Parâmetros Característicos das Máquinas Hidráulicas

- Histórico:

• As máquinas hidráulicas foram desenvolvidas de forma empírica a partir da necessidade de transportar água com eficiência e de produzir energia para realizar tarefas.

• Primeiras máquinas hidráulicas:

- 1000 A. C.: chineses utilizavam na irrigação
- Início da era cristã: romanos utilizaram um sistema de elevação e transporte de água com canais e tubos
- Idade média: aparecimento das máquinas motrizes: evolução da antiga roda d'água.
- Século XX: aparecimento das primeiras turbinas hidráulicas e a forma de descrevê-las matematicamente.

• Esses primeiros modelos matemáticos eram produzidos de forma totalmente empírica e apresentados graficamente na forma de curvas de desempenho e de equações envolvendo as diversas grandezas pertinentes ao fenômeno.

Parâmetros Característicos das Máquinas Hidráulicas

- Aparecimento das curvas das bombas hidráulicas nas quais são apresentadas as relações entre as grandezas **pressão**, *P*, e **rendimento**, η, em função da grandeza **vazão**, *Q*.
- Desde o início até o dia de hoje as unidades que são usadas para representar as grandezas são:

  - **pressão** é indicada como **carga** e aparece em metros [m] de coluna de água (mca)
  - **vazão** em (m^3/h)

Análise Dimensional

- Por que utilizar Análise Dimensional?

1) São grupos de grandezas que tornaram mais fácil o entendimento das máquinas hidráulicas. Por exemplo:

- grupo ligado à rotação *N* da máquina (formado por *N*, *D*, *H*) é denominado rotação específica unitária e denotado por n_{11}

$$n_{11} = \frac{N.D}{\sqrt{H}}$$

- grupo ligado à vazão, *Q*, envolve *Q*, *D* e *H* formando a vazão específica unitária, Q_{11}

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2\sqrt{H}}$$

Análise Dimensional

- Por que utilizar Análise Dimensional?

2) Emprego dos grupos adimensionais nos ensaios de máquinas nos quais o tamanho e/ou potência limita as condições de estudo, exigindo a construção de um modelo.

3) Redução do número de parâmetros necessários para descrever um fenômeno.

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

*Se existe uma relação funcional entre **M** variáveis físicas, $\boldsymbol{x_i}$, descritas por **N** variáveis fundamentais, então existe uma relação funcional entre **M-N** grupos adimensionais, $\boldsymbol{\pi_i}$, formados a partir das variáveis físicas.*

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

- Aplicação do Teorema dos π's:

- definir as variáveis físicas pertinentes ao problema
- definir as variáveis fundamentais envolvidas
- definir o cálculo do número de grupos adimensionais que descrevem o problema
- escolher um conjunto de grandezas físicas independentes, isto é, que não podem formar um grupo adimensional, destinado a gerar os números adimensionais, e que recebe o nome de sistema probásico. Teoricamente o sistema probásico pode ser formado por quaisquer variáveis independentes mas na prática este grupo de grandezas envolve: massa específica ρ, comprimento característico D e uma velocidade V ou ω.

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

Formam-se os grupos adimensionais combinando as variáveis do sistema probásico com cada uma das grandezas físicas remanescentes.

Temos 8 grandezas físicas pertinentes ao problema, ligadas por uma relação funcional do tipo:

$$\Delta P = f\left(Q, R, \omega, \rho, \mu, \eta, \alpha\right)$$

Q - Vazão [m^3/s],

P - Pressão [N/m^2]

ρ - Massa específica [Kg/m^3]

μ - Viscosidade [$N.s/m^2$]

ω - Velocidade angular da máquina [rd/s]

R - Raio do rotor, R = D/2 [m]

η - Rendimento [adimensional]

α - Razão de abertura do distribuidor [adimensional], para turbinas

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

Existem 5 variáveis adimensionais, do tipo:

$$\pi_1 = \phi\left(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5\right)$$

- π_1 é o **coeficiente de pressão**

$$\pi_1 = \psi = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho\left(\omega . R\right)^2}$$

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

- π_2 é o **coeficiente de vazão**

$$\pi_2 = \varphi = \frac{Q}{\omega . R^3}$$

- π_3 é o **coeficiente de regime, representado pelo Número de Reynolds**

$$\pi_3 = \mathrm{Re} = \frac{\omega . R^2}{\nu}$$

Análise Dimensional:
Teorema de Buckingham ou Teorema dos π's

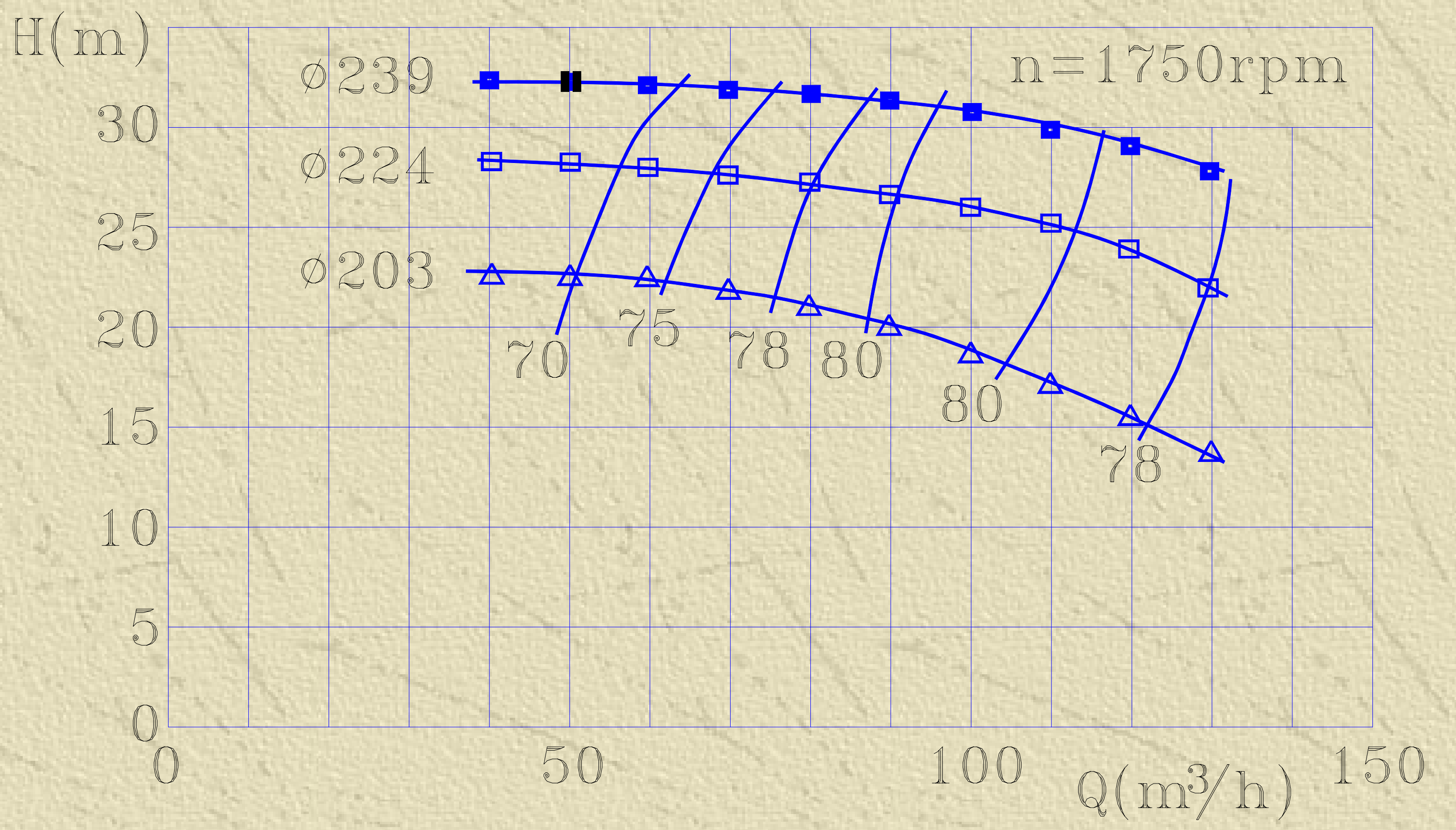
- π_4 é o **rendimento**

$$\pi_4 = \eta = \frac{P_{saida}}{P_{entrada}}$$

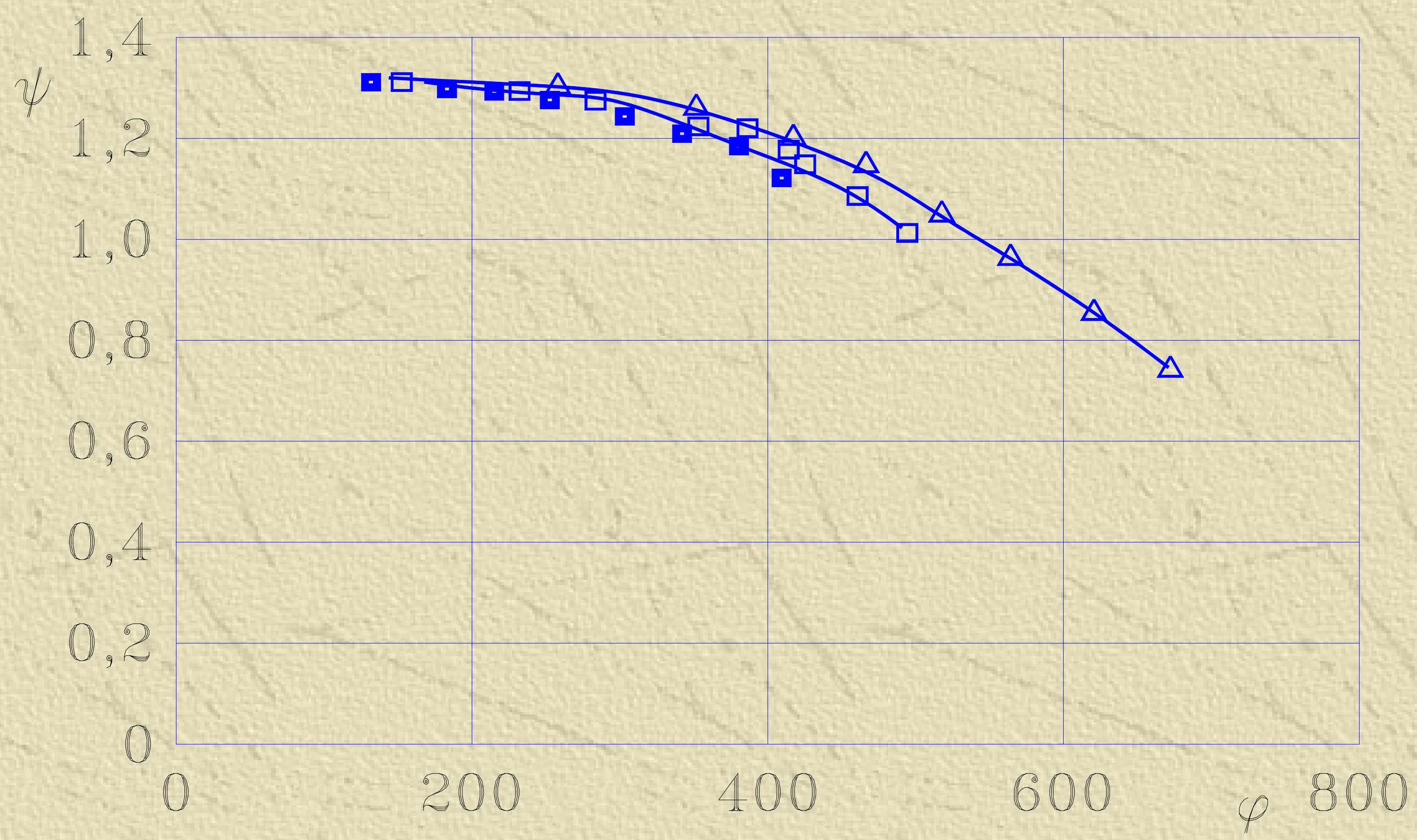
- π_5 é a **razão de abertura do distribuidor**

$$\pi_5 = \alpha = \frac{\text{abertura do distribuidor}}{\text{abertura total do distribuidor}}$$

Descrição do Funcionamento de uma Bomba Hidráulica de Fluxo



Descrição do Funcionamento de uma Bomba Hidráulica de Fluxo



Rotação Específica, n_{SQ}

Independentemente da máquina ser uma bomba hidráulica de fluxo ou uma turbina é conveniente a definição de um parâmetro único para classificação e definição das dimensões da máquina. Verifica-se que o n_{SQ} representa a rotação que a bomba teria para fornecer uma vazão unitária, sob uma altura manométrica também unitária.

$$n_{\mathrm{SQ}} = \frac{n\sqrt{Q}}{\Delta H^{3/4}}$$

Rotação Específica referente à potência, n_S

O n_S é calculado em função da rotação, da potência útil e da carga hidráulica disponível, quando substitui Q pela sua equação matemática obtida da equação da potência:

$$n_S = \frac{n\sqrt{P_u}}{\Delta H^{5/4}}$$

Nestas equações as unidades não são coerentes com um sistema de unidades, a rotação é medida em [rpm], o H em [mca], a vazão em [m^3/s] e a potência útil em [CV].

Rotação Específica referente à potência, n_S

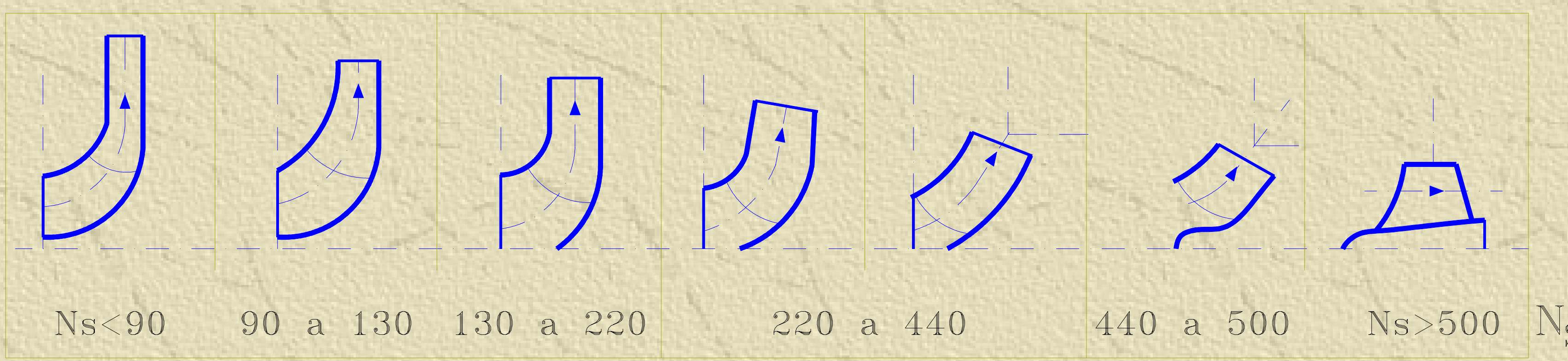
O parâmetro n_S é calculado para as condições de máximo rendimento da máquina.

Um conjunto de máquinas que trabalham em semelhança hidrodinâmica é geometricamente semelhante e tem o mesmo valor do n_S.

Máquinas com valor de n_S baixo tem dimensões físicas grandes e baixa rotação.

As bombas hidráulicas de fluxo de n_S baixo são do tipo radial ou centrifugas, valores intermediários de n_S caracterizam as máquinas mistas, e valores altos indicam máquinas axiais que tem pequenas dimensões e rotação elevada.

Evolução do rotor da bombas hidráulicas em função do n_S



Radial centrífuga | Mista | Semi Axial | Axial

Lenta | Normal | Rápida

Semelhança Hidrodinâmica

• A semelhança hidrodinâmica entre máquinas geometricamente semelhantes é estabelecida com base no conceito da igualdade dos parâmetros adimensionais.

• A operação de duas máquinas é hidrodinamicamente semelhante se os parâmetros adimensionais são iguais.

• As curvas características de máquinas semelhantes tornam-se uma única quando se usam os coeficientes de pressão e o coeficiente de vazão.

• Pode-se, então, definir as características de operação de uma máquina B_2 a partir de uma máquina semelhante B_1, de características conhecidas.

Semelhança Hidrodinâmica

Existe uma proporcionalidade entre os valores de Q, H e P com a rotação; assim sendo, sempre que alterarmos a rotação de uma bomba haverá, em conseqüência, alteração nas curvas características, sendo a correção para a nova rotação (n_1) feita através das seguintes expressões:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{n}{n_1} \qquad \frac{H}{H_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \qquad \frac{P}{P_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^3$$

Semelhança Hidrodinâmica

Ou seja:

$$\frac{n}{n_1} = \frac{Q}{Q_1} = \sqrt{\frac{H}{H_1}} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_1}}$$

Assim sendo, sempre que alteramos a rotação, dever ser feita correção das curvas características através das relações anteriores para determinação do novo ponto de trabalho.

Redução do diâmetro do rotor

- O que fazer quando a Bomba Hidráulica fornece uma vazão excessiva?
- *Alternativa 1*:

Alterar a perda de carga do sistema hidráulico, fechando parcialmente um registro.
Esta operação diminui a vazão graças ao aumento da pressão manométrica.
Como a diminuição da vazão é acompanhada de aumento da pressão, e ainda alteração do rendimento, a potência não é reduzida proporcionalmente à diminuição da vazão.

Redução do diâmetro do rotor

• *Alternativa 2*:

Alterar o diâmetro do rotor, permitindo um ajuste da bomba hidráulica ao sistema, garantindo a vazão necessária e minimizando a potência gasta.

Com a redução do rotor altera-se a curva da bomba e o novo ponto de operação será sobre a curva do sistema hidráulico com redução da vazão e da pressão manométrica.

A potência será também reduzida.

Redução do diâmetro do rotor

Existem várias formas de cortar o rotor, por exemplo:

- Cortando palhetas e paredes
- Cortando só as palhetas;
- Cortando as palhetas com ângulo;

Reduz-se o raio do rotor para a dimensão calculada.

Redução do diâmetro do rotor

A curva da bomba no novo diâmetro é obtida da curva original através das equações de semelhança.
Agora para a condição de rotação constante, são obtidas as relações de cálculo de alteração do diâmetro:

$$\frac{Q_{d1}}{Q_{d2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

$$\frac{H_{d1}}{H_{d2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

Redução do diâmetro do rotor

Eliminando-se a relação de diâmetros:

$$\frac{\Delta H_{d1}}{\Delta H_{d2}} = \left(\frac{Q_{d1}}{Q_{d2}}\right)^{2/3}$$

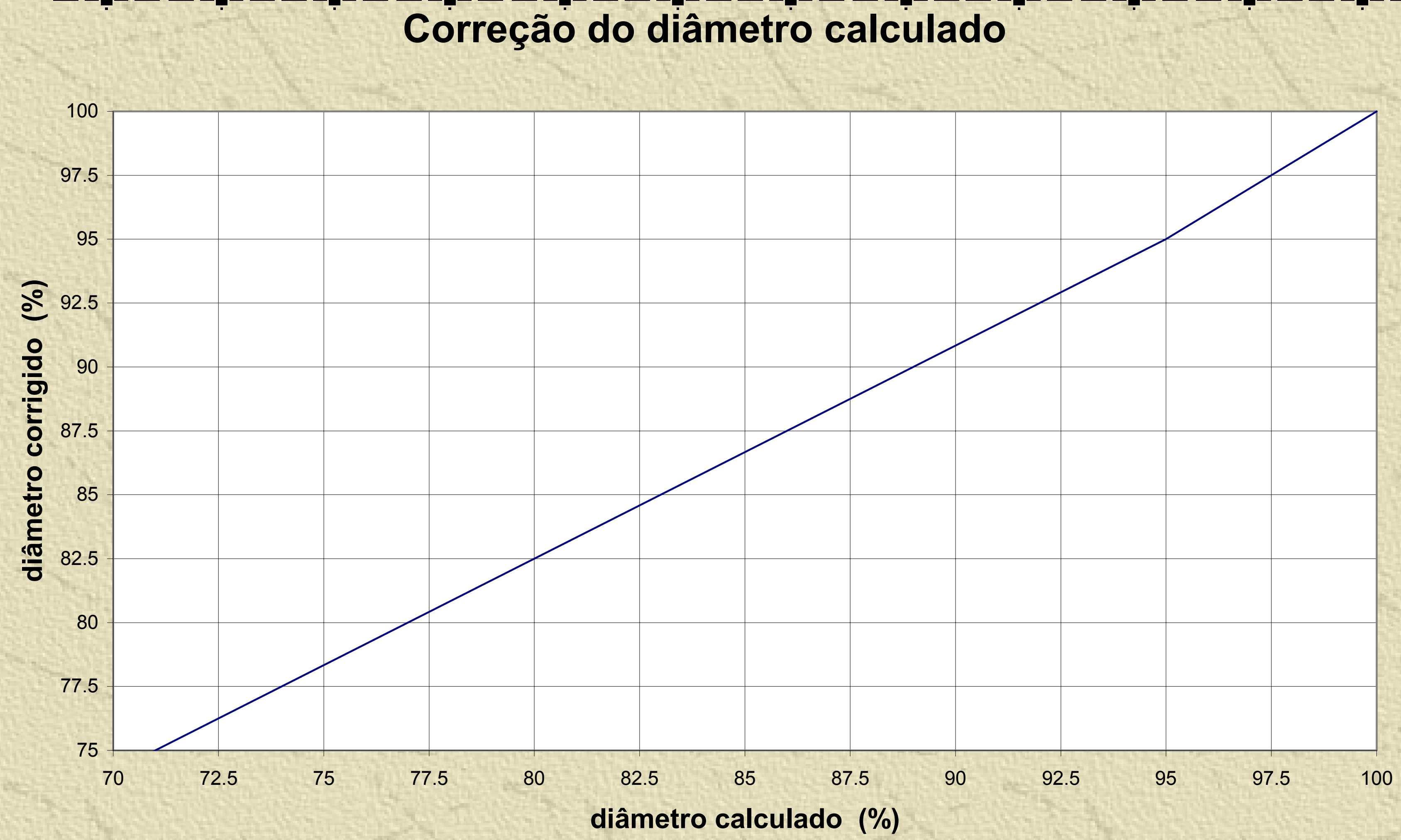
As relações desta equação só valem para pontos pertencentes à equação anterior.

Redução do diâmetro do rotor

A porcentagem de redução obtida por cálculo deve ser corrigida por critérios experimentais pois uma usinagem do rotor, com uma alteração mais profunda do diâmetro, vai alterar o ângulo de saída da pá, com conseqüente mudança de características da máquina. Essa correção no cálculo vai trazer um aumento no diâmetro calculado, que é suficiente para compensar a variação do ângulo de saída da pá.

Redução do diâmetro do rotor

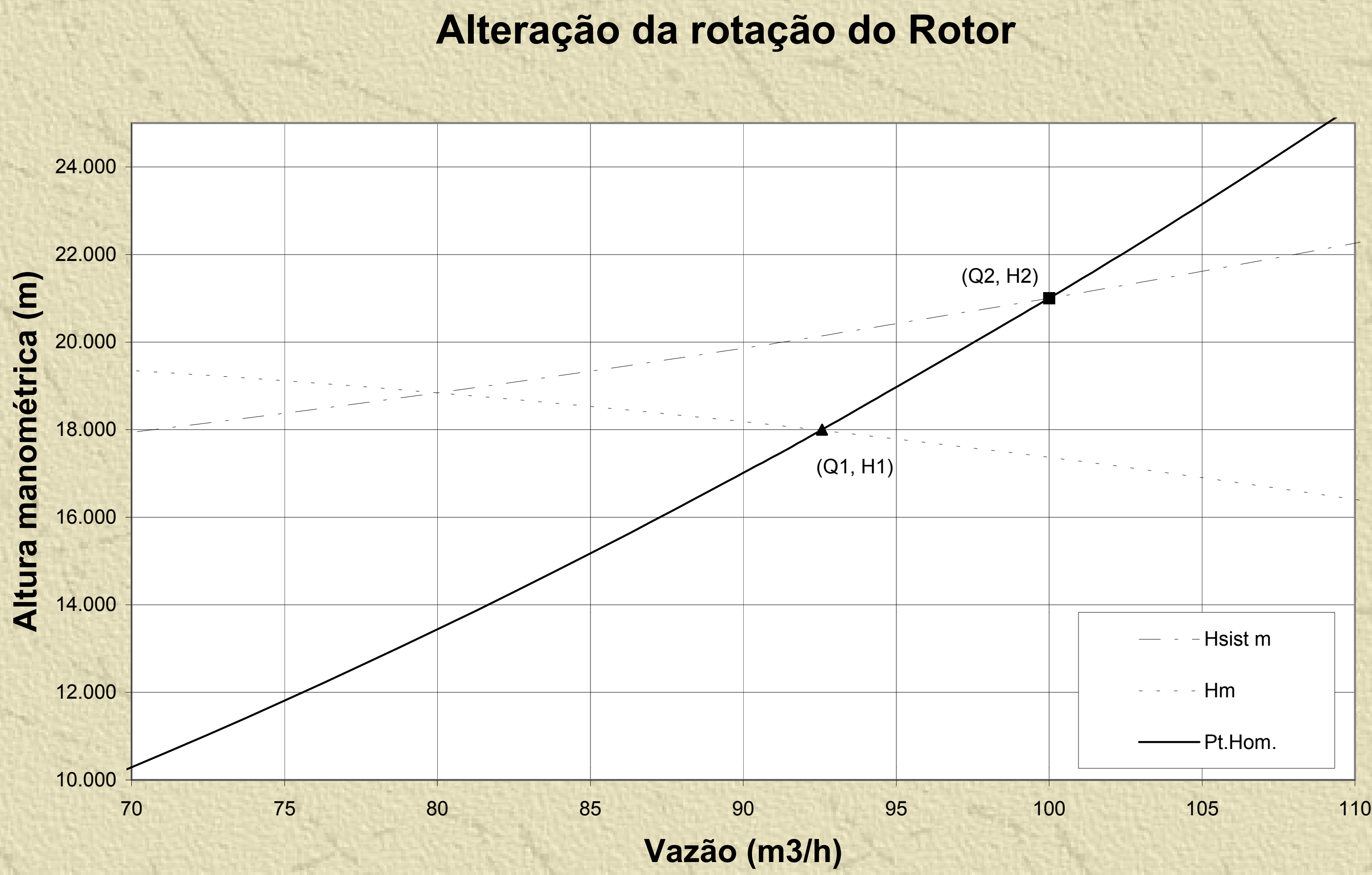
Correção na usinagem calculada do rotor:



Exemplo 1:

Uma bomba hidráulica alimenta um sistema de distribuição de água que apresenta uma equação do sistema do tipo $H_m = Hg + K.Q^2$, onde o Hg vale 15m e a constante K vale 0,0006 para a vazão em m^3/h. Nas condições de funcionamento a bomba fornece uma vazão de 80 m^3/h. Se a bomba opera à rotação de 1750rpm, qual deve ser a nova rotação para garantir uma vazão mínima de 100m^3/h.

Exemplo 1:

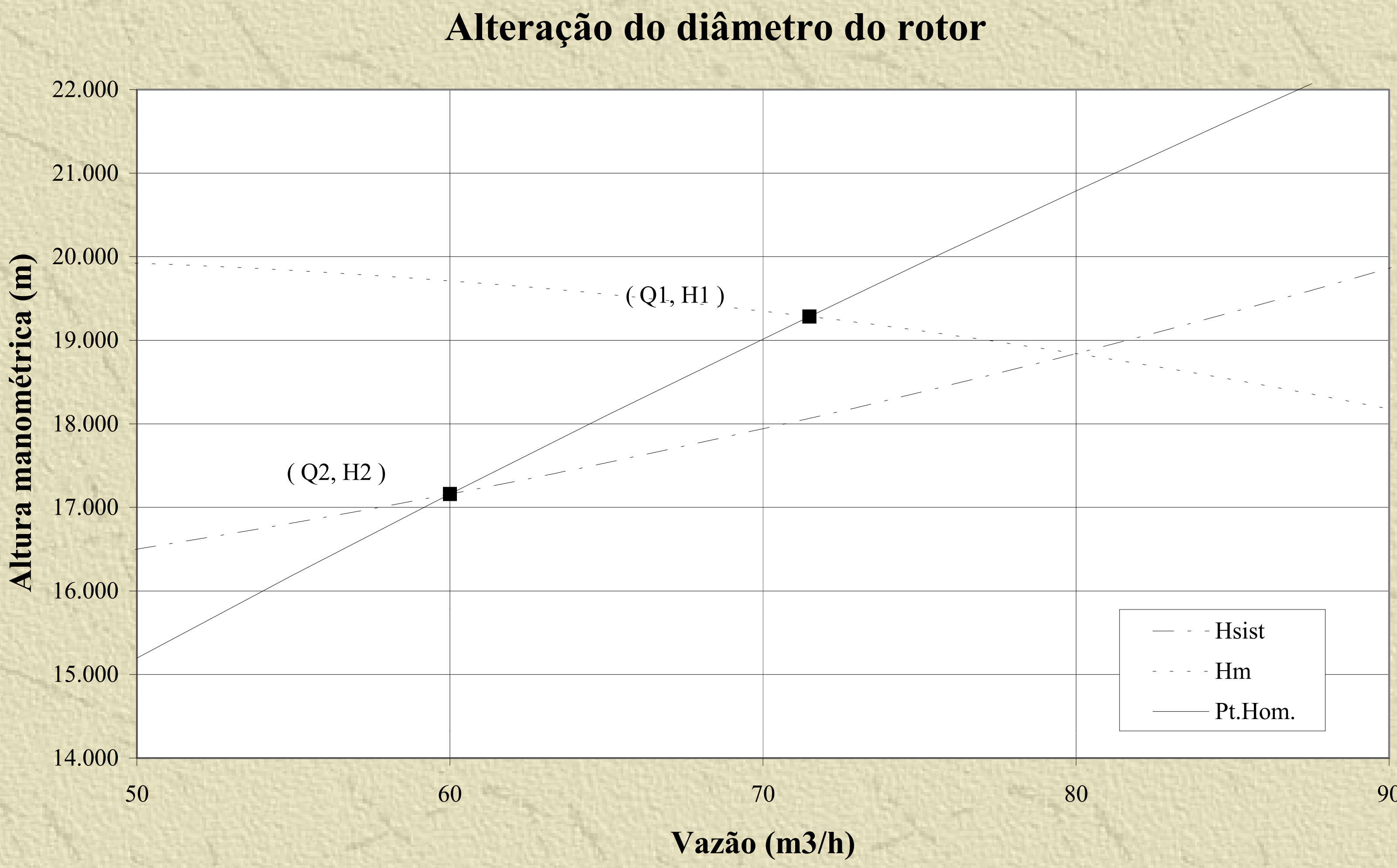


Alteração da rotação do Rotor
Altura manométrica (m)
24.000
22.000
20.000
18.000
16.000
14.000
12.000
10.000
70
75
80
85
90
95
100
105
110
Vazão (m3/h)
(Q2, H2)
(Q1, H1)
Hsist m
Hm
Pt.Hom.

Exemplo 2:

A bomba hidráulica do exemplo 1 deve ter seu rotor ajustado para que ela forneça uma vazão de $60m^3/h$, no mesmo sistema hidráulico daquele exercício. Sendo o diâmetro original igual a 240mm, qual deve ser o novo diâmetro do rotor?

Exemplo 2:


Alteração do diâmetro do rotor
22.000
21.000
20.000
19.000
18.000
17.000
16.000
15.000
14.000
Altura manométrica (m)
(Q1, H1)
(Q2, H2)
Hsist
Hm
Pt.Hom.
50
60
70
80
90
Vazão (m3/h)