

MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Aylin Krzesaj

Bombas

Bombas são equipamentos que transformam energia mecânica em energia hidráulica, que é fornecida ao líquido. Também são chamadas "*geradores hidráulicos*", ou ainda, "*equipamentos hidromecânicos*".

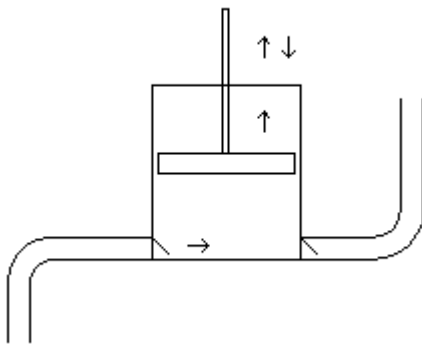
Ao passar por uma bomba, há um aumento de energia do líquido, ou seja, a linha de energia se eleva.

- Obs.: Na hidráulica, a linha de energia praticamente coincide com a linha piezométrica.

Os principais tipos de bombas são:

1. Estática-volumétrica ou de deslocamento positivo

Possui uma câmara em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento. Proporciona, então, condições para que se realize o escoamento na tubulação de aspiração até a bomba, e na tubulação de recalque até o ponto de utilização. A vazão é proporcional à geometria da mesma e à sua velocidade.



Bomba de embolo

A característica principal desta classe de bombas é que uma partícula líquida em contato com o órgão que comunica a energia tem aproximadamente a mesma trajetória que a do ponto do órgão com o qual está em contato

1.1 Alternativa ou recíproca

O elemento bombeador faz um movimento de "*vai e vem*", alternando seu sentido

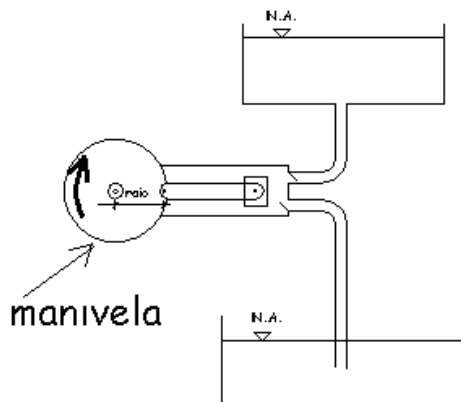
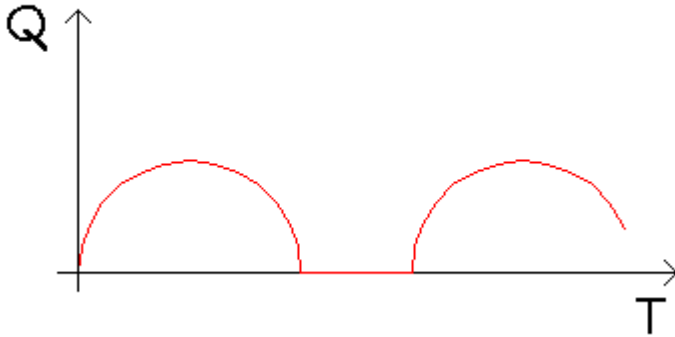


Gráfico da vazão em função do tempo



- a) Utilizada para pequenas vazões e grande pressão;
- b) Vazão proporcional à rotação.
→ usada como bomba dosadora (dosa reagentes químicos: sulfato de alumínio, cloro, cal, flúor) em uma estação de tratamento de água.

Modos de variar a vazão

- 1. Variando o raio da manivela
- 2. Variando a velocidade do motor

No segundo caso o ajuste da velocidade é feito eletronicamente em função da vazão necessária. A variação da vazão é feita com a variação da frequência da rede elétrica.

Normalmente: $f=60\text{Hz}$ (c/s) ciclos por segundo

$$n=120.f/p \quad (\text{r.p.m.})$$

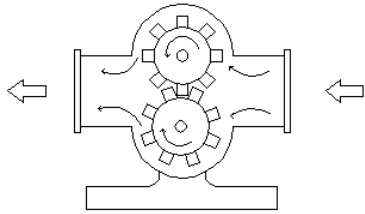
p =número de polos do motor

O motor elétrico tem: $p=2, 4, 6, 8, 10, \dots$

- c) Apresenta vazão pulsante;
- d) Não pode operar com o registro de descarga fechado. Por isto é importante a instalação de uma válvula de alívio no recalque;
- e) Variações: bomba de combustível de automóveis antigos.

1.2. Bomba rotativa

Como exemplo apresentamos a bomba de engrenagens. O líquido bombeado é empurrado pelos dentes das engrenagens. Utilizada somente em líquidos lubrificantes. A vazão é proporcional ao volume entre os dentes e à velocidade das engrenagens. Uma das engrenagens é movimentada por um motor Exemplo de uso: bombeamento de óleo combustível para caldeira e/ou para forno de usina de cimento.



1.3. Outros Exemplos

Ainda podemos citar a bomba de palhetas e a bomba de excêntrico, porém não são muito utilizadas

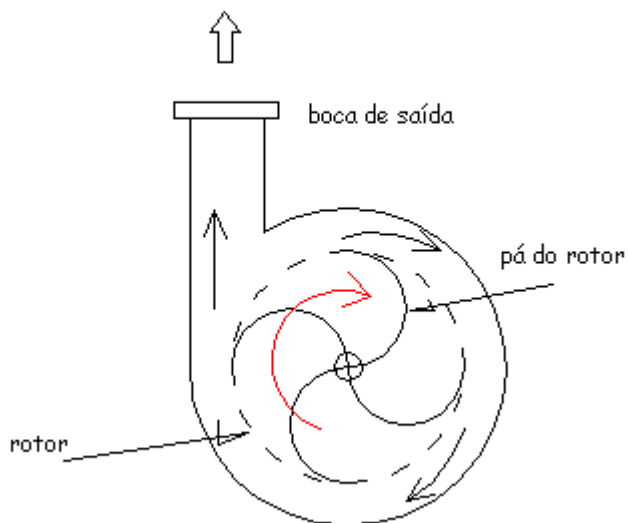
2. Bomba dinâmica, bomba de fluxo, ou de escoamento

Classificação segundo a trajetória do líquido no rotor:

2.1. Bomba centrífuga radial

O líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás para a periferia, segundo trajetórias contidas em planos normais ao eixo. As trajetórias são, portanto, curvas praticamente planas contidas em planos radiais.

Seção por um plano normal ao eixo



As bombas deste tipo possuem pás cilíndricas (simples curvaturas), com geratrizes paralelas ao eixo de rotação, sendo estas pás fixadas a um disco apenas (rotor aberto), para bombas de água suja.

Nas bombas radiais bem projetadas, a região inicial das pás pode apresentar-se com a forma de superfície de dupla curvatura, para melhor atender à transição das trajetórias

das partículas líquidas, da direção axial para a radial, sem provocar choques, nem turbulências excessivas.

As bombas do tipo radial, pela sua simplicidade se prestam à fabricação em série, sendo generalizada sua construção e extendida sua utilização à grande maioria das instalações comuns de água limpa, descarga de 5 a 500 l/s e até mais, e para pequenas, médias e grandes alturas de elevação.

Notemos que estas indicações são vagas e algo imprecisas, e que a escolha do tipo de rotor dependerá da noção de velocidade específica. Quando se trata de descargas grandes e pequenas alturas de elevação, o rendimento das bombas radiais torna-se baixo, e o seu custo se eleva em virtude das dimensões que assumem suas peças, tornando-se pouco conveniente empregá-las.

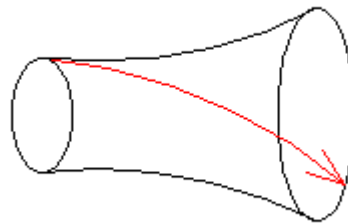
2.2. Bombas de fluxo misto ou bombas diagonais

2.2.1. Bomba hélico-centrífuga

Nas bombas deste tipo, o líquido penetra no rotor axialmente; atinge as pás cujo bordo de entrada é curvo e inclinado em relação ao eixo; segue uma trajetória que é uma curva reversa, pois as pás são de dupla curvatura, e atinge o bordo de saída que é paralelo ao eixo ou ligeiramente inclinado em relação a ele. Sai do rotor segundo uma trajetória ligeiramente inclinada em relação ao plano perpendicular ao eixo

A pressão é comunicada pela força centrífuga e pela ação de sustentação ou propulsão das pás

Trajétória de uma partícula líquida na bomba hélico-centrífuga

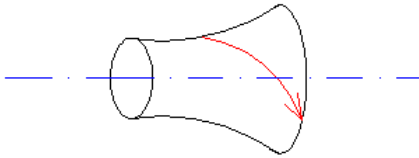


2.2.2. Bomba helicoidal

Nestas bombas, o líquido atinge o bordo das pás que é curvo e bastante inclinado em relação ao eixo; a trajetória é uma hélice cônica, reversa, e as pás são superfícies de dupla curvatura. O bordo de saída das pás é uma curva bastante inclinada em relação ao eixo. O rotor normalmente possui apenas uma base de fixação das pás com a forma de um cone ou de uma ogiva.

As bombas deste tipo prestam-se a grandes descargas e altura de elevação pequenas e médias. Por serem as pás de dupla curvatura, seu projeto é mais complexo e sua fabricação apresenta certos problemas de fundição. As bombas hélico-axiais são bombas com formato intermediário entre as bombas helicoidais e as axiais.

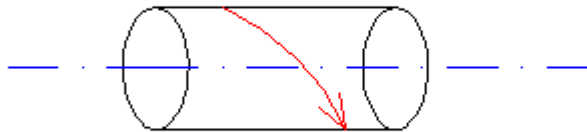
Trajétória de uma partícula na bomba helicoidal



2.2.3. Bomba axial ou propulsora

Nestas bombas, as trajetórias das partículas líquidas, pela configuração que assumem as pás do rotor e as pás guias, começam paralelamente ao eixo e se transformam em hélices cilíndricas. Forma-se uma hélice de vórtice forçado, pois, ao escoamento axial, superpõe-se um vórtice forçado pelo movimento das pás. Não são propriamente bombas centrífugas, pois a força centrífuga decorrente da rotação das pás não é responsável pelo aumento de energia da pressão. São estudadas e projetadas segundo a Teoria da sustentação das asas e da propulsão das hélices, ou ainda, segundo a Teoria do vórtice forçado.

Trajétória de uma partícula líquida numa bomba axial



Bombas axiais

As bombas axiais possuem um rotor com aspecto de hélice de propulsão, dotada de reduzido número de pás (2 a 8) e possuem velocidade específica elevada. Sob uma forma simplista, diz-se que as bombas axiais ou de hélice se destinam a elevar grandes descargas a pequenas alturas.

As pás podem ser fixas, fundidas com o núcleo de fixação ou a ele soldadas, ou podem variar o passo, graças a um mecanismo localizado no interior da ogiva onde as pás são adaptadas. Um sistema de comando automático comunica as pás a inclinação adequada à descarga, com a qual a bomba deve funcionar.

Evita-se assim, com a bomba de passo regulável, que o rendimento sofra acentuadas variações quando a descarga se afasta do valor normal (de máximo rendimento), pois, no caso das pás fixas, variando a descarga, o ângulo de incidência se altera e os filetes líquidos tendem ou a descolar-se ou a chocar-se com as pás, o que reduz o rendimento das bombas.

As bombas axiais com pás de passo variável são conhecidas como bombas Kaplan, por serem análogas às turbinas hidráulicas as quais levam o nome de seu inventor, o engenheiro Vitor Kaplan.

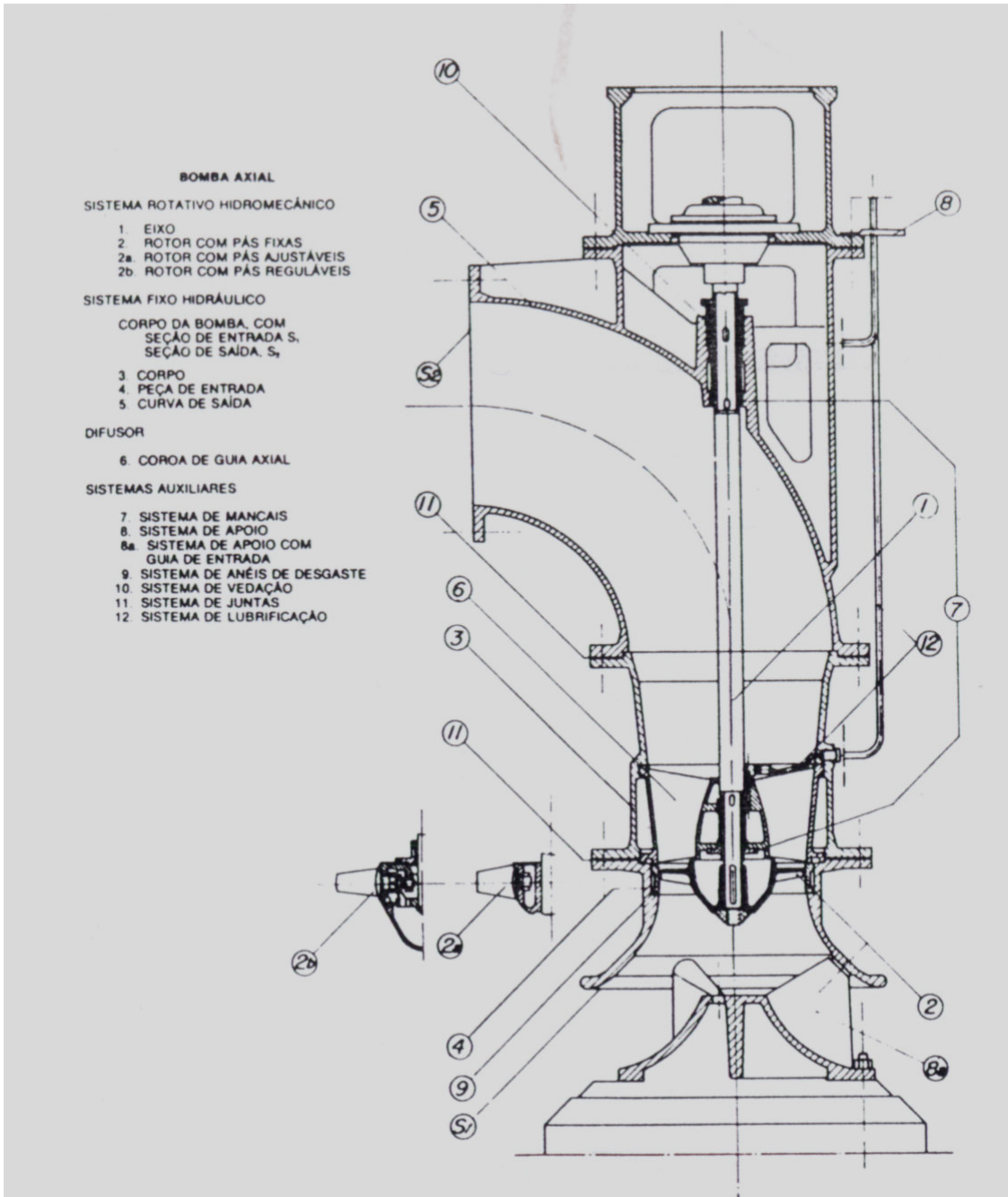
Em bombas menos aperfeiçoadas, as pás podem ser apenas ajustadas num ângulo adequado ao funcionamento para as condições desejadas.

O rotor é colocado no interior de um tubo com formato troncônico, e o motor que aciona fica acima do tubo



Nos rotores em hélice, a velocidade de arrastamento no ponto de contato do líquido com a pá à entrada é igual à que se verifica à saída da pá, isto é,

$$u_1 = u_2 = u$$



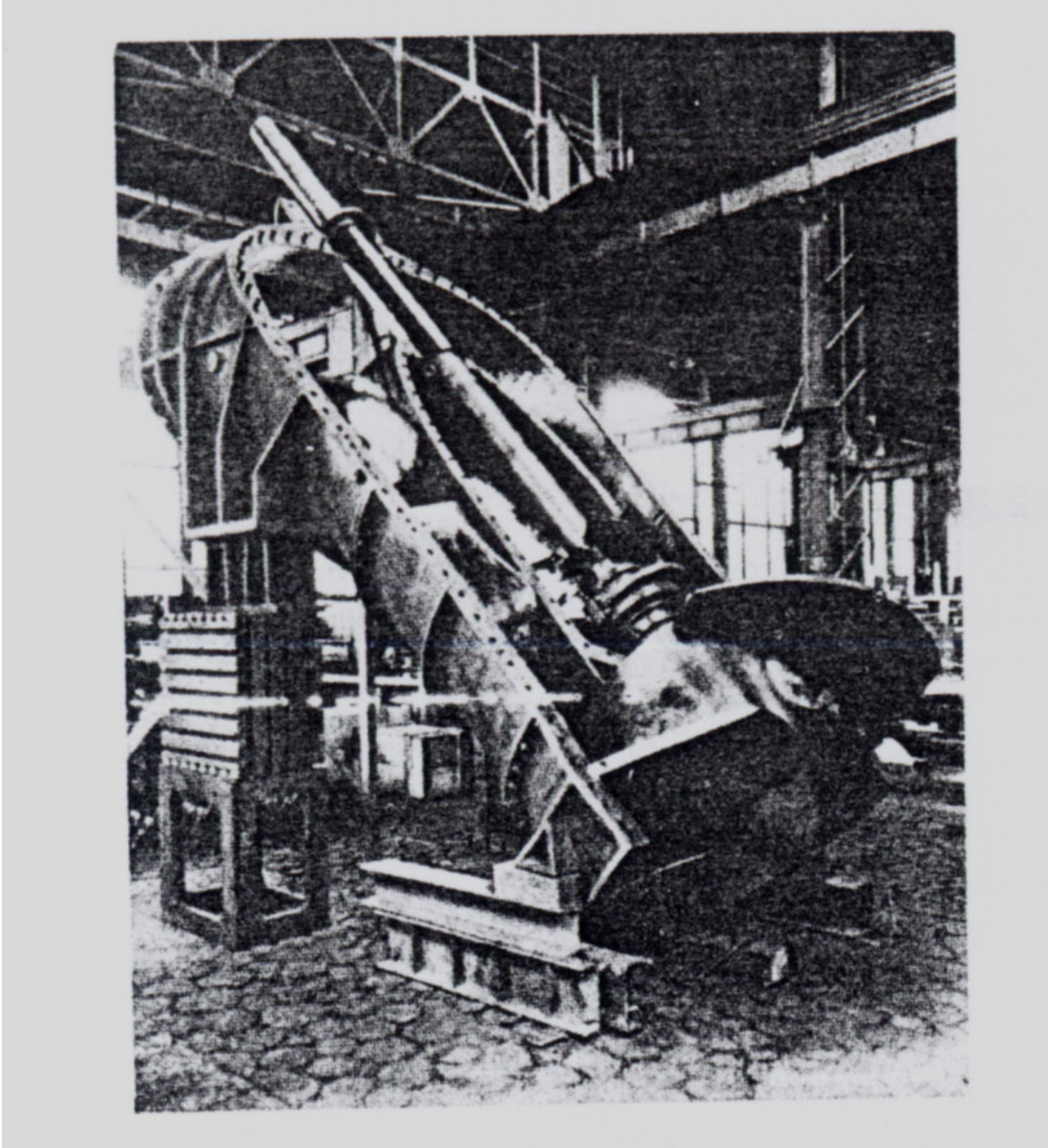
Seg

ue-se que a froça centrífuga decorrente da variação da velocidade u é nula. A energia obtida, então à custa da variação da velocidade relativa W , a qual diminui do valor W_1 para o valor W_2 , produzindo um efeito de difusão ao longo do canal formado por duas pás consecutivas, o que produz o aumento da energia de pressão. A equação das velocidades se transforma em

$$H_e = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

onde

$$v_2 > v_1 \text{ e } w_1 > w_2$$



Bomba axial de pás de passo variável para irrigação

Como o termo $\frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$ é nulo e é o que nas bombas responde pela maior parte da energia de pressão, segue-se que as bombas axiais proporcionam reduzida energia

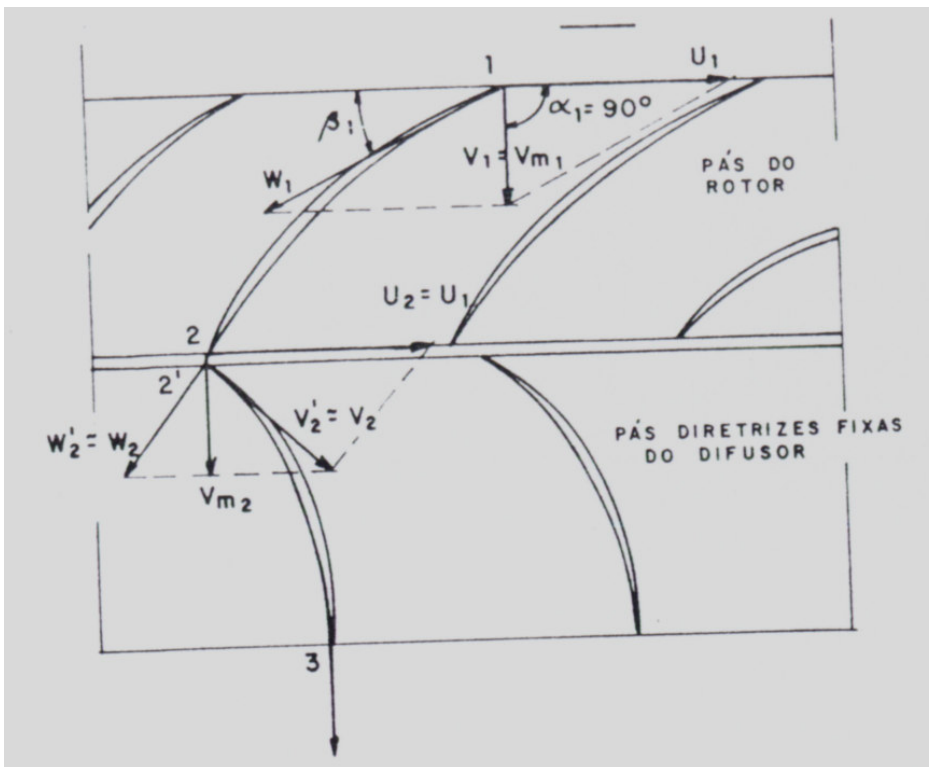
de pressão, uma vez que a parcela dessa energia obtida a custa da variação da velocidade relativa é pequena. De fato, para fornecer maior parcela de energia da pressão, w precisaria ter um valor muito elevado à entrada da pá, valor esse que deveria ser reduzido a um valor muito pequeno à saída, o que é difícil de conseguir, uma vez que o percurso ao longo do rotor é relativamente curto.

A velocidade absoluta de entrada no rotor v_1 é radial, mas, à saída, é tangente a uma trajetória helicoidal que se estabelece devido à componente tangencial Vu_2 e ao chamado efeito de pontas.

Como convém que o líquido volte a escoar-se segundo a direção axial é necessário transformar parte apreciável da energia cinética em energia de pressão, coloca-se à saída do rotor uma coroa de guia axial com pás guias ou diretrizes no difusor, o qual é o próprio tubo troncônico de seção crescente no sentido do escoamento, com ângulo de conicidade da ordem de 10° .

As bombas axiais só podem trabalhar se o rotor estiver imerso no líquido (afogado). Para que o líquido penetre no canal formado pelas pás do rotor seguindo uma direção contida num plano meridiano, usam-se diretrizes fixas antes do rotor.

Diagrama das velocidades



Ao passar pelo rotor, a velocidade absoluta aumenta seu valor de v_1 a v_2 , de modo que se obtém uma energia dinâmica positiva

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} > 0$$

É graças à curvatura adequada da pá da hélice que se consegue fazer com que w_2 seja menor que w_1 , proporcionando um valor positivo para o termo

$$\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$

No diagrama abaixo supomos que a entrada no rotor não é meridiana (V_1 não coincide com V_{m1})

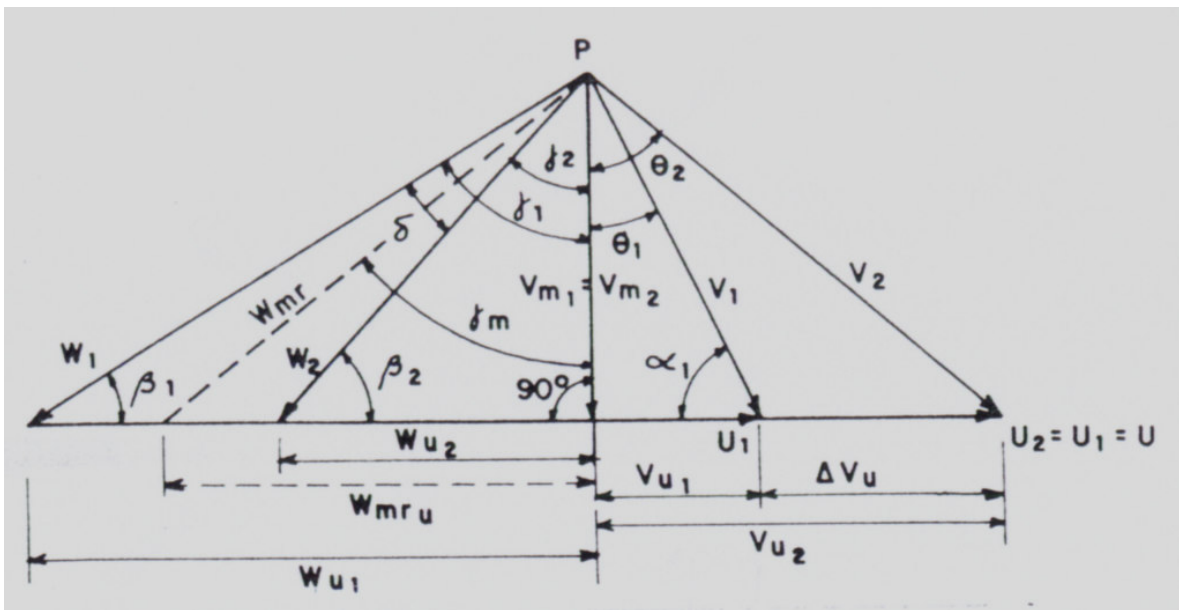
Representamos também as projeções de V_1 e V_2 sobre a direção de u .

A equação de Euler pode ser escrita como:

$$H_e = \frac{u_2 \cdot \Delta v_u}{g}$$

Chama-se velocidade média relativa da partícula líquida no ponto 1 e a velocidade w_{mr} , que faz o ângulo γ_m com a velocidade V_{m1} e cuja a tangente é definida por

$$\text{tg } \gamma_m = \frac{w_{mr u}}{v_{m1}}$$



sendo

$$w_{mr_u} = \frac{w_{u_1} + w_{u_2}}{2}$$

O ângulo médio do filete pode ser calculado a partir dos ângulos γ_1 e γ_2 , pois

$$w_{u_1} = v_{m_1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_1$$

$$w_{u_2} = v_{m_2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_2$$

logo

$$w_{mr_u} = \frac{v_{m_1}}{2} (\operatorname{tg} \gamma_1 + \operatorname{tg} \gamma_2)$$

e portanto

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{1}{2} (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2)$$

O ângulo de incidência da pá é o ângulo formado pela direção da velocidade média relativa W_{mr} com a corda do perfil da pá.

Equação da Energia

$$H_e = \frac{u_2 \cdot \Delta v_u}{g}$$

Como nas bombas axiais $u_2 = u_1 = u$, podemos escrever

$$H_e = \frac{u \cdot \Delta v_u}{g}$$

O diagrama de vértice comum nos mostra que

$$v_{u_1} = v_{m_1} \cdot \operatorname{tg} \theta_1$$

e

$$v_{u_2} = v_{m_2} \cdot \operatorname{tg} \theta_2 = v_{m_1} \cdot \operatorname{tg} \theta_2, \text{ porque } v_{m_1} = v_{m_2} = v_m$$

logo

$$H_e = \frac{u \cdot v_m}{g} (\operatorname{tg} \theta_2 - \operatorname{tg} \theta_1)$$

mas

$$u = v_m \cdot \operatorname{tg} \gamma_1 + v_m \cdot \operatorname{tg} \gamma_2 = v_m \cdot \operatorname{tg} \Theta_2 - v_m \cdot \operatorname{tg} \Theta_1$$

donde

$$H_e = \frac{u \cdot v_m}{g} (\operatorname{tg} \gamma_1 - \operatorname{tg} \gamma_2)$$

Grau de Reação

O grau de reação no caso das bombas axiais assume a forma

$$G_r = \frac{\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}}{H_e}$$

uma vez que, não existindo efeito da força centrífuga, a energia de pressão fica reduzida ao que é proporcionado pela variação de energia cinética devido apenas a velocidade relativa. O grau de reação varia de 0 a 1, sendo recomendáveis valores elevados do mesmo. Na prática, procura-se fazer com que v_1 seja axial ao atingir a pá; que o número de pás seja reduzido; que a curvatura das pás não seja muito grande e que v_2 não seja muito elevado.

A PÁ DO ROTOR CONSIDERADA COMO ELEMENTO COM PERFIL DE ASA

Durante muito tempo, as bombas axiais foram calculadas com os recursos da Teoria Unidimensional do escoamento líquido, complementadas com subsídio advindo de ensaios e comprovação prática dos resultados.

A mecânica dos fluidos, graças ao seu notável desenvolvimento, permitiu que se pudesse aplicar o projeto das turbomáquinas axiais conceitos e estudos realizados com perfis de asas de avião.

É assim que modernamente o estudo e traçado das pás baseia-se na Teoria de circulação das velocidades, cujos fundamentos foram apresentados por Kutta e Youkowski, numa generalização do chamado Efeito Magnus, e que, é aplicado ao domínio das Asas de sustentação, passou a denominar-se Teoria da sustentação ou Teoria da força portante.

A experiência mostra que, se tivermos uma placa plana inclinada relativamente à direção geral de um escoamento uniforme de velocidade relativa W_x num espaço suficientemente amplo, em virtude do desvio das linhas de corrente, esta placa ficará sujeita a uma força R inclinada relativamente à direção do escoamento. Essa força R possui duas componentes naturais: P , perpendicular à direção do escoamento, denominada sustentação, Portança ou Lift, e A , na direção do escoamento do fluido, tem os nomes de Arraste, resistência ou drag.

Visando a conseguir aumento da portança e diminuição do arraste, pode-se curvar a placa ou adotar perfis de asa.

Para compreender o aparecimento dessas forças, é preciso notar que, até atingir o perfil, o fluido possui uma velocidade relativa ao mesmo, igual a W_x , e que a pressão estática uniforme reinante é P_x .

Na parte inferior do perfil, a pressão aumenta, tornando-se $p > p_x$, e, em consequência, a velocidade dos filetes diminui.

Na parte superior, pelo contrário, $p < p_x$ e $W > W_x$ devido ao adensamento dos filetes.

Em virtude da sobrepressão reinante no infradorso e da subpressão do extradorso, ambas de mesmo sentido, resulta a força portante ou de sustentação P .

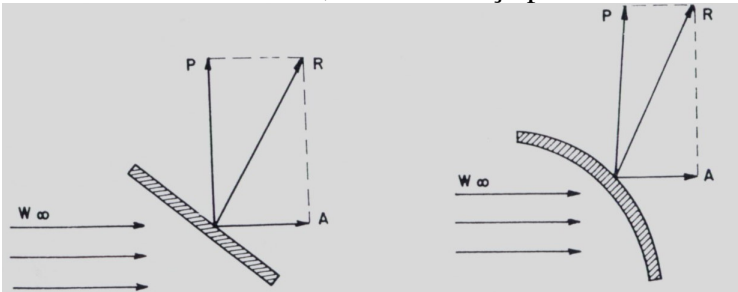
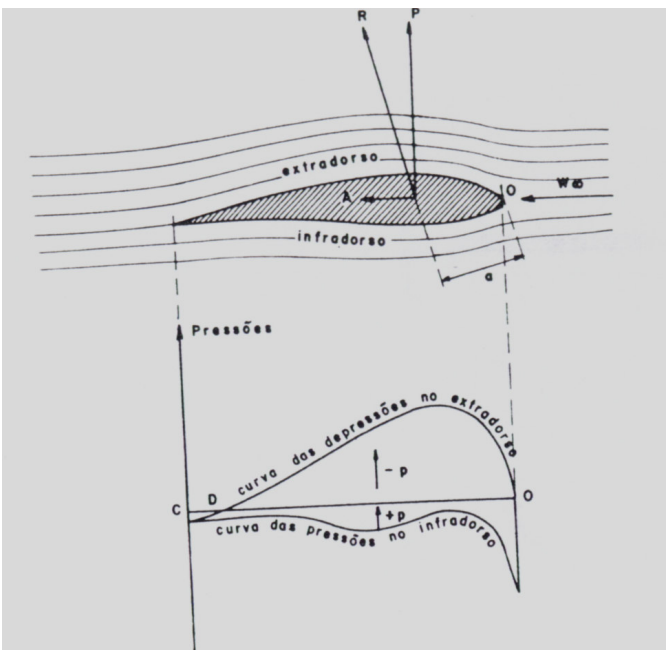
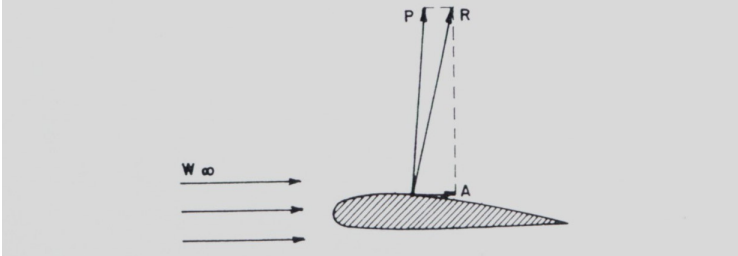
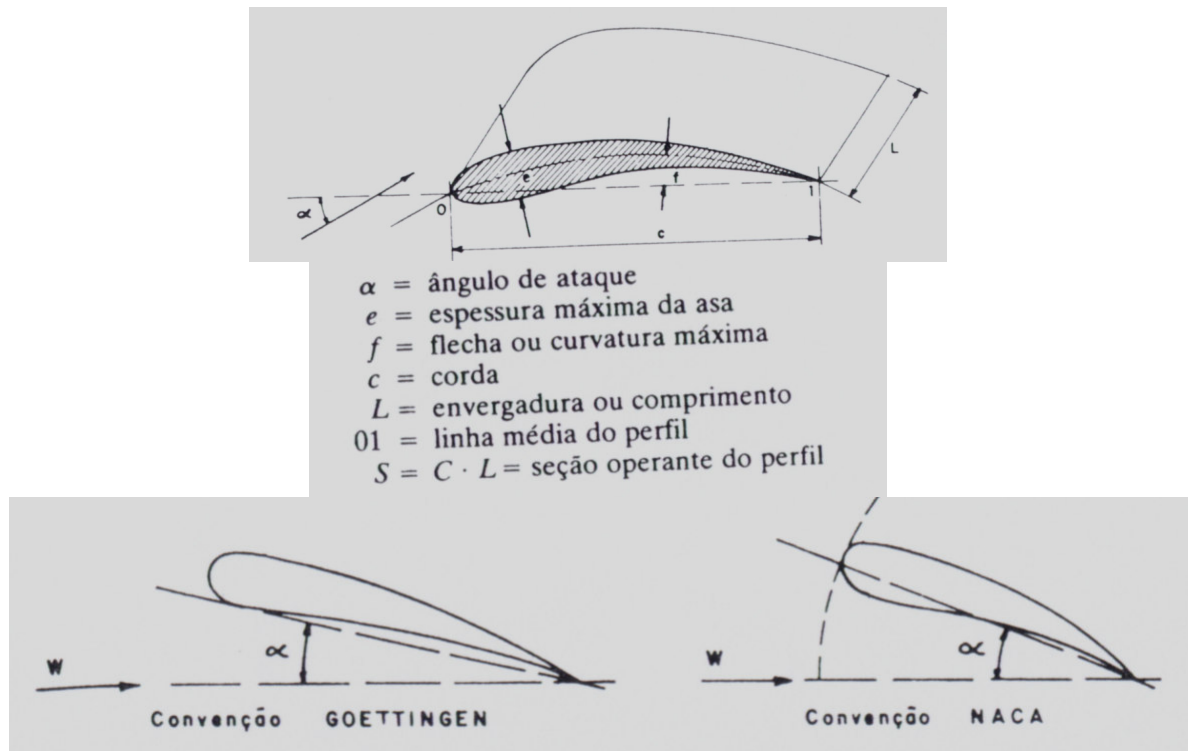


Fig. 14.6 Linhas de corrente sobre placa plana e forças resultantes.

Fig. 14.7 Linhas de corrente sobre placa curva e forças resultantes.



Procurou-se construir perfis que, para grandes velocidades, proporcionassem valores elevados de P e reduzidos valores para o arraste R.



Chegou-se assim aos chamados perfis normais, laminares, dos quais são mais empregados os padronizados pela NACA e os obtidos nos ensaios do túnel Goetting, na Alemanha.

Determinação da Portança e do Arraste

As forças de portança e de arraste são calculadas em função da chamada Pressão de estagnação e de coeficientes fluido dinâmicos, denominados coeficientes de portança C_a e coeficiente de arraste C_r .

A pressão é dada por

$$p = \gamma \cdot \frac{w_{\infty}^2}{2g}$$

sendo γ o peso específico do líquido.

A portança P é calculada por

$$P = C_a \cdot S \cdot p$$

onde S é, como dissemos, a seção operante de perfil.

O arraste é obtido por

$$A = C_r \cdot S \cdot p = C_r \cdot S \cdot \gamma \cdot \frac{w_{\infty}^2}{2g}$$

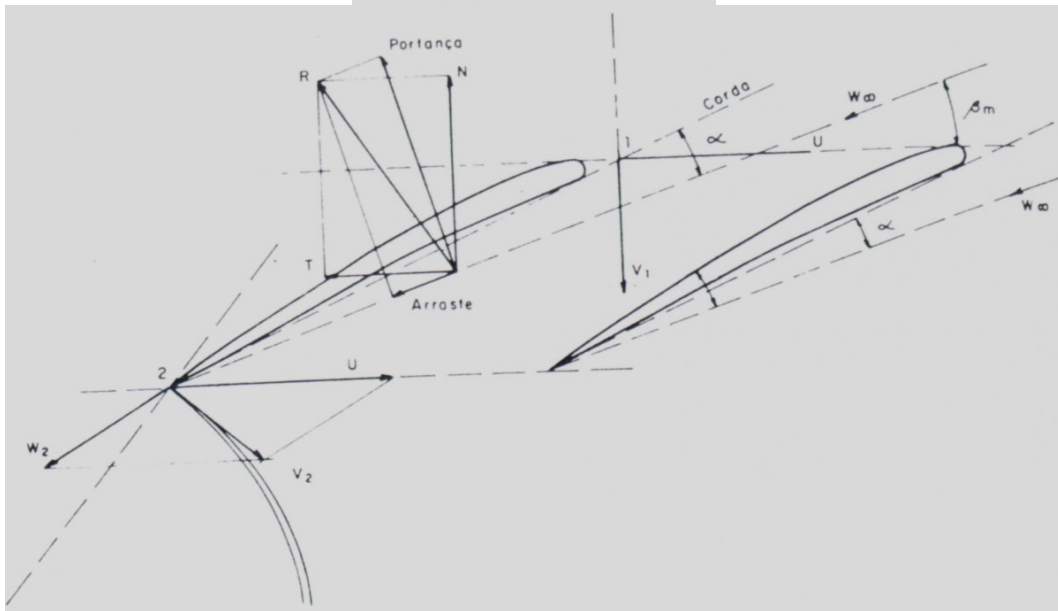
Para valores elevados do número de Reynolds, os valores de C_a e C_r , podem ser considerados constantes para um dado perfil.

Considerando a figura a seguir, na qual se acham representadas por uma projeção cilíndrica desenvolvida duas pás consecutivas de uma bomba axial. Tanto nessas bombas axiais quanto nas turbinas Kaplan e nos ventiladores axiais, o movimento relativo do perfil não ocorre realmente na direção de W_∞ . A força R resultante de P e A pode ser decomposta em duas direções:

- uma perpendicular à direção do deslocamento do perfil, que chamaremos de N , e
- outra tangencial à circunferência que passa pelo ponto de aplicação de R .

O momento devido a essas forças pode ser expresso em função da pressão de estagnação existente na ponta do perfil, multiplicando-se essa pressão por um coeficiente experimental C_m chamado coeficiente de momento, ou seja,

$$M = C_m \cdot S \cdot \gamma \cdot \frac{W_\infty^2}{2g}$$



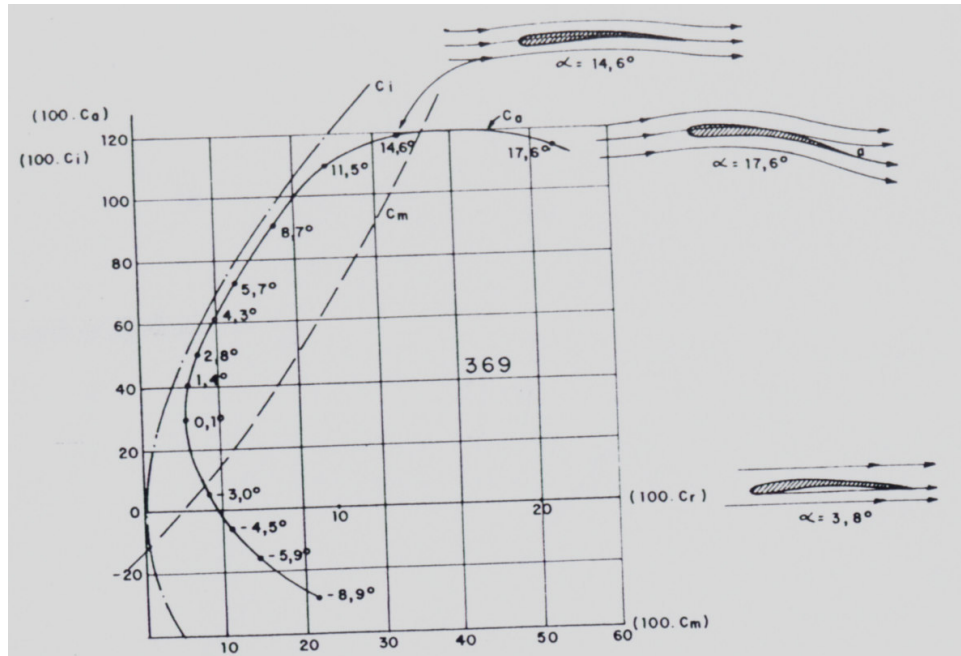
Uma vez calculado o Momento, calcula-se a potência, multiplicando-se esse valor pelo da velocidade angular.

- V_1 é a velocidade absoluta de escoamento da água em relação à terra ao entrar no canal formado por duas pás consecutivas;
- W_∞ é a velocidade de escoamento da água em relação a pá sem espessura, em espaço infinito;
- V_2 é a velocidade absoluta de escoamento à saída do rotor

Encontram-se os valores coeficientes C_w , C_r e C_m para perfis normalizados, em função do ângulo de ataque α , por meio de curvas traçadas em diagramas polares, obtidos em ensaios realizados em túneis aerodinâmicos.

Devido aos turbilhões marginais que provocam componentes transversais para as velocidades e à interação das pás que, na realidade não se acham num espaço infinito e sim formando dispositivos denominados Grades, alguns autores

consideram ainda uma protanço ou resistência induzida, cujo coeficiente C_i é também encontrado nos citados gráficos polares.



Portanço em perfil de asa.

$$\frac{C_r}{C_a} = \text{tg } \theta$$

