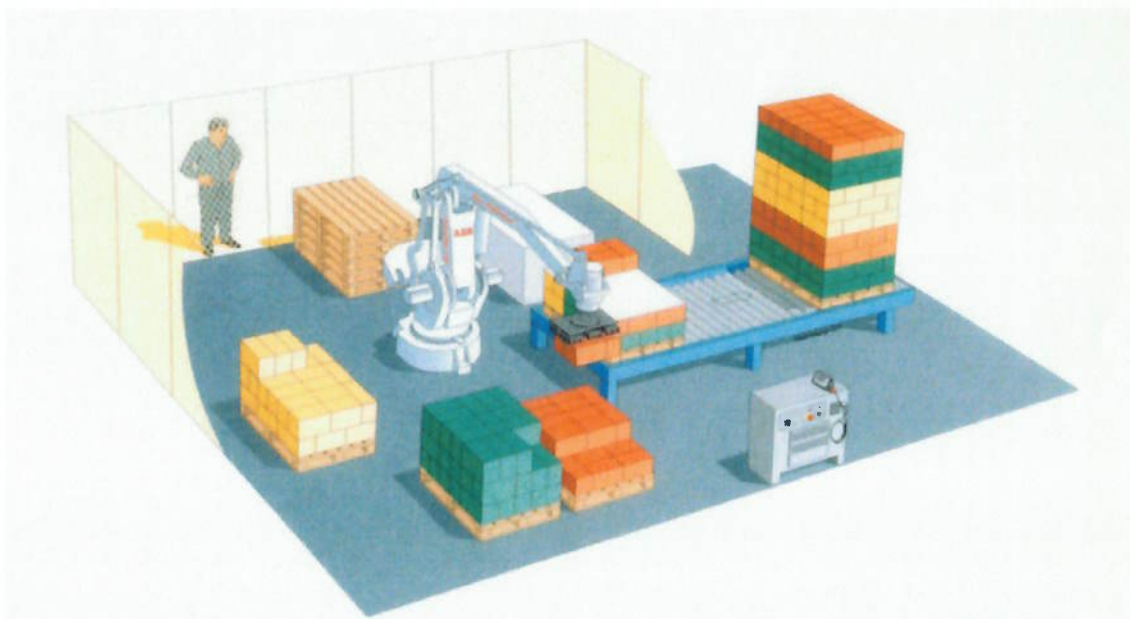


Figura 1.1: Célula Robotizada de Paletização

Essa é a configuração padrão da garra para paletização. Ou seja, o único parâmetro que se pode alterar no sistema é o número de colunas - de uma a três.

Devido à grande variedade de produtos utilizados, essa garra vem se mostrando por vezes ineficiente havendo diversos casos de queda do produto durante a movimentação, ocasionando paradas na linha produtiva e conseqüente prejuízo financeiro.

Neste contexto, este estudo tem como finalidade analisar as causas dessas falhas e corrigi-las além de desenvolver um método para o cálculo do tipo, da forma e da quantidade de ventosas necessárias para a sucção e movimentação de produtos para paletização.

2. O VÁCUO

2.1. Classificação

O vácuo é classificado em diferentes graus de acordo com a pressão. Apesar do pascal (Pa) ser a unidade de pressão do Sistema Internacional de Unidades (S.I.), pressões de vácuo da ordem de dezenas de milhares de pascais são comuns nesses sistemas. Por essa razão, as unidades mais utilizadas são: o bar que corresponde a 10^5 Pa e a atmosfera (atm) que corresponde a 101.325 Pa. Outra medida de pressão de vácuo é o vácuo relativo, a relação entre a diferença de pressão entre o ambiente e sistema e a pressão ambiente sendo, portanto, um adimensional. Ou seja, 75% de vácuo corresponde a 25% da pressão ambiente. A seguir, é apresentada a Tabela 2.1 de conversão entre as diversas unidades utilizadas na medição do vácuo.

Tabela 2.1: Tabela de Conversão de Unidades de Pressão ao Nível do Mar.

kPa 101,3	mbar 1013	Torr 760	- kPa 0	- mmHg 0	% vácuo 0
100	1000	700	10	100	10
		600	20	200	20
		500	30	300	30
		400	40	400	40
50	500	300	50	500	50
		200	60	600	60
		100	70	700	70
			80		80
			90		90
0	0	0	101,3	760	100

À medida que a pressão diminui, o vácuo atingido pode ser classificado de diversas formas. O vácuo pode ser dividido, por exemplo, em cinco categorias: baixo, primário, alto, muito alto e ultra-alto. Uma classificação simplista considera apenas três categorias: baixo, médio e alto. As relações destes graus de vácuo com as respectivas pressões indicadas na Tabela 2.2

Tabela 2.2: Classificação do Vácuo.

Pressão (bar)	Pressão Relativa	Zonas de Pressão
1.01 - 0.81	0 – 20%	Baixo vácuo
0.81 – 0.01	20% - 99%	Médio vácuo
Abaixo de 0.01	Acima de 99%	Alto vácuo

Obs.: Valores ao nível do mar, pressão ambiente 1.013 bar

Como dito, sistemas a vácuo são altamente empregados na indústria. Através do vácuo é possível, por exemplo, a sujeição de elementos através de ventosas. Nesta aplicação, utiliza-se o médio vácuo, com pressões relativas entre 55% e 85%.

2.2. Analogia com Circuitos Elétricos

É muito usada a analogia entre um circuito de corrente contínua e os sistemas à vácuo devido semelhança entre ambos.

Considere um circuito elétrico formado somente por fontes e resistores como mostrado na Figura 2.1. Em regime permanente a corrente contínua não é criada nem destruída e o potencial elétrico (tensão) é constante no tempo em qualquer ponto do sistema.

Considere também um sistema de vácuo constituído por uma linha conectando um gerador de vácuo a uma ventosa atuando sobre um elemento poroso. Nesta configuração, o ar sai da atmosfera, atravessa o elemento em direção à linha de pressão, penetra no gerador de vácuo onde é expelido novamente para a atmosfera.

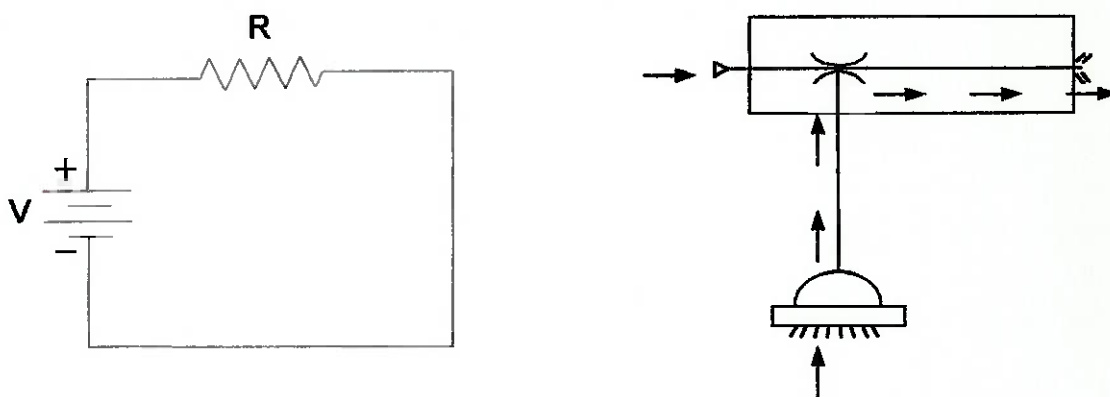


Figura 2.1: Circuito elétrico de corrente contínua e circuito pneumático análogo

Em regime permanente, pode ser feita, então, a analogia com o circuito elétrico descrito acima: a pressão varia ao longo do sistema, mas em um determinado ponto, ela é constante no tempo.

Suponhamos que esse sistema esteja em equilíbrio térmico. A partir dessas condições, pode-se definir a corrente de gás Q que representa as moléculas em movimento e é análoga à corrente elétrica.

No caso elétrico, a resistência em ohms $[\Omega]$ do resistor é dada pela Lei de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad [2.1]$$

onde V é a tensão em volts [V] entre os terminais do resistor e I é a corrente elétrica em ampères [A] que nele flui.

Da mesma forma, a resistência ou impedância do sistema à vácuo dada em m^{-3} é definida pela queda de pressão em pascais [Pa] por unidade de corrente em pascais vezes metros cúbicos [Pa.m³], ou seja:

$$Z = \frac{\Delta p}{Q} \quad [2.2]$$

onde P é a diferença de pressão, definido por

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [2.3]$$

p_1 é a pressão a montante do trecho estudado e p_2 é a pressão a jusante.

Ao inverso da resistência, dá-se o nome de condutância, cuja unidade no S.I. é m^3 . Portanto, esta é dada pela seguinte equação:

$$C = \frac{Q}{\Delta p} \quad [2.4]$$

Nota-se ainda que a analogia elétrica também se aplica à combinação de resistências em série e em paralelo. Logo, as seguintes relações também são válidas:

$$Z_{SÉRIE} = \sum_{i=1}^n Z_i \quad [2.5]$$

$$\frac{1}{Z_{PARALELO}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i} \quad [2.6]$$

$$\frac{1}{C_{SÉRIE}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad [2.7]$$

$$C_{PARALELO} = \sum_{i=1}^n C_i \quad [2.8]$$

2.3. *Escoamento em Dutos*

No escoamento de gases em dutos, os impactos entre suas moléculas são desprezíveis se comparados aos impactos entre o gás e a parede do duto. Na maioria dos casos, tais choques resultam na reflexão das moléculas do gás.

Knudsen [2] estudou o comportamento de gases em dutos e descobriu que a direção de reflexão da molécula do gás independe da direção de incidência. Tal comportamento é descrito pela seguinte expressão:

$$ds = \frac{d\varpi}{\pi} \cos \theta \quad [2.1]$$

onde ds é a probabilidade de uma molécula deixar a superfície em um ângulo (pequeno) $d\omega$ formando um ângulo θ com a normal da parede do duto.

A alta pressão, o efeito dessa distribuição poderia induzir a ocorrência de colisões entre as moléculas de gás perto da superfície imediatamente após a reflexão de uma molécula na parede do duto. Contudo, a baixas pressões, onde as colisões intermoleculares são raras, o termo escoamento quase perde seu sentido literal.

A resistência de um duto a um escoamento de fluido é dado por:

$$R = 1,59 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{273 \cdot M}{T}} \cdot \left(\frac{l}{d^3} \right) \left(\frac{4}{3 \cdot d^2} \right) \quad [2.2]$$

onde R = tempo gasto para atravessar o duto (s/cm^3),

M = peso molecular do gás (g),

T = temperatura do gás (K),

L = comprimento do duto (cm),

D = diâmetro do duto (cm).

Quando o fluido de trabalho utilizado é o ar, esta fórmula pode ser simplificada, sem a ocorrência de grandes erros. Primeiramente, a parcela

$\frac{4}{3 \cdot d^2}$ pode ser desprezada pois é muito menor que $\frac{l}{d^3}$. Então, inserindo o

peso molecular - 29 para o ar - a temperatura - aproximadamente 295K (273° +

22°C) - e substituindo d^3 por $8.r^3$ (pois $d^3 = (2.r)^3 = 8.r^3$), o termo

$$\frac{1,59}{8} \sqrt{\frac{273 \times 29}{295}} \cong 1.$$

Logo, a equação acima pode ser aproximada por:

$$R = \frac{l}{r^3} \cdot 10^{-5} \text{ s/cm}^2 \quad [2.3]$$

Se medirmos R em l/s e l e r em milímetros, teremos:

$$R = \frac{l \cdot 10^{-1}}{r^3 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-2} = \frac{l}{r^3} \text{ s/l} \quad [2.4]$$

Como esperado, nota-se que a resistência é diretamente proporcional ao comprimento do duto e inversamente proporcional ao seu raio. Logo, é o diâmetro do duto que irá controlar a velocidade do ar (pois seu comprimento será determinado pela distância entre o gerador de vácuo e a ventosa, neste caso). Por exemplo, Para $l=200\text{mm}$ e $r=5\text{mm}$ (valores utilizados em sistemas a vácuo) a resistência a um escoamento será 1.6s/l e o seu inverso, 0.625l/s será a vazão máxima do escoamento no sistema, que independe da potência do gerador de vácuo.

2.4. Tempo de Evacuação

2.4.1. Tempo de evacuação de um volume para materiais não porosos

Considere o seguinte sistema:

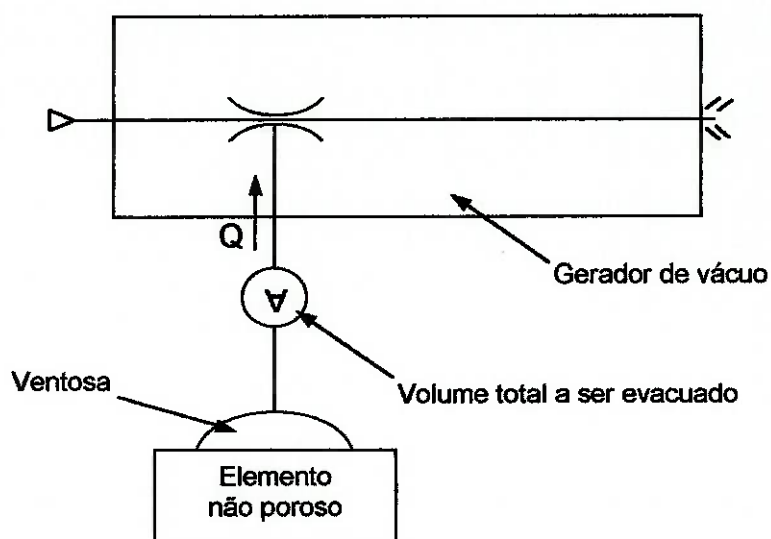


Figura 2.1: Sujeição de elemento através de ventosa sem vazamento

Aplicando a equação da continuidade ao sistema acima:

$$-\rho \cdot Q = \frac{d}{dt}(\partial V) \quad [2.1]$$

onde ρ é a densidade do ar e Q é a vazão de vácuo:

$$-\rho.Q = \rho.\frac{\partial V}{\partial t} + V.\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho.\frac{\partial V}{\partial t} + V.\left(\frac{\rho}{p}\right).\frac{\partial p}{\partial t} \quad [2.2]$$

Assumindo que o volume não varia¹, $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$. Logo,

$$-\rho.Q = \rho.\frac{V}{p}.\frac{dp}{dt} \Rightarrow dt = -\frac{V}{Q}.\frac{1}{p}.dp \quad [2.3]$$

Integrando ambos os lados com a condição inicial $p=p_0$ em $t=0$, tem-se

$$t = \frac{V}{Q} \ln \frac{p_0}{p} \quad [2.4]$$

onde: V é dado em m^3 ;

Q é dado em m^3/s e

t é dado em s.

Esta fórmula representa, no caso de ventosas, o tempo mínimo necessário para se atingir a máxima força de sujeição.

¹ Por simplicidade, este cálculo não considera a variação de volume em função da flexibilidade da ventosa.

2.4.2. Tempo de evacuação de um volume para materiais porosos

O mesmo raciocínio pode ser aplicado na obtenção do tempo de evacuação de um volume para superfícies porosas.

Neste caso, há uma vazão de vazamento (q) de sentido contrário à vazão de vácuo (enquanto um entra no sistema, o outro sai).

Considere o sistema com vazamento abaixo:

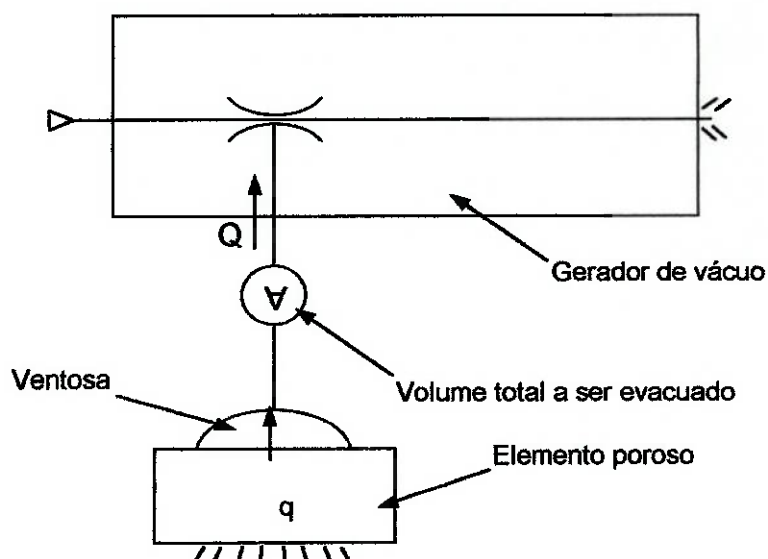


Figura 2.1: Sujeição de elemento através de ventosa com vazamento

Então, o tempo de evacuação é dado por:

$$t = \frac{V}{Q - q} \ln \frac{p_0}{p} \quad [2.1]$$

A vazão de vazamento, em muitos casos, pode representar de 50% a 60% da vazão de vácuo. Por esta razão, o termo $Q-q$ pode ser substituído por $0,5.Q$ ou $0,4.Q$ dependendo da porosidade do material em contato com a ventosa. Para o caso $q=0,6.Q$, temos:

$$t = \frac{V}{0,4.Q} \ln \frac{p_0}{p} \quad [2.2]$$

Como esperado, o tempo de evacuação de um volume para superfície porosa é maior do que àquele para superfície não porosa devido a presença de vazamentos.

3. SISTEMAS A VÁCUO UTILIZADOS EM ROBÔS

3.1. Topologia do Sistema

Uma célula de paletização é mostrada na Figura 3.1. Nela podemos identificar o robô, a garra pneumática, as esteiras, os pallets e os produtos paletizados.



Figura 3.1: Célula de paletização

3.2. Geração de Vácuo

A geração de vácuo consiste na redução dos impactos moleculares dentro de um sistema. Os dois métodos mais utilizados são:

- **Aumento do volume de um sistema a temperatura constante.** A uma temperatura fixa, o produto entre a pressão e o volume é constante segundo a Lei de Boyle. Os equipamentos que utilizam desse princípio conseguem obter um alto vácuo. A Figura 3.1 ilustra este princípio.

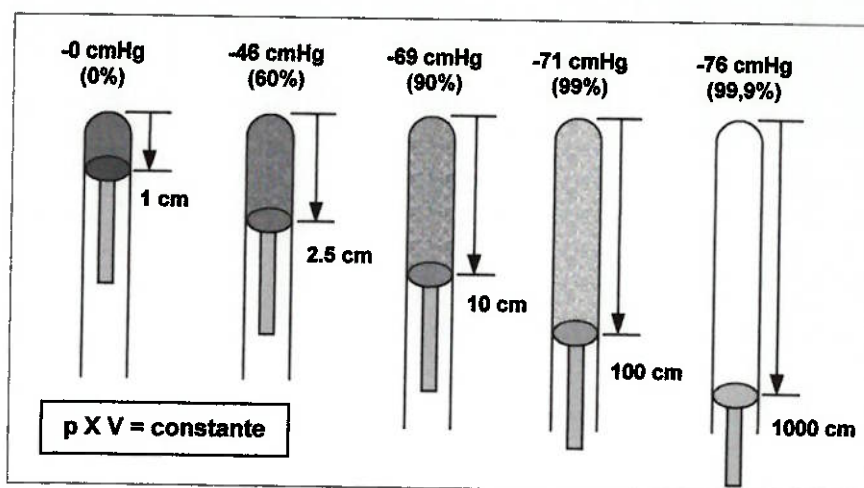


Figura 3.1: Lei de Boyle

Os equipamentos baseados neste princípio são os ventiladores (centrífugos e radiais) e as bombas (de pistão, de difusão, de membrana, de palhetas, roots).

A Figura 3.2 representa um ventilador centrífugo. Este equipamento é formado por pás que giram em relação a um eixo comum. Este movimento de rotação promove a queda de pressão de um dos lados das pás.

A bomba de pistão da Figura 3.3 funciona de modo semelhante a um motor de combustão interna: o movimento de rotação é transformado em translação e transmitido ao pistão através de um mecanismo biela-manivela. O ar é bombeado da direita para a esquerda de forma não contínua (em pulsos).

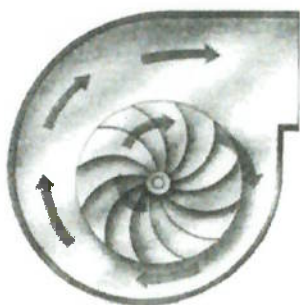


Figura 3.2: Ventilador Centrífugo



Figura 3.3: Bomba de Pistão

A Figura 3.4 representa uma bomba de palhetas de funcionamento semelhante ao ventilador centrífugo.

A bomba "roots" mostrada na Figura 3.5 é formada por dois eixos de rotação. As duas peças funcionam como dentes de uma engrenagem, a da esquerda girando em sentido horário, a outra em sentido inverso. Como esquematizado na figura, o ar entra pela parte inferior do equipamento, onde é gerado vácuo, e é empurrado até a parte superior pelas duas peças rotantes.

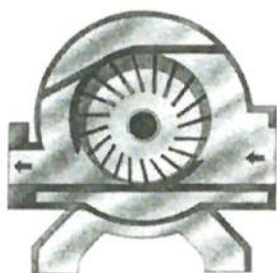


Figura 3.4: Bomba de Palhetas

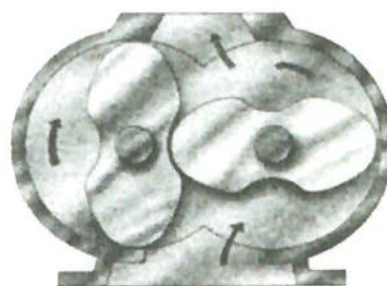


Figura 3.5: Bomba "Roots"

Os ventiladores comparados as bombas promovem, geralmente, maiores vazões e menores depressões.

- **Aumento da velocidade de um fluido a vazão em massa constante.**

Esta afirmação é baseada no Princípio de Bernoulli: o aumento da velocidade de escoamento de um fluido diminui a pressão do mesmo. O tubo de Venturi da Figura 3.6 é baseado neste princípio. Ar comprimido é injetado no ponto 1. No estrangulamento (ponto 2), há o aumento da velocidade do ar e conseqüente queda de pressão, gerando vácuo na parte inferior do equipamento.

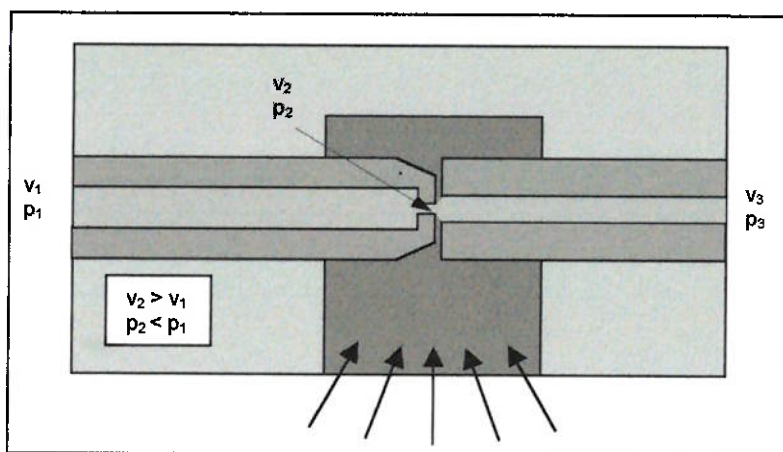


Figura 3.6: Tubo de Venturi

A principal aplicação deste princípio é o ejetor a ar comprimido. A queda de pressão neste equipamento é limitada pois, como esta depende da velocidade do ar comprimido, a pressão é estagnada ao se atingir a velocidade crítica do fluido pressurizado, como será explicado no Capítulo item 5.1 do capítulo 3. Apesar disso, o princípio de Venturi pode ser utilizado recursivamente através de um tubo de estágios múltiplos, aumentando o grau de vácuo obtido. A Figura 3.7 mostra um ejetor Venturi de quatro estágios.

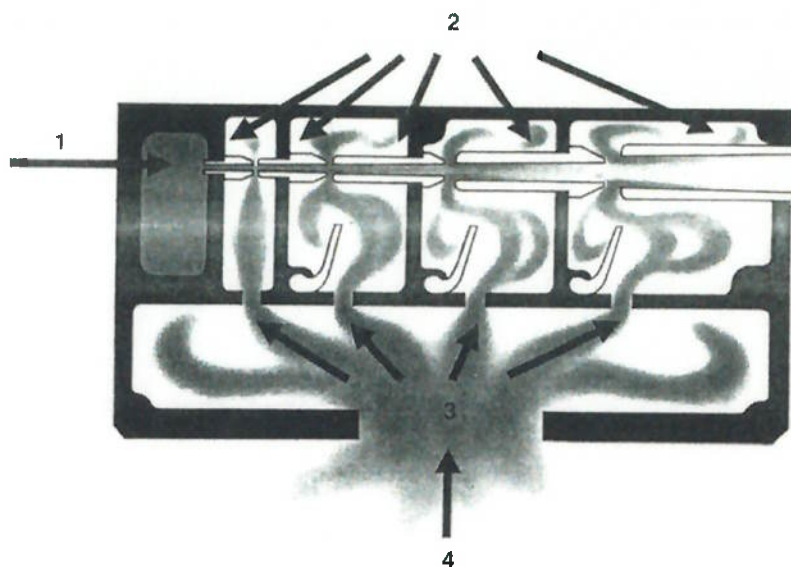


Figura 3.7: Ejetor Venturi de quatro estágios.

A presença de múltiplos estágios promove tanto o aumento no nível de vácuo quanto o aumento da vazão pelo orifício 4. Ainda sobre a figura, 1 é a entrada de ar comprimido, 2 são os ejetores e 3 é o fluxo de vácuo.

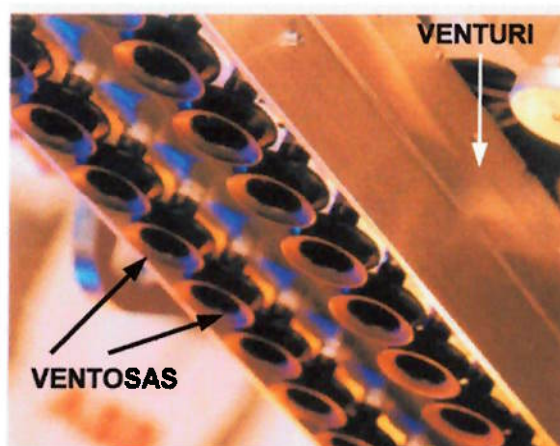


Figura 3.8: Ejetor Venturi integrado à ventosas

Nos geradores de vácuo, as principais variáveis são: vazão em volume e nível de vácuo. Vazão em volume é o volume de fluido que escoar no duto do gerador de vácuo durante um certo tempo, usualmente medida em litros por

segundo e nível de vácuo é a relação entre a diferença entre a pressão interna e externa do duto do gerador e a pressão externa (pressão atmosférica), dada em porcentagem. Tais parâmetros são inversamente proporcionais, sendo que o máximo de um corresponde ao mínimo do outro, como mostra a Figura 3.9.

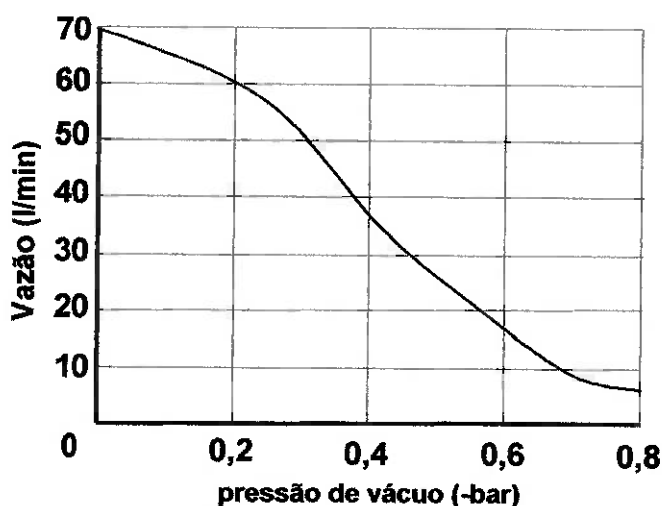


Figura 3.9: Curva característica para o gerador de vácuo Festo VAD-3/8

3.3. Geradores de Vácuo.

A escolha certa do gerador de vácuo é fator preponderante para o sucesso do sistema. Os principais fatores que influenciam na escolha do gerador são: o nível de vácuo requerido, o volume a ser evacuado, o tempo de evacuação, o consumo de energia e as dimensões do gerador. Outro fator que pode ser considerado é o nível de ruído gerado pelo equipamento.

3.3.1. Ventiladores e bombas volumétricas

As bombas volumétricas e os ventiladores usualmente são acionadas por um motor elétrico. Algumas vezes são acionadas por motores hidráulicos, pneumáticos ou ainda de combustão interna. Elas transferem o ar da zona de aspiração para a zona de escape, criando uma pressão negativa.

- **Os Ventiladores**

Os ventiladores utilizados para a produção de vácuo se caracterizam pela grande vazão e por possuírem poucas partes em movimento. Além disso, geram pouco calor e costumam consumir pouca energia. Como inconvenientes, destacam-se o baixo nível de vácuo, o ruído e o tamanho elevados e o alto tempo para se atingir o regime permanente (pleno funcionamento). Os principais ventiladores são: o centrífugo, o radial e o de canais laterais.

- **As Bombas Volumétricas**

As bombas se caracterizam pelo alto nível de vácuo e por entrarem em regime permanente rapidamente. Algumas bombas possuem pouca vazão e baixo preço como a bomba de pistão. Outras bombas, como a *roots*, possuem alta vazão mas um alto custo. A bomba de palhetas tem como vantagem o alto grau de vácuo aliado a grande vazão com baixo nível de ruído. Como inconveniente, apresenta alto preço e exige uma freqüente manutenção.

3.3.2. Os ejtores a ar comprimido (venturis)

Nestes equipamentos, o ar comprimido flui através do ejtor, onde sofre uma expansão. Durante a expansão, a energia armazenada na forma de pressão e calor é convertida em energia cinética. O aumento da velocidade do ar comprimido promove a queda de pressão e de temperatura, criando uma zona de pressão negativa (vácuo) no bocal de aspiração.

A queda de pressão neste equipamento é proporcional a velocidade do ar comprimido. Os principais ejtores a ar comprimido disponíveis atualmente no mercado são: ejtor simples, slot multietapa e multicaracterística.

Ejtor simples: consiste na utilização de apenas um venturi como mostrado na Figura 3.1. Devido às características construtivas, este ejtor não consegue gerar alto vácuo e alta vazão simultaneamente.

Ejtor slot: a Figura 3.2 mostra um ejtor slot. Ar comprimido é injetado no ponto 1 e expelido pelo ponto 3. No ponto 2 ocorre a geração de vácuo.



Figura 3.1: Ejtor Simples

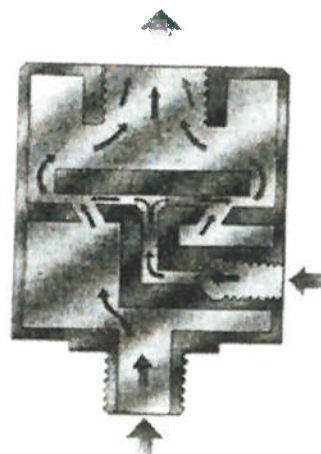


Figura 3.2: Ejtor Slot

Ejetor multietapa: mostrado na Figura 3.3, este ejedor consiste na associação em série de venturis. O primeiro venturi (de menor diâmetro) promove alto nível de vácuo e pouca vazão enquanto que o último venturi da associação produz baixo nível de vácuo e alta vazão. O equipamento possui válvulas que regulam automaticamente o acionamento de cada venturi, possibilitando alto nível de vácuo e alta vazão simultaneamente.

Ejetor multicaracterística: A Figura 3.4 representa um ejedor multicaracterística composto de dois ejedores multietapas associados em paralelo. Em comparação com o ejedor multietapa, essa associação reduz o consumo de ar.

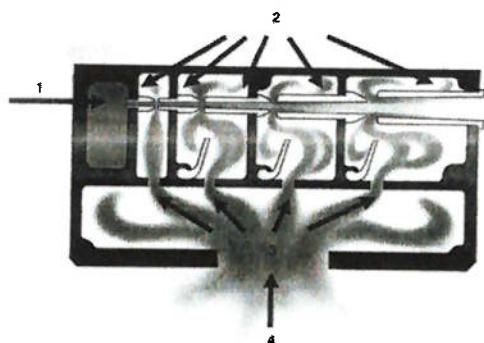


Figura 3.3: Ejedor Multietapa

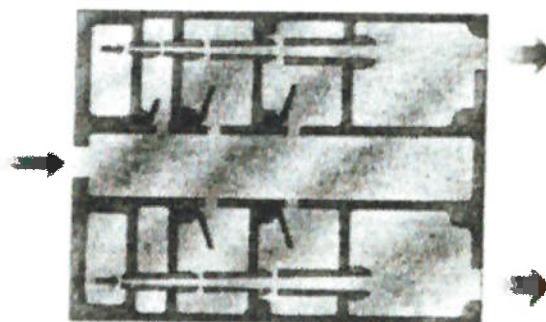


Figura 3.4: Ejedor Multicaracterística

3.4. Comparativo Entre Ventiladores, Bombas Volumétricas e Ejetores a Ar Comprimido

O transporte de produtos utilizando-se ventosas exige algumas características do sistema a vácuo utilizado:

1. Elevado nível de vácuo (superior a 60%);
2. Baixo tempo de resposta;
3. Rápida comutação pressão ambiente - vácuo - pressão ambiente;
4. Gerador de vácuo leve;
5. Ventosas independentes.

A primeira característica provém do fato que, na maioria das aplicações, a área de contato disponível para as ventosas e o elemento é pequena. Logo, a utilização de baixos níveis de vácuo implicaria na adoção de um número maior de ventosas, aumentando a área de contato requerida.

A segunda e a terceira características são necessárias devido ao tempo do ciclo de paletização, que deve ser o menor possível. O baixo tempo de resposta implica na instalação do gerador de vácuo o mais próximo possível da ventosa, minimizando o volume a ser evacuado. No caso de robôs, o gerador é instalado no manipulador. Qualquer acréscimo de peso no manipulador diminui sua capacidade de carga. Portanto, o gerador de vácuo deve ser também leve.

O transporte exige ventosas independentes pois a pega dos elementos é feita em blocos de duas ou mais unidades, porém a amarração² escolhida pode implicar no depósito de uma unidade por vez: algumas ventosas permanecem “ligadas” segurando a carga, enquanto outras são “desligadas” soltando a carga na posição desejada. A Tabela 3.1 compara os tipos de geradores de vácuo com as características desejadas.

Tabela 3.1: Comparação entre geradores de vácuo.

Gerador de vácuo	Nível de vácuo	Tempo de resposta	Comutação	Peso
Ventiladores	baixo/alto	alto	lenta	médio/alto
Bombas	baixo/alto	alto	rápida	médio/alto
Ejetores a ar	baixo/alto	baixo	muito rápida	baixo/médio

Pela análise da tabela acima, o equipamento mais indicado para o transporte de produtos utilizando-se ventosas é o ejedor a ar.

3.4.1. Critérios de seleção de ejtores a ar – Grau de eficiência

A Tabela 3.1 a seguir compara o desempenho de alguns tipos de ejtores a ar de acordo com as características desejadas.

² **Amarração** é o termo utilizado para designar a posição de empilhamento das caixas no pallet. Existem duas posições de deposição das caixas: uma para as camadas ímpares e outra para as camadas pares. Há uma alternância de direções entre estas camadas para garantir maior rigidez na pilha. Devido à geometria do elemento e do pallet, há diversas configurações possíveis, variando de produto para produto.

Tabela 3.1: Comparação entre ejetores a ar comprimido.

Ejetor	Nível de vácuo	Vazão	Consumo de ar	Nível de ruído	Preço
Simplex	baixo/alto	alto/baixo	alto	alto	baixo
Slot	médio	médio	médio	alto	médio
Multietapa	alto	alto	médio	baixo	alto
Multicaracterística	alto	alto	Baixo	baixo	alto

Além desta tabela, pode-se utilizar um critério aplicado para uma comparação objetiva entre os ejetores a ar dos mais diversos tipos – de uma ou mais fases – o grau de eficiência: quanto maior este adimensional for, mais adequado será o gerador de vácuo para o sistema.

O grau de eficiência η é definido pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{t \cdot Q}{V}} \quad [3.1]$$

onde t = tempo de evacuação (s) de um volume (l) com uma depressão p_v (bar)

Q = vazão de ar do ejedor (l/s)

V = volume a ser evacuado (l)

3.5. Vazamentos

A principal causa de falha em sistemas de ventosas a vácuo é a queda na pressão de vácuo gerada por vazamentos na interface ventosa-elemento. Na maioria das aplicações, os vazamentos são inevitáveis devido a porosidade do material sugado. A atenção nesses casos é voltada para o controle da

pressão de vácuo. Outra causa comum de falha é a aplicação errônea do tipo (forma) e material da ventosa.

Para robôs de paletização, parâmetros como impurezas, forma e composição do material sujeito são determinantes no projeto do sistema. A estimação de tais parâmetros é extremamente complicada. Por essa razão, usam-se altos coeficientes de segurança.

Os dados de fabricantes de ventosas devem ser tomados com atenção pois, na prática, tais dados são tomados em condições de laboratório e podem não corresponder à realidade do sistema. Por exemplo, o fabricante Schmalz (Alemanha) afirma que um modelo particular de ventosa suporta 74N de força vertical e 40N de força horizontal. Contudo, experiências realizadas na Asea Brown Boveri, fabricante de robôs de paletização (Suécia), demonstraram que a força vertical máxima obtida sem descolamento da ventosa no elemento (caixa de papelão) é de aproximadamente 10N, sete vezes menor do que anunciada pelo fabricante.

Tal discrepância ocorre devido a aplicação da ventosa. Neste caso, o fabricante fez o teste a uma pressão de vácuo bem maior do que o teste suéco. Devido à porosidade e a diferença de pressão atmosférica nas duas localidades, a ventosa testada na Suécia resistiu somente a cerca de 10N. Teste semelhante realizado na Asea Brown Boveri Ltda. na cidade de Osasco - Brasil, revelou ainda que a porosidade do papelão utilizado nas caixas para embalagem não é constante na mesma peça, ou seja, dependendo do ponto de sucção, a ventosa terá uma capacidade de levantamento diferente. A utilização de fatores de segurança da ordem de três são fortemente recomendados, sendo que o mínimo aceitável para o projeto é dois.

Por estas razões, a experiência e a estatística são ferramentas fundamentais no projeto de sistemas de ventosas.

3.5.1. Cálculo da vazão de vazamento e escolha do gerador de vácuo

A vazão de vazamento pode ser conhecida através de dois métodos:

- a) **Utilizando-se uma tabela** (utilizada quando a área de vazamento é conhecida);
- b) **Experimentalmente** (utilizada quando a área de vazamento é desconhecida).

Conhecendo-se a área de vazamento, pode-se utilizar a Tabela 3.3, que mostra a vazão de vazamento a diferentes níveis de vácuo considerando-se uma área de vazamento de 1mm^2 . O cálculo da vazão de vazamento é feito multiplicando-se a área de vazamento (em mm^2) pela vazão dada na tabela. Na pressão de -47kPa , o ar atinge Mach 1³ e abaixo desta pressão, o aumento do nível de vácuo (diminuição da pressão) não promove o aumento da vazão.

³ Mach 1 é a velocidade do som no ar atmosférico. Ao nível do mar, esta velocidade vale é de 1193km/h , aproximadamente 330m/s .

Tabela 3.1: Vazão de vazamento a diferentes pressões para uma área de vazamento de 1mm^2 .

Nível de Vácuo (kPa)	Vazão de Vazamento (l/s)
-5	0,092
-10	0,118
-20	0,163
-30	0,184
-40	0,197
-47	0,199
Abaixo de -47	0,199

Referência: [4].

Na maioria dos casos, não se conhece a área de vazamento. O cálculo da vazão de vazamento é, então, realizado de forma experimental. O experimento consiste na instalação do equipamento Figura 3.1.

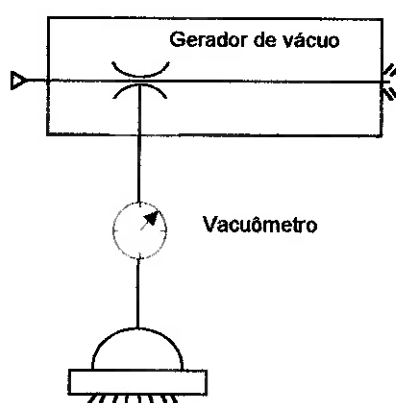


Figura 3.1: Equipamento Utilizado na Determinação Prática da Vazão de Vazamento

Com o gerador de vácuo em funcionamento, é lido o valor de pressão no vacuômetro. Este valor corresponde a uma vazão aspirada pelo gerador de vácuo e dada pela sua curva característica. Este valor corresponde à vazão de vazamento.

4. A VENTOSA

4.1. Princípio de Funcionamento da Ventosa .

Uma ventosa e seu diagrama esquemático são mostradas nas Figura 4.2, respectivamente. A ventosa funciona devido a diferença de pressão entre suas paredes interna e externa. Como no interior da ventosa há vácuo, a pressão externa é maior que a interna.



Figura 4.1: Ventosa cônica
Schmalz SG 30

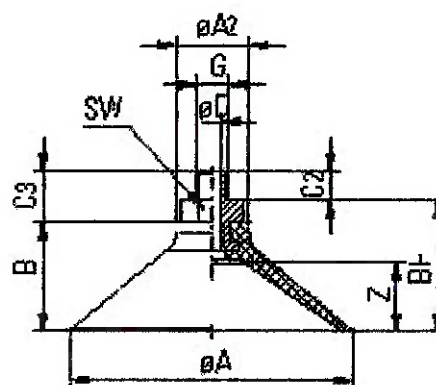


Figura 4.2: Desenho esquemático da
ventosa Schmalz SG 30

Esta diferença de pressão comprime as paredes da ventosa em direção ao elemento sujeito, produzindo forças de compressão entre as duas partes, como pode ser visto na Figura 4.3.

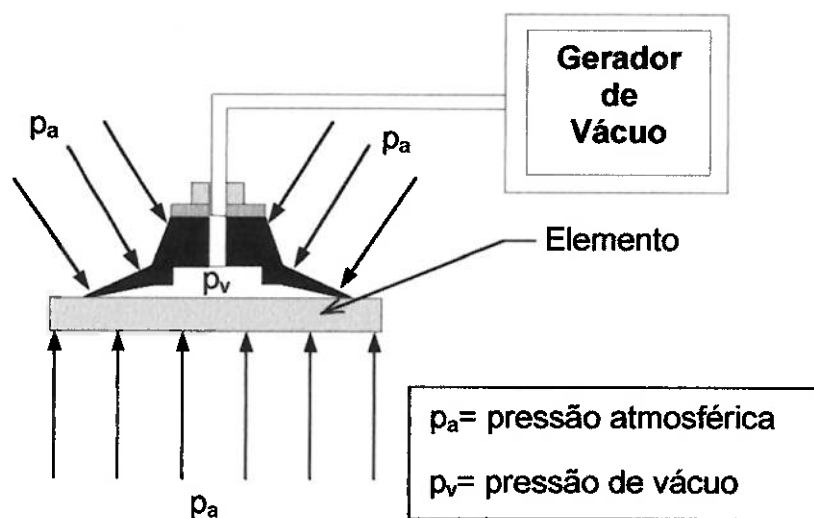


Figura 4.3: Sujeição de elemento por ventosa

Tais forças dependem de vários parâmetros como a geometria do par ventosa-elemento e o nível de vácuo na ventosa. Quanto maior o nível de vácuo, maior será a diferença de pressão e, portanto, maiores serão as forças agindo no par. A geometria do par define o nível de vedação do sistema ventosa-elemento.

Vazamentos proporcionam queda do nível de vácuo e conseqüente redução das forças de sujeição.

Na aplicação de ventosas em robôs de paletização, é desejado que as forças de sujeição sejam suficientes para a movimentação de carga, caso contrário, esta pode se desprender das ventosas durante a movimentação, provocando acidentes e possíveis danos a carga sujeita.

4.2. Estudo da Ventosa

4.2.1. Aumento da Força na Ventosa

A prevenção do descolamento da ventosa no elemento é feita através do aumento da força na ventosa. Há duas formas principais de incremento das forças, ambas baseadas no aumento do nível de vácuo no interior da ventosa:

- a) **Aumento da vedação do sistema.** Em muitos casos, tal procedimento é de difícil solução, quer pela impossibilidade de se reduzir a rugosidade média dos materiais em contato, quer pela variedade dos objetos a serem movimentados com a mesma ventosa (matérias e geometria diferentes).
- b) **Aumento da vazão de vácuo.** Este incremento implica na utilização de geradores de vácuo mais potentes. Além do aumento no custo dos equipamentos, o consumo de energia cresce de forma exponencial.

Por ser uma medida relativa, o nível de vácuo depende ainda da altitude do sistema. Com o aumento da altitude, a pressão atmosférica e o nível de vácuo diminuem. Logo, no cálculo de sistemas a vácuo, a altitude da instalação deve ser considerada. As relações aproximadas entre aumento da altitude e queda no nível de vácuo são dadas na Figura 4.1.

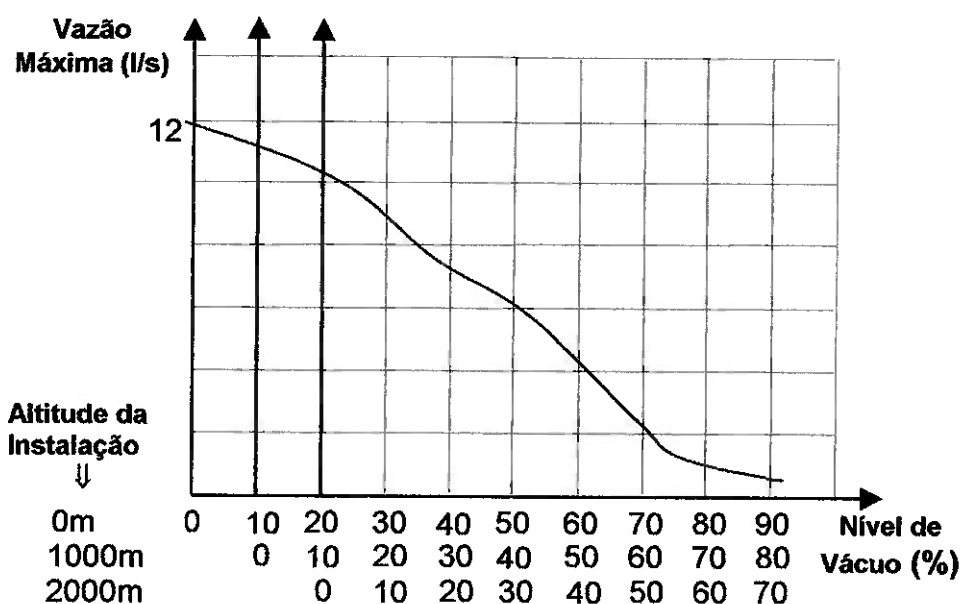


Figura 4.1: Variação relativa do nível de vácuo com a altitude da instalação

4.2.2. Seleção e Cálculo de Ventosas

No projeto de sistemas de ventosas para sujeição, diversos parâmetros são fundamentais na determinação do tipo, material, tamanho, quantidade e disposição das ventosas:

- Massa do elemento sujeito;
- Geometria do elemento;
- Rigidez do material;
- Presença (ou ausência) de vazamentos;

- Aceleração no transporte⁴

A primeira análise é a escolha do plano de contato entre a ventosa e o elemento. Algumas aplicações especiais exigem que se utilize o plano vertical, porém, na paletização se escolhe o plano horizontal, carregando o elemento sujeito pela parte superior.

O passo seguinte é a escolha da forma da ventosa. Há diversas ventosas, cada qual com uma gama de aplicações. Os principais tipos de ventosas são:

Ventosa cônica (universal)



A Figura 4.1 representa a mais simples das ventosas, utilizada para a pega de materiais planos ou ligeiramente curvos. As ventosas cônicas são também as que possuem o menor custo.

Figura 4.1: Ventosa cônica

⁴ A aceleração influi em fatores como o tempo de ciclo de paletização e forças no par ventosa-elemento

Ventosa em fole

Uma ventosa em fole é representada na Figura 4.2. Formada por um ou mais foles, é utilizada para o transporte de materiais cuja superfície é em desnível. Os foles permitem também a pega de objetos de pequenos raios de curvatura ou com desnível angular. Devido a maior facilidade de deformação, esta ventosa não é indicada para altas pressões de vácuo nem para sistemas em que ocorram altas acelerações.



Figura 4.2: Ventosa em fole

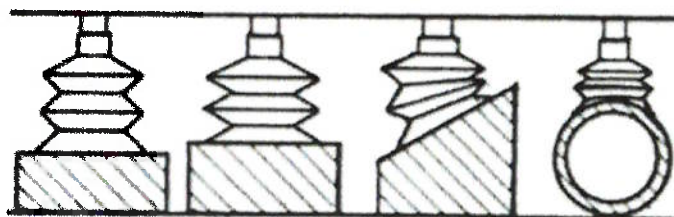


Figura 4.3: Aplicações da ventosa em fole

Ventosa rígida



Figura 4.4: Ventosa rígida

A Figura 4.4 mostra uma ventosa rígida. Devido a sua elevada rigidez, é indicada para a manipulação de objetos grandes, pesados e de superfície plana.

A matéria-prima da ventosa é escolhida considerando-se fatores como resistência à presença de óleo, faixa de temperatura de utilização, durabilidade, resistência à intempéries, etc.

A Tabela 4.1 relaciona os diversos materiais de ventosas com os fatores anteriormente citados.

Tabela 4.1: Matérias-primas de ventosas e suas aplicações.

	Cloropreno	Silicone	Borracha Nitrílica	Poliuretano	Propileno-etileno
Propriedades					
Resistência ao desgaste	+++	++	+++	+++	++
Temp. de trabalho (°C)	-40 a 110	-70 a 200	0 a 90	-20 a 80	-40 a 135
Resistência					
ao tempo	++	+++	++	+++	+++
a óleos	+	-	+++	+++	-
a ácidos	-	-	+	-	-
derivados de petróleo	+	-	+++	-	-
Aplicações					
Indústria alimentícia					
Indústria eletroeletrônica					
Ambientes com alta temp.					
Ambientes com baixa temp					

O passo seguinte é o cálculo da força na ventosa. A força que age entre a ventosa e o elemento depende da área de contato entre ambos e da pressão de vácuo reinante no interior da ventosa.

Considere a ventosa cônica da Figura 4.1:

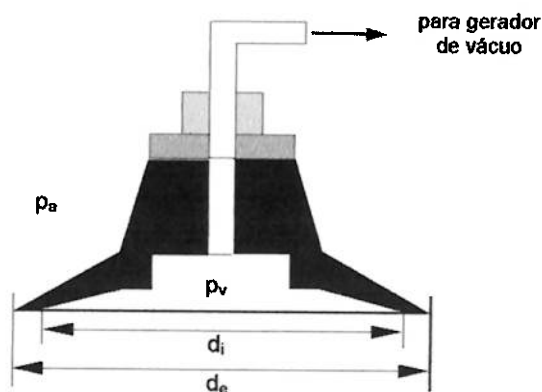


Figura 4.1: Ventosa Cônica

Da definição de pressão,

$$p = \frac{F}{A} \quad [4.1]$$

Como a ventosa tem base circular, sua área de contato com o elemento é:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [4.2]$$

Então, para n ventosas, a força será:

$$F = p_v \cdot A = \frac{\pi \cdot n \cdot p_v \cdot D^2}{4} \quad [4.3]$$

Com os dados de projeto, podemos calcular o diâmetro mínimo das ventosas submetidas a pressão interna de vácuo p_v capazes de suportar a carga F :

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot p_v \cdot n}} \quad [4.4]$$

com D em m , F em N e p_v em $-Pa$.

Para D em mm , F em N e p_v em $-kPa$, substituindo-se o valor da constante π e introduzindo-se o fator de segurança s , a equação [4.4] assume a seguinte forma:

$$D = 35,7 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot s}{p_v \cdot n}} \quad [4.5]$$

onde o fator de segurança s deve valer pelo menos 2.⁵

O diâmetro D corresponde a um diâmetro intermediário entre o externo e o interno da ventosa. Este parâmetro é chamado de diâmetro efetivo da ventosa e é calculado experimentalmente. São utilizados um dinamômetro, utilizado na determinação da força na iminência de descolamento do par ventosa-elemento, e um vacuômetro, para determinar a pressão interna da ventosa. Estes valores são introduzidos na equação [9.4] que fornece o diâmetro efetivo da ventosa. O parâmetro D é um dado dos fabricantes de ventosas.

Alguns fabricantes utilizam-se de fórmulas alternativas para o cálculo do diâmetro ou do número de ventosas particulares a seus produtos. Tais fórmulas levam em conta o diâmetro nominal da ventosa.

O fabricante Schmalz recomenda a seguinte equação:

$$D = 1,12 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot s}{p_v \cdot n}} \quad [4.6]$$

onde D : diâmetro da ventosa (cm);

m : massa da carga (kg);

s : fator de segurança;

⁵ Note que o fator de segurança colocado no radical é um multiplicador direto da área de contato entre a ventosa e o elemento.

p_v : pressão de vácuo (bar) e

n : número de ventosas

Já o fabricante PIAB recomenda a equação [4.7]:

$$D = 113 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot s}{p_v \cdot n}} \quad [4.7]$$

onde D : diâmetro da ventosa (mm);

m : massa da carga (kg);

s : fator de segurança;

p_v : pressão de vácuo (-kPa) e

n : número de ventosas

Para ambos os casos, o diâmetro da ventosa a ser utilizada deve ser aquele imediatamente superior ao diâmetro D resultantes destas equações. Por exemplo, para 20kg de carga suportada por 10 ventosas a -60kPa e um fator de segurança igual a 3, temos os seguintes diâmetros mínimos:

- Pela equação [4.5]: $D = 79.82\text{mm}$ ($g = 10\text{m/s}^2$);
- Pela equação [4.6]: $D = 7.92\text{cm} = 79.20\text{mm}$;
- Pela equação [4.7]: $D = 79.90\text{mm}$;

Considerando-se a pequena variação dos resultados- menor que 1% - englobada pelo fator de segurança, pode-se utilizar a equação [4.5] no cálculo de ventosas. Ainda em favor da segurança, este diâmetro calculado deve ser considerado o diâmetro interno da ventosa.

5. ESTUDO DE CASO

5.1. Experimento Prático

Este experimento tem por objetivo analisar um sistema de ventosas e comparar os valores obtidos na prática com aqueles obtidos analiticamente. O equipamento estudado será a garra de paletização atualmente utilizada nos robôs.

5.1.1. Parâmetros analisados

Os parâmetros analisados neste estudo são: pressões de entrada e saída do gerador de vácuo, pressão de vácuo na ventosa e força máxima vertical na ventosa.

5.1.2. Descrição do equipamento

- Unidade de conservação Festo contendo:
 - elemento filtrante modelo LOED-MIDI-120-536;
 - uma válvula reguladora de pressão modelo LFRD-MIDI-120-518 e
 - um manômetro analógico, escala de 0 a 10 bar.
- Gerador de vácuo Schmalz tipo venturi modelo VGS-P/S-S0;
- Ventosa Schmalz tipo monofole modelo FSGA 53, 53mm de diâmetro nominal;

- Vacuômetro analógico Wika, escala de 0 a -760mmHg;
- Dinamômetro Filizola modelo AT tipo cilíndrico, escala de 0 a 10 kg;

Para a carga, foram utilizados materiais que freqüentemente são utilizados no processo de paletização. Os materiais utilizados foram:

1. Caixa A: caixa de papelão, fabricante N^a Sra. da Penha, tipo CV gramatura 465g, qualidade CK14L e dimensões 450x300x220 (mm)
2. Caixa B: caixa de papelão branco, fabricante N^a Sra. da Penha, tipo CV gramatura 500g, qualidade CK14L, dimensões 600x300x160 (mm)
3. Vidro: Prato de vidro temperado Santa Marina, 220mm de diâmetro, superfície lisa e plana;
4. Metal: Lata de atum sólido Gomes da Costa, 86mm de diâmetro, superfície lisa e levemente ondulada;
5. Madeira: Caixa de madeira lixada (grana 600), lisa e plana

5.1.3. Procedimento experimental

O esquema da instalação é mostrada na Figura 5.1 a seguir:

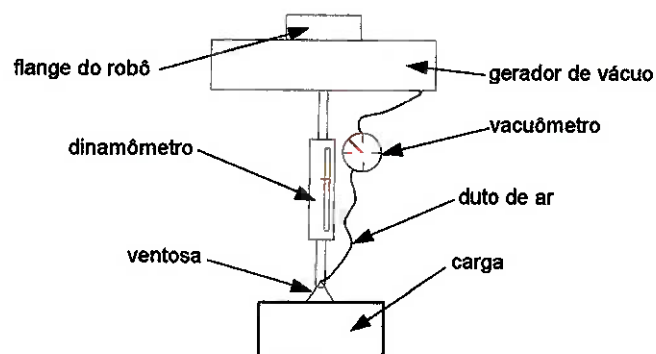


Figura 5.1: Esquema da instalação

O procedimento experimental é o seguinte:

- Regula-se a pressão de entrada do gerador de vácuo em 1.0 bar;
- conecta-se a ventosa a carga;
- lê-se a indicação do vacuômetro, após a estabilização de seu ponteiro;
- força-se o desprendimento da carga vagarosamente a uma velocidade constante com o auxílio do robô, observando-se o valor no dinamômetro;
- na iminência do descolamento, lê-se o valor no dinamômetro.
- repete-se o procedimento acima para as demais cargas;
- repete-se o procedimento anterior para as pressões de entrada de 1.5 a 6.5bar, variando-se de 0.5 em 0.5bar.

5.1.4. Levantamento de dados

Com os dados experimentais foram levantadas curvas que descrevem o comportamento do sistema para diferentes pressões de entrada.

A Figura 5.1 representa a variação da pressão interna da ventosa com a pressão entrada.

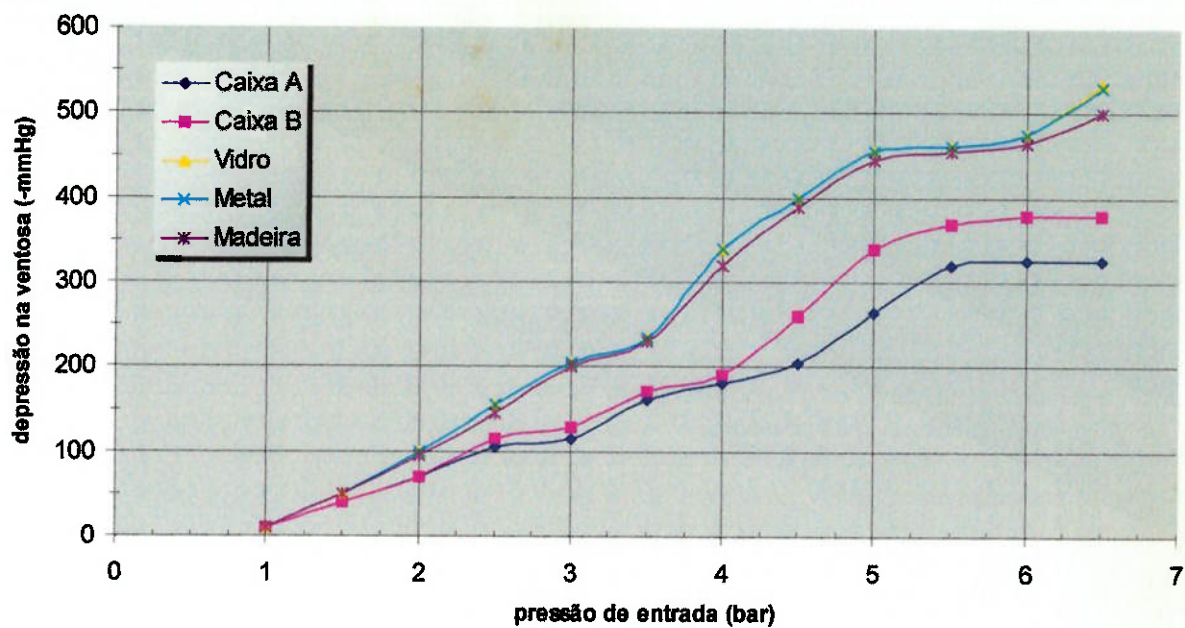


Figura 5.1: Variação da pressão interna da ventosa

A Figura 5.2 mostra a variação da capacidade de carga da ventosa com a pressão de entrada.

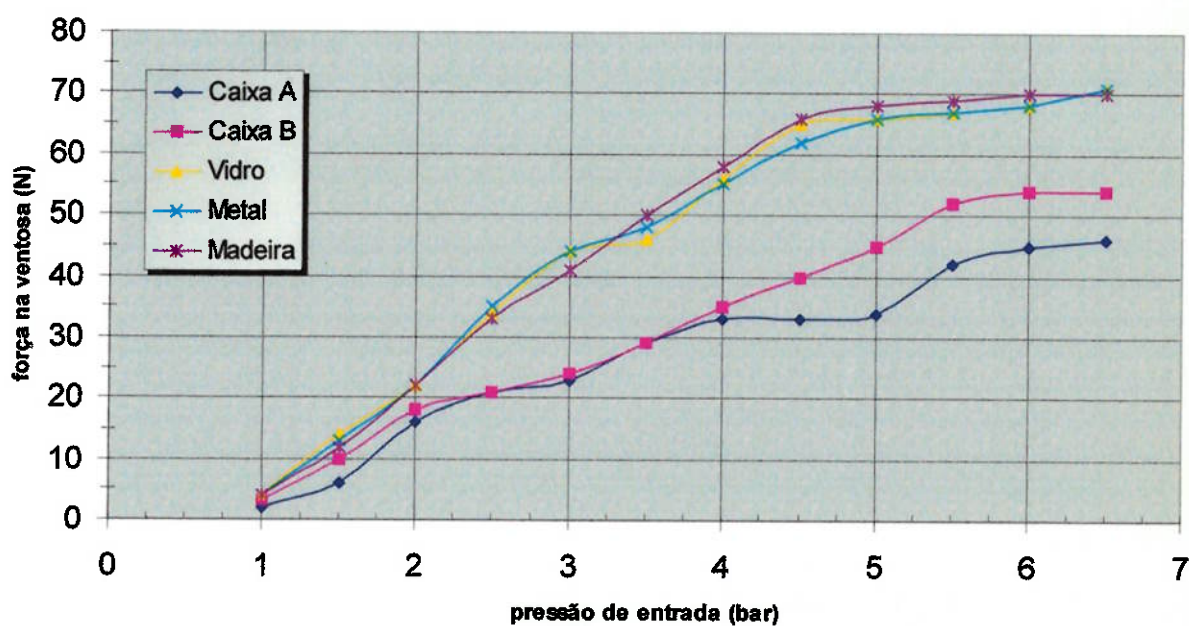


Figura 5.2: Variação da força na ventosa

A variação da capacidade de carga com a pressão interna na ventosa para as caixas A e B é mostrada nas Figuras 5.4 e 5.5 a seguir.

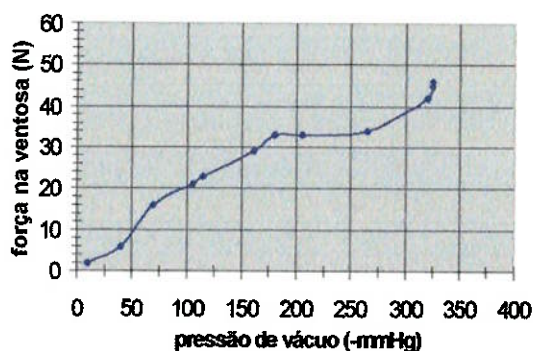


Figura 5.3: Variação da força na ventosa (Caixa A)

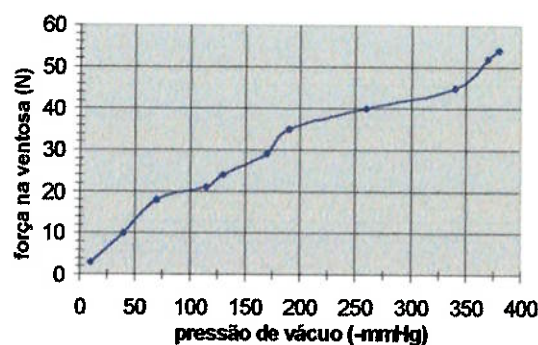


Figura 5.4: Variação da força na ventosa (Caixa B)

O máximo nível de vácuo (pressão de vácuo) alcançada na caixa A é de -325mmHg e a capacidade de carga nesta pressão de 46N. Para a caixa B, estes valores são -380mmHg e 54N, respectivamente. Esta diferença é devido a porosidade do papelão da caixa A ser maior do que o da caixa B, permitindo maiores vazamentos. Pode-se notar, ainda, que dada uma pressão de vácuo (maior que -380mmHg), a força na ventosa é praticamente idêntica para ambas as caixas.

As figuras 5.6 e 5.7 representam respectivamente o comportamento do vidro e o metal:

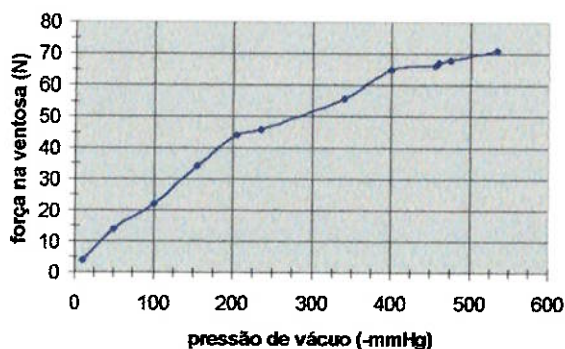


Figura 5.5: Variação da força na ventosa (Vidro)

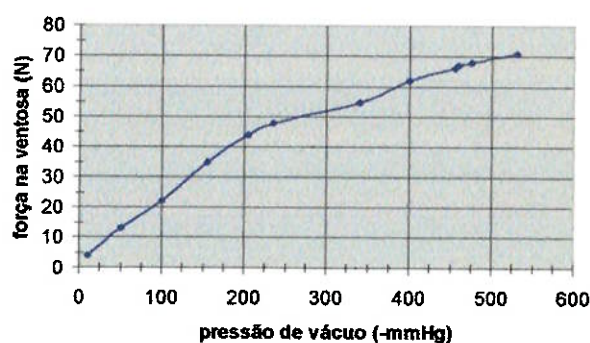


Figura 5.6: Variação da força na ventosa (Metal)

Devido a baixa porosidade desses dois materiais e da geometria comum, ambos têm comportamento semelhante. O máximo nível de vácuo (pressão de vácuo) alcançada no vidro é de -535mmHg e a capacidade de carga nesta pressão de 71N . Para o metal, estes valores são -530mmHg e 71N , respectivamente.

O quinto material ensaiado, a madeira, devido a geometria e a superfície pouco rugosa tem comportamento semelhante ao vidro como pode ser visto na Figura 5.7

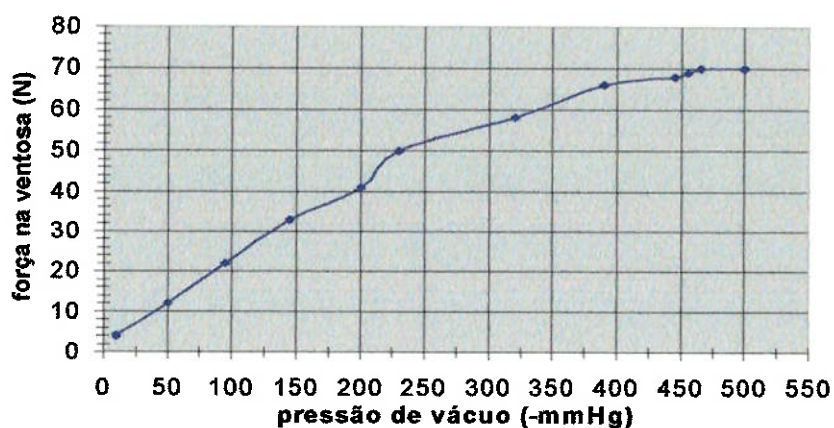


Figura 5.7: Variação da força na ventosa (Madeira)

Para este material, o máximo nível de vácuo (pressão de vácuo) alcançada é de -500mmHg e a capacidade de carga nesta pressão de 70N , valores muito próximos do vidro e do metal.

5.2. Análise Teórica

Utilizando-se da equação [4.6] e isolando-se a massa obtém-se:

$$m = \left(\frac{D}{1,12} \right)^2 \cdot \frac{p_v \cdot n}{s} \quad [5.1]$$

Assumindo $g=10\text{m/s}^2$, temos a equação para a força teórica:

$$F = 10 \cdot \left(\frac{D}{1,12} \right)^2 \cdot \frac{p_v \cdot n}{s} \quad [5.2]$$

Os dados de projeto são:

Uma ventosa ($n=1$), diâmetro de 53mm ($D= 5,3\text{cm}$) calculado sem fator de segurança ($s= 1$)

Convertendo a pressão de bar para mmHg ($1\text{bar}=750.06\text{mmHg}$), a força é expressa pela seguinte equação de reta expressa na Figura 5.1:

$$F = \frac{1}{3,35} \cdot p_v \quad [5.3]$$

onde F é dada em newtons e p_v é dada em mmHg.

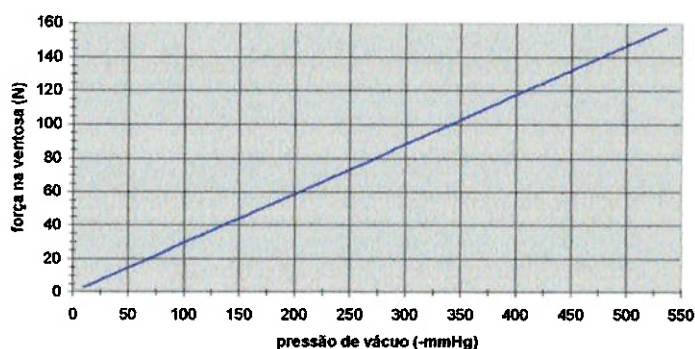


Figura 5.1: Capacidade de carga teórica da ventosa

5.3. Análise dos Resultados - Comparação Entre Valores Teóricos e Experimentais

A Figura 5.1 representa os valores práticos e teórico da capacidade de carga a diferentes pressões de vácuo. As quatro curvas representam o resultado teórico considerando fatores de segurança iguais a 1.0 (marrom), 2.0 (verde), 2.5 (azul escuro) e 3.0 (azul claro).

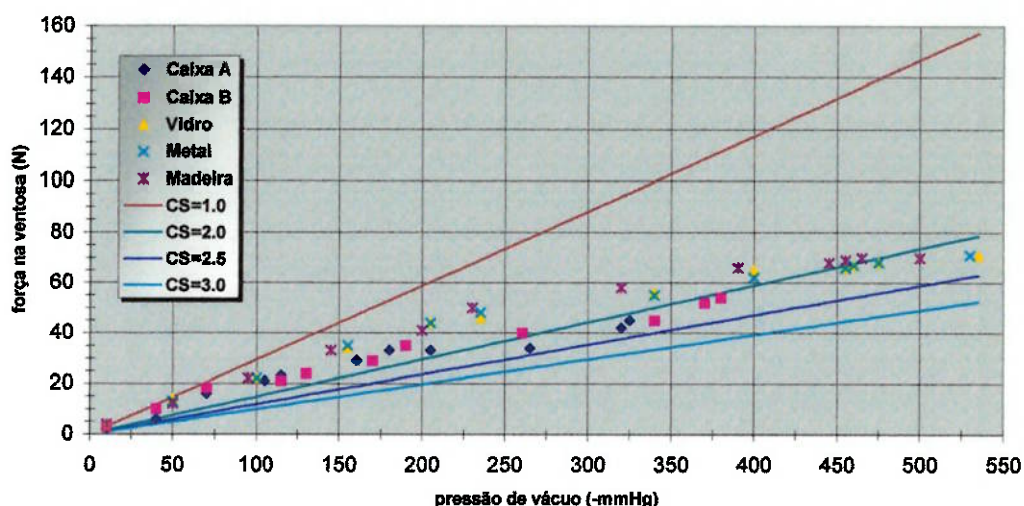


Figura 5.1: Variação da força na ventosa – valores teóricos e práticos

A curva de fator de segurança igual a 1.0 não descreve o comportamento do sistema na realidade. Como pode ser visto, os valores práticos de força são menores do que os valores teóricos. Este fato se explica através da observação do processo de descolamento. Neste processo, ocorre a deformação da ventosa, que desliza no material perdendo área de contato e gerando. A diminuição da área de contato diminui a capacidade de carregamento. Em uma última análise, o deslizamento da ventosa no material gera rugas por onde ocorrem vazamentos e queda na pressão de vácuo

culminando com o descolamento do par. Para pequenas pressões, a deformação é muito pequena, devido a força no par ventosa-elemento ser pequena. Porém, para altas pressões, as forças envolvidas são elevadas e os efeitos da deformação e do deslizamento são amplificados como pôde ser visto na figura 5.1.

Além disso, a forma e o material da ventosa alteram sua deformação, logo, mesmo para ventosas de mesmo diâmetro mas de formas e/ou materiais diferentes espera-se encontrar variações na capacidade de carga. Um fator de segurança de 2.5 já garante o dimensionamento correto do sistema. Dessa forma, no projeto de sistemas, fatores de segurança entre 2.5 e 3.0 são adequados para sistemas submetidos a pequenas acelerações.

6. CONCLUSÃO

O dimensionamento correto dos equipamentos que constituem um sistema a vácuo é fator essencial no projeto. Este dimensionamento tem por objetivo o funcionamento correto do sistema sem desperdícios energéticos.

A análise de um sistema de ventosas permitiu constatar que as diferenças entre valores teóricos e práticos ocorrem devido a deformações e deslizamentos na ventosa submetida a carregamentos elevados para cada pressão de vácuo. Foi constatado ainda que o aumento da depressão interna na ventosa incrementa esta defasagem.

A ocorrência de deformações e deslizamentos seria minimizada com a adoção de uma ventosa rígida. Contudo, a aplicação do sistema impera a utilização de ventosas em fole, mais susceptível à deformação.

Como consequência, um coeficiente de segurança compreendido entre 2.5 e 3.0 é indicado para o cálculo correto do diâmetro mínimo da ventosa. É importante salientar ainda que, caso haja risco de vida, este fator deve ser ampliado.

Na aplicação de materiais planos e rígidos, recomenda-se a utilização de ventosas cônicas ou rígidas pois assim aumenta-se a relação capacidade de carga / pressão de vácuo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STELLI, FULVIO – *Equipamentos de Alto Vácuo e Princípios de Cálculo* – EPUSP – São Paulo – 1981.
- [2] DAVY, J. R. – *Industrial High Vacuum*– Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. – London – 1967.
- [3] “Schmalz Vacuum Components”– J. Schmalz GmbH – Glatten – 1999.
- [4] “Academia Del Vacío” PIAB - PIAB - Sweden – 1998.
- [5] “The Pneumatic Catalogue - Festo - Germany – 1998.
- [6] Vacuum Components For Industrial Application - Sapelem – Beaucouzé - 1999.
- [7] “Venturi Vacuum Generators - What They Are And How To Design Them Into Your System” –Teknocraft Inc. – Melbourne FL. - 1999.
- [8] “Datos Técnicos De Sistemas De Vacío” - AR Sistemas De Vacío – Madrid – 1999.
- [9] Vacuum/Pressure Pumps - Barnant Company - U.S.A. – 1999.
- [10] ROBINSON, R. *et al.*- Venturi Vacuum Systems for Hypobaric Chamber Operations – Aviation, Space and Environmental Medicine, U.S.A., Vol. 68 No. 11, 1046-1047 November 1997.
- [11] CATÁLOGOS DE ROBÔS ABB.- Asea Brown Boveri –Vasterås-1999