

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO
TRABALHO**

**ANÁLISE DOS REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROJETO DE UM
EQUIPAMENTO PARA ELEVAÇÃO E INSTALAÇÃO DE VIDROS PLANOS COM
VENTOSAS A VÁCUO**

MARCOS ANDRÉ KROHN

Porto Alegre, Setembro de 2016.

MARCOS ANDRÉ KROHN

ANÁLISE DOS REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROJETO DE UM
EQUIPAMENTO PARA ELEVAÇÃO E MONTAGEM DE VIDROS COM VENTOSAS A
VÁCUO

Monografia submetida ao Corpo Docente do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Especialista.

Orientador: Prof. Eng. MSc. Roque Puiatti

Porto Alegre

2016

MARCOS ANDRÉ KROHN

ANÁLISE DOS REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROJETO DE UM
EQUIPAMENTO PARA ELEVAÇÃO E MONTAGEM DE VIDROS COM VENTOSAS A
VÁCUO

Esta monografia foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Coordenador do curso no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Orientador

Prof. Eng. MSc. Roque Puiatti

Coordenadora

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Dedico este trabalho a minha esposa Rosani, por ser a primeira e principal incentivadora de minha participação no curso de especialização que culminou nesta monografia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa Rosani Moraes pela paciência de muitas noites de espera.

Agradeço ao professor e orientador Roque Puiatti por ter mostrado a necessidade e possibilidade de uso prático deste trabalho.

Agradeço ao meu sócio Leonardo B. Vargas pela sempre prestativa ajuda na no projeto, montagem e teste do protótipo.

RESUMO

O objetivo desta monografia é o projeto de um protótipo de equipamento com ventosas a vácuo para movimentação de vidros. É destinado ao içamento e montagem de vidros na construção ou em seus processos anteriores, como a fabricação dos vidros e seu transporte até a aplicação final.

O trabalho partiu de uma revisão teórica sobre o vácuo e ventosas, em seguida passou por uma revisão normativa para determinar características que melhorem a segurança para o pessoal envolvido e na operação como um todo. Buscou-se subsídios, mesmo que por analogia, na Norma Brasileira NR-11, também nas normas estrangeiras EN 13155 e ASME B30.20, no que foi cabível.

Em seguida elaborou-se especificação das partes componentes do projeto e sua execução. Finalmente, avaliou-se performance e funcionalidade do protótipo e seu efeito na segurança.

Palavras-chave: ventosa, vácuo, vidro, pele de vidro, construção, edifício, içamento, segurança no trabalho

ABSTRACT

The purpose of this monograph is to design a prototype device with vacuum suction cups for glass handling. It is intended for hoisting and assembly of glass parts on buildings, or in their previous processes, like the manufacture of glass and transport to the final application.

This work started on a theoretical review on vacuum and suction cups, gone through a standards review to determine characteristics to enhance security for the personnel involved and the operation as a whole. Searched for subsidies, even by analogy, in the Brazilian standard NR-11, also in foreign standards EN 13155 and ASME B30.20, as appropriate

Then passed through the specification of the component parts of the project and its execution. Finally, evaluated the performance and functionality of the prototype and its effect on safety.

Keywords: suction cup, vacuum, glass, curtain wall, construction, building, hoisting, occupational safety

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ventosa para vidros pesados.....	12
Figura 2 - Hemisférios de Magdeburg.....	14
Figura 3 - Medição absoluta e relativa do vácuo.....	16
Figura 4 - Energia dispendida para atingir diferentes níveis de vácuo.....	17
Figura 5 - Tipos mais comuns de geradores e bombas de vácuo.....	18
Figura 6 - Ventosa ideal para fins de cálculo de força.....	22
Figura 7 - Ventosa ideal com pressão interna tendendo a zero.....	23
Figura 8 - Vista superior e inferior de uma ventosa real.....	25
Figura 9 - Fotografia com contraste realçado da ventosa através de vidro.....	26
Figura 10 - Ensaio de força de ventosa com tração até o descolamento.....	28
Figura 11 - Gráfico da força sob tração a diversas pressões de teste.....	29
Figura 12 - Representação de dispositivos sem e com gerador de vácuo.....	36
Figura 13 - Força de tração medida x deslocamento ou deslizamento.....	39
Figura 14 - Método da norma EN 13155 para cálculo da força de adesão.....	39
Figura 15 - Exemplos de dispositivos na norma ASME B30.20.....	42
Figura 16 - Curva de pressão e corrente no modo contínuo.....	46
Figura 17 - Curva de pressão e corrente no modo cíclico.....	48
Figura 18 - Sensor Freescale MPX2100DP.....	49
Figura 19 - Válvula de retenção ou unidirecional.....	50
Figura 20 - Bomba de vácuo a pistão seco BCPDC-330/CN.....	50
Figura 21 - Equipamento com ventosas original, para cargas verticais.....	51
Figura 22 – Montagem das partes.....	52
Figura 23 – Painel.....	53
Figura 24 – Botoeira adaptada para controle do vácuo.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
BS	British Standards
BSI	British Standards Institute
BSPP	British Standard Parallel Pipe
BTH	Bellow The Hook
CC	Corrente contínua
CEN	Comité Européen de Normalisation
EN	Europäische Norm
LABELO	Laboratórios Especializados em Eletrônica Calibração e Ensaio
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PTFE	Politetrafluoretileno
Séc.	Século
SI	Sistema Internacional
UPC	Ultimate Pad Capacity
WLL	Working Load Limit

LISTA DE SÍMBOLOS

kPa	Quilo Pascal (unidade)
Pa	Pascal (unidade)
g	Aceleração de gravidade = 9,81 m/s ²
P	Pressão
F	Força
A	Área
N	Newton (unidade)
p	Pi = 3,141516...
r	Raio
Fa ⊥	Força de adesão perpendicular
Fa //	Força de adesão paralela
S	Superfície (área)
m	Coeficiente de atrito
Tr	Força de tração medida
a	Ângulo de inclinação da carga
Hg	Pressão em cm de mercúrio ou cmHg
cmHg	Centímetros de mercúrio (unidade)
Ns	Nível de segurança
Nd	Nível de desligamento
Nr	Nível de religamento
ti	Tempo inicial
td	Tempo desligado
tl	Tempo ligado
mV	Milivolt (unidade)
A.h	Ampere . hora (unidade)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	VÁCUO NO CONTEXTO HISTÓRICO	13
3.	VÁCUO, CONCEITO, CLASSIFICAÇÃO E GERAÇÃO	15
3.1	CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO.....	15
3.2	GERAÇÃO.....	17
3.2.1	Ventiladores ou Blowers	18
3.2.2	Bombas de Palhetas Rotativas	19
3.2.3	Bombas a Pistão	20
3.2.4	Gerador Venturi	20
4.	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA VENTOSA	22
4.1	A VENTOSA IDEAL.....	22
4.2	A VENTOSA REAL.....	24
5.	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	32
5.1	ANEXO 1 DA NORMA BRASILEIRA NR-11.....	32
5.2	NORMA EUROPEIA EN 13155.....	34
5.3	NORMA ASME B30.20.....	40
6.	CRITÉRIOS DE PROJETO	43
6.1	CAPACIDADE DE CARGA.....	43
6.2	GERADOR DE VÁCUO.....	45
6.2.1	Geração Contínua	46
6.2.2	Geração intermitente	47
6.3	ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES.....	48
6.3.1	Sensor de Vácuo	48
6.3.2	Válvula de Retenção	49
6.3.3	Bomba de Vácuo	50
6.3.4	Chassi e outros itens necessários	50
7.	MONTAGEM DO PROTÓTIPO	52
8.	RESULTADOS OBTIDOS	55
8.1	VALORES MEDIDOS E A NORMA.....	55
8.2	MELHORIA ESPERADA NA SEGURANÇA.....	56
8.3	SUGESTÕES PARA UMA NOVA IMPLEMENTAÇÃO.....	56
9.	CONCLUSÃO	58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
--	-----------

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo discutir e determinar os melhores requisitos de segurança para um equipamento de içamento de vidros com ventosas a vácuo, para uso na montagem de fachadas de prédios, conhecidas também como pele de vidro, ou para qualquer aplicação estética ou estrutural na construção, bem como processos intermediários desde a fabricação até a instalação definitiva. Consecutivamente estes requisitos serão testados e avaliados no projeto e construção e um equipamento protótipo funcional. A Figura 1 mostra exemplo de uso deste tipo de equipamento, em atuação.

Figura 1 – Ventosa para vidros pesados.



Fonte: internet

Ventosas já são há muito tempo e largamente utilizadas nas mais diversas atividades humanas, desde a medicina, pesquisa científica, indústria e prestação de serviços. A principal capacidade que nos interessa nas ventosas é a sujeição firme, porém suave e amortecida que se obtém com o uso de ventosas de borracha, usadas especificamente para manipulação de materiais planos. Como será exposto no presente, esta força de fixação pode ser o suficiente para elevar ou prender várias centenas de quilogramas individualmente, ou até toneladas se usadas em arranjos adequados. Apesar desta força ser considerável, esta pode ser exercida sem o menor dano em superfícies delicadas ou já acabadas. Esta fixação formidável também pode ser exercida automaticamente, ou até a distância, sem interferência direta humana nas proximidades do material a ser transportado. Esta última característica é de grande utilidade para fins de segurança operacional e de pessoal.

Em seguida será analisado este tipo de equipamento no aspecto teórico e normativo, para que seja determinada a melhor configuração em termos de viabilidade econômica e de segurança de operação.

Ao final será especificado o equipamento em termos de capacidade, partes e peças disponíveis para montagem de um protótipo. Neste protótipo serão feitos testes para determinar as características de operação e segurança obtidas.

Por se tratar de trabalho eminentemente prático, a pesquisa bibliográfica é feita predominantemente em normas e informações técnicas, tanto de fabricantes de equipamentos como de ensaio previamente realizado.

2. VÁCUO NO CONTEXTO HISTÓRICO

Conforme Nardi (2002) Historicamente o vácuo foi visto como uma possibilidade desde o Séc. IV AC. Entretanto muitos contestavam a possibilidade da sua existência. O próprio Aristóteles, que negava a sua existência, afirmava que “a natureza tinha horror a vácuo”. Apesar de tentar negar sua existência, esta afirmação intuitiva do filósofo atualmente pode nos ajudar a entender, também intuitivamente, a natureza e a intensidade das forças que o vácuo pode exercer. O suposto “horror” na verdade revela o ímpeto com que “natureza” tenta compensar o vácuo, gerando forças consistentes dentro da nossa atmosfera.

A verdadeira natureza do vácuo foi entendida de forma concomitante com o entendimento da pressão atmosférica, e que foi demonstrada por cientistas célebres no século XVII, como Torricelli, Pascal e Boyle.

Como escreveu Nardi (2002), já na época medieval era discutido o problema observado em bombas usadas para sucção de água que não conseguiam elevá-la além de um pouco mais que 10 m.

Gasparo Berti, por volta de 1641, reproduziu esta observação das bombas de sucção usando um tubo de chumbo de um pouco mais de 10 m de altura. A ponta inferior deste tubo era provida de uma torneira e submersa em uma cuba de água. A ponta superior provida de um balão de vidro e também uma torneira no seu topo era preenchida com água totalmente. A torneira superior era selada e em seguida a inferior aberta, fazendo a água descer e estabilizar a altura da coluna até aproximadamente 10 m.

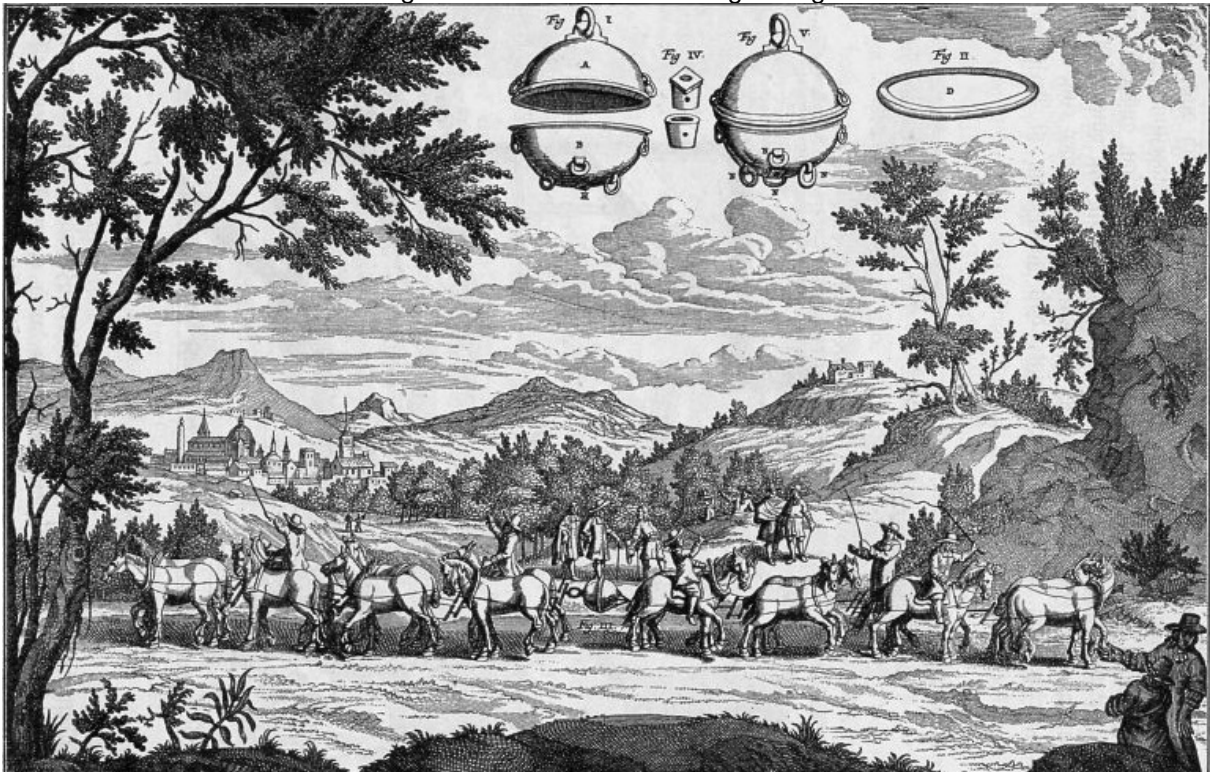
Torricelli em 1643 usou então mercúrio que, 13,8 vezes mais denso que a

água, conseguiu reproduzir este ponto de equilíbrio em aproximadamente 76 cm de coluna de mercúrio em um tubo de vidro.

Em 1648 Pascal usando o mesmo “tubo torricelliano” observou na Montanha Puy-de-Dôme que o ponto de equilíbrio da coluna de mercúrio estabilizava em alturas diferentes em diferentes altitudes na montanha (Nardi, 2002). Chegava-se a conclusão que o que equilibrava o nível de líquido nos tubos era a pressão atmosférica da coluna de ar atmosférico.

A verdadeira capacidade da força que se pode obter com vácuo foi demonstrada pela primeira vez de forma bastante alegórica em 1654 por Otto Von Guericke, com a célebre experiência dos Hemisférios de Magdeburg, diante da corte do Imperador Fernando II. Os hemisférios feitos de bronze com 35,5 cm de diâmetro eram efetivamente ventosas, pois embora fossem metálicos e vedados com gordura exerciam esta função, como a conhecemos hoje (Nardi, 2002). Os hemisférios foram colocados juntos e vedados, o vácuo foi feito no seu interior de forma que a força gerada por 16 cavalos, 8 de cada lado, não conseguiu separá-los, como mostra a Figura 2. Em seguida desfazendo-se o vácuo os hemisférios foram separados manualmente sem dificuldade.

Figura 2 – Hemisférios de Magdeburg.



Fonte: internet (2016)

3. VÁCUO, CONCEITO, CLASSIFICAÇÃO E GERAÇÃO

3.1 CONCEITO E CLASSIFICAÇÃO

A palavra vácuo tem origem na palavra latina “vacua” que significa “vazio” (Marquardt, 1999). Este vazio na prática não é absoluto, entendemos como um vazio parcial ou vácuo parcial.

Uma vez que o vácuo foi entendido a princípio em relação a pressão atmosférica, existem duas formas de medi-lo: a relativa e a absoluta.

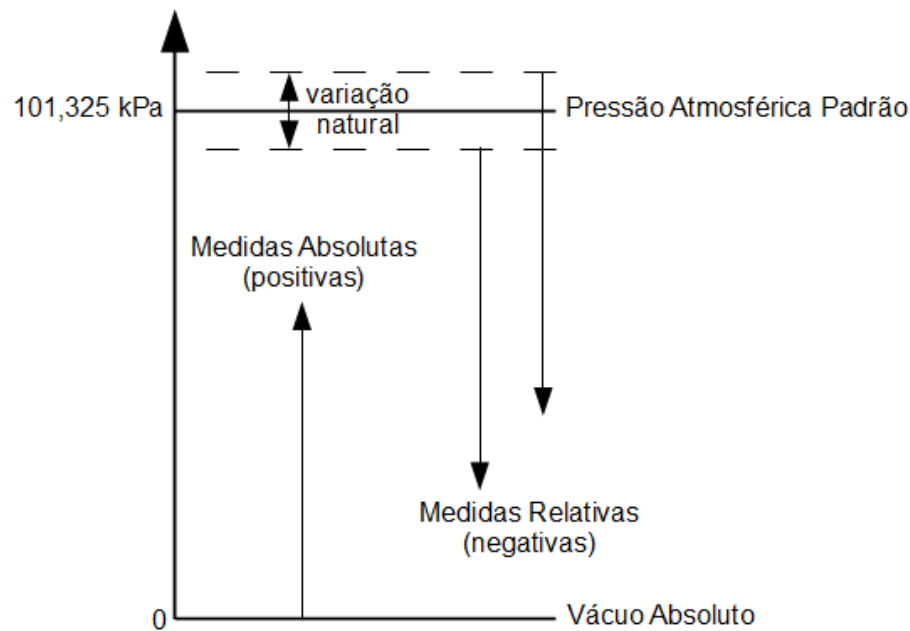
O vácuo relativo, mais de acordo com o senso comum, é uma pressão negativa medida em relação à pressão atmosférica, considerando esta como pressão zero. É mais empregado em aplicações comuns industriais ou cotidianas, inclusive com ventosas, pois o que interessa nestes casos é a diferença de pressão (e conseqüentemente força) que se obtém em relação a pressão atmosférica, já que esta última é variável.

O vácuo absoluto, mais preciso, é medido como uma pressão positiva em relação à pressão zero absoluta, mas nunca maior que a pressão atmosférica. Esta referência é mais empregada em aplicações onde a ausência quase total de gases e pressão é necessária. Na prática o vácuo absoluto é virtualmente impossível de atingir, tanto em termos de recursos como de tempo necessário para obtê-lo, então sempre entende-se vácuo absoluto como pressão tendendo a zero.

Apesar destas duas formas de medir e referenciar o vácuo serem opostas e muito diferentes nas suas exigências técnicas, a definição de vácuo é bem simples: vácuo é tão somente qualquer pressão menor que a pressão atmosférica. Pela definição de Marquardt (1999), mais ampla, é qualquer volume de gás contendo menos partículas, moléculas ou átomos (menor densidade de partículas ou pressão de gás) que a atmosfera externa que o envolve.

A Figura 3 mostra graficamente a relação entre a forma absoluta e relativa de medir o vácuo, bem como esta é relacionada com a pressão atmosférica padrão de 101,325 kPa (Paiva, 2010). Para este trabalho a forma de medição do vácuo será a relativa, pois o que determina a força que uma ventosa pode gerar é a diferença entre a pressão do vácuo e a pressão atmosférica. Diferente da pressão atmosférica padrão, a pressão atmosférica real disponível pode variar com as condições atmosféricas e a altitude em relação ao nível do mar no local de sua medição.

Figura 3 – Medição absoluta e relativa do vácuo.



Fonte: autor (2016)

Uma classificação usual do vácuo por faixa de pressão, segundo Chambers (1998), é como na Tabela 1 a seguir onde é relacionada pelo autor com a sua proporção da pressão atmosférica:

Tabela 1 – Classificação do vácuo por faixas de pressão absoluta.

Nomenclatura	Faixa de pressão	% Pressão atmosférica
Low vacuum / Baixo vácuo	Atmosfera a 100 Pa	100 a 0,0987
Medium vacuum / Médio vácuo	100 Pa a 0,1 Pa	< 0,0987
High vacuum / Alto vácuo	0,1 Pa a 10^{-6} Pa	Desprezível
Ultra-high vacuum/ Ultra-alto vácuo	10^{-6} Pa a 10^{-10} Pa	Desprezível
Extreme high vacuum / Vácuo extremo	Abaixo de 10^{-10} Pa	Desprezível

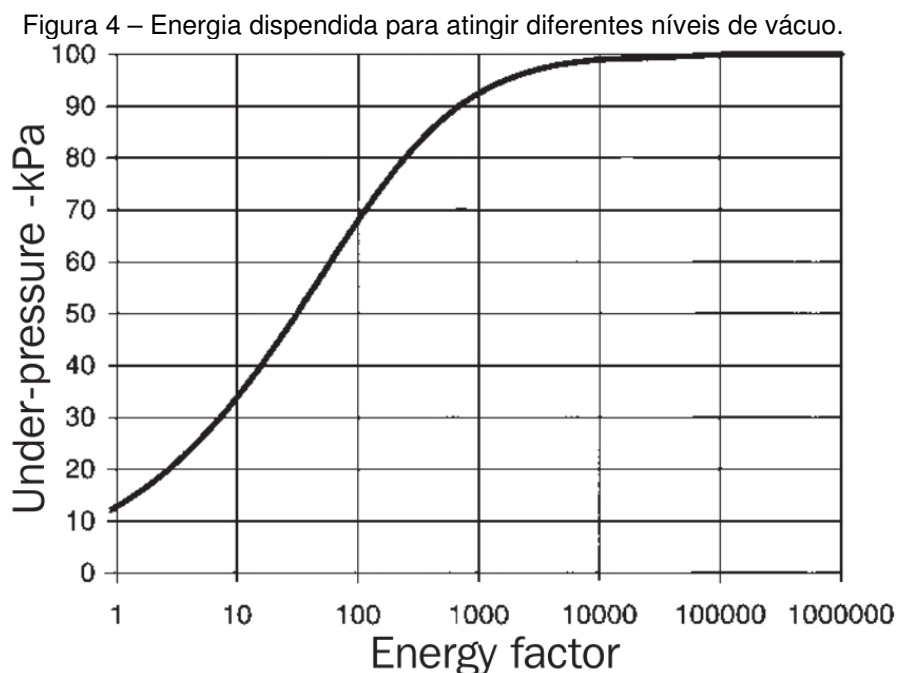
Fonte: Chambers, Fitch, Halliday (1998)

Por esta classificação a faixa chamada de baixo vácuo ocupa mais que 99,9 % da pressão atmosférica disponível e as outras quatro faixas dividem os menos que 0,1 % restantes da escala. Isso mostra a natureza assintótica do vácuo tendendo à pressão zero, mas sem nunca a atingir, como já foi mencionado. De fato a prática nos mostra que se é muito fácil e rápido produzir "um pouco de vácuo" também é muito desproporcionalmente demorado e dispendioso produzir um alto vácuo.

3.2 GERAÇÃO

Um experimento simples e intuitivo que podemos fazer para comprovar esta natureza não linear é produzir vácuo com um êmbolo ou pistão, como o que existe em uma seringa. Se tomarmos uma seringa descartável comum, que pode ser adquirida em qualquer farmácia, e conectarmos um instrumento de medição de pressão no local onde seria colocada a agulha, podemos medir um vácuo progressivamente maior a medida que se move o êmbolo. Este vácuo é gerado porque a pequena quantidade de ar que está confinada no interior da seringa, inicialmente à pressão atmosférica, passa a ocupar um volume crescente, conseqüentemente a sua pressão cai na razão inversa do aumento de seu volume. É fácil imaginar que se quisermos que este vácuo seja absoluto, com a pressão no interior da seringa tendendo a zero, teríamos que mover o êmbolo por uma distância infinita, o que é impossível. Ou simplesmente: com a pressão tendendo a zero o volume (deslocado) tende ao infinito.

A Figura 4, conforme Catálogo PIAB (1999), mostra a proporção entre a energia dispendida para fazer vácuo em um determinado volume. Por exemplo: se é necessária uma pouco mais que 1 unidade de energia para fazer vácuo até -10 kPa em um determinado volume de ar, será necessário quase 1.000 vezes mais energia para levar o mesmo volume a -90 kPa.

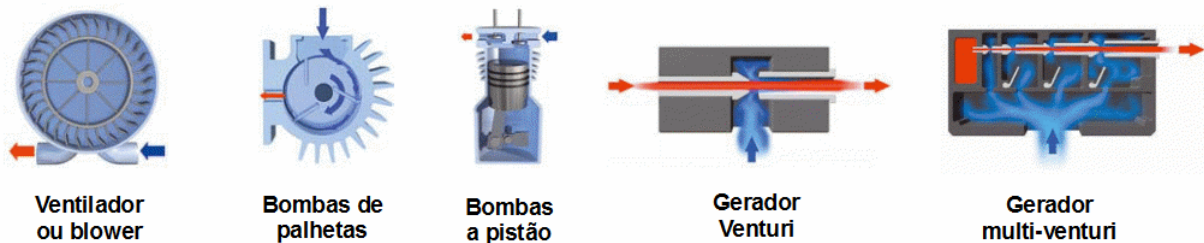


Fonte: PIAB (1999)

Para o uso industrial, comercial e até científico comum o baixo vácuo será conveniente. Para uso com ventosas esta faixa é até excedente, pois como o que interessa é a força provocada pela diferença de pressão entre a atmosfera e o vácuo, os 99,9% disponíveis e inclusos nesta faixa são mais que suficientes. A própria variação natural da pressão atmosférica já compromete a possibilidade do uso total desta faixa de pressão.

Para esta faixa de baixo vácuo há várias formas usuais ou comuns de gerar vácuo. Na Figura 5 estão representados esquematicamente os tipos de geradores ou bombas de vácuo mais comuns, conforme Catálogo PIAB (2004). Os fluxos em vermelho são de pressão positiva, em azul de pressão negativa ou vácuo.

Figura 5 – Tipos mais comuns de geradores e bombas de vácuo.



Fonte: PIAB (2004) e autor (2016)

3.2.1 Ventiladores ou Blowers

Os ventiladores, ou blowers são na verdade um grupo extenso de tipos de máquinas que funcionam com vários tipos de rotor. Podem ser ventiladores comuns, do tipo siroco, turbinas ou ventiladores centrífugos, mas em todos há uma característica em comum: têm um rotor que gira em alta rotação de forma livre, sem atrito com a carcaça ou câmara onde é gerado o vácuo, por esse motivo não têm uma vedação interna que permita um nível de vácuo elevado, toda a diferença de pressão é gerada por fenômenos aerodinâmicos nas suas pás de rotor. Se por um lado o nível é baixo, tipicamente não passa de -20 kPa, por outro a vazão ou deslocamento volumétrico é muito alto. São aplicados principalmente na ventilação, exaustão ou na movimentação de pós e granulados. Apesar de serem equipamentos robustos e energeticamente eficientes, seu uso com ventosas é muito restrito, pois com o nível de vácuo baixo é necessário em contrapartida ventosas com área muito grande para gerar uma força consistente.

3.2.2 Bombas de Palhetas Rotativas

As bombas de palhetas também formam um grupo extenso de máquinas, e variam muito no porte, desde pequenas bombas portáteis ou de bancada até verdadeiras centrais de vácuo com dezenas de kW de potência, capazes de suprir a necessidade de vácuo de uma instalação industrial inteira. O que têm em comum é o fato de possuir pás ou palhetas que giram dentro de uma câmara de vácuo ou carcaça com uma forma de vedação efetiva, permitindo tanto níveis de vácuo elevados como vazões elevadas. Há três tipos:

As bombas de palhetas secas, onde o próprio material que constitui a palheta é autolubrificante, como grafite por exemplo. Um rotor com estas palhetas gira mantendo-as em contato com carcaça gerando um fluxo de ar, o contato da palheta com a carcaça é uma vedação efetiva impedindo o refluxo do ar, isso gera uma capacidade de compressão na saída da bomba e conseqüentemente uma capacidade de aspiração na entrada da bomba com potencial para níveis elevados. Tipicamente pode chegar a -90 kPa. Este tipo de bomba é usado principalmente na indústria com potências de alguns kW e é muito comum seu uso com ventosas. Sua desvantagem é o ruído e calor gerados pelo atrito e o desgaste constante das palhetas, que necessitam de manutenção em períodos curtos.

Uma variação desta é a bomba de palhetas lubrificadas. Neste caso as palhetas são feitas de material durável, mas giram em uma carcaça em banho de óleo. Este óleo cria uma vedação muito boa entre a pá do rotor e a carcaça, proporcionando níveis de vácuo elevados, na faixa do médio vácuo e próximo ao alto vácuo se houver mais de um estágio de geração. São usadas com potências não tão altas como as palhetas secas, preferencialmente em aplicações de laboratório ou em refrigeração, onde o nível de vácuo é importante. Têm também o inconveniente do calor e ruído gerados. Mas têm um inconveniente extra, uma parcela do óleo usado na lubrificação é expelido da bomba, cria a necessidade de sua contenção ou então acaba contaminando o entorno.

Um terceiro tipo de palheta é a bomba mais conhecida comercialmente como bomba de anel líquido. Suas palhetas não atrim diretamente com a carcaça, como nos blowers, mas existe uma vedação efetiva entre estas e a carcaça através do dito anel líquido. Este anel é formado por uma certa quantidade de água que, quando posta a girar pelo rotor, por movimento centrífugo adere à parede da carcaça criando

um anel de vedação efetiva entre as pás e a carcaça. Este tipo de bomba alia alto fluxo e nível de vácuo elevado e geralmente é usado em instalações de grande porte, é usada com ventosas quando estas fazem parte de um sistema de vácuo maior. Entretanto o nível de vácuo é limitado pelo próprio vedante, a água, que tende a evaporar a medida que se aquece e o vácuo aumenta. Assim a água tem que estar sempre sendo resfriada, ou por sua reposição constante em circuito aberto, o que é ambientalmente condenado, ou em circuito fechado através de uma torre ou sistema de refrigeração própria.

3.2.3 Bombas a Pistão

As bombas a pistão tem o mesmo princípio de funcionamento de um compressor a pistão e podem ser de fato usadas como um compressor. Funcionam com um pistão em movimento cíclico dentro de um cilindro e sincronizado com válvulas de admissão e exaustão, o que gera o deslocamento de ar desejado para aspiração (vácuo) ou compressão. Também pode funcionar com uma membrana flexível no lugar do pistão, neste caso são bombas de diafragma, mas funcionam com o mesmo tipo de movimento cíclico. Geralmente são usados em aplicações de pequeno porte, inclusive com ventosas. Seus inconvenientes são também o calor e ruído gerado pelo atrito e a vibração gerada pelo movimento cíclico e não balanceado, típico de um pistão. Seu preço e durabilidade dependem da tecnologia e materiais empregados, podem ser tanto secas como lubrificadas a óleo. O nível de vácuo máximo típico é de -80 kPa, mas pode chegar a -99 kPa se a geração for em mais de um estágio. As vazões normalmente são baixas.

3.2.4 Gerador Venturi

O gerador venturi é de longe o mais barato e mais robusto que existe, pois é um gerador que se pode chamar de “estado sólido”, sem partes móveis. Por isso é largamente usado em toda e qualquer aplicação de pequeno porte, e preferencialmente com ventosas, limitados apenas por sua baixa eficiência energética. O princípio do gerador venturi, simplificado, é forçar um fluxo de ar pressurizado através de um tubo com estreitamento, neste ponto mais estreito o fluxo acelera para manter a vazão constante. Com o aumento da velocidade sua

pressão dinâmica aumenta, provocando como consequência a diminuição da sua pressão estática. Se neste mesmo ponto mais estreito for feita uma tomada de ar haverá uma aspiração causada por esta baixa pressão estática. Os geradores venturi comerciais são mais sofisticados que nesta simples explicação, mas mantendo a robustez e baixo custo, podem ser calibrados em sua construção para diversos níveis de vácuo e vazões. O nível máximo que pode ser atingido é tipicamente -90 kPa. São preferencialmente usados em automação e controle porque podem ser ligados e desligados rapidamente através do controle de sua alimentação de ar comprimido. Também pode-se ajustar a vazão e o nível de vácuo controlando a pressão de alimentação.

Um desenvolvimento importante do gerador venturi é o multi venturi em série. Consiste em alinhar dois ou mais venturis em série, de forma que aproveitem o mesmo fluxo de ar comprimido, sempre aproveitando a pressão residual da etapa anterior e convertendo a energia deste de forma bem mais eficiente. Apesar do custo maior, devido à maior complexidade e precisão mecânica do projeto e construção, são bastante competitivos e mantêm todas as qualidades de robustez e controle dos geradores venturi simples. O nível máximo pode chegar até -100 kPa, ou seja, médio vácuo. Vazão e eficiência energética são semelhantes às bombas mecânicas. São usados em aplicações de pequeno e médio porte, também muito usado com ventosas.

4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA VENTOSA.

4.1 A VENTOSA IDEAL.

Como já foi a muito demonstrado por Pascal e Von Guericke, entre outros, a força que uma ventosa pode gerar não é decorrente do vácuo, mas sim da pressão atmosférica, ou melhor, da diferença entre a pressão atmosférica e o vácuo no seu interior.

Para determinarmos a força teórica de uma ventosa devemos recorrer a própria definição de pressão, que é força por unidade de área:

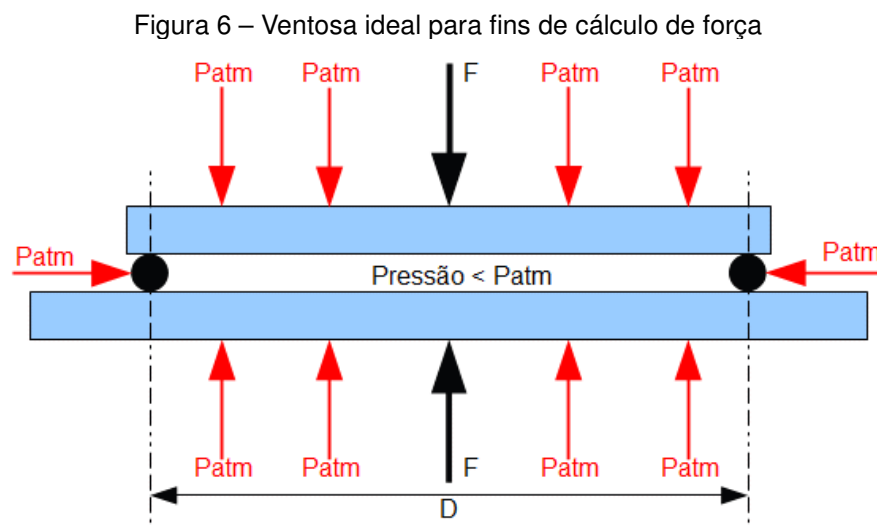
$$P = F / A \quad (\text{N/m}^2) \quad (1)$$

Logo:

$$F = P \cdot A \quad (\text{N}) \quad (2)$$

Onde a P é a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão interna da ventosa ou seu vácuo. A é a área da projeção da ventosa sobre a superfície onde é pressionada.

A ventosa ideal para determinarmos a força é plana, indeformável e com uma vedação a mais próxima possível da sua borda. Na Figura 6 vemos um desenho esquemático que representa esta ventosa ideal, em corte de vista lateral.

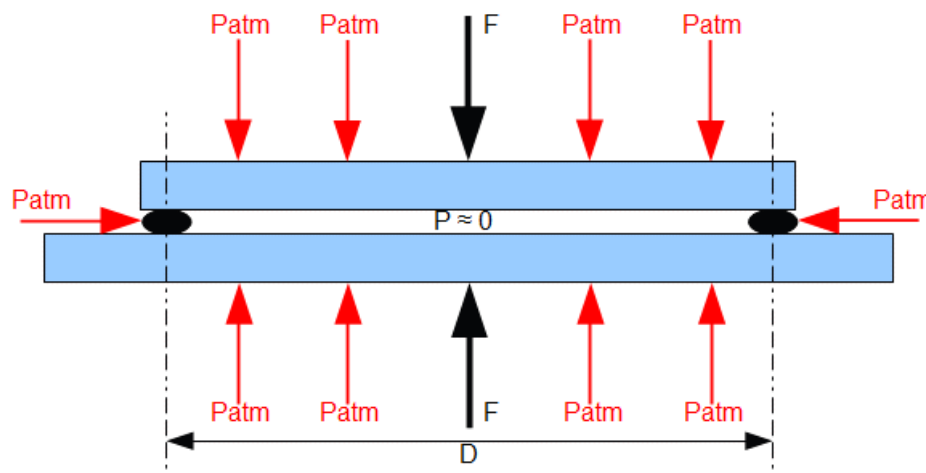


Fonte: autor (2016)

Na figura temos o corte lateral de uma ventosa ideal simplificada, que é constituída de 2 placas metálicas separadas apenas por um anel de vedação de secção circular. O Diâmetro D representa os pontos de contato do anel com as placas, pode ser considerado como o diâmetro médio da ventosa ou câmara de vácuo formada por este arranjo. Quando no seu interior se diminui a pressão para um valor menor que a pressão atmosférica esta pressiona o conjunto e o mantém coeso. A força é aplicada em todas as superfícies e de todas as direções, mas as componentes preponderantes e que mais interessam neste estudo são as perpendiculares as superfícies das placas metálicas, iguais em módulo, opostas em direção e identificadas como F .

Já na Figura 7 aparece a mesma ventosa ideal quando no seu interior se diminui a pressão para um valor mais próximo possível de zero ou vácuo absoluto. A compressão da força atmosférica pode aumentar consideravelmente, provocando inclusive deformação do anel de vedação que separa as placas. Se o seu diâmetro D não diminuir então a área da ventosa também não diminuirá. Nesta situação se obterá a maior força possível nesta ventosa ideal.

Figura 7 – Ventosa ideal com pressão interna tendendo a zero.



Fonte: autor (2016)

A força máxima que uma ventosa ideal pode gerar, tendo como referência a pressão atmosférica padrão e uma área de 1 m^2 é :

$$F = 101,325 \text{ kPa} \cdot 1 \text{ m}^2 \quad (3)$$

$$F = 101.325 \text{ N/m}^2 \cdot 1 \text{ m}^2 \quad (4)$$

$$F = 101.325 \text{ N} \quad (5)$$

Como a função de uma ventosa para este trabalho é prender e suspender cargas, e supondo que a placa superior fosse usada neste caso para suspender a placa inferior, então poderíamos calcular a carga útil desta ventosa ideal de 1 m² com vácuo absoluto. Então da própria definição da força:

$$F = m \cdot a \quad (\text{N.m/s}^2) \quad (6)$$

$$m = F / a \quad (\text{kg}) \quad (7)$$

Usando a aceleração da gravidade padrão de 9,81 m/s²:

$$m = 101.325 / 9,81 \quad (\text{kg.m/s}^2 / \text{m/s}^2) \quad (8)$$

$$m = 10.328,75 \text{ kg} \quad (9)$$

Como ventosas de centímetros quadrados são mais usuais que de metros quadrados, pode-se colocar esta força em uma escala mais usual usando a relação:

$$1 \text{ m}^2 = 10.000 \text{ cm}^2 \quad (10)$$

Então esta carga máxima útil será de 1,032875 kg para cada cm² de ventosa.

4.2 A VENTOSA REAL

No entanto, na prática, não se consegue esta carga ideal para ventosas reais por dois motivos.

O primeiro motivo é a dificuldade prática e a inviabilidade econômica de se usar ventosas com vácuo absoluto. Mesmo que fosse atingido o vácuo absoluto, não se pode garantir que a pressão atmosférica padrão esteja disponível, na verdade é pouco provável, pois a maioria das atividades em que se poderia usar uma ventosa são realizadas do nível do mar para cima. Portanto a pressão atmosférica disponível será via de regra menor que a pressão atmosférica padrão. Assim a ventosa terá uma carga útil diminuída que, pelo menos em função das pressões seria sempre proporcional a diferença de pressão em seu interior e a pressão atmosférica real no

seu local de utilização.

Mas há outro motivo que diminui e também torna não proporcional em relação a pressão a carga possível de uma ventosa. É o fato de que em uma ventosa real há uma variação de sua geometria e diminuição de sua área a medida que o vácuo aumenta. Uma ventosa real não pode ser totalmente indeformável como a do exemplo ideal, pois deve poder ser aplicada em superfícies também não ideais. A flexibilidade de uma ventosa aumenta muito sua capacidade adaptação a estas superfícies. Pode-se então definir um fator de correção que diminui a carga de uma ventosa em relação a sua carga teórica máxima calculada a partir de sua área real.

A Figura 8 são as fotografias de uma ventosa real, modelo PDL240-185NIT-AL3 marca ERGOVAC, à esquerda a vista superior da parte metálica e indeformável de conexão, à direita a vista inferior, a parte de borracha nitrílica que entra em contato com a superfície da peça a ser transportada.

Figura 8 – Vista superior e inferior de uma ventosa real.



Fonte: autor (2016)

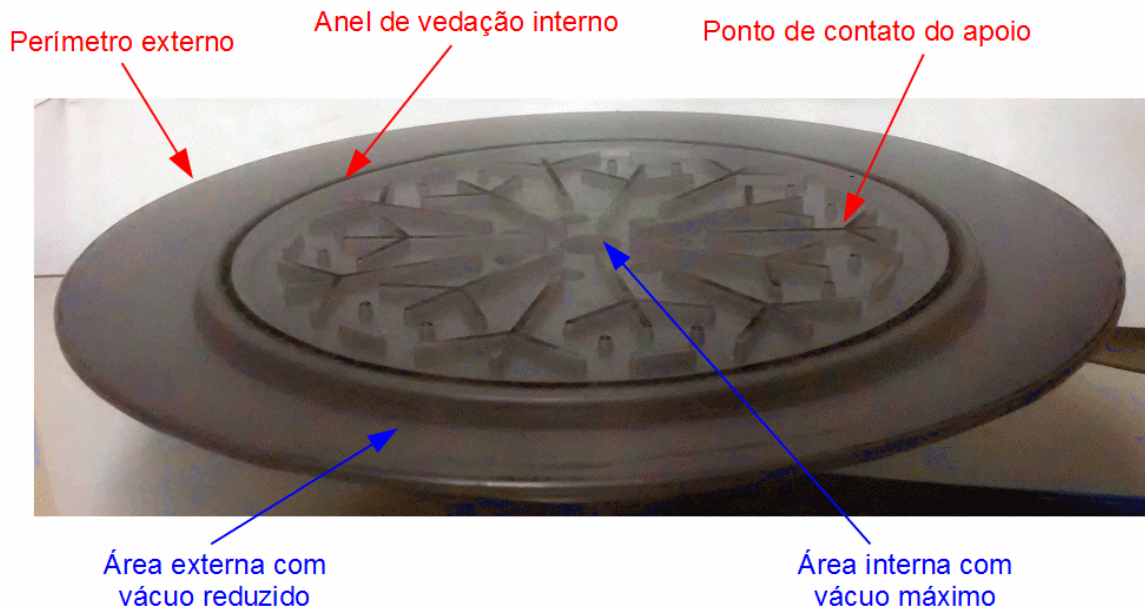
Na esquerda cabe apenas destacar a conexão metálica onde estão os orifícios de fixação da ventosa e a conexão pneumática por onde o ar é aspirado quando se deseja fazer vácuo. Esta conexão metálica é responsável pela sua rigidez mecânica e de fixação, ambas necessárias para que a ventosa tenha capacidade de carga efetiva. Na direita, na vista inferior, devem ser destacadas algumas características. Os orifícios por onde o ar é aspirado, normalmente são centralizados, mas há exceções a esta disposição. Há também relevos radiais que servem de apoio para ventosa na superfície, estes mantêm a cavidade aberta mesmo sob níveis altos de vácuo. Servem também para melhorar o atrito da ventosa com a superfície, minimizando a possibilidade de deslizamento e possibilitando que a ventosa possa também ser usada com cargas na vertical. Ventosas podem ter

também dois ou mais anéis de vedação concêntricos, no exemplo há um anel interno além da própria borda da ventosa. A função destes anéis é tornar a ventosa mais tolerante a pequenas imperfeições e desníveis na superfície, criando duas ou mais zonas de vácuo, mais intensas quanto mais próximas ao centro ou ponto de aspiração de ar da ventosa. Também permitem que a ventosa fixe em peças ligeiramente menores que a ventosa ou de formas desalinhadas com a ventosa.

A Figura 9 é uma fotografia com contraste realçado da ventosa fixada em uma placa de vidro, tomada através do vidro, de forma que os pontos de contato da ventosa com o vidro fiquem evidentes.

O perímetro externo da ventosa aplicada no vidro é aproximadamente o perímetro da ventosa e define de fato o diâmetro real da ventosa quando em uso, não pode ser usado para obter o valor da força aplicado na ventosa, há outros fatores que interferem, conforme já mencionado.

Figura 9 – Fotografia com contraste realçado da ventosa através de vidro.



Fonte: autor (2016)

O anel de vedação interno (neste caso só há um) define a região interna onde o vácuo é máximo. A área entre este anel e o perímetro externo define uma região com vácuo reduzido. Como o vácuo é feito através de sucção por um orifício central, o vácuo nesta região reduzida é mantido apenas pelo que é aspirado através das imperfeições de vedação do anel interno, por outro lado este vácuo é diminuído através do que é aspirado através da imperfeição de vedação do perímetro externo. Claro, neste exemplo supomos que não há passagem de ar através da superfície onde a ventosa está presa. Como neste caso o material é vidro podemos afirmar

esta condição, mas nem sempre é possível garantir com outros materiais.

Se o vácuo for mantido constante na ventosa através de um gerador de vácuo ou bomba de vácuo, então se estabelece um fluxo de ar muito pequeno, porém constante, no sentido de equilibrar a pressão interna com a pressão atmosférica, este fluxo passa pelo perímetro externo, pelo anel interno e finalmente é retirado pelo gerador de vácuo, de forma que podemos afirmar que:

Pressão atmosférica > Pressão da área externa > Pressão da área interna

Fica evidente que não podemos determinar a força da ventosa pelo simples produto de sua área pela diferença entre a pressão interna e a pressão atmosférica, é provável que no interior da ventosa o valor da pressão não seja homogêneo. A força poderia ser determinada pela soma das diferentes áreas internas multiplicadas por suas respectivas pressões em relação a pressão atmosférica. Isto serviria apenas de exercício teórico, já que na prática é difícil determinar a pressão da área externa, esta depende da taxa de vazamento entre as diversas vedações, que por sua vez depende do material onde está fixada, bem como da força aplicada pela pressão atmosférica sobre a ventosa.

Observa-se que em materiais com superfície muito lisa ou bem polida, como no vidro da fotografia, a vedação do anel interno é praticamente perfeita, permitindo que pouco ou nenhum ar passe por esta. Desta forma a área externa fica com um nível de vácuo muito baixo ou até inexistente, não contribuindo significativamente para a força de apreensão da ventosa. Em materiais com superfície mais irregular, como uma chapa de aço por exemplo, com sulcos, relevos ou contaminada com pó, esta vedação do anel interno não é tão efetiva, permitindo que o ar passe, conseqüentemente cria-se um vácuo não desprezível na área externa. Esta área passa a contribuir com a força total da ventosa. Isso é claro ocorre em uma situação dinâmica, com o vácuo sendo mantido ativamente na ventosa por algum tipo de bomba de vácuo. Sem esta última o decaimento do vácuo seria rápido e a força cessaria em questão de dezenas segundos.

Outro fator não desprezível que diminui a força de uma ventosa real é a área de contato com a superfície dos diversos apoios que existem, além do perímetro externo. Na figura 2.6 são bem visíveis as áreas de contato, tanto do anel interno, quanto dos apoios para aumentar o atrito. Estes de fato diminuem um pouco a área

efetiva da ventosa. Quanto maior o vácuo aplicado, mais intensa é esta relação, pois mais a ventosa se deforma e mais evidentes ficam estes pontos de contato.

Uma outra abordagem que pode ser usada de forma segura é a medição efetiva da força da ventosa, junto com a aplicação de um fator de segurança que assegure uma margem ampla de operação. Este fator de segurança já é previsto em normas internacionais, e deve ser aplicado independente do método usado para determinação da capacidade de carga da ventosa, conforme será exposto na sequência. No momento, de forma resumida, pode-se dizer que o fator de segurança é de 2 vezes o peso da carga para elevação na horizontal e 4 vezes o peso da carga para elevação na vertical.

A medição da força de fixação da ventosa pode ser feita com um ensaio de tração até o descolamento da superfície, com pressão de vácuo mantida constante, e a análise criteriosa do resultado em função da deformação da mesma. A Figura 10 mostra o ensaio feito para o mesmo modelo de ventosa usada como exemplo. As informações referentes a este ensaio foram cedidas pela empresa Indutec Ind. Tecnológica Ltda., fabricante das ventosas marca ERGOVAC.

O ensaio consiste em prender a ventosa em um substrato fixo, mantendo o vácuo constante, e tracioná-la a velocidade constante até o descolamento desta do substrato (Alfama, 2015). A força de tração é medida durante todo o curso do ensaio enquanto a ventosa se deforma.

Figura 10 - Ensaio de força de ventosa com tração até o descolamento.



Fonte: Alfama (2015)

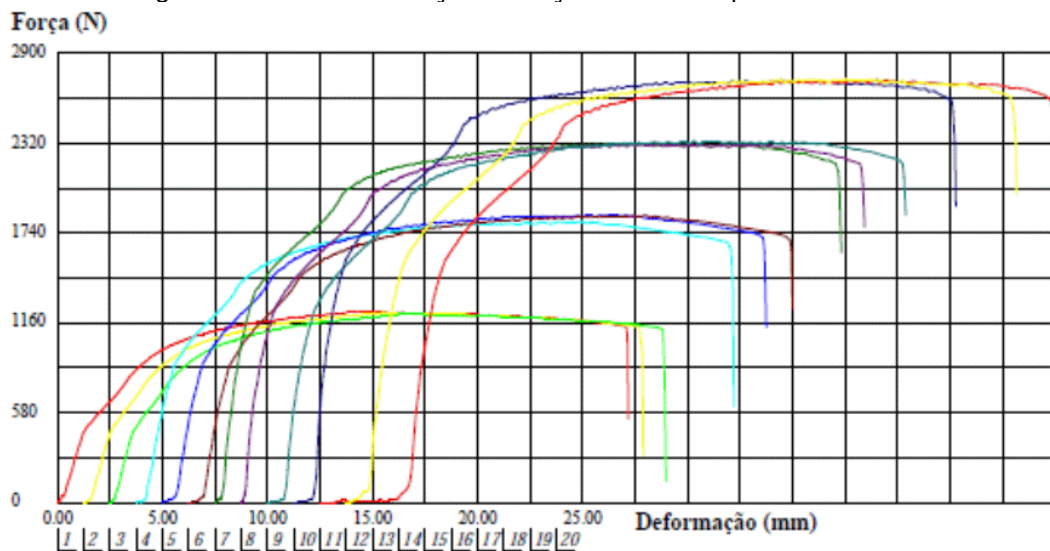
A fotografia da esquerda mostra a ventosa com uma leve deformação, sugerindo que houve descolamento do anel de vedação interno. Este pode ser um ponto onde a força medida já é bem alta, próxima ao máximo, pois toda cavidade interna está com a pressão homogênea e igual à pressão de ensaio, portanto a força máxima para esta pressão de ensaio. Esta configuração pode ser assumida por uma

ventosa que esteja com uma carga adequada, mas sofre uma tração ou aceleração brusca no sentido de soltar a carga. Quando há o descolamento do anel interno há uma equalização da pressão entre as duas regiões internas. Este é o ponto de maior deformação aceitável para o uso da ventosa. Já a fotografia da direita mostra a ventosa a ponto de descolar, este é um ponto onde a força medida é alta, próxima do máximo possível, mas é um ponto instável mecanicamente, não é um ponto de operação viável para esta ventosa.

A Figura 11 mostra o resultado gráfico das medidas feitas na ventosa usada como exemplo até ao momento. No eixo vertical está representada a força em N, com divisões a cada 290 N. No eixo horizontal está a deformação ou deslocamento em mm provocado pela tração, as divisões são de 2,5 mm. Há ao todo 12 linhas, pois foram feitas 3 medidas para cada nível de vácuo de teste. Foram testados 4 níveis de vácuo, respectivamente com as pressões relativas de -20 kPa, -40 kPa, -60 kPa e -80 kPa. Apenas a linha de número 1 parte da origem, as outras foram deslocadas no eixo horizontal para que não se confundissem nos trechos iniciais. As linhas se agrupam em 4 conjuntos por semelhança que correspondem aos 4 níveis de vácuo testados e revelam por certo um comportamento médio semelhante para pressões iguais:

- as medidas a -20 kPa são as que têm máximo ligeiramente acima de 1.160 N;
- as de -40 kPa um pouco acima de 1.740 N;
- as de -60 kPa em 2.320 N;
- e as de -80 kPa um pouco abaixo de 2.900 N.

Figura 11 – Gráfico da força sob tração a diversas pressões de teste.



Fonte: Alfama (2015)

Para entender o comportamento da ventosa é conveniente tomar uma das linhas para análise. Pode-se tomar a linha de número 12 e de cor vermelha, uma das medidas a -80 kPa, por ter o comportamento mais evidenciado. No início da linha há um aumento suave da força que corresponde ao tensionamento inicial da ventosa. Em seguida há um trecho de grande inclinação, quase vertical, indicando um grande aumento da força para um deslocamento mínimo até aproximadamente o valor de 1.740 N. Este trecho corresponde a uma ampla faixa de trabalho segura, pois as forças até este valor provocam uma deformação aproximadamente linear, mas muito pequena. A partir deste ponto a deformação aumenta de uma forma mais intensa. Aproximadamente em 2.320 N há um aumento súbito da força que corresponde ao descolamento do anel de vedação interno. Isto ocorre pelo motivo que já foi mencionado, a pressão no interior da ventosa equaliza ficando toda igual aos -80 kPa. A partir deste ponto a força aumenta muito pouco enquanto a deformação aumenta muito. A força chega a diminuir um pouco, devido a redução de área que ocorre com a deformação, até que se reduz instantaneamente quando há o descolamento completo da ventosa.

A título de comparação podemos verificar a relação do valor da força medida com o valor da força teórica calculada pela área real da ventosa e pela pressão aplicada. Assim a -60 kPa (por exemplo) temos a força máxima média das 3 medidas de 2.324 N. Já a força calculada, levando em conta o diâmetro de 250 mm da ventosa quando pressionada.

Área da ventosa:

$$A = \pi \cdot r^2 \quad (11)$$

$$A = \pi \cdot 0,125^2 \quad (12)$$

$$A = 0,04524 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Força a -60 kPa:

$$F = 0,04909 \text{ m}^2 \cdot 60.000 \text{ Pa} \quad (14)$$

$$F = 2.945,24 \text{ N} \quad (15)$$

Assim o fator de redução da força para esta ventosa real a -60 kPa, devido a sua flexibilidade e deformação, é:

$$2.324 / 2.945,24 = 0,7891 = 78,91 \% \quad (16)$$

Calculando este valor teórico e comparando ao valor medido para as pressões de teste temos a tabela a seguir:

Tabela 2 – Força calculada, medida e fator de redução.

Pressão de teste	Força calculada (N)	Força medida (N)	Varição %
-40 kPa	1.963,49	1.843	93,86
-60 kPa	2.945,24	2.324	78,91
-80 kPa	3.926,99	2.732	69,57

Quanto maior o nível de vácuo, mais o valor da força efetiva se afasta do valor teórico. Isto ocorre porque quanto maior o nível de vácuo mais a ventosa se deforma, o que corrobora a ideia que é pouco eficiente usar níveis de vácuo muito altos com ventosas.

5. REFERÊNCIAS NORMATIVAS.

No conjunto de Normas Regulamentadoras brasileiras não existe referência específica a este tipo de equipamento com ventosas para movimentação de vidros da forma que será configurado. Há uma referência clara de equipamento semelhante, mas para transporte de pedras, no Anexo 1 da NR-11. Esta NR trata de transporte, movimentação e armazenagem materiais, o Anexo 1 é específico sobre chapas de mármore, granito ou outras rochas. A seção 5 é mais específica sobre o uso de ventosas para este fim. Pode-se usar esta norma como guia ou ponto de partida para uma análise mais específica sobre o material que se pretende transportar, o vidro, que de certa forma guarda semelhanças com as rochas no tamanho, peso, rigidez e natureza quebradiça.

Há também normas internacionais, que apesar de não existir obrigação de sua observação no Brasil, podem servir também de referência por serem mais específicas e abordarem equipamentos com ventosas do tipo que se pretende projetar. O uso destas normas também serve como critério de prudência e pode contribuir para o melhoramento técnico e nivelamento tecnológico às boas práticas de países onde este tipo de equipamento vem sendo usado com mais frequência e a mais tempo. Pode-se buscar esta referência na norma europeia EN 13155 e norte-americana ASME B30.20. Ambas versam sobre equipamentos de transporte e movimentação de cargas, mesmo sem serem equivalentes a NR-11, apresentam diretrizes sobre estes equipamentos de um modo geral e especificamente sobre ventosas.

5.1 ANEXO 1 DA NORMA BRASILEIRA NR-11.

O Anexo 1 da NR-11 é o detalhamento do item 11.4.1 que trata especificamente de movimentação e transportes de chapas de mármore granito e outras rochas. Sua atualização de 29 de Abril de 2016 diminuiu as exigências para uso de ventosas, por isso faz-se referência à versão anterior mais completa de 17 de Setembro de 2003, por prudência. O equipamento que se pretende desenvolver não atuará neste segmento industrial, pode perfeitamente superar as exigências atuais. Na seção 5.1 as alíneas “a” até “i” descrevem-se as diversas características obrigatórias das ventosas para chapas. Na 5.2 uma recomendação, mas que

poderia ser também uma obrigação.

Na alínea “a” determina que a potência do compressor deve atender às necessidades de pressão das ventosas. Como ventosas precisam de vácuo e não pressão, e gerador ou bomba de vácuo não compressor, supõe-se que estas obrigações se referem a uma ventosa com gerador tipo venturi, um dos tipos mais comuns, que funciona acionado por ar comprimido, isto dá sentido a esta determinação.

A alínea “b” determina que as ventosas devem ser dotadas de válvulas de segurança facilmente acessíveis ao operador, não especifica se estas são para manter o vácuo ou para desfazê-lo. Na atualização mais recente já citada, em 2.5.1 alínea “a”, muda para válvula direcional, entende-se que esta faça transição entre vácuo e pressão, para prender ou soltar a carga.

Já a “c” determina que as mangueiras e conexões devem possuir resistência compatível, isto certamente vale tanto para as mangueiras e conexões de vácuo, que o distribuem da bomba ou gerador até as ventosas, bem como as mangueiras e conexões de ar comprimido que alimentam o gerador venturi.

A alínea “d” determina que as ventosas devem ser dotadas de dispositivo auxiliar que garanta a contenção da mangueira, evitando seu ricocheteamento em caso de desprendimento acidental, certamente se refere a mangueira de ar comprimido que pode apresentar ricocheteamento por estar sob pressão. Já uma mangueira de vácuo não apresenta este efeito ao romper, a não ser que esteja sob grande tensão mecânica, o que certamente deve ser evitado.

A alínea “e” determina que as mangueiras devem estar protegidas, firmemente presas aos tubos de saída e de entrada e, preferencialmente, afastadas das vias de circulação. Isso serve tanto para as mangueiras de vácuo como de ar comprimido. Certamente serve também para cabos elétricos de alimentação e comando, pois muitos equipamentos deste tipo têm bombas elétricas.

Na alínea “f” determina que o fabricante do equipamento deve fornecer manual de operação em português, coerente com outras normas regulamentadoras que versam sobre máquinas e equipamentos.

Na alínea “g” determina que as borrachas das ventosas devem ter manutenção periódica e imediata substituição em caso de desgaste ou defeitos.

A alínea “h” determina deve-se destinar área específica para a movimentação de chapas com uso de ventosa, de forma que o trabalho seja realizado com total

segurança; esta área deve ter sinalização adequada na vertical e no piso. Esta está relacionada com a organização do trabalho com a ventosa e não necessariamente com o projeto e adequação desta.

A alínea “i” determina que procedimentos de segurança devem ser adotados para garantir a movimentação segura de chapas na falta de energia elétrica. Esta é uma determinação que exige medidas de organização do trabalho, mas pode ser também facilitada por características da ventosa, como uso de válvula de retenção do vácuo, no-break ou baterias.

Na seção 5.2 recomenda que os equipamentos de movimentação de chapas, a vácuo, possuam alarme sonoro e visual que indiquem pressão fora dos limites de segurança estabelecidos. Isto poderia ser uma determinação como as outras, com será visto a seguir nas em normas internacionais esta característica não é facultativa. Na atualização da NR-11 de 02 de Maio de 2016 este item foi alterado e tornou-se o item 2.5.2. Tornou-se obrigatório alarme sonoro e visual, mas apenas para dispositivos com acionamento elétrico, deixando de fora outros com acionamento pneumático.

5.2 NORMA EUROPEIA EN 13155

Teve-se acesso a esta norma europeia na sua versão BS EN 13155:2003+A2:2009. É uma norma de 2003 com adendo e revisão A2 de 2009. EN é abreviatura do alemão Europäische Norm que significa Norma Europeia. É elaborada e publicada em três línguas (alemão, francês e inglês) pelo CEN, abreviatura de Comité Européen de Normalisation ou Comité Europeu de Normalização, com sede em Bruxelas. BS é a versão inglesa publicada pelo BSI, British Standards Institute, Instituto de Padrões Britânico. Sua abrangência de aplicação e aceitação é uma lista exaustiva de países europeus. Esta norma é direcionada a fabricantes de equipamentos, não tem o direcionamento específico, como das NR brasileiras, para saúde e segurança do trabalho, se equipara a uma NBR (Norma Brasileira) aprovada pela ABNT.

O nome completo da norma é “Cranes – Safety - Non-fixed load lifting attachments”. A palavra “cranes” é usada indistintamente para guindastes, pontes rolantes e talhas. Por “non-fixed load lifting attachments” entende-se qualquer dispositivo não fixo no guindaste ou ponte usado para prender ou fixar uma carga a

ser elevada, podem ser ganchos, grampos, ímãs e certamente ventosas. A palavra “safety” significa segurança, neste caso de um modo amplo, não só em relação a segurança dos trabalhadores, mas da operação como um todo.

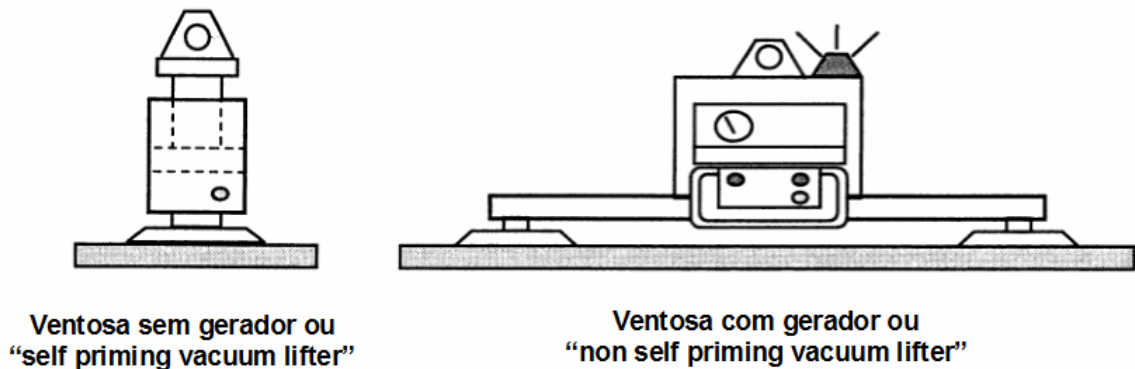
Nesta norma o item 5.2.2 Vacuum Lifters, ou elevadores a vácuo, e seus subitens 5.2.2.1 a 5.2.2.11 tratam de equipamentos para elevação com ventosas (a vácuo). Os subitens de interesse para este projeto são explorados a seguir.

Subitem 5.2.2.1 determina que a capacidade do dispositivo com ventosas deve ser de pelo menos o dobro da carga de trabalho no final da faixa de trabalho e início da faixa de risco no que diz respeito a pressão ou vácuo. Isto deve ser respeitado também em todos os ângulos de inclinação projetados para mover a carga, acrescidos de 6 graus. Determina ainda que a faixa de trabalho e a faixa de risco, no que diz respeito ao vácuo, devem ser contíguas, não pode haver nenhuma fixa intermediária entre elas.

Os subitens 5.2.2.2 a 5.2.2.4 determinam que tanto dispositivos com gerador de vácuo, como o caso deste trabalho, quanto dispositivos com ventosa sem gerador devem indicar claramente a faixa de vácuo segura ou de risco através de algum dispositivo de medição e sinalização. Esta sinalização deve estar visível ao operador do equipamento.

Apesar de não ser escopo deste trabalho, vale a pena explicar a diferença entre ventosa com geração de vácuo e as ventosas sem geração de vácuo, pois estas últimas são citadas tanto nesta norma como na norma norte-americana ASME B30.20 que será considerada também. As ventosas sem gerador usam alguma forma de tração, como uma alavanca ou a própria tração de elevação do dispositivo, para criar aumento de volume em uma câmara com comunicação com a ventosa. Este aumento de volume é que gera o vácuo para adesão na carga a ser transportada. O tipo mais comum usa um cilindro pneumático com pistão acoplado no olhal de suspensão do dispositivo. Ao tracionar a haste deste pistão o aumento do volume da câmara inferior do cilindro aplica vácuo nas ventosas. A Figura 12 mostra as figuras da norma EN 13155 na forma de desenhos didáticos simplificados para diferenciar os dois tipos de dispositivos com ventosas.

Figura 12 – Representação de dispositivos sem e com gerador de vácuo.



Fonte: BS EN 13155 (2009) e autor (2016)

O subitem 5.2.2.5 determina a forma de mitigar perdas de vácuo, que podem ser causadas tanto por vazamentos como por falha de fornecimento de energia. Esta forma depende do tipo de geração de vácuo, como segue:

- a) dispositivos com bomba de vácuo devem ter uma reserva de vácuo (tanque) com válvula de retenção entre a reserva e a bomba, a válvula deve estar mais próxima possível da reserva;
- b) dispositivos com gerador venturi devem ter tanque de reserva com ar comprimido (para alimentar o venturi) ou tanque de reserva de vácuo com válvula de retenção, também mais próxima possível da reserva;
- c) em dispositivos com turbina (blower) deve haver também bateria ou um volante inercial para manter a rotação;
- d) em ventosas com pistão de vácuo (sem gerador) deve haver uma folga de pelo menos 5% no curso total do pistão.

O subitem 5.2.2.6 determina que deve haver um alarme visual ou sonoro, conforme a circunstâncias de uso, que avise se o nível de vácuo cair abaixo da faixa segura e não puder mais se recuperado. Este alarme deve funcionar mesmo com falha no fornecimento de energia.

No subitem 5.2.2.7 determina que em acaso de falha de fornecimento de energia o dispositivo deve manter a carga por 5 minutos. Exceção a esta regra pode ocorrer se o equipamento for operado em áreas sem acesso de pessoal ou se for acionado por turbina de vácuo, desde que sejam cumpridas as seguintes condições:

- a) o dispositivo seja conduzido pelo operador por manípulos que assegurem que

- este não fique na área de risco em caso de queda da carga;
- b) o alarme do subitem 5.2.2.6 avise também assim que a condição de falha de energia ocorra;
 - c) o fabricante do dispositivo impeça, por instrução expressa e marcada neste, que o centro geométrico das ventosas seja erguido acima de 1,8 m;
 - d) o subitem 5.2.2.8 determina que se o dispositivo for usado em uma área de construção, deve ter uma forma extra de apreensão da carga, ou então deve ter duas reservas de vácuo com suas respectivas válvulas de retenção independentes. Cada reserva deve estar conectado a um conjunto diferente de ventosas e cada conjunto separadamente deve ter capacidade para o dobro da carga nominal.

No 5.2.2.9 determina que a liberação da carga só possa se feita por controle de ação dupla, exceto se a carga só possa se liberada quando já baixada ou em área sem acesso de pessoal.

5.2.2.10 determina que controles adicionais de giro e inclinação da carga só possam ser feito por comandos que necessitem de atuação permanente.

E por fim 5.2.2.11 determina que o formato da ventosa deve ser compatível com o tipo de carga. Se mais de uma ventosa for usada em conjunto, a geometria deve ser compatível e a distribuição de carga entre elas deve ser homogênea. A distribuição de carga admissível para cada ventosa não deve superar sua capacidade individual e ter em conta a rigidez tanto da carga com do dispositivo de elevação com ventosas.

Na Norma EN 13155 há ainda o Anexo C, este determina formas de verificação e teste das características de segurança determinadas por esta. Principalmente sobre os dispositivos de medição e aviso do nível de vácuo e seus alarmes sobre o estado de operação do equipamento, bem como dos limites de carga para operação. Neste anexo também determina como calcular a força de adesão da ventosa. Não faz distinção entre cargas na horizontal e vertical, pois segundo esta norma, qualquer carga, inclusive as que devem ser transportadas apenas na horizontal, devem ser garantidas em um ângulo de inclinação de 6° além da inclinação projetada. Assim determina a forma de cálculo e teste para assegurar que a força será sempre no mínimo 2 vezes maior que a carga na pressão limite de operação.

Força de adesão na horizontal ou perpendicular:

$$F_{a \perp} = P \cdot S \quad (17)$$

E a força de adesão na vertical ou paralela

$$F_{a //} = \mu \cdot P \cdot S \quad (18)$$

P: Pressão em Pa

S: Soma da superfície interna de todas as ventosas em m²

μ: Coeficiente de atrito a ser medido em ensaio.

O ensaio para determinar o coeficiente de atrito μ é feito colocando a ventosa sob a pressão ou vácuo limite para a faixa de trabalho sobre uma superfície de teste a ser carregada e suspensa na vertical. Em seguida se aplica força de tração, à velocidade constante, paralela à superfície e no mesmo sentido da aceleração da gravidade (ou diretamente para baixo) até que esta carga de teste comece a deslizar. Esta força deve ser aplicada através de um dispositivo de medição de força, como uma célula de carga por exemplo. A Figura 13 a seguir mostra graficamente o resultado da medição desta força de tração.

No eixo vertical está a força medida e no eixo horizontal o deslocamento, o intervalo 1 é o transitório onde o atrito estático é vencido e aparece um pico na força medida. O intervalo 2 é o deslocamento estável mantido em velocidade constante. Neste aparece um força de tração aproximadamente contante Tr que é determinada pelo atrito dinâmico μ do arranjo. O coeficiente de atrito então é determinado como segue:

$$\mu = (Tr + m \cdot g) / P \cdot S \quad (19)$$

Tr: Força de tração medida em N.

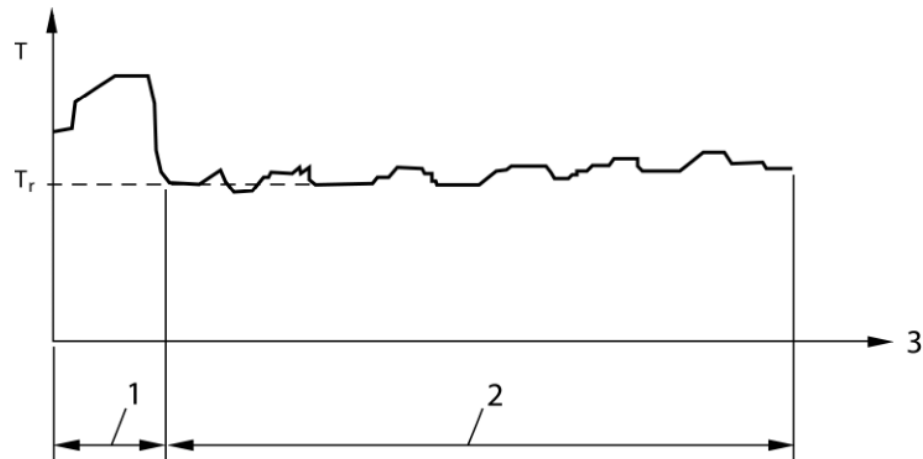
m: Massa da carga ou superfície de teste em kg.

g: Aceleração da gravidade em m/s².

P: Pressão ou vácuo de teste em Pa.

S: Área da superfície da ventosa em m².

Figura 13 – Força de tração medida x deslocamento ou deslizamento.



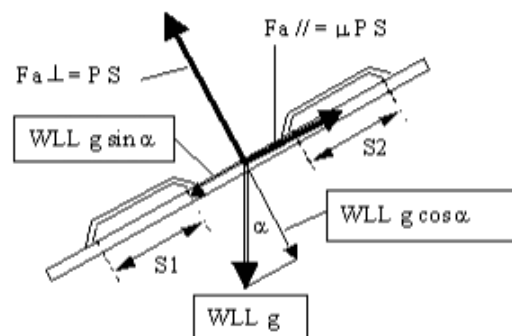
Fonte: BS EN 13155:2003+A2:2009 (2012)

Tendo a Figura 14 como referência, estão as condições de atendimento da norma:

$$F_{a\perp} = P \cdot S \geq 2 \cdot WLL \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (20)$$

$$F_{a//} = \mu \cdot (P \cdot S - WLL \cdot g \cdot \cos \alpha) \geq 2 \cdot WLL \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (21)$$

Figura 14 – Método da norma EN 13155 para cálculo da força de adesão.



Fonte: BS EN 13155:2003+A2:2009 (2012)

WLL: Working load limit ou carga limite (máxima) de trabalho em kg.

g: Aceleração da gravidade em m/s^2 .

α : Ângulo de inclinação da carga.

5.3 NORMA ASME B30.20

A norma ASME B30.20 é publicada por “The American Society of Mechanical Engineers” ou Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos. É reconhecida como “An American National Standard” ou uma norma nacional norte-americana. O Comitê elaborador da norma é composto por membros da indústria, governo e forças armadas norte-americanas, inclusive membro da OSHA, órgão do governo especialmente voltado para segurança do trabalhador. Na sua declaração de propósito a norma cita expressamente e em primeiro lugar a segurança dos trabalhadores, além de servir de orientação aos empregadores e órgãos de governo fiscalizadores. As versões que se teve acesso são as de 2003 e 2010. Esta norma é subconjunto da Norma ASME B30, que trata de forma ampla sobre segurança de vários tipos de equipamentos de carga e elevação de carga. A ASME B30.20 se chama “Below-the-hook Lifting Devices” ou dispositivos de elevação sob o gancho, dispositivos de elevação suspensos pelos equipamentos de elevação. Inclui os dispositivos de elevação com ventosas, tratados especificamente no capítulo 20-2. A seguir são apresentadas as diversas seções deste capítulo, com ênfase nas características de projeto e construção.

A seção 20-2.2 informa o escopo da norma, serve para dispositivos de elevação a vácuo operados com bombas ou gerador de vácuo ou sem, por força mecânica (como pistão de vácuo). Não se aplica a dispositivos para materiais porosos que devem ter características de projeto especiais.

A subseção 20-2.2.1 lista uma série de informações obrigatórias que devem ser marcadas no equipamento.

- a) carga nominal do equipamento e carga por ventosa;
- b) identificação do equipamento como nome do fabricante, endereço, modelo, número de série, tara, característica elétrica ou de pressão de alimentação e classificação conforme norma ASME BTH-1;
- c) as mesmas informações das alíneas anteriores, mas em referência a reparos e alterações no equipamento;
- d) Sinalização de segurança com etiquetas padronizadas para prevenir ou alertar sobre uma lista extensiva de perigos e riscos, entre elas.
 - não operar com sobrecarga,
 - não operar equipamento com defeito ou partes faltando,

- não operar fora da faixa de pressão,
- não operar com espaçamento inadequado entre ventosas,
- não operar com carga desalinhada em relação ao dispositivo,
- não erguer pessoas,
- não erguer carga sobre pessoas,
- não manter carga suspensa desassistida,
- operar sem ter lido e entendido o manual do equipamento,
- não erguer cargas mais alto que o necessário,
- sinalização de estado de cada ventosas se operada em separado no mesmo dispositivo,

Na seção 20-2.2.1 estão instruções sobre projeto e construção de dispositivos com ventosas. Na alínea "a" define UPC, Ultimate Pad Capacity ou Capacidade máxima da ventosa. Esta versão da norma remete a outra, a ASME BTH-1 – Design of Below-the-Hook Lifting Devices, para a fórmula de cálculo de UPC, no entanto a versão 2003 de ASME B30.20 indica a forma de cálculo no sistema métrico (mas não no SI) como:

$$UPC = A \cdot (Hg / 73,6) \quad (22)$$

A: é a área efetiva da ventosa, em cm², ou a área fechada entre a ventosa e o material quando a ventosa está completamente pressionada contra o material.

Hg: é a pressão do sistema em cmHg, levando em conta todos os fatores que possam reduzi-lo, com altitude, desgaste da bomba e vazamentos.

73,6: é a constante de divisão para o método.

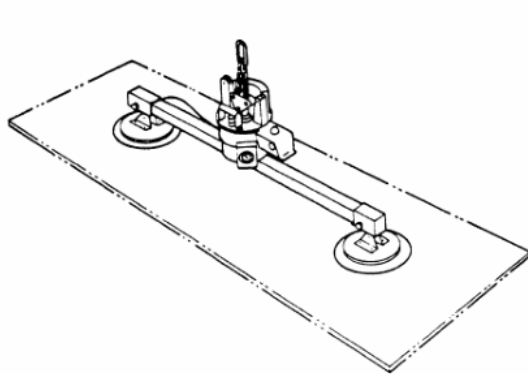
Na alínea "c" determina que a carga a ser transportada na horizontal não pode exceder 50% do valor UPC calculado. Na alínea "d" determina que para cargas na vertical não pode exceder 25% do valor de UPC calculado.

A alínea "e" informa que estes limites se aplicam a cargas planas, limpas, secas e não porosas. Devem ser alterados no caso da carga não cumprir estas condições.

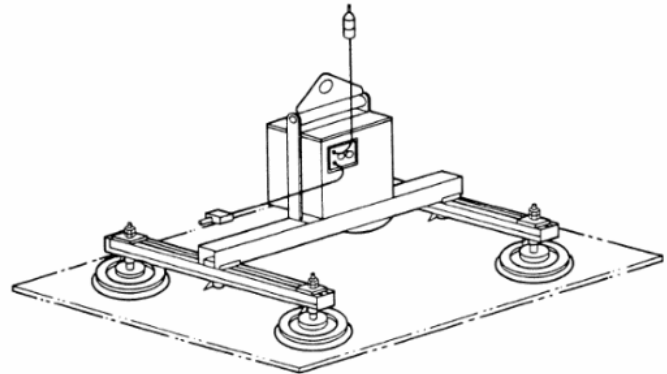
Na alínea "f" determina que os dispositivos devem ter reservatório de vácuo para o caso de perda de alimentação. O reservatório deve ser projetado para que o nível de vácuo não caia mais que 10% após 4 minutos sem alimentação. O projeto

também deve prever que todos os reservatórios de vácuo disponíveis no equipamento sejam direcionados para as ventosas efetivamente em uso durante a falha de alimentação.

Figura 15 – Exemplos de dispositivos na norma ASME B30.20.



Ventosa dupla sem gerador, com vácuo acionado por pistão mecânico



Ventosa quádrupla com gerador de vácuo e alimentação externa

Fonte: ASME B30.20 (2003) e autor (2016)

As demais seções do capítulo 20-2 tratam de diversos assuntos como inspeções, testes, manutenção, operação, treinamento, manuais e demais questões administrativas relativas a este tipo de dispositivo. A Figura 15 mostra a representação de exemplos apresentados na norma de dispositivos de elevação com ventosas.

6. CRITÉRIOS DE PROJETO.

6.1 – CAPACIDADE DE CARGA.

Como já foi descrito, o fator que define a força disponível é a área da ventosa ou conjunto de ventosas que se dispõe. A forma como é construída a ventosa, se é mais rígida ou flexível determina o quanto se pode aproximar da força máxima teórica que sua área determina. Mais rígida mais força, mais flexível, maior capacidade de adaptação. O gerador ou bomba de vácuo determina o quanto se aproxima da força máxima que a ventosa poderia ter com vácuo tendendo ao vácuo absoluto ou pressão tendendo a zero.

Como já foi descrito também, chegar próximo ao vácuo absoluto pode ser caro e demorado, e na prática a força que se obteria nesta situação é percentualmente pouco maior que a força que se obtém com um nível um pouco mais baixo, mas também bem mais fácil de atingir. A relação custo x benefício que se pretende em um projeto de engenharia impõe os limites práticos deste projeto. Neste caso este critério poderia se resumir em maximizar o número e tamanho das ventosas e atingir um nível de vácuo mais alto possível dentro da viabilidade técnica e econômica do projeto.

A estrutura básica que se tem a disposição permite o uso de 4 ventosas em um arranjo retangular. A maior ventosa que se dispõe é o modelo PDL350-260NIT marca ERGOVAC. Esta tem um diâmetro externo total de 350 mm e um anel de vedação interno de 260 mm. O valor da força máxima de descolamento para este modelo (Alfama, 2015, p. 3) é de 4.840 N a -60 kPa e 5.459 N a -80 kPa. A faixa entre estes dois valores sugere um nível de vácuo alto o suficiente para não subaproveitar as ventosas, mas não tão alto que possa ser difícil de atingir para uma bomba de vácuo comercial e comum.

Outro critério importante de projeto é a posição de uso vertical quase sempre usada para manusear, transportar ou instalar vidros ou conjuntos montados com vidros. Como esta é posição mais comum e mais exigente é a que será considerada sempre para projeto.

Na norma EN 13155 o critério de aceitabilidade exige que se meça a força de adesão paralela à superfície, que no caso da carga vertical é a componente gerada pelo seu peso. Como não se dispõe deste valor medido, o critério da norma ASME

B30.20 de considerar o a carga máxima como 25% da força calculada da ventosa é um critério prático e viável.

Assim pode-se determinar qual a carga de forma mais pática usando a norma ASME B30.20, pois apesar de ser menos precisa a apenas determinar a carga como um fator de segurança adicional da carga na horizontal (de 50% para 25%), pode ser feito com os dados disponíveis. Então a carga será então 4 vezes o valor calculado para uma ventosa por que se dispõe de 4 ventosas. Um nível de vácuo usado comumente com ventosas é -60 kPa, pois é um nível fácil de ser atingido e com este já se obtém uma boa parte da capacidade teórica da ventosa. Permite que se aumente ainda a margem de segurança operando acima deste, mas mantendo-o com referência de segurança para sinalização de advertência, por exemplo. A ventosa tem 350 mm de diâmetro ou 35 cm para fins de cálculo da área.

UPC – Ultimate Pad Capacity, capacidade da ventosa (ASME B30.20, 2003):

$$UPC = A \cdot (Hg / 73,6) \quad (23)$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (35 / 2)^2 = 962,11 \text{ cm}^2 \quad (24)$$

$$Hg = 45 \text{ cmHg (convertido a partir de 60 kPa)} \quad (25)$$

$$UPC = 962,11 \cdot (45 / 73,6) = 588,24 \text{ kg} \quad (26)$$

Assim para uma carga na vertical o seu valor máximo admissível é de 25% de UPC ou 147,06 kg. Como são 4 ventosa a capacidade total do dispositivo é 588,24 kg.

Como a ventosa no vidro tem uma vedação quase perfeita, então pode acontecer o que já foi descrito na explicação sobre ao funcionamento da ventosa, o nível de vácuo efetivo pode estar presente apenas na parte mais interna da ventosa, na área compreendida pelo anel interno de vedação, que tem diâmetro de 260 mm. Então por prudência, usando o mesmo cálculo, determinamos com esta área reduzida o valor de UPC 324,61 kg. Logo 25% deste em 4 ventosa leva à capacidade total do dispositivo para 324,61 kg, ou 325 kg para simplificar, pois a margem de segurança e este critério de prudência dão conta deste arredondamento com muita folga.

Ao comparar o valor de UPC 324,61 kg com os ensaios de tração feitos no LABELO por Alfama (2015), temos o valor medido para ventosa de 350 mm a -60 kPa de 4.840 N. Traduzindo em peso ou carga ao dividir pela aceleração da gravidade de $9,81 \text{ m/s}^2$ temos então uma carga de arranque perpendicular de 493,37 kg. UPC de fato representa um critério de prudência com fator de segurança elevado, pois deve-se usar ainda o fator de 25% para a posição vertical.

6.2 GERADOR DE VÁCUO

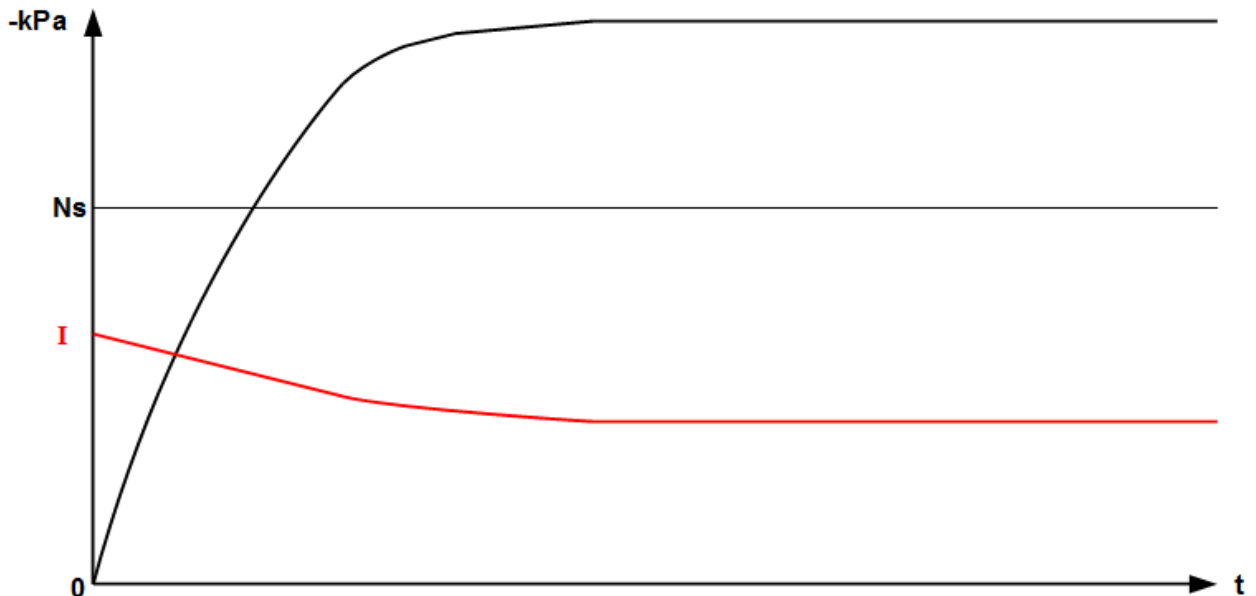
Muito importante é definir também a forma de alimentação do gerador ou bomba de vácuo. Há duas formas possíveis, alimentação elétrica, para os vários tipos de bombas elétricas, ou pneumática, com ar comprimido, no caso de um gerador venturi. Qualquer uma delas pode ser inconveniente por necessitar de uma conexão constante em um dispositivo que pode ser içado em locais abertos, sem infraestrutura industrial, e a alturas consideráveis para conexões elétricas ou de ar comprimido comuns. Isto poderia acarretar problemas de mobilidade do dispositivo e um comprometimento da segurança, pois cabos ou tubos muito longos tem peso maior e são mais suscetíveis a rompimento. O vidro, material a que se destina o equipamento, tem como característica a estanqueidade na sua apreensão com ventosas. Não há vazamento de ar através do vidro, também não há vazamento significativo através da interface de vedação entre a ventosa e o vidro, tornando esta uma conexão virtualmente hermética. Esta característica em particular permite que, com a seleção de uma bomba e conjunto pneumático adequado, se consiga um consumo de energia significativo apenas no início do processo de geração de vácuo. No momento que o vácuo é considerado seguro para movimentação a bomba pode entrar em regime econômico, apenas mantendo o vácuo frente a um vazamento insignificante. Isto certamente sugere o uso de bateria para alimentação da bomba, o que confere ao conjunto mobilidade independente da alimentação e robustez no que diz respeito a disponibilidade de energia, bem menos suscetível a falhas.

Como uso de bateria e uma bomba de vácuo elétrica de corrente contínua ou CC pode-se controlar a bomba de forma muito simples, motores de pequeno porte CC tem alto torque de partida e podem ser ligados e desligados muito rapidamente, tipicamente em menos de 1 s já atingem velocidade nominal e velocidade de bombeamento efetiva.

6.2.1 Geração Contínua

A Figura 16 mostra graficamente o comportamento do nível de vácuo na ventosa (linha preta) e da corrente elétrica na bomba de vácuo CC (linha vermelha) em relação ao tempo. No instante zero, com a ventosa sem vácuo a bomba é ligada, a corrente no motor da bomba é máxima, pois é a situação de maior carga para bomba, quando tem a maior vazão instantânea. O gráfico não representa a corrente de partida ou transiente elétrico da bomba, pois sua escala de tempo é muito curta e irrelevante para o exemplo em questão. A medida que o nível de vácuo sobe o volume de ar movimentado pela bomba (vazão) diminui e conseqüentemente sua carga, a corrente cai até um valor constante a mediada que o nível de vácuo também estabiliza. Importante notar que a partir deste ponto de estabilização a bomba de vácuo continua consumindo energia, mesmo sem contribuir para o aumento do vácuo, portanto realiza trabalho nulo. N_s é o nível de segurança da ventosa, com o vácuo acima deste ponto já é possível operá-la. A única vantagem desta forma de operação é manter o nível de vácuo sempre bem acima do nível de segurança, desde que não haja falha na bomba.

Figura 16 – Curva de pressão e corrente no modo contínuo.



Fonte: autor

6.2.2 Geração intermitente

Em aplicações com alta estanqueidade com esta em questão, onde o vácuo tende a se manter, pode-se usar a bomba de forma cíclica, ligando e desligando, apenas mantendo o nível e compensando as perdas devidas aos pequenos vazamentos próprios dos materiais empregados. Esta solução é bastante empregada para economia de energia em conjunto com geradores venturi (PIAB, 2004), pois estes têm como característica acionamento instantâneo, e sem limite de ciclos, assim que alimentados com ar.

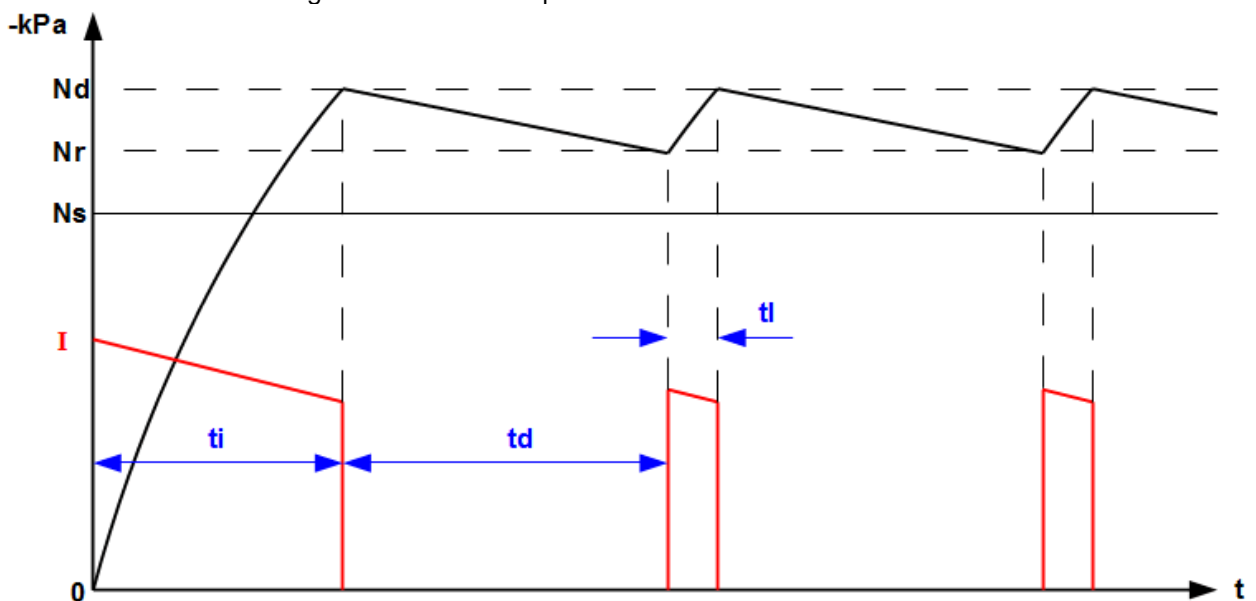
Como já foi mencionado, pequenas bombas com motor CC também tem esta característica de serem praticamente instantâneas, também são pouco sensíveis a ciclos de acionamento e desligamento contínuos. Pode-se usar o controle do tipo “on-off” para manter o vácuo em níveis aceitáveis e reduzir o consumo de energia, o que é particularmente interessante quando esta é fornecida por baterias.

A Figura 17 mostra graficamente com se pode usar a bomba de vácuo de forma intermitente para manter o vácuo maior que um determinado nível de segurança N_s . Usa-se um sensor de pressão para medir o vácuo e comandos elétricos adequados para manter a bomba funcionando em modo cíclico entre as pressões N_d ou nível de desligamento e N_r ou nível de religamento, ambos maiores que o nível de segurança.

Quando a bomba é acionada pela primeira vez, Pressão e corrente da bomba se comportam exatamente como nos instantes iniciais do exemplo anterior, com acionamento contínuo. Isto ocorre durante t_i ou tempo de acionamento inicial. No instante que a pressão atinge o N_d ou nível de desligamento a bomba é cortada e selada automaticamente por uma válvula de retenção automática, que mantém o vácuo na ventosa mesmo com a bomba parada. Durante t_d ou tempo de bomba desligada o nível de vácuo da ventosa cai naturalmente até atingir N_r ou nível de religamento da bomba, este nível deve ser suficientemente mais alto que o nível de segurança N_s para se garantir que o vácuo nunca caia abaixo deste. Neste ponto a bomba religa durante um tempo t_l ou tempo de bomba ligada para recompor o nível de vácuo até N_d novamente, mantendo assim um funcionamento cíclico do tipo “on-off”. Tanto t_i como t_l dependem proporcionalmente do volume interno do circuito de vácuo e de forma inversa da capacidade e potência da bomba de vácuo. Entretanto t_l será muito menor que t_i , pois o volume de ar retirado para compensar os

vazamentos é muito menor que o volume removido para estabelecer o vácuo no primeiro ciclo. Se o circuito de vácuo é altamente estanque como se supõe, o tempo **td** será muito maior que **ti**. Se esta proporção for de algumas dezenas de vezes fica fácil comprovar a economia de energia que se pode obter neste modo de operação. Pode-se estender muito o tempo de utilização da bateria, ou pode-se ainda permitir o uso de uma bateria de menor capacidade (mais leve, menor e com menor custo) do que seria necessário em um sistema de bomba de vácuo ligada continuamente.

Figura 17 – Curva de pressão e corrente no modo cíclico.



Fonte: autor

6.3 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES

6.3.1 Sensor de Vácuo

O sensor usado para monitorar o nível de vácuo deve ser o mais preciso possível. Pressostatos do tipo eletromecânico como diafragma, do ponto de vista funcional, poderiam ser usados por desempenharem a função de liga-desliga com uma pequena histerese. Entretanto a precisão e a repetibilidade neste caso não são suficientes. Este tipo de pressostato normalmente funciona com uma histerese fixa e ajuste apenas do ponto médio de atuação, ou seja, teria que ser ajustado em um ponto médio entre N_d e N_r e deveria atuar precisamente nestes pontos, desligando em N_d e religando em N_r . Precisaria ser um dispositivo bastante sofisticado e de construção mecânica precisa, pois se tratando de vácuo sempre há que se contar

com diferenças mínimas de pressão, que são difíceis de serem convertidas em atuação mecânica efetiva. Também não é adequado não poder ajustar separadamente ou independentemente os pontos de atuação N_d e N_r . Esta capacidade permitiria explorar de forma mais eficiente a característica da bomba, buscando um ajuste que minimizasse o tempo da bomba ligada.

Então neste caso é preferível o uso de um sensor de pressão que de fato meça o nível de vácuo e gere um sinal que possa ser interpretado por um circuito lógico que controle a bomba. Uma opção robusta e econômica é usar sensores de estado sólido do tipo piezo resistivo, de alta precisão, que têm erro total (linearidade, offset e histerese) de medição menor que 1%. O sensor escolhido é o MPX2100D (Freescale) que gera um sinal analógico de 0 a 40 mV, proporcional ao vácuo de 0 a -100 kPa. Certamente este sinal deve ser amplificado e tratado do ponto de vista eletrônico para gerar os comandos de ligar e desligar a bomba. A Figura 18 mostra o sensor com duas tomadas de pressão, trata-se de um sensor diferencial, mede a diferença entre a pressão das tomadas. Para medir o vácuo relativo em uma ventosa deve ter a tomada de pressão menor ligada no circuito de vácuo da ventosa e a tomada de pressão maior aberta para a atmosfera.

Figura 18 – Sensor Freescale MPX2100DP.



Fonte: Freescale (2008)

6.3.2 Válvula de Retenção

Outro item importante neste arranjo é a válvula de retenção que isola a bomba do circuito de vácuo no momento que esta está desligada. Para isto se usa uma válvula unidirecional ou válvula de retenção ou válvula de não-retorno, que nada mais é que um dispositivo que permite a passagem do fluxo de ar apenas em um sentido. Neste caso o ar deve passar apenas no sentido em que a bomba aspira e selar o circuito no caso desta desligar. Preferiu-se um modelo específico para uso com o vácuo, pois é ajustada para atuar com uma diferença de pressão muito

pequena. Neste caso o modelo em alumínio de 1/8 de polegada BSPP (Biomec), conforme Figura 19.

Figura 19 – Válvula de retenção ou unidirecional.



Fonte: autor

6.3.3 Bomba de Vácuo

A bomba de vácuo, como já descrito, deve ter a capacidade de partir rapidamente assim que comandada. O item escolhido é o modelo BCP-13H marca Biomec. Trata-se de um microbomba de pistão a seco, ou seja, sem óleo lubrificante. É construída predominantemente em alumínio, pistão cabeçote e camisa com acabamento polido são deste material. As válvulas do cabeçote são feitas de aço inox e o anel de vedação do pistão é de composto de PTFE. Sua capacidade máxima de bombeamento é de 33 l/min, vácuo máximo de -86 kPa. O motor é CC de 12 V com escovas de grafite, desenvolve até 100 W, corrente máxima de 10 A. A figura 20 mostra a microbomba BCPDC-330/CN.

Figura 20 – Bomba de vácuo a pistão seco BCPDC-330/CN.



Fonte: Biomec (2012)

6.3.4 Chassi e outros itens para montagem

Para montagem do protótipo foi usado um chassi já existente que foi inicialmente projetado para uso industrial em cargas na horizontal até 500 kg. Pode ser usado para cargas na vertical também, mas para cargas menores. Em qualquer

caso sempre com alimentação externa elétrica ou com ar comprimido. As principais modificações necessárias são a adaptação para alimentação por bateria, uso de reservatório de vácuo e montagem com quatro ventosas de 350 mm, maiores que no projeto original que permite no máximo o uso de cinco ventosas de 240 mm. A Figura 21 mostra o equipamento na sua concepção original, antes das mudanças planejadas para este protótipo.

Figura 21 – Equipamento com ventosas original, para cargas verticais.



Fonte: ERGOVAC (2012)

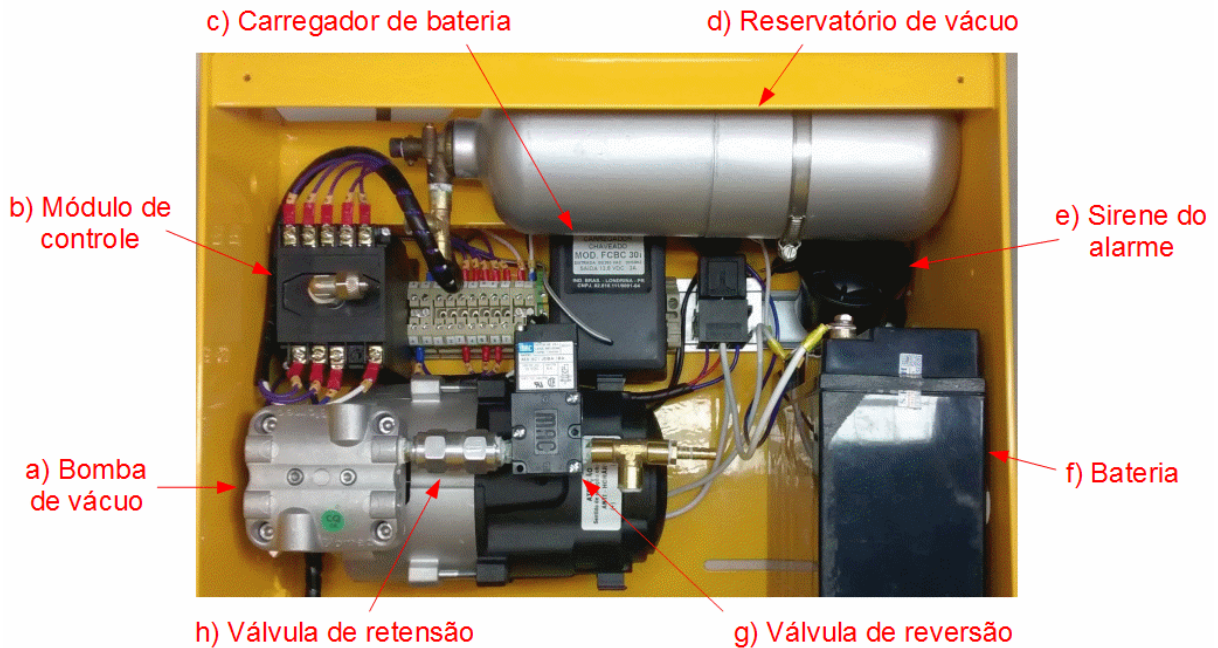
Outros itens são necessários para montagem e para garantir o funcionamento como esperado, os principais são os que seguem:

- a) bateria de chumbo ácido de 12 V e 18 A.h;
- b) carregador de bateria chaveado de 3 A;
- c) válvula pneumática direcional de 4 vias e 2 posições com acionamento direto por solenoide de 12V CC, necessária para liberar a carga rapidamente por reversão do fluxo da bomba, uma vez que o sistema é feito para ser estanque;
- d) reservatório de vácuo de 1,2 l para o caso de falha da bomba ou controle;
- e) vacuômetro indicador do nível de vácuo da ventosa;
- f) módulo eletrônico para sinalização e controle da bomba de vácuo;
- g) sirene piezoelétrica de 12 V para alarme de emergência;
- h) luzes de advertência e sinalização.

7. MONTAGEM DO PROTÓTIPO

A Figura 22 a seguir mostra a montagem das diversas partes com o painel do equipamento aberto.

Figura 22 – Montagem das partes



Fonte: autor (2016)

- a) bomba de vácuo, modelo BCPDC-330/CN de 12 V corrente contínua;
- b) módulo de controle da bomba, contém o sensor em seu interior;
- c) carregador de bateria chaveado de 3 A, tensão de flutuação de 13,8 V;
- d) reservatório de vácuo de 1,2 l;
- e) sirene do alarme, acionada quando o nível de vácuo cair abaixo de -60 kPa, também é acionada em disparos curtos intermitentes caso a tensão da bateria caia instantaneamente abaixo de 10,5 V, para sinalizar descarga iminente da bateria;
- f) Bateria de chumbo e ácido de 18 A.h;
- g) válvula de reversão do vácuo, é uma válvula pneumática, mas com acionamento direto por solenoide de 12 V corrente contínua, permite uso e comutação efetiva com vácuo;
- h) válvula de retenção do vácuo, ou válvula de não retorno, acionada por pressão (vácuo) e mola.

O módulo de controle da bomba foi especialmente desenvolvido para equipamento com ventosas. Sua função é monitorar o nível de vácuo através do sensor MPX2100DP e gerar os sinais que controlam, bomba, a válvula de reversão, as luzes de advertência e a sirene de alarme. Uma vez que o nível de vácuo passar de -60 kPa (operação segura) e por algum motivo qualquer, intencional ou acidental, cair abaixo deste nível (perda de nível de segurança) a sirene de alarme disparará.

A Figura 23 mostra o painel do equipamento, que é a tampa de fechamento da montagem, com as suas diversas partes.

Figura 23 - Painel



Fonte: autor (2016)

- a) chave liga-desliga do equipamento;
- b) sinaleiro vermelho - não operar, indica vácuo inseguro para operar. Se for contínua está no período inicial de geração do vácuo, valor de segurança de -60 kPa ainda não foi atingido. Se for piscante indica perda da condição segura, o nível caiu abaixo de -60 kPa, isto ocorre junto com o disparo da sirene de alarme;
- c) sinaleiro verde - bomba, indica que a bomba está ligada;
- d) sinaleiro verde - vácuo, indica vácuo seguro para operar, maior que -60 kPa;
- e) LED bicolor do carregador, vermelho indica carga em andamento, verde indica carga concluída ou descarga em andamento;
- f) voltímetro de 8 V a 16 V, indica a tensão da bateria;
- g) vacuômetro de 0 a -100 kPa, indica o nível de vácuo.

A Figura 24 mostra uma botoeira pendente do tipo usado em equipamentos de elevação. Ela é usada para acionar o desligar a bomba e a reversão do equipamento a uma distância segura. Seus botões e funções foram adaptados para esta função.

Figura 24 – Botoeira adaptada para controle do vácuo



Fonte: autor (2016)

- a) Chave da bomba, neste local o botão do tipo pulso foi trocado por um comutador de acionamento angular e com retenção, seu acionamento liga a bomba par o início da geração do vácuo;
- b) Botão de alívio, é intertravado com a chave da bomba que não permite seu acionamento quando a bomba está ligada, com a bomba intencionalmente desligada aciona válvula de reversão, o que permite desfazer o vácuo e soltar a carga rapidamente;
- c) Botão de emergência. Neste tipo de equipamento não faz sentido uma “parada de emergência”, pois em caso de mau uso ou mau funcionamento não é aceitável a parada da bomba. Assim sua função foi adaptada para manter a bomba em funcionamento, sobrepujando o comando manual ou do módulo de controle. Também dispara a revelia a sirene e liga o sinaleiro vermelho, indicando de qualquer forma alguma anomalia que necessita intervenção.

8. RESULTADOS OBTIDOS

8.1. VALORES MEDIDOS E A NORMA

Uma vez que a carga máxima para o equipamento foi calculada pelo critério da norma ASME B30.20 de não ultrapassar 25% de UPC (ASME B30.20, 2003, 2010) a característica mais importante que poderia se obter no projeto para realmente estender a possibilidade de uso seguro é o valor para o tempo de queda do nível de vácuo com perda da alimentação, que não deve ser de mais de 10% em 4 minutos, conforme seção 20-2.2.1, alínea f.

No caso de um equipamento a bateria, a perda de alimentação pode ocorrer por descarga da bateria. Isto pode ocorrer por uso contínuo do equipamento além da capacidade da bateria, ou por falta de manutenção e observação da vida útil da bateria, que perde a capacidade de carga após muitos ciclos de carga e descarga. Também pode ocorrer com uma bateria nova, mas que tenha sido usada (até a exaustão da carga) ou carregada de forma incorreta.

Situação análoga poderia ocorrer se houvesse pane no equipamento, como curto circuito, travamento mecânico da bomba, queima do motor da bomba ou falha do controle da bomba. O resultado seria a parada definitiva da bomba e o vácuo decairia normalmente até a queda da carga.

O nível de segurança é o nível mínimo que se pode atingir usando o critério do UPC calculado, no caso -60 kPa, é o nível abaixo do qual não pode-se operar nunca, no pior caso com a carga mais pesada, não por coincidência é o nível de disparo do alarme indicando emergência, apesar de ainda estar bem acima do nível onde efetivamente ocorreria a queda da carga.

Com as ventosas de fato colocadas sobre vidro a taxa de queda do vácuo medida foi de aproximadamente 2 kPa a cada 4 minutos ou 3,4 %, abaixo dos 10 %, valor estipulado na norma. Na prática, havendo falha geral na geração de vácuo e o disparo do alarme em - 60 kPa, em 4 minutos o decaimento seria na pior hipótese para -58 kPa, ainda bastante próximo da faixa segura e em um tempo bastante adequado para se tomar providências de segurança em relação a carga, com baixá-la imediatamente por exemplo. O teste de estanqueidade foi feito na empresa Indutec Indústria Tecnológica Ltda. com um vacuômetro digital modelo XXX marca Airbest.

8.2. MELHORA ESPERADA NA SEGURANÇA

Do ponto de vista da segurança em movimentações de carga, tão importante quanto as características e condições do equipamento utilizado, são as mediadas de organização do trabalho e operações. É indispensável a sinalização, comunicação e também a demarcação das áreas e espaços destinados para tal.

A maior contribuição de segurança que um equipamento com ventosas pode dar à operação de mover, içar montar vidros é o afastamento físico entre a carga e o pessoal encarregado da função. A proximidade ou o contato direto de pessoas com este tipo de carga é um fator de risco considerável, com casos já registrados de fatalidade (ZH CLICRBS, 2009). Evita que qualquer tipo de cabo, cinta ou presilha tenha que ser diretamente fixada na carga, ou que pior ainda, a carga seja diretamente transportadas por mãos, o que a natureza frágil da própria carga exigiria se só houvessem meios precários para isso. O fato da ventosa conseguir sustentar a carga aderindo tão somente em uma face, sem ter que usar qualquer borda da peça como apoio, permite a instalação e retirada de vidros diretamente em caixilhos de aberturas de construções.

8.3. SUGESTÕES PARA UMA NOVA IMPLEMENTAÇÃO

Algumas melhorias podem ser feitas no protótipo para o seu uso comercial, tanto para segurança como para funcionalidade.

Uma melhora na capacidade de carga poderia ser obtida usando uma ventosa de mesmo diâmetro, mas sem o anel interno de vedação. Como o uso é preferencialmente com vidros ou até com algum material de acabamento com superfície bem uniforme e estanque, o anel se torna desnecessário, na verdade até um limitador de capacidade. De fato, como já foi determinado, o valor de UPC para 4 ventosas de 350 mm é 588,24 kg. Esta capacidade supera até a capacidade de projeto da estrutura que é de 500 kg. Assim o equipamento poderia ser usado para até 500 kg de acordo com a norma ASME B.30.20.

Para segurança, alguns dos comandos críticos de acionamento das diversas funções poderiam ser mudados para comandos do tipo contato normalmente fechado. Assim, em caso de falha geral do comando, as funções críticas se

manteriam ligadas mesmo sem sinal de ativação. Estas partes seriam a bomba de vácuo, a sirene do alarme e a luz vermelha de indica não operar.

Também poderia se prover o equipamento de sensor ou chave que detecte peso da carga na olhal de suspensão do equipamento. Desta forma este não poderia ser desligado, nem intencionalmente, nem acidentalmente, quando o equipamento estivesse suspenso com carga.

Uma melhoria tanto na segurança como na funcionalidade seria prover de comando por rádio controle no lugar da botoeira por cabo. Isto permitira ligar e desligar o mesmo a distâncias de dezenas de metros, por pessoal no solo ou dentro do prédio, após o vidro ser instalado.

Uma melhoria funcional seria possibilitar o uso de baterias removíveis e carregador externo além do que está no próprio equipamento. Desta forma o equipamento poderia ser usado continuamente por longos períodos, independente da capacidade da bateria.

9. CONCLUSÃO

O protótipo mostrou que pode ser operado com segurança por longo tempo dentro das condições estabelecidas pela norma ASME B30.20. Também demonstrou uma margem de segurança ampla para o caso de falha ou uso inadequado, conseguindo manter o vácuo por um tempo significativamente maior que o estipulado pela mesma norma.

Esta característica foi obtida por duas condições principalmente: a primeira foi o cuidado na execução do circuito pneumático (ou de vácuo) que conferiu uma grande estanqueidade, com entrada mínima de ar. A segunda foi o uso eficiente da energia, com uma bomba de baixa potência e uma bateria comum e de capacidade média, do tipo normalmente usada em nobreaks. Uma montagem compacta e sem conexões de energia externa também foi a consequência destas características.

Como já foi mencionado, este equipamento com ventosas contribui para a segurança por permitir o afastamento físico entre as pessoas e a carga, permitindo uma operação a distância como acessório de fixação da carga em guias. Cabe mencionar também a melhora esperada na velocidade de instalação dos vidros e revestimentos, já que as cargas podem ser fixadas nas ventosas e também liberadas destas em poucos segundos.

Este tipo de equipamento já é comumente produzido e usado na construção em países que estão em um patamar tecnológico mais desenvolvido, tipicamente na Europa e América do Norte. São usados tanto na execução de obras inteiras como em intervenções de manutenção em vidros e revestimentos de prédios.

No Brasil um equipamento com estas características é inovador, pois o uso específico em instalação e manutenção de vidros em prédios é pouco conhecido, se limita a aplicações pontuais e com equipamentos importados. Abre-se assim a possibilidade de uso comercial como equipamento do patrimônio de construtoras e prestadores de serviço. Também pode ser oferecido como equipamento para locação, para uso em curtos períodos e aplicações pontuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Nardi, R.; Longuini, M.D. Origens Históricas e Considerações Acerca do Conceito de Pressão Atmosférica. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, UFSC, Florianópolis, vol. 19, n.1, p. 67-78. abr. 2002

Guericke. O. **Experimenta nova (ut vocantur) magdeburgica de vacuo spatio**. Amsterdam. J. Jansson. 1672. pp. 104-105
<<https://archive.org/details/experimentanovau00gueruoft>>

Marquardt, N. **Introduction to the Principles of Vacuum Physics**. Institute for Accelerator Physics and Synchrotron Radiation. Dortmund, 1999
<<http://www.chem.elte.hu/foundations/altkem/vakuumtechnika/CERN01.pdf>>

Paiva, J. A. de. Aplicações da Tecnologia do Vácuo em Engenharia Mecânica. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 6, 2010, Campina Grande. **Anais eletrônicos**. ABCM, 2010
<<http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/conem/2010/PDF/CON10-0546.pdf>>

Chambers, A.; Fitch, R.K.; Halliday, B.S. Introduction. In:_____. **Basic Vacuum Technology**. 2nd ed. Philadelphia: Institute of Physics, 1988.
<<http://www.crcnetbase.com/isbn/978-0-7503-0495-5>>

PIAB AB. Catalogue 1999. Introduction. 1999.

PIAB AB. Vacuum Technique. Catalogue 2004. Piab Vacuum Academy. 2004.

Alfama, L.P.S. **CMP 0021s/2015**: Ensaio de força de arranque de ventosa. Porto Alegre: PUCRS, 2015, 11 f. Relatório de Ensaio realizado no LABELO/PUCRS.

BRASIL, Portaria MTb n.º 3.214, de 08 de junho de 1978. NR-11 - Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais. **Diário Oficial da União**. Brasília, 6 jul. 1978.

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTE. **BS EN 13155:2003+A2:2009**: Cranes – Safety - Non-fixed load lifting attachments, London, 2012.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B30.20**: Below-The-Hook Lifting Devices, New York, 2003.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B30.20**: Below-The-Hook Lifting Devices, New York, 2010.

Freescale Semiconductor. **MPX2100 Series** - 100 kPa On-Chip Temperature Compensated and Calibrated Silicon Pressure Sensors. Rev. 10. Tempe, 2008.

Carolina Rocha. **ZH CLICRBS**. 2009. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticia/2009/06/jovem-morre-em-acidente-no-estacionamento-de-shopping-na-capital-2554242.html#>> Acesso em: 30 de agosto de 2016.