

BC

FD-1408

GIL BAZANINI 1630281

**ASPECTOS TERMODINAMICOS DA  
CAVITAÇÃO DESENVOLVIDA COM  
APLICAÇÃO AS BOMBAS  
CENTRIFUGAS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia

São Paulo  
1992

GIL BAZANINI 1630281

**ASPECTOS TERMODINAMICOS DA  
CAVITAÇÃO DESENVOLVIDA COM  
APLICAÇÃO AS BOMBAS  
CENTRIFUGAS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia

Area de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa

413739

São Paulo  
1992

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa pelo constante apoio e incentivo durante todas as etapas desse trabalho e demais atividades desenvolvidas junto à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## SUMARIO

Lista de tabelas

Lista de figuras

Lista de Símbolos

Resumo

"Abstract"

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 - Introdução.....	1
1.2 - O Efeito Termodinâmico.....	1
1.3 - Objetivos e Justificativas.....	2
Capítulo 2 - INFLUENCIA DO EFEITO TERMODINAMICO SOBRE O NPSH REQUERIDO DAS BOMBAS CENTRIFUGAS.....	4
2.1 - Métodos de Cálculo da Redução da Temperatura....	4
2.1.1 - Método do Fator B.....	4
2.1.2 - Variações do Método do Fator B.....	7
2.1.3 - Teoria do Preenchimento.....	9
2.1.4 - Formulação de Fruman; Beuzelin.....	17
2.2 - Influência da Temperatura do Líquido.....	17
2.3 - Determinação do NPSH.....	20
2.4 - Cálculo de $\Delta P_v$ .....	25
2.5 - Operações com Outros Líquidos.....	26



Capítulo 3 - APLICAÇÃO DO EFEITO TERMODINAMICO NA CORREÇÃO DO NPSH REQUERIDO DAS BOMBAS CENTRIFUGAS.....	28
3.1 - Introdução.....	28
3.2 - Aplicação da Teoria do Preenchimento às Bombas Centrífugas.....	28
3.3 - As equações propostas por Fruman e Beuzelin....	37
3.4 - Utilização do Método de Stepanoff.....	38
3.5 - Método de Ruggeri e Moore.....	39
3.5.1 - Cálculos para a Água.....	41
3.5.2 - Cálculos para o Butano.....	43
3.5.3 - Cálculos para o Freon-11.....	44
3.5.4 - Cálculos para o Sódio.....	45
3.5.5 - Cálculos para o Hidrogênio.....	46
Capítulo 4 - COMENTARIOS FINAIS.....	51
4.1 - Influência das Propriedades Físicas.....	51
4.2 - Conclusões.....	54
ANEXO A - Cálculos da correção do $NPSH_r$ (Teoria do Preenchimento).....	57
ANEXO B - Cálculo da Correção do $NPSH_r$ (Equação de Fruman e Beuzelin).....	62
ANEXO C - Cálculo da Correção do $NPSH_r$ (Método de Stepanoff).....	67
ANEXO D - Cálculo da Correção do $NPSH_r$ (Método de Ruggeri e Moore).....	72
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	78
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	80

- Apêndice I - Dedução da equação para o cálculo de  $\Delta T$   
em função de B
- Apêndice II - Determinação da equação para o cálculo  
de  $\Delta T$  utilizando o Teorema dos ¶
- Apêndice III - Exemplo de cálculo em uma instalação de  
bombeamento
- Apêndice IV - Condução de calor através da camada de  
líquido próxima à cavidade

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes e expoentes obtidos para o venturi e as ogivas. [BILLET et al. (1981)].....	13
Tabela 2 - Comparação entre os valores de $\Delta T$ medidos e calculados para o venturi. [BILLET et al. (1981)].....	14
Tabela 3 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para a água.....	57
( Teoria do Preenchimento )	
Tabela 4 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o butano.....	58
( Teoria do Preenchimento )	
Tabela 5 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o sódio.....	59
( Teoria do Preenchimento )	
Tabela 6 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o hidrogênio.....	60
( Teoria do Preenchimento )	
Tabela 7 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o Freon - 11.....	61
( Teoria do Preenchimento )	
Tabela 8 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para a água (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).....	62
Tabela 9 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o butano (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).....	63
Tabela 10 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o sódio (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).....	64
Tabela 11 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o hidrogênio (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).....	65
Tabela 12 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o Freon-11 (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).....	66
Tabela 13 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para a água (Método de STEPANOFF).....	67
Tabela 14 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o butano (Método de STEPANOFF).....	68
Tabela 15 - Cálculo do $\Delta NPSH$ para o sódio (Método de STEPANOFF).....	69

Tabela 16 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o hidrogênio (Método de STEPANOFF).....	70
Tabela 17 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o Freon-11 (Método de STEPANOFF).....	71
Tabela 18 - Valores medidos de NPSH <sub>r</sub> (Ruggeri; Moore (1969)) .....	40
Tabela 19 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para a água (Método de RUGGERI e MOORE).....	72
Tabela 20 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o butano (Método de RUGGERI e MOORE).....	73
Tabela 21 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o Freon-11 (Método de RUGGERI e MOORE).....	74
Tabela 22 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o sódio (Método de RUGGERI e MOORE).....	75
Tabela 23 - Cálculo do $\Delta$ NPSH para o hidrogênio (Método de RUGGERI e MOORE).....	76



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito Termodinâmico.....	2
Figura 2 - Venturi e ogivas utilizados por BILLET et al [BILLET et al (1981)].....	13
Figura 3 - Placa plana rugosa sem gradiente de pressão.....	17
Figura 4 - Desempenho da bomba operando com água a várias temperaturas. [STÄHL; STEPANOFF (1956)].....	18
Figura 5 - Gráfico da pressão de vapor em função da temperatura.....	19
Figura 6 - Esquema do dispositivo utilizado para ensino de cavitação.....	20
Figura 7 - Triângulo de velocidades na entrada do rotor.....	22
Figura 8 - Cavitação em outros líquidos em relação a água. [STEPANOFF (1961)].....	26
Figura 9 - Correção do $NPSH_r$ para o sódio.....	32
Figura 10 - Correção do $NPSH_r$ para o hidrogênio.....	32
Figura 11 - Correção do $NPSH_r$ para a água.....	33
Figura 12 - Correção do $NPSH_r$ para o butano.....	33
Figura 13 - Correção do $NPSH_r$ para o Freon - 11.....	34
Figura 14 - Comparação da correção do $NPSH_r$ entre água, Freon - 11 e butano.....	34
Figura 15 - Correção do $NPSH_r$ . [HYDRAULIC INSTITUTE (1982)].....	36

- Figura 16 - Correção do  $NPSH_r$  para o sódio: comparação entre os métodos utilizados.....48
- Figura 17 - Correção do  $NPSH_r$  para o hidrogênio: comparação entre os métodos utilizados.....48
- Figura 18 - Correção do  $NPSH_r$  para o água: comparação entre os métodos utilizados.....49
- Figura 19 - Correção do  $NPSH_r$  para o butano: comparação entre os métodos utilizados.....49
- Figura 20 - Correção do  $NPSH_r$  para o Freon-11: comparação entre os métodos utilizados.....50

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a, \dots, p$	Expoentes
$A_v$	Area de seção transversal da cavidade
$A_w$	Area da superfície da cavidade
$B$	Critério de Cavitação Térmica
$B'$	Primeiro parâmetro adimensional de Bonnin
$B''$	Segundo parâmetro adimensional de Bonnin
$B_{eff}$	B efetivo
$B_1$	B para uma redução de $NPSH_d$ de 1 pé abaixo do ponto de cavitação incipiente
$C_1, \dots, C_4$	Coefficientes
$C_A$	Coefficiente de área
$C_f$	Coefficiente de atrito
$C_m$	Velocidade axial na entrada da pá do rotor
$C_{p1}$	Calor específico à pressão constante do líquido
$C_Q$	Coefficiente de vazão
$C_{v1}$	Calor específico a volume constante do líquido
$d$	Espessura da camada de líquido envolvida no processo de condução de calor
$D$	Diâmetro do modelo
$Fr$	Número de Froude
$g; g_c$	Aceleração da gravidade
$h$	Coefficiente de película
$h_s$	Altura de sucção
$H$	Altura manométrica da bomba
$H_{e \text{ abs}}$	Carga total absoluta na entrada da bomba
$J$	Equivalente mecânico de calor
$K$	Condutividade termica do líquido



L	Comprimento da cavidade ou região de formação de cavidade
$m_l$	Massa de líquido
$m_v$	Massa de vapor
$\dot{m}_v$	Vazão em massa de vapor na cavidade
N	Rotação
NPSH	Carga líquida total de sucção
NPSH <sub>A.F.</sub>	NPSH para água fria
NPSH <sub>d</sub>	NPSH disponível
NPSH <sub>r</sub>	NPSH requerido pela bomba
Nu	Número de Nusselt
P <sub>a</sub>	Pressão atmosférica local
P <sub>c</sub> = P <sub>v</sub> (T <sub>c</sub> )	Pressão na cavidade
Pe	Número de Péclét
P <sub>e</sub>	Pressão estática na entrada do flange de sucção da bomba
Pr	Número de Prandtl
P <sub>v</sub> = P <sub>v</sub> (T <sub>∞</sub> )	Pressão de vapor correspondente a T <sub>∞</sub>
P <sub>∞</sub>	Pressão ao longe
q	Calor por unidade de massa
$\dot{q}$	Taxa de transferência de calor
Q	Quantidade de calor
Q <sub>v</sub>	Volume de vapor
$\dot{Q}_v$	Vazão em volume de vapor na cavidade
r <sub>v</sub>	Relação entre a massa de líquido evaporada em cada quilo de líquido por 1 quilo de líquido
R <sub>c</sub>	Raio de equilíbrio da cavidade
Re	Número de Reynolds
Re <sub>L</sub>	Re relativo ao comprimento da cavidade



$R_v$	Constante gasosa do vapor de água
$s$	Entropia por unidade de massa
$s_l$	Entropia por unidade de massa do líquido
$s_v$	Entropia por unidade de massa do vapor
$t$	Tempo de crescimento da cavidade
$T$	Temperatura
$T_c$	Temperatura na cavidade
$T_{\infty}$	Temperatura ao longe
$u$	Energia interna por unidade de massa
$U_T$	Velocidade da pá do rotor
$v$	Volume específico
$v_l$	Volume específico do líquido
$v_v$	Volume específico do vapor
$V_e$	Velocidade na entrada do flange de sucção da bomba
$V_v$	Velocidade do vapor
$V_{\infty}$	Velocidade ao longe
$v_l$	Volume de líquido
$v_v$	Volume de vapor
$x$	Distância axial a partir do bordo de ataque da placa
$X$	Título
$We$	Número de Weber
$\alpha$	Difusidade térmica do líquido
$\gamma$	Peso específico do líquido
$\Delta h$	Perda de carga total
$\Delta H$	Variação da altura manométrica da bomba
$\Delta h_f$	Variação de entalpia

$\Delta h_t$	Redução de $NPSH_d$ a partir do ponto de cavitação incipiente para se produzir um efeito mensurável da cavitação na queda da altura manométrica da bomba.
$\Delta h_{t1}$	$\Delta h_t$ para a água
$\Delta h_{t2}$	$\Delta h_t$ para fluidos que não a água
$\Delta NPSH$	Correção do $NPSH_r$
$\Delta P_v$	Variação da pressão de vapor
$\Delta T$	Variação de temperatura
$\epsilon$	Rugosidade média
$\eta$	Rendimento da bomba
$\lambda$	Calor latente de vaporização
$\mu$	Viscosidade
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\rho_l$	Densidade do líquido
$\rho_v$	Densidade do vapor
$\sigma$	Tensão superficial
$\sigma_c$	Número de cavitação baseado na pressão da cavidade
$\phi$	Coefficiente de vazão da bomba
$w$	Velocidade do fluido relativa à pá do rotor



## RESUMO

Em alguns casos o Efeito Termodinâmico pode exercer grande influência sobre o valor do NPSH requerido por uma bomba, principalmente para bombas operando com fluidos que não a água fria.

São apresentados quatro métodos para se estimar a redução do NPSH requerido por uma bomba operando com vários fluidos. Estes métodos são a Teoria do Preenchimento, método de Ruggeri e Moore, equação de Fruman e Beuzelin, e método de Stepanoff.

E feita uma comparação entre os resultados obtidos com cada um dos métodos empregados e também com os medidos por outros autores. Em geral, os resultados não apresentam grande discrepância entre si, porém o método que mais se aproximou dos resultados experimentais foi o de Stepanoff.

## ABSTRACT

In some situations the Thermodynamic Effect can have a great influence in the net positive suction head (NPSH) required for a pump, specially for pumps handling liquids other than cold water.

Four methods are presented here to estimate the reduction in the NPSH required for a pump handling various fluids. These methods are: Entrainment Theory, method of Ruggeri and Moore, equation of Fruman and Beuzelin and method of Stepanoff.

The results obtained for NPSH adjustments are presented and a comparison is made with other authors' results. In general, the results don't differ much from each other. The method of STEPANOFF was the one that gave the best agreement with experimental data.



CAPITULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

## 1.1. INTRODUÇÃO

Ao se diminuir a pressão hidrodinâmica de um líquido até um determinado valor, normalmente tido como a pressão de vapor na temperatura do líquido, cria-se condições para a formação de bolhas de vapor, ou cavidades, as quais implodirão quando da recuperação daquela pressão.

E dado o nome de cavitação, pela literatura especializada, ao conjunto de eventos: formação, crescimento e implosão das cavidades.

A cavitação pode estar associada a fenômenos térmicos, como um resfriamento localizado, requerido à formação de vapor. Dependendo do líquido e da temperatura na qual o mesmo se encontra, esse resfriamento pode tornar-se mensurável, por exemplo, pela diferença entre a temperatura da região de formação de vapor e a temperatura do líquido, ou pela variação do  $NPSH_r$  no caso das bombas centrífugas.

A análise da influência da formação das cavidades no  $NPSH_r$  das bombas centrífugas é um dos objetivos desse trabalho.

## 1.2. O EFEITO TERMODINÂMICO

No processo de formação de uma cavidade, se faz necessária uma transferência contínua de calor do líquido circun-



dante, de tal maneira que a temperatura da cavidade  $T_c$  será menor que a temperatura do líquido ao longe  $T_\infty$ . Surge assim, uma diferença localizada de temperatura que se denomina Efeito Termodinâmico, conforme representado pela figura 1 abaixo.

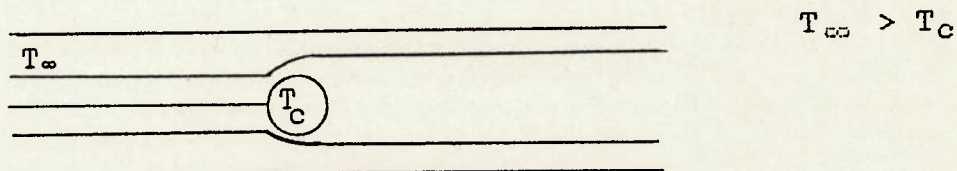


Figura 1. Efeito Termodinâmico

Essa diferença de temperatura é expressa por:

$$\Delta T = T_\infty - T_c \quad (1)$$

Em alguns casos, esse Efeito Termodinâmico pode exercer grande influência sobre o valor do NPSH requerido para uma bomba centrífuga, principalmente se a mesma estiver operando com fluidos que não a água fria.

### 1.3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O presente trabalho tem por finalidade verificar a influência do Efeito Termodinâmico no NPSH requerido de uma bomba centrífuga operando com diversos fluidos que não a água fria, através do cálculo da correção do NPSH requerido em relação à água fria, designado por  $\Delta NPSH$ . Pretende-se

com isso fornecer subsídios para a estimativa do valor do NPSH requerido, quando da operação com um dos fluidos aqui tratados.

A crescente diversidade de fluidos utilizados pela indústria atualmente, e suas respectivas condições de operação contribuem para a justificativa do tema, além do interesse próprio do fabricante e usuários das bombas centrífugas.

A utilização de líquidos criogênicos como combustível pela indústria aeroespacial tende a aumentar o interesse pelo desenvolvimento do assunto, assim como o manuseio de água quente em plantas termoelétricas e reatores nucleares.

Os fluidos selecionados foram: um criogênico (hidrogênio), um metal líquido (sódio), um refrigerante (Freon - 11)\*, um hidrocarbono (butano), além da água.

Serão discutidos os métodos conhecidos para o cálculo de  $\Delta T$ , e a partir daí os mesmos serão aplicados às bombas centrífugas, sendo calculados os valores respectivos de correção da pressão de vapor ( $\Delta P_v$ ) e de NPSH requerido ( $\Delta NPSH$ ). Os resultados obtidos serão comparados com os disponíveis na bibliografia conhecida, medidos ou calculados.

Para cada fluido, os resultados de  $\Delta NPSH$  são apresentados em forma de tabelas, indicando os cálculos efetuados e gráficos comparativos com outros autores, sempre em função da temperatura.

---

\* Embora o termo mais correto seja R-11, pois Freon-11 representa uma marca comercial, o termo Freon-11 será mantido porque todas as referências consultadas, à exceção do HYDRAULIC INSTITUTE (1982), o utilizam.



**CAPITULO 2**

**.INFLUENCIA DO EFEITO  
TERMODINAMICO SOBRE O NPSH  
REQUERIDO DAS BOMBAS  
CENTRIFUGAS**

## 2.1. MÉTODOS DE CÁLCULO DA REDUÇÃO DE TEMPERATURA

### 2.1.1. MÉTODO DO FATOR B:

STAHL; STEPANOFF (1956) são considerados os primeiros a estudar o Efeito Termodinâmico para cavitação desenvolvida em bombas centrífugas.

Se a partir da condição de cavitação incipiente de uma bomba centrífuga o valor de  $NPSH_d$  for reduzido o suficiente para produzir um efeito mensurável na queda de desempenho da mesma, após um determinado instante ter-se-á uma certa energia disponível para a vaporização do líquido. Essa energia será a diferença entre a entalpia do líquido saturado à temperatura  $T_\infty$ , e a entalpia do líquido saturado correspondente à pressão na zona de baixa pressão do rotor nas condições de  $NPSH$  reduzido. A diferença de temperaturas correspondente às duas condições de saturação pode ser expressa através de:

$$\Delta T = \frac{\Delta h_f}{C_{pl}} \quad (2)$$

Supondo que o equilíbrio térmico seja restabelecido, pode-se fazer o balanço térmico através da seguinte equação:

$$\Delta h_f = r_v \cdot \lambda \quad (3)$$

Onde  $r_v$  é a relação entre a massa de líquido evaporada e a massa de líquido que escoou através da zona de baixa pressão no rotor; ou seja:

$$r_v = \frac{m_v}{m_l} = \frac{v_v \cdot v_l}{v_v \cdot v_l} \quad (4)$$

Utilizando-se a equação (4), a equação (3) fica:

$$\frac{v_v}{v_l} = \frac{v_v}{v_l} \cdot \frac{\Delta h_f}{\lambda}$$

A relação  $v_v / v_l$  designou-se o símbolo B, o qual recebe o nome de Critério de Cavitação Térmica.

$$B = \frac{v_v}{v_l} \cdot \frac{\Delta h_f}{\lambda} \quad (5)$$

Para cada redução no valor de  $NPSH_d$ , pode-se calcular B através das propriedades do líquido, utilizando-se a equação (5).

Segundo STAHL e STEPANOFF, para uma bomba operando à mesma rotação e mesma vazão, o mesmo valor de B para diferentes fluidos implicaria no mesmo estágio de desenvolvimento da cavitação para a mesma queda na altura manométrica da bomba, uma vez que a vazão na região de baixa pressão seria a mesma.

Teoricamente, a suposição de restabelecimento do equilíbrio térmico requeriria um tempo de duração infinito para o processo. Contudo, para uma bomba operando com dois líquidos diferentes e mesmo número do Critério de Cavitação Térmica, o efeito do tempo será o mesmo nos dois casos.



Uma vez que o equilíbrio térmico não se concretiza e apenas uma parte do fluxo atravessa a região de baixa pressão, B não irá representar a relação vapor/líquido em volume para o escoamento como um todo, sendo apenas um indicativo da tendência de vaporização do líquido sob condições cavitantes, produzindo o efeito mensurável na queda da altura manométrica da bomba. Geralmente, uma redução de 3% na altura manométrica da bomba constitui o mencionado efeito mensurável na queda da altura manométrica, conforme descrito por STEPANOFF (1965) e norma ABNT NBR 10462 (1988).

$$\frac{\Delta H}{H} = 0,03$$

Para o cálculo da redução de temperatura basta substituir a equação (2) na equação (5):

$$\Delta T = B \cdot \frac{v_l}{v_v} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l}$$

Ou ainda

$$\Delta T = B \cdot \left[ \frac{p_v}{p_l} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l} \right] \quad (6)$$

Onde

$$B = \frac{v_v}{v_l}$$

No apêndice I é apresentada uma forma alternativa para se chegar à equação (6).



Por ser de difícil determinação, o cálculo de B passa a se constituir numa desvantagem desse método.

### 2.1.2. VARIAÇÕES DO METODO DO FATOR B

Muitas tentativas tem sido feitas com o objetivo de melhorar o método do fator B de modo que várias alternativas foram apresentadas nas últimas décadas. Nenhuma delas, porém, superou em importância o método original do fator B.

BONNIN (1971), (1972) e (1974), trabalhando com parâmetros adimensionais, sugeriu que dois fatores adimensionais correlacionariam melhor os dados experimentais disponíveis, propondo a substituição do fator B por dois outros fatores designados por B' e B''.

Onde

$$B' = \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \lambda \cdot \frac{t}{K} \cdot \frac{dP_v}{dT} \quad (7)$$

$$B'' = \frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot \frac{Cp_l}{\lambda} \cdot \Delta T \quad (8)$$

Segundo o referido autor, para B' >> 1 e B'' << 1 ou B' >> B'' >> 1 o crescimento da cavidade seria influenciado somente pelo Efeito Termodinâmico.

Não ficou provado que os fatores B' e B'' são os mais apropriados para o estudo do fenômeno.

FLORSCHUETZ; CHAO (1963) apud GARCIA; HAMMITT (1967) propuseram uma modificação do fator B, denominada fator B efetivo definido como:

$$B_{\text{eff}} = \left[ \frac{\rho_l \cdot C_{p_l} \cdot \Delta T}{\rho_v \cdot \lambda} \right]^2 \cdot \frac{\alpha}{R_0} \cdot \left[ \frac{\rho_l}{\Delta P_v} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Escrevendo em função do fator B, tem-se

$$B_{\text{eff}} = B^2 \cdot \frac{\alpha}{R_0} \cdot \left[ \frac{\rho_l}{\Delta P_v} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Os efeitos termodinâmicos seriam significativos para baixos valores de  $B_{\text{eff}}$ . Altos valores de  $B_{\text{eff}}$  implicariam em crescimento e colapso das bolhas controlados pela inércia.

GARCIA; HAMMITT (1967) realizaram ensaios utilizando um equipamento vibratório e foram registrados os danos sofridos pelas amostras. Posteriormente foram realizados experimentos adicionais por HAMMITT; BHATT (1975) apud HAMMITT (1980) utilizando o mesmo equipamento e sódio como fluido de trabalho. Os resultados obtidos não concordaram com os primeiros.

Uma dificuldade adicional para o cálculo de  $B_{\text{eff}}$  é a necessidade de se adotar  $R_0$  para a cavidade.

RUGGERI; MOORE (1969) propuseram uma expressão para se calcular o fator B para as condições desejadas, baseando-se em valores medidos para um dado fluido a determinadas condi-

ções de temperatura e velocidade, condições essas denominadas de valores de referência.

O valor previsto seria dado por:

$$\left[ \frac{v_v}{v_l} \right]_{\text{prev.}} = \left[ \frac{v_v}{v_l} \right]_{\text{ref.}} \cdot \left[ \frac{\alpha_{\text{ref.}}}{\alpha} \right] \cdot \left[ \frac{N}{N_{\text{ref.}}} \right]^{0,8} \quad (11)$$

As suposições de semelhança geométrica do fluxo cavitante para os vários fluidos e diversas condições de escoamento e ainda de equilíbrio térmico na região cavitante estão implícitas no trabalho de RUGGERI e MOORE, o qual vem a complementar um trabalho anterior de GELDER et al. (1966).

Em nenhum dos trabalhos analisados se considera a presença de gás não dissolvido no interior da cavidade, desprezando-se o efeito de difusão gasosa através do líquido. Além disso, supõe-se que a cavidade permanece esférica.

A crescente complexidade dos modelos propostos e as dificuldades em se determinar os fatores envolvidos aliados a ausência de resultados significativos tem contribuído para a procura de métodos alternativos.

### 2.1.3. TEORIA DO PREENCHIMENTO

Baseado nos trabalhos de HOLL; WISLICENUS (1961) e nos comentários de ACOSTA; PARKIN (1961), HOLL et al. (1975), trabalhando com ogivas calibre zero e calibre  $1/4$  com água e



Freon - 113, propuseram um método semi-experimental para o cálculo de  $\Delta T$ .

A cavidade vaporosa sendo continuamente alimentada com vapor através da superfície da mesma implica numa transferência de calor, dada por:

$$\dot{q} = \lambda \cdot \dot{m}_V \quad (12)$$

Onde

$$\dot{m}_V = \rho_V \cdot V_V \cdot A_V \quad (13)$$

Definindo coeficiente de vazão como

$$C_Q = \frac{\dot{Q}_V}{D^2 \cdot V_{co}} \quad (14)$$

Tem-se

$$\dot{m}_V = \rho_V \cdot D^2 \cdot V_{co} \cdot C_Q \quad (15)$$

Substituindo (15) em (12), resulta

$$\dot{q} = \rho_V \cdot \lambda \cdot C_Q \cdot D^2 \cdot V_{co} \quad (16)$$

Considerando um coeficiente de película  $h$  entre a cavidade e o líquido circundante, tem-se

$$\dot{q} = h \cdot A_w \cdot (T_{co} - T_c) = h \cdot A_w \cdot \Delta T \quad (17)$$

Igualando-se as equações (16) e (17) obtém-se para T:

$$\Delta T = \frac{C_Q}{h} \cdot \frac{D^2}{A_w} \cdot V_{co} \cdot \lambda \cdot \rho_v \quad (18)$$

Através de uma análise dimensional, pode-se chegar à equação (18), conforme mostrado no apêndice II.

Introduzindo os números adimensionais:

$$C_A = \frac{A_w}{D^2} \quad (19)$$

$$Pe = \frac{V_{co} \cdot D}{\alpha} \quad (20)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{K} \quad (21)$$

E valendo-se da relação

$$\alpha = \frac{K}{\rho_L \cdot Cp_l} \quad (22)$$

Resulta

$$\Delta T = \frac{C_Q}{C_A} \cdot \frac{Pe}{Nu} \cdot \left[ \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l} \right] \quad (23)$$

Igualando as equações (6) e (23) pode-se expressar B como a relação entre quatro adimensionais



$$B = \frac{C_Q}{C_A} \cdot \frac{Pe}{Nu} \quad (24)$$

Para determinação de  $C_Q$  foram necessários trabalhos experimentais realizados por BILLET; WEIR (1974) apud HOLL et al. (1975) supondo que a vazão em volume de vapor necessária para sustentar uma cavidade vaporosa é igual a vazão em volume de gás para sustentar uma cavidade ventilada.

Desse modo  $C_Q$  foi expresso na forma

$$C_Q = C_2 \cdot Re^b \cdot Fr^c \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^e \quad (25)$$

Onde

$$Re = \frac{V_{co} \cdot D}{\nu} \quad (26)$$

$$Fr = \frac{V_{co}}{\sqrt{g \cdot D}}$$

A partir de fotografias de cavidades naturais e ventiladas do trabalho de BILLET et al. (1974) apud HOLL et al. (1975),  $C_A$  foi apresentado na forma

$$C_A = C_1 \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^a \quad (27)$$

Valendo-se das equações (25) e (27) e de valores medidos para  $\Delta T$ , o autor elaborou a seguinte forma para  $Nu$

$$Nu = C_3 \cdot Re^f \cdot Fr^g \cdot Pr^i \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^j \quad (28)$$



Sendo  $a, \dots, j$  determinados experimentalmente

Substituindo as equações (25), (27) e (28) na equação (23) resulta

$$\Delta T = C_4 \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^k \cdot Re^l \cdot Fr^m \cdot Pr^p \cdot Pe \cdot \left[ \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\lambda}{C_{p1}} \right] \quad (29)$$

Foram efetuadas medições posteriores com venturis e duas ogivas, esquematizados na figura 2

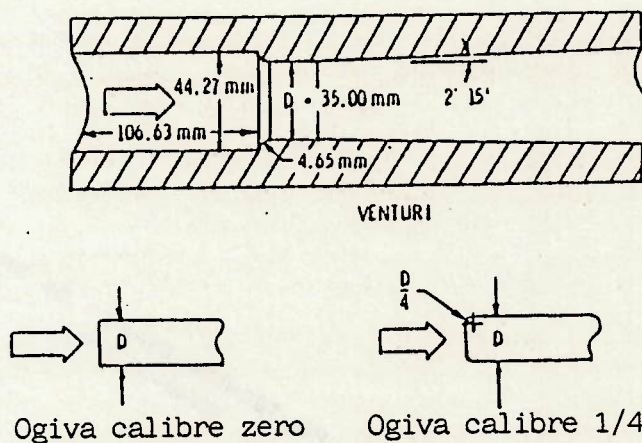


Figura 2. Venturi e ogivas utilizados por BILLET et al. (BILLET et al. (1981))

Os valores dos coeficientes e expoentes obtidos encontram-se na tabela 1.

Modelo	Qtde	Coefficientes $C_a, C_b$ ou $C_4$	Exp. $L/D$	Exp. $Re$	Exp. $Fr$	Exp. $Pr$	Exp. $Pe$
Venturi	$C_Q$	$0,676 \times 10^{-4}$	1,06	0,48	-0,21	----	---
	$Nu$	$0,611 \times 10^{-3}$	-0,39	1,36	-0,59	0,04	---
	$\Delta T$	$0,421 \times 10^{-1}$	0,36	-0,88	0,38	0,04	1,0
Ogiva Calibre Zero	$C_Q$	$0,424 \times 10^{-2}$	0,69	0,16	0,13	---	---
	$Nu$	$0,148 \times 10^{-3}$	-1,33	1,39	0,15	0,85	---
	$\Delta T$	6,221	0,83	-1,23	-0,02	-0,85	1,0
Ogiva Calibre 1/4	$C_Q$	$0,320 \times 10^{-4}$	0,74	0,46	0,26	----	---
	$Nu$	$0,464 \times 10^{-2}$	-0,70	1,03	0,30	0,41	---
	$\Delta T$	$0,335 \times 10^{-2}$	0,26	-0,57	-0,04	-0,41	1,0

Tabela 1. Coeficientes e expoentes obtidos para o venturi e as ogivas [BILLET et al (1981)]

Os valores calculados de  $\Delta T$  para os respectivos fluidos de trabalho obtidos com os venturis, em comparação com os valores medidos estão mostrados na tabela 2.

Fluido	Diâmetro do Venturi D(mm)	L/D	Velocidade $V_{co}$ (m/s)	Temp. do Fluido T(°K)	Medido $\Delta T$ (°C)	Previsto $\Delta T$ (°C)
Hidrogênio	24,8	2,05	31,3	19,9	1,77	1,53
	....	2,56	30,1	19,8	1,45	1,63
	....	3,33	30,4	19,8	1,88	1,80
	....	3,33	43,7	20,7	2,37	2,52
	....	1,79	46,0	20,4	1,99	1,97
	etc.	2,82	45,6	20,3	2,74	2,28
		2,56	49,7	22,4	2,71	3,33
		3,33	50,8	22,3	3,01	3,67
		3,59	51,3	22,4	3,04	3,83
		1,79	52,6	20,6	2,58	2,19
		2,70	53,3	20,6	3,02	2,54
		3,33	52,7	20,1	3,36	2,68
		3,33	52,7	20,6	3,19	2,72
		1,28	57,2	22,4	2,25	2,81
		2,05	58,0	20,7	2,91	2,43
		2,05	58,7	20,7	2,96	2,45
		3,33	58,1	20,7	3,43	2,92
		3,59	59,1	20,6	3,16	2,99
	2,05	58,6	22,6	2,81	3,46	
	3,33	57,9	22,4	3,43	4,01	
	3,33	58,6	22,5	3,53	4,08	

Tabela 2 - Comparação entre os valores de  $\Delta T$  medidos e calculados para o venturi. [BILLET et al. (1981)]. (continua)



Fluido	Diâmetro do Venturi D(mm)	L/D	Velocidade $V_{\infty}$ (m/s)	Temp. do Fluido T(°K)	Medido $\Delta T$ (°C)	Previsto $\Delta T$ (°C)
Freon 114	24,8	1,64	9,5	289,1	3,78	4,03
	....	1,64	9,9	299,8	4,94	5,36
	....	1,64	6,7	277,1	2,22	2,49
	....	1,64	6,9	288,7	3,00	3,41
	....	1,64	7,0	299,7	4,33	4,48
	etc.	1,64	13,5	288,9	4,89	4,79
		1,64	13,6	299,9	5,83	6,28
		0,72	16,5	289,1	2,89	3,12
		3,08	8,2	289,1	4,00	4,73
Hidro- gênio	24,8	1,28	46,1	20,5	1,43	1,77
	....	2,05	46,6	20,6	1,97	2,15
	....	3,33	46,6	20,6	2,32	2,58
	....	1,28	39,2	21,4	1,91	1,95
	....	2,05	38,7	21,5	2,06	2,32
	etc.	3,33	39,8	21,6	2,33	2,84
		1,28	42,6	22,5	2,38	2,45
		2,05	43,9	22,6	2,81	2,97
		3,33	44,1	22,8	3,19	3,69
		1,28	60,0	20,8	1,96	2,15
		2,05	60,8	20,9	2,50	2,61
		3,33	62,2	20,8	3,47	3,11
		1,28	59,6	21,4	2,48	2,39
		2,05	60,2	21,4	3,06	2,67

Fluido	Diâmetro do Venturi D(mm)	L/D	Velocidade $V_{\infty}$ (m/s)	Temp. do Fluido T(°K)	Medido $\Delta T$ (°C)	Previsto $\Delta T$ (°C)
Hidro- gênio	24,8	3,33	59,7	21,3	3,58	3,34
	....	1,28	58,0	22,6	2,91	2,91
	....	2,05	57,7	22,6	3,16	3,43
	....	3,33	57,8	22,6	3,72	4,09
	....	1,28	59,8	20,9	2,77	2,17
	etc.	1,28	61,8	22,7	3,47	3,03
		2,05	61,8	22,6	3,62	3,54
		3,33	62,4	22,7	4,27	4,37
		1,28	60,2	21,4	2,83	2,39
		2,05	60,5	21,4	2,99	2,84
		3,33	61,3	21,6	3,48	3,56
		1,28	42,4	21,6	2,21	2,07
		2,05	43,0	21,5	2,65	2,46
		3,33	43,8	22,1	2,98	3,26
		1,28	47,4	20,6	1,96	1,82
		2,05	47,2	20,4	2,42	2,09
		3,33	46,9	20,7	3,03	2,76
		2,05	46,2	22,7	2,47	3,12
		3,33	46,7	22,7	2,91	3,78
		1,28	33,8	20,3	1,55	1,44
	2,05	34,5	20,3	1,64	1,73	

(continua)



Fluido	Diâmetro do Venturi D(mm)	L/D	Velocidade $V_{\infty}$ (m/s)	Temp. do Fluido T(°K)	Medido $\Delta T$ (°C)	Previsto $\Delta T$ (°C)
Nitro- gênio	24,8	3,33	10,7	77,8	1,67	1,40
	....	3,33	15,4	77,7	1,72	1,64
	....	3,33	14,0	83,7	2,39	2,63
	....	3,33	19,9	89,1	4,83	4,82
	....	3,33	22,6	89,3	4,78	5,19
	etc.	3,33	22,3	83,6	3,61	3,29
		3,33	22,3	78,3	2,33	2,10
		3,33	22,2	78,2	2,39	2,07
		3,33	15,1	78,1	1,83	1,69
		3,33	14,7	78,1	2,00	1,67
Freon 114	35,0	2,00	9,6	272,8	3,00	2,60
	....	2,00	9,7	273,0	4,06	4,17
	....	2,00	9,7	272,9	5,11	5,44
	....	2,00	5,8	265,9	1,50	1,46
	....	2,00	5,7	265,8	1,83	2,00
	etc.	2,00	5,8	265,8	2,78	3,28
		2,00	13,2	279,4	4,06	3,16
		2,00	13,4	279,8	5,06	5,13
		0,36	10,1	273,8	2,17	2,27
		0,91	10,0	273,7	3,50	3,16
	2,90	9,2	272,2	4,44	4,66	

Fluido	Diâmetro do Venturi D(mm)	L/D	Velocidade $V_{\infty}$ (m/s)	Temp. do Fluido T(°K)	Medido $\Delta T$ (°C)	Previsto $\Delta T$ (°C)
Nitro- gênio	35,0	0,73	6,2	77,8	0,61	0,59
	....	1,45	6,1	77,8	0,72	0,75
	....	2,90	5,9	77,8	1,00	0,95
	....	2,90	7,6	78,0	1,28	1,11
	....	2,90	9,6	78,3	1,50	1,28
	etc.	2,90	12,8	79,2	1,67	1,59

Tabela 2 - Comparação entre os valores de  $\Delta T$  medidos e calculados para o venturi. [BILLET et al (1981)]. (final)

#### 2.1.4. FORMULAÇÃO DE FRUMAN; BEUZELIN

FRUMAN; BEUZELIN (1992) considerando o escoamento sobre uma placa plana rugosa sem gradiente de pressão sugeriram a seguinte equação para o cálculo de  $\Delta T$ :

$$\Delta T = 2 \cdot \left[ \frac{C_Q}{C_f} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda \cdot \rho_V}{C_{p1} \cdot \rho_1} \right] \cdot \left[ 1 + 2,11 \cdot (\text{Pr} - 1) \cdot \text{Re}_L^{-0,1} \right] \quad (30)$$

Onde

$$\text{Re}_L = \frac{V_{\infty} \cdot L}{\nu} \quad (31)$$

$$C_f = 0,0139 \left[ \frac{x}{\epsilon} \right]^{-1/7} \quad (32)$$

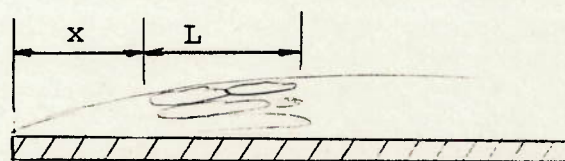


Figura 3. Placa plana rugosa sem gradiente de pressão

#### 2.2. INFLUENCIA DA TEMPERATURA DO LIQUIDO

Observando-se as tabelas de vapor da água pode-se verificar que à medida que a temperatura aumenta o volume específico do vapor diminui. Conseqüentemente, o volume ocupado



por uma mesma massa de vapor deve diminuir, reduzindo-se a influência da mesma na queda da altura manométrica da bomba com o aumento da temperatura. Tal fato foi verificado por STAHL; STEPANOFF (1956) e SALEMANN (1959) para a água conforme mostrado na figura 4.

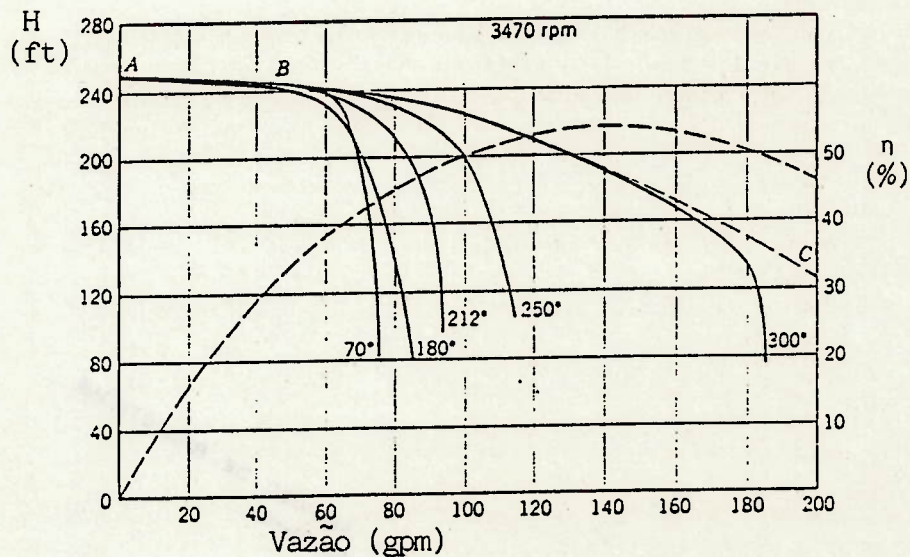


Figura 4. Desempenho da bomba operando com água a várias temperaturas (°F) (STAHL; STEPANOFF (1956))

Pode-se notar que as quedas sofridas pelas curvas características da bomba, a partir do ponto de cavitação incipiente B, diminuem com o aumento da temperatura.

Na ausência de gases não condensáveis a pressão na cavidade será igual a pressão de vapor na temperatura da cavidade.

$$P_c = P_v(T_c)$$

(33)



Expandindo  $P_V(T_C)$  em séries de TAYLOR, vem:

$$P_V(T_C) = P_V(T_{\infty}) - \left[ \frac{dP_V}{dT} \right] \cdot (T_{\infty} - T_C) + \dots \quad (34)$$

Através da figura 5 abaixo verifica-se que conforme  $T$  aumenta, dois fatos ocorrem:

a) Um mesmo  $\Delta T$  produz um  $\Delta P_V$  maior

b)  $P_V$  aumenta

Onde

$$\Delta P_V = P_V(T_{\infty}) - P_V(T_C) \quad (35)$$

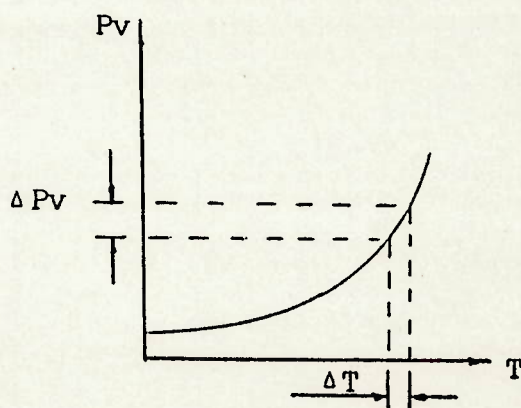


Figura 5. Gráfico da pressão de vapor em função da temperatura.

A figura 3 refere-se a uma bomba centrífuga com diâmetro de entrada de  $1\frac{1}{2}$ " , diâmetro de rotor de  $7\frac{3}{4}$ " NPSH<sub>d</sub> de 1,22 metros. A linha tracejada corresponde a bomba trabalhando afogada a uma temperatura de 21,1°C, fora da condição de cavitação incipiente.

Um aumento no valor do  $\Delta P_v$  exigirá uma redução do NPSH requerido da mesma quantidade, a partir do ponto de cavitação incipiente, para se ter uma mesma queda na altura manométrica da bomba.

Conclui-se que o aumento da temperatura do líquido contribui para uma redução na queda da altura manométrica da bomba, em condições de NPSH<sub>d</sub> insuficiente.

### 2.3. DETERMINAÇÃO DO NPSH

Através de um dispositivo como o esquematizado na figura 6, pode-se realizar o ensaio de cavitação em uma bomba centrífuga controlando-se a pressão na entrada  $P_e^i$  , através do controle da pressão no colchão de ar do reservatório 5 por meio da bomba de vácuo 4.

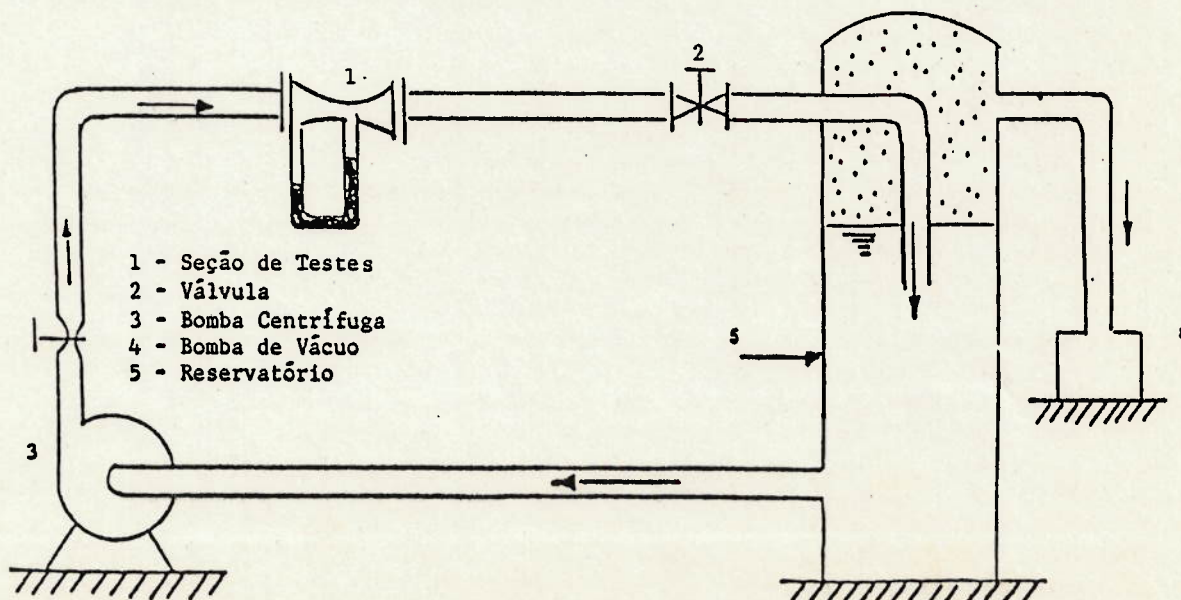


Figura 6. Esquema do dispositivo utilizado para ensaio de cavitação.



Pelo ruído característico da cavitação, pode-se determinar para cada vazão um  $Pe'$  que corresponda à condição de não cavitação, porém recomenda-se seguir o procedimento descrito na norma ABNT NBR 10462 (1988).

Daí vem a definição de NPSH requerido:

$$NPSH_r = \frac{Pe' + 0,5 \cdot \rho_l \cdot C_m^2 - P_v(T_{ca})}{\rho_l \cdot g} \quad (36)$$

$NPSH_r$  é a carga total absoluta na entrada do flange de sucção da bomba. O valor de  $NPSH_r$  é função da bomba e da vazão que a mesma estiver recalçando.

Para uma bomba centrífuga (vide triângulo de velocidades na figura 7), tem-se:

$$w^2 = C_m^2 + U_T^2 = C_m^2 \left[ 1 + \frac{U_T^2}{C_m^2} \right]$$

Ou

$$w^2 = C_m^2 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\phi^2} \right] \quad (37)$$

Onde

$$\phi = \frac{C_m}{U_T} \quad (38)$$



Substituindo (38) em (36) vem

$$NPSH_r = \frac{P_{co} + 0,5 \cdot \rho_1 \cdot \phi^2 \cdot U_T^2 - P_v(T_{co})}{\rho_1 \cdot g} \quad (39)$$

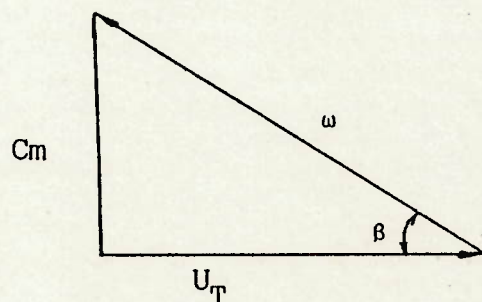


Figura 7. Triângulo de velocidades na entrada do rotor.

O número de cavitação baseado na pressão da cavidade é dado por

$$\sigma_c = \frac{P_{co} - P_c}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot w^2}$$

Ou

$$\sigma_c = \frac{P_{co} - P_v(T_{co})}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot w^2} + \frac{P_v(T_{co}) - P_c}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot w^2} \quad (40)$$

Substituindo a equação (37) na equação (40) resulta

$$\sigma_c = \frac{P_{\infty} - P_v(T_{\infty})}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot C_m^2 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\phi^2} \right]} + \frac{P_v(T_{\infty}) - P_c}{0,5 \cdot \rho_1 \cdot C_m^2 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{\phi^2} \right]}$$

Ou

$$P_{\infty} - P_v(T_{\infty}) = 0,5 \cdot \sigma_c \cdot \rho_1 \cdot U_T^2 \cdot (\phi^2 + 1) - \Delta P_v \quad (41)$$

Substituindo (41) em (39) resulta:

$$NPSH_r = \sigma_c \cdot (\phi^2 + 1) \cdot \frac{U_T^2}{2 \cdot g} + \phi^2 \cdot \frac{U_T^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta P_v}{\rho_1 \cdot g} \quad (42)$$

Observa-se nesta equação que  $NPSH_r$  aumenta com o aumento da velocidade da pá do rotor, e que  $NPSH_r$  diminui com a severidade do efeito termodinâmico.

Na ausência de Efeito Termodinâmico

$$\Delta P_v = 0$$

O  $NPSH$  disponível de uma instalação é por definição a carga total absoluta na entrada da bomba acima da pressão de vapor na temperatura de bombeamento do líquido.

$$NPSH_d = H_{e \text{ abs}} (\text{disponível}) - \frac{P_v}{\gamma} \quad (43)$$

RUGGERI; MOORE (1969) apresentaram um método iterativo para o cálculo do  $NPSH_r$  de uma bomba centrífuga utilizando a razão  $\psi_v / \psi_l$  (ou fator B).

Inicialmente é necessário ensaiar por duas vezes a bomba em estudo com os respectivos valores de  $N$ , obtendo-se dois valores para  $NPSH_r$ . Arbitra-se os valores de um dos ensaios como sendo  $N_{ref}$  e  $(NPSH_r)_{ref}$ . Escolhe-se um valor para  $(\Delta P_v)_{ref}$  e obtém-se  $(\psi_v / \psi_l)_{ref}$  pelo emprego da equação

$$\Delta P_v = J \cdot \left[ \frac{\rho_v}{\rho_l} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\lambda^2}{C_{p1} \cdot T_{\infty}} \right] \cdot \left[ \frac{\psi_v}{\psi_l} \right] \cdot \left[ \frac{g_c}{g} \right] \quad (44)$$

Conhecido  $(\psi_v / \psi_l)_{ref}$ , calcula-se  $\psi_v / \psi_l$  valendo-se da equação (11). Entrando-se com o valor de  $\psi_v / \psi_l$  na equação (44) obtém-se  $\Delta P_v$ . Repetem-se os cálculos até que se obtenha um par de valores  $(\Delta P_v)_{ref}$  e  $\Delta P_v$  que satisfaça a equação (45).

$$\frac{NPSH_{ref} + (\Delta P_v)_{ref}}{NPSH + \Delta P_v} = \left[ \frac{N_{ref}}{N} \right]^2 \quad (45)$$

Dessa forma obtém-se os valores de  $(\Delta P_v)_{ref}$  e  $(\psi_v / \psi_l)_{ref}$ . Uma vez determinados esses valores pode-se calcular o  $NPSH_r$  para outros líquidos, novos valores de temperatura ou mesmo outros valores de rotação.

É interessante a possibilidade levantada pelos autores de se aplicar às bombas centrífugas um método obtido origi-



nalmente trabalhando-se com venturís, na presença de cavitação desenvolvida. Tal possibilidade baseia-se no fato de uma cavidade presente no escoamento interno a um venturi formar-se de modo similar à cavidade presente no escoamento entre duas pás adjacentes de um rotor de bomba.

#### 2.4. CALCULO DE $\Delta P_v$

Conhecido  $\Delta T$ , pode-se calcular  $\Delta P_v$  de duas formas: através do uso de tabelas de propriedades termodinâmicas ou empregando-se a equação de Clausius-Clapeyron, na forma apresentada por VAN WYLEN; SONNTAG (1976). Esta última forma será a utilizada.

Observando-se as equações (1), (34) e (35) pode-se concluir que

$$\Delta P_v = \frac{dP_v}{dT} \Delta T \quad (46)$$

A equação Clausius-Clapeyron é

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{P_v \cdot \lambda}{T_{co} \cdot \left[ 1 - \frac{P_v}{P_1} \right]} \quad (47)$$

Substituindo a equação (47) na equação (46) resulta

$$\Delta P_v = \frac{P_v \cdot \lambda}{T_{co} \cdot \left[ 1 - \frac{P_v}{P_1} \right]} \cdot \Delta T \quad (48)$$

## 2.5. OPERAÇÃO COM OUTROS LÍQUIDOS

Este item tem por objetivo uma comparação quantitativa do comportamento de uma bomba centrífuga operando com água e com outros líquidos.

É sabido que outros líquidos, como os hidrocarbonos, por exemplo, necessitam de uma redução maior de  $NPSH_d$  do que a água para ter-se uma mesma queda de desempenho, a partir da condição de cavitação incipiente (ponto C da figura 8), conforme descrito por STEPANOFF (1961).

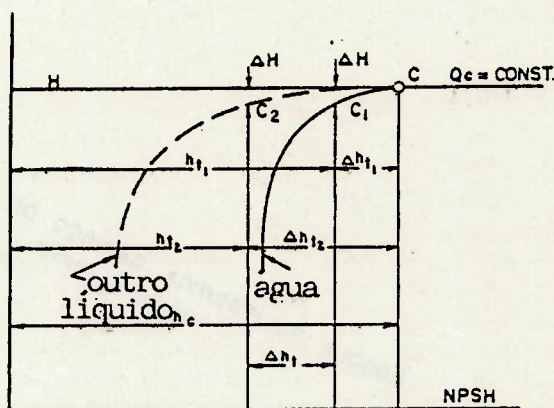


Figura 8. Cavitação em outros líquidos, em relação a água (STEPANOFF (1961))

Portanto, para uma mesma bomba operando com outro líquido, o  $NPSH_r$  será menor em relação ao da água da seguinte quantidade

$$\Delta NPSH = \Delta h_{t2} - \Delta h_{t1} \quad (49)$$



Conforme mencionado por STEPANOFF (1961) foi verificado experimentalmente que a redução de  $NPSH_d$  necessária a partir do ponto de cavitação incipiente, ou seja  $\Delta h_{t1}$ , para se produzir um efeito mensurável da cavitação na queda da altura manométrica da bomba  $\Delta H/H$  trabalhando com água fria (a temperatura ambiente) é muito pequena, podendo ser desprezada.

Como  $\Delta P_v = 0$  para água fria, voltando à equação (42) pode-se escrever para o  $NPSH_r$  para água fria.

$$NPSH_{A.F.} = \sigma_c \cdot (\phi^2 + 1) \cdot \frac{U_T^2}{2 \cdot g} + \phi^2 \cdot \frac{U_T^2}{2 \cdot g} \quad (50)$$

Assim, para outros líquidos ou água quente

$$NPSH = NPSH_{A.F.} - \frac{\Delta P_v}{\rho_l \cdot g} \quad (51)$$

E a correção do  $NPSH_r$ , fica

$$\Delta NPSH = - \frac{\Delta P_v}{\rho_l \cdot g} \quad (52)$$

**CAPITULO 3**

**APLICAÇÃO DO EFEITO  
TERMODINAMICO NA CORREÇÃO DO  
NPSH REQUERIDO DAS BOMBAS  
CENTRIFUGAS**



### 3.1. INTRODUCAO

Neste capítulo os principais métodos conhecidos para o cálculo de  $\Delta T$  serão utilizados para a correção do  $NPSH_r$  das bombas centrífugas. Os mesmos serão comparados entre si e confrontados com dados experimentais disponíveis na literatura.

A equação proposta por FRUMAN; BEUZELIN (1992) bem como a Teoria do Preenchimento referem-se a placa plana e venturis, respectivamente, e portanto tiveram que ser adaptadas para aplicação às bombas centrífugas.

O terceiro método a ser utilizado é o devido a STEPANOFF (1964) e é próprio às bombas centrífugas.

Finalmente será utilizado o método proposto por RUGGERI; MOORE (1969), o qual também é próprio às bombas.

Os gráficos apresentados nesse capítulo foram gerados com o auxílio do programa Lotus 1-2-3.

### 3.2. APLICACAO DA TEORIA DO PREENCHIMENTO AS BOMBAS CENTRIFUGAS

Embora a Teoria do Preenchimento tenha sido proposta a partir de estudos com ogivas e venturis, a mesma será apli-

cada ao escoamento entre as pás do rotor de uma bomba centrífuga conforme discutido no item 2.3. Além disso, como a Teoria do Preenchimento considera que a vaporização do líquido necessária ao crescimento e manutenção da cavidade se dá fundamentalmente por convecção, bastaria que as cavidades fossem formadas de modo semelhante nos dois casos, o que é bastante razoável. No apêndice IV é feita uma análise da troca de calor por condução, no caso de não haver transferência de calor por convecção.

Aplicando os valores das constantes e expoentes, para o caso do venturi da tabela 1, à equação (29) resulta

$$\Delta T = 0,0421 \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^{0,36} \cdot (Re)^{-0,88} \cdot (Fr)^{0,36} \cdot (Pr)^{-0,04} \cdot Pe \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l}$$

Desenvolvendo vem

$$\Delta T = 0,0273 \cdot L^{0,36} \cdot V_{co}^{0,5} \cdot D^{-0,43} \cdot \left[ \left[ \frac{1}{\nu} \right]^{-0,88} \cdot (Pr)^{-0,04} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\alpha} \right] \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l}$$

No caso das bombas centrífugas,  $V_{co}$  corresponde à velocidade do fluido relativa à pá  $\omega$

$$\Delta T = 0,0273 \cdot L^{0,36} \cdot \omega^{0,5} \cdot D^{-0,43} \cdot \left[ \left[ \frac{1}{\nu} \right]^{-0,88} \cdot (Pr)^{-0,04} \right] \cdot \left[ \frac{1}{2} \right] \cdot \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\lambda}{Cp_l} \quad (53)$$



Onde

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (54)$$

O valor de  $\Delta T$  foi obtido através da equação (53), considerando uma velocidade relativa  $\omega$  de 15 m/s, que é uma média aritmética obtida a partir de uma amostragem de bombas fabricadas, onde a velocidade relativa variava de 8 a 32 m/s. Também foi utilizada uma velocidade relativa de 1 m/s para se observar a influência da velocidade.

O produto  $L^{0,36} \cdot D^{-0,43}$  foi considerado como sendo igual a 1, ou seja, não foi levado em conta a influência da geometria.

Foi verificado experimentalmente por BILLET et al. (1981) que a influência da geometria é muito pequena para os casos em estudo.

Uma vez obtido  $\Delta T$ , calculou-se  $\Delta P_v$  pela equação (48) deduzida no item 2.4.

Conhecido  $\Delta P_v$ , obteve-se  $\Delta NPSH$  através da equação (52) para diversos fluidos a várias temperaturas. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas 3 a 7 do anexo A, para cada fluido.

Os valores das propriedades físicas dos fluidos foram obtidos através das tabelas de vapor apresentadas em PERRY (1984). Para a obtenção das propriedades do Freon-11, também

foi utilizado o American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbook (1985).

Para o sódio, como os dados disponíveis para  $\mu$  e  $K$  na bibliografia utilizada, no caso KREITH (1977) e PERRY (1984) referiam-se somente até uma temperatura máxima de  $900^{\circ}\text{C}$ , foi feita uma extrapolação para estas duas propriedades utilizando-se o método dos mínimos quadrados e a tabela de dados apresentada por KREITH (1977). As equações encontradas que mais aproximaram os dados são

$$\mu = 133,64 \cdot T_{\infty}^{-1,293}$$

$$K = 101,95 - 4,46 \times 10^{-2} \cdot T_{\infty}$$

Onde as unidades para  $T_{\infty}$ ,  $\mu$  e  $K$  são respectivamente  $^{\circ}\text{K}$ ,  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$  e  $\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$ .

Os resultados obtidos nas tabelas 3 a 7 estão representados nos gráficos das figuras 9 a 13.

A figura 14 é um comparativo entre o Freon-11, a água e o butano.



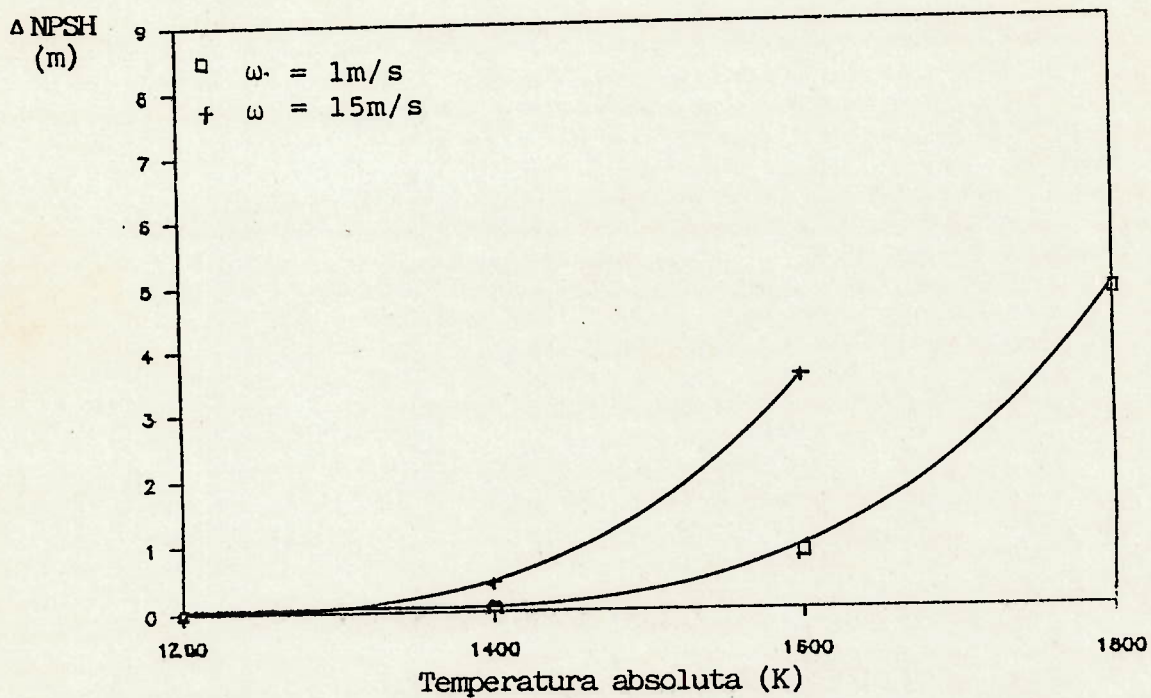


Figura 9. Correção do  $NPSH_r$  para o sódio.

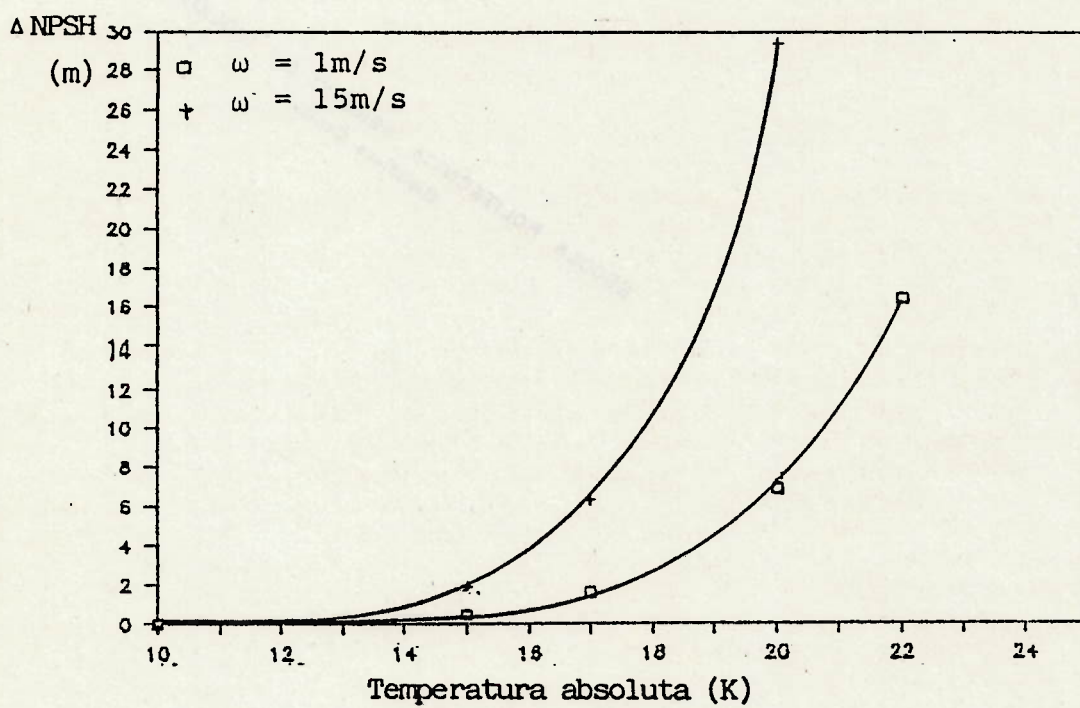


Figura 10 Correção do  $NPSH_r$  para o hidrogênio



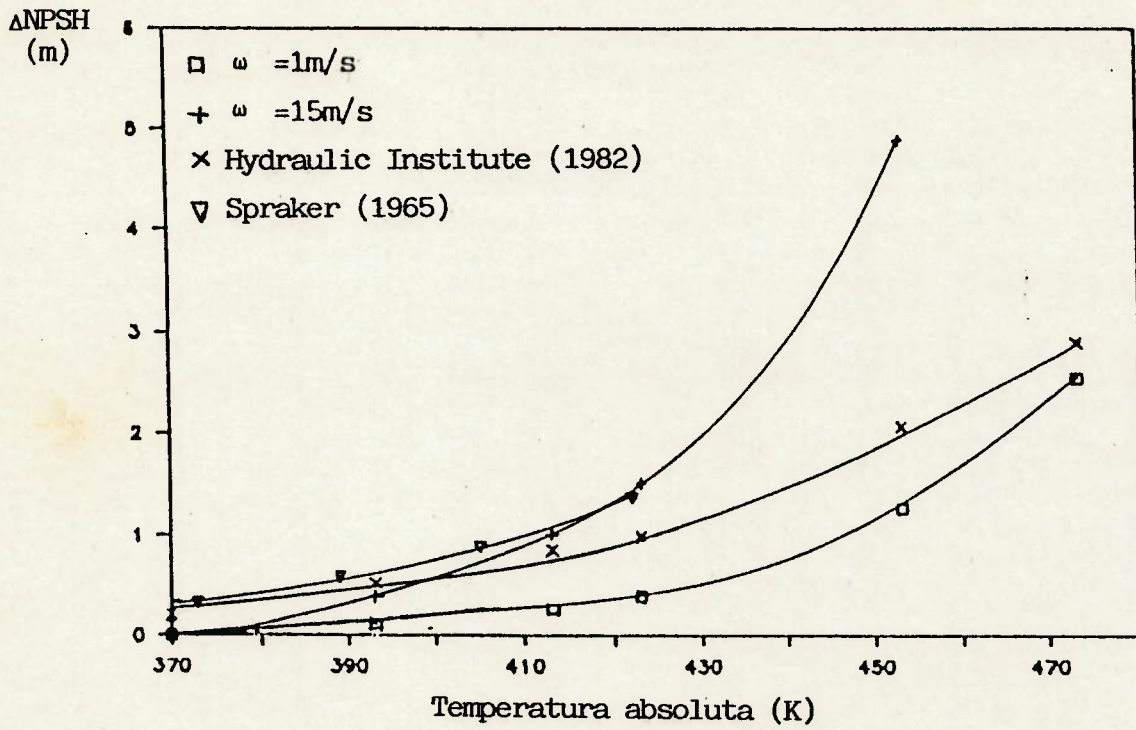


Figura 11. Correção do  $NPSH_r$  para a água

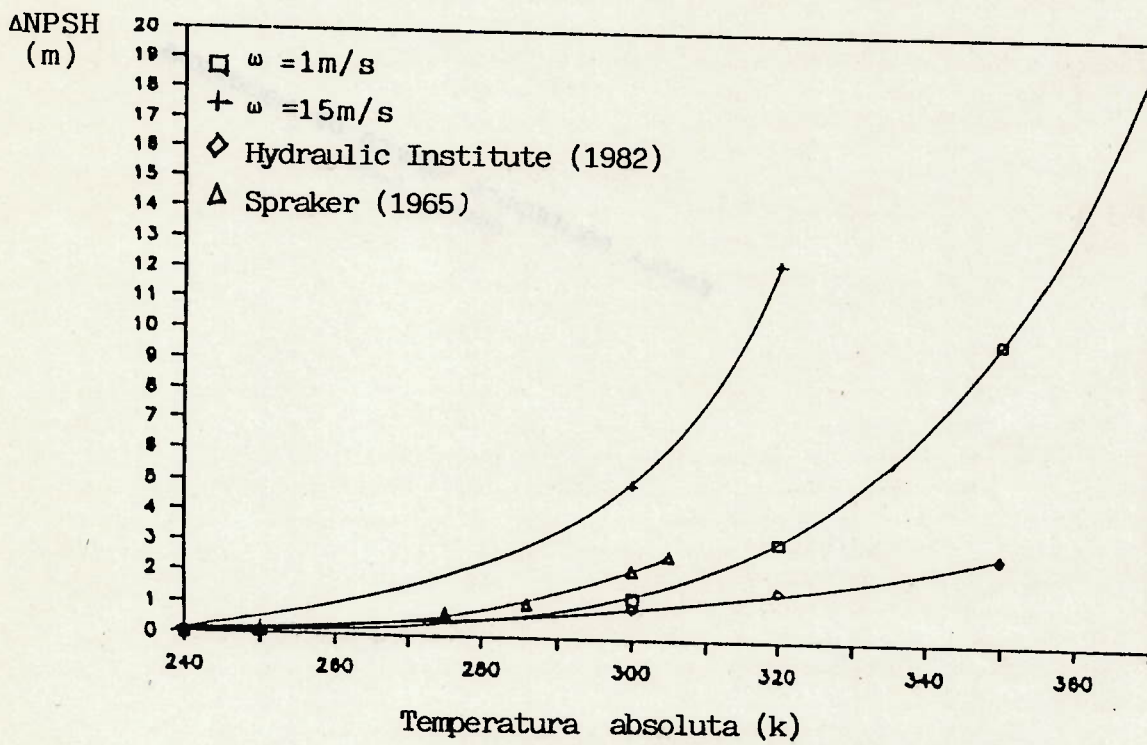


Figura 12. Correção do  $NPSH_r$  para o butano

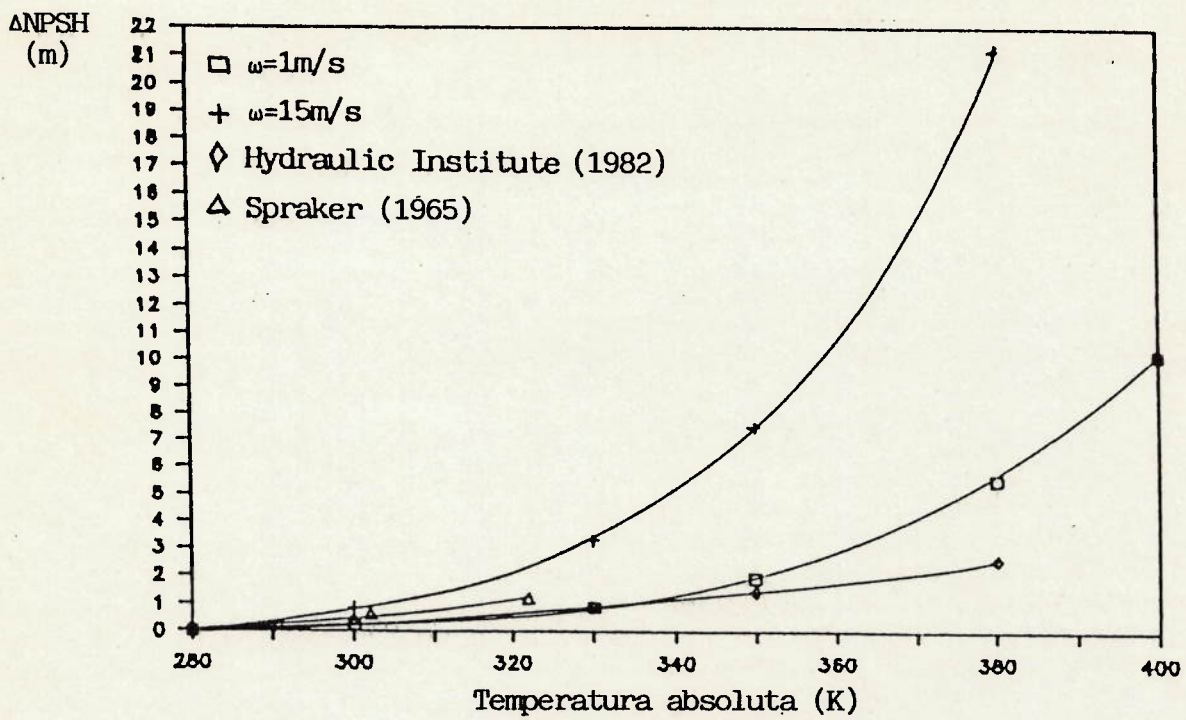


Figura 13. Correção do  $NPSH_r$  para o freon-11

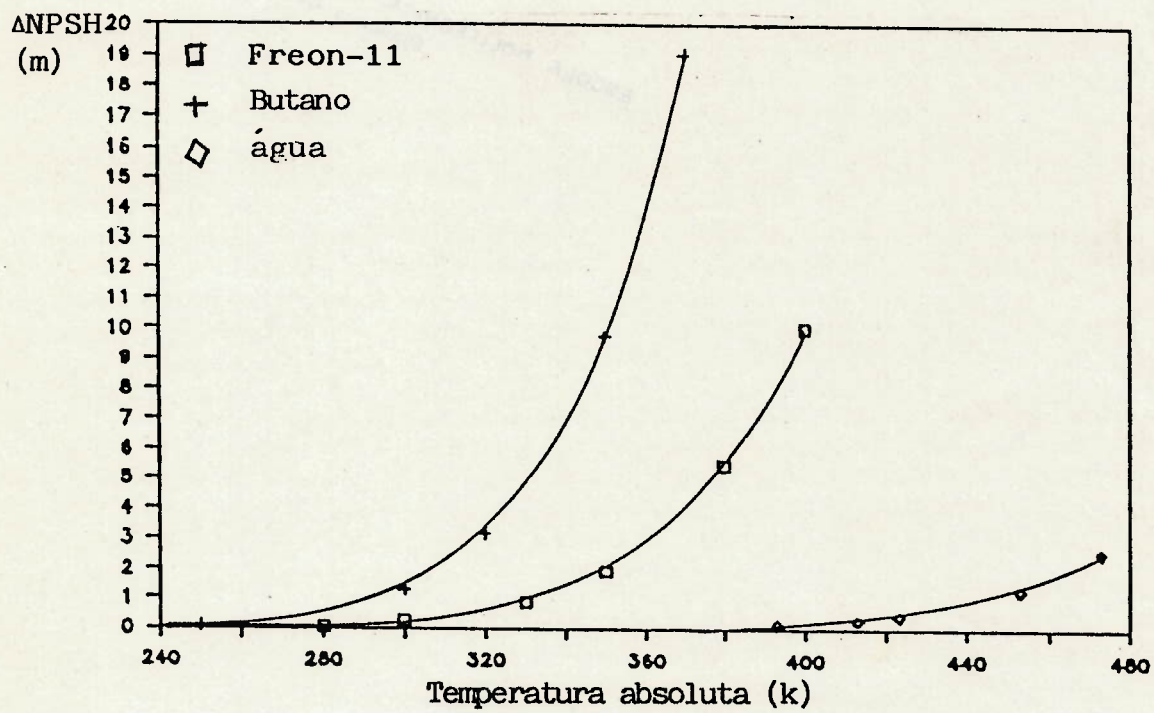


Figura 14. Comparação da correção do  $NPSH_r$  entre água, freon-11 e butano.



E importante observar que à medida que  $T_{\infty}$  aumenta, aproximando-se do ponto crítico, os valores de  $\rho_v$  e  $\rho_l$  tendem a se igualar fazendo com que o valor de  $\Delta NPSH$  venha a tender a infinito, conforme mostrado pelas equações (48) e (52).

Esse fato pode ser verificado pela inclinação acentuada das curvas das figuras 9 a 14 a partir de certos valores de  $T_{\infty}$ . Os resultados obtidos para  $\Delta NPSH$  deixam de ter significado físico nas proximidades do ponto crítico.

Na ausência de dados nas condições de operação, o HYDRAULIC INSTITUTE (1982) recomenda que a correção do  $NPSH_r$  seja de no máximo 50% do  $NPSH_r$  para água fria, estando ainda limitada a 3,05 metros para os fluidos que constam na figura 15, baseada em dados de laboratório.

No ponto crítico os valores de  $\rho_v$  e  $\rho_l$  seriam iguais e certamente nunca haveria cavitação.

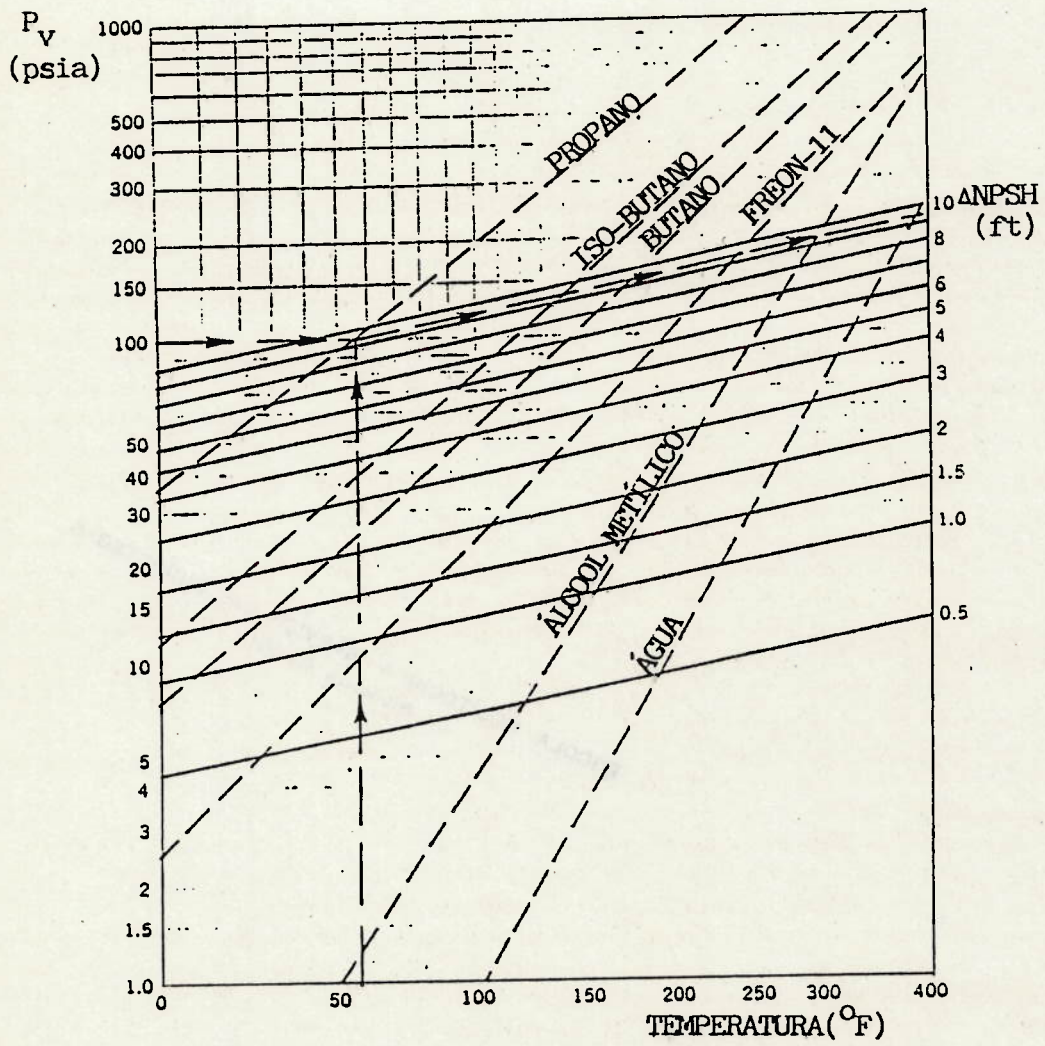


Figura 15. Correção do  $NPSH_r$  (HYDRAULIC INSTITUTE (1982))



### 3.3. EQUACOES PROPOSTAS POR FRUMAN E BEUZELIN

As equações propostas por FRUMAN; BEUZELIN (1992), equações (30) e (32), referem-se ao escoamento sobre uma placa plana rugosa sem gradiente de pressão.

Considerando o escoamento ao longo da pá do rotor semelhante ao escoamento sobre uma placa plana nas referidas condições, e sabendo que a formação de cavidades é um fenômeno local que ocorre na entradas das pás do rotor tem-se  $x = 1\text{cm}$  e  $L = 5\text{cm}$ . \*

Será utilizado para  $C_Q$  um valor de  $5,2 \times 10^{-3}$  e para  $\varepsilon$  um valor de  $1\text{mm}$ , que são os mesmos valores utilizados pelos autores acima.

Substituindo esses valores na equação (32) vem

$$C_f = 10^{-2}$$

E a equação (30), após rearranjada, fica

$$\Delta T = \left[ 1,04 + 2,194 \cdot (Pr - 1) \cdot Re_1^{-0,1} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda \cdot \rho_v}{C_{p1} \cdot \rho_l} \right] \quad (55)$$

Da mesma forma que na Teoria do Preenchimento será utilizada uma velocidade  $\omega$  de  $15\text{m/s}$  pelas mesmas vazões então apresentadas.

\* Vale ressaltar que um valor de rugosidade média de  $1\text{ mm}$  seria excessivamente grande para um rotor de bomba centrífuga, devido à elevada perda de carga provocada. Um rotor fundido pode apresentar um valor uma ordem de grandeza menor para a rugosidade média.

Vale ressaltar que, dos métodos utilizados, esse é o que seria menos propício para aplicação às bombas centrífugas, por tratar-se de placa plana e sem gradiente de pressão. Porém, sua utilização foi mantida para efeito de comparação com os resultados experimentais e demais métodos utilizados.

Os cálculos de  $\Delta T$  e  $\Delta NPSH$  encontram-se nas tabelas 8 a 12 do Anexo B para os fluidos em estudo.

### 3.4. UTILIZACAO DO METODO DE STEPANOFF

Baseado na correlação de dados experimentais para uma bomba à rotação de 3500 rpm operando com água, butano e Freon-11, e desprezando os dados que pareciam imprecisos ou não se adaptavam ao modelo sugerido pela maioria dos pontos, STEPANOFF (1964) propôs para o cálculo de  $\Delta NPSH$ , a seguinte equação:

$$\Delta NPSH = - \frac{64}{P_v \cdot B_1^{4/3}} \quad (\text{pé c.l.})^* \quad (56)$$

Onde

$$B_1 = \frac{Cp_1 \cdot T_{co} \cdot \rho_1^2}{\lambda^2 \cdot \rho_v^2 \cdot 778} \quad (57)$$

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido



Sendo  $B_1$  o Critério de Cavitação Térmica para uma redução de  $NPSH_d$  de 1 pé abaixo do ponto de cavitação incipiente e todas as grandezas em unidades do Sistema Britânico.  $P_v$  está expressa em pé de coluna de líquido.

Os cálculos com as equações (56) e (57), e a determinação de  $\Delta NPSH$  encontram-se nas tabelas 13 a 17 do Anexo C. Por serem as equações (56) e (57) de caráter experimental, as propriedades e grandezas foram utilizadas em unidades do Sistema Britânico, à exceção do resultado final de  $\Delta NPSH$ , para efeito de comparação com os outros métodos.

### 3.5. METODO DE RUGGERI E MOORE

O método de RUGGERI; MOORE (1969), para determinação de  $NPSH_r$ , descrito no item 2.3, será utilizado com o auxílio da tabela 18, visto que esse método necessita de valores medidos para servirem como referência.

LÍQUIDO	T <sub>co</sub> (K)	NPSH <sub>r</sub> (m)
ÁGUA	294	3,7
	394	3,4
	422	2,6
BUTANO	275	3,0
	286	2,7
	300	1,6
	306	1,1
FREON - 11	303	3,1
	322	2,6

Tabela 18 - Valores medidos de NPSH<sub>r</sub>  
(Ruggeri; moore (1969))

Como para o sódio e o hidrogênio não existem valores medidos de NPSH<sub>r</sub> na bibliografia conhecida, serão utilizados valores obtidos pelo método de STEPANOFF, tabelas 15 e 16, o qual tem proporcionado bons resultados quando esses são comparados com valores medidos.

Embora os propositores do método tenham sugerido um procedimento baseado em tentativas, procedimento esse já descrito no item 2.3, o mesmo pode ser evitado através do processo de cálculo utilizado.

O cálculo efetuado a seguir para a água ilustra o procedimento que também será seguido para os demais fluidos.

Segundo os autores, pelo menos um dos resultados obtidos por ensaio deve ser referente a um Efeito Termodinâmico mensurável.



Todos os valores da tabela 18 são relativos a uma mesma bomba a uma mesma rotação, de aproximadamente 3550 rpm. Para o sódio e o hidrogênio será considerada a mesma bomba à mesma rotação. Desse modo, os resultados obtidos são todos referentes à rotação de 3550 rpm. Os valores de  $NPSH_r$  da tabela 18 apresentam uma incerteza de 0,2m.

Nos cálculos a relação  $v_v / v_l$  será substituída por B.

### 3.5.1. CALCULOS PARA A AGUA

Com base nos dados apresentados na tabela 18 tem-se

$$NPSH_r = 3,4 \text{ m para a água a } 394 \text{ K}$$

$$NPSH_r = 2,6 \text{ m para a água a } 422 \text{ K}$$

A água a 394 K será o fluido de referência.

Substituindo os valores das propriedades físicas dos fluidos nas equações (11), (44) e (45) chega-se a

$$B = 0,989 \cdot B_{ref} \quad (58)$$

$$(\Delta P_v)_{ref} = 0,403 \cdot B_{ref} \quad (59)$$

$$\Delta P_v = 1,897 \cdot B \quad (60)$$

$$3,4 + (\Delta P_v)_{ref} = 2,6 + \Delta P_v \quad (61)$$

Substituindo as equações (58), (59) e (60) na equação (61) determina-se B

$$B = 0,552$$

Da equação (58)

$$B_{ref} = 0,558$$

Da equação (59)

$$(\Delta P_v)_{ref} = 0,225 \text{ m.c.l.*}$$

Substituindo os valores de referência disponíveis, nas equações (11), (44) e (45) resulta

$$B_{prev} = 0,558 \cdot \frac{1,72 \times 10^{-7}}{\alpha} \quad (62)$$

$$(\Delta P_v)_{prev} = 0,102 \cdot B_{prev} \cdot \left[ \frac{P_v}{P_1} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\lambda^2}{C_{p1} \cdot T_{\infty}} \right] \quad (63)$$

$$3,4 + 0,225 = NPSH_r + (\Delta P_v)_{prev} \quad (64)$$

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



Da tabela 18

$$\text{NPSH}_{A.F.} = \text{NPSH a } 294 \text{ K} = 3,7 \text{ m.c.l.}$$

Como

$$\Delta\text{NPSH} = \text{NPSH}_r - \text{NPSH}_{A.F.}$$

Resulta

$$\Delta\text{NPSH} = \text{NPSH}_r - 3,7 \quad (\text{m.c.l.}) \quad (65)$$

Os cálculos de  $\Delta\text{NPSH}$  em função da temperatura para a água estão na tabela 19 do Anexo D.

### 3.5.2. CALCULOS PARA O BUTANO

Com os dados da tabela 18

$$\text{NPSH}_r = 3,4 \text{ m para a água a } 394 \text{ K}$$

$$\text{NPSH}_r = 1,6 \text{ m para o butano a } 300 \text{ K}$$

Referência: água a 394 K

Valendo-se do mesmo procedimento do item anterior vem

$$B_{\text{ref}} = 0,406$$

$$(\Delta P_v)_{\text{ref}} = 0,163 \text{ m.c.l.}$$

$$B_{\text{prev}} = 0,406 \cdot \frac{1,72 \times 10^{-7}}{\alpha} \quad (66)$$

$$3,4 + 0,163 = \text{NPSH}_r + (\Delta P_v)_{\text{prev}} \quad (67)$$

Os resultados obtidos estão na tabela 20 do Anexo D, em função da temperatura.

### 3.5.3. CALCULOS PARA O FREON-11

Da tabela 18

$$\text{NPSH}_r = 3,4 \text{ m para a água a } 394 \text{ K}$$

$$\text{NPSH}_r = 3,1 \text{ m para o Freon-11 a } 303 \text{ K}$$

Referência: água a 394 K

Analogamente obtem-se

$$B_{\text{ref}} = 1,32$$

$$(\Delta P_v)_{\text{ref}} = 0,534 \text{ m.c.l.}$$

$$B_{\text{prev}} = 1,32 \cdot \frac{1,72 \times 10^{-7}}{\alpha} \quad (68)$$

$$3,4 + 0,534 = \text{NPSH}_r + (\Delta P_v)_{\text{prev}} \quad (69)$$

Os resultados encontram-se na tabela 21 do Anexo D.



## 3.5.4. CALCULOS PARA O SODIO

Da tabela 15

$$\Delta NPSH = - 0,246 \text{ m para } 1200 \text{ K}$$

$$\Delta NPSH = - 1,45 \text{ m para } 1400 \text{ K}$$

Pela equação (65)

$$NPSH_r = 3,45 \text{ m para o sódio a } 1200 \text{ K}$$

$$NPSH_r = 2,25 \text{ m para o sódio a } 1400 \text{ K}$$

Referência: sódio a 1200 K

Por processo análogo chega-se a

$$B_{ref} = 0,333$$

$$(\Delta P_v)_{ref} = 0,092 \text{ m.c.l.}$$

$$B_{prev} = 0,333 \cdot \frac{5,15 \times 10^{-5}}{\alpha} \quad (70)$$

$$3,45 + 0,092 = NPSH_r + (\Delta P_v)_{prev} \quad (71)$$

Os resultados encontram-se na tabela 22 do Anexo D.

## 3.5.5. CALCULOS PARA O HIDROGENIO

Da tabela 16

$$\Delta NPSH = -1,98 \text{ m a } 14 \text{ K}$$

$$\Delta NPSH = -3,51 \text{ m a } 15 \text{ K}$$

Pela equação (65)

$$NPSH_r = 1,72 \text{ m para o hidrogênio a } 14 \text{ K}$$

$$NPSH_r = 0,19 \text{ m para o hidrogênio a } 15 \text{ K}$$

Referência: hidrogênio a 14 K

Analogamente

$$B_{ref} = 1,68$$

$$(\Delta P_v)_{ref} = 1,25 \text{ m.c.l.}$$

$$B_{prev} = 1,68 \cdot \frac{1,51 \times 10^{-7}}{\alpha} \quad (72)$$

$$1,72 + 1,25 = NPSH_r + (\Delta P_v)_{prev} \quad (73)$$



Os resultados encontram-se na tabela 23 do Anexo D.

As figuras 16 a 20 mostram uma comparação da correção do  $NPSH_r$  entre os quatro métodos utilizados para cada fluido, em função da temperatura, para os seguintes valores de velocidade ou rotação:

Teoria do Preenchimento:  $\omega = 15$  m/s

Equação de FRUMAN; BEUZELIN:  $\omega = 15$  m/s

Método de RUGGERI; MOORE:  $N = 3550$  rpm

Método de STEPANOFF:  $N = 3500$  rpm

No apêndice III é apresentado um exemplo de cálculo de uma instalação típica de bombeamento.

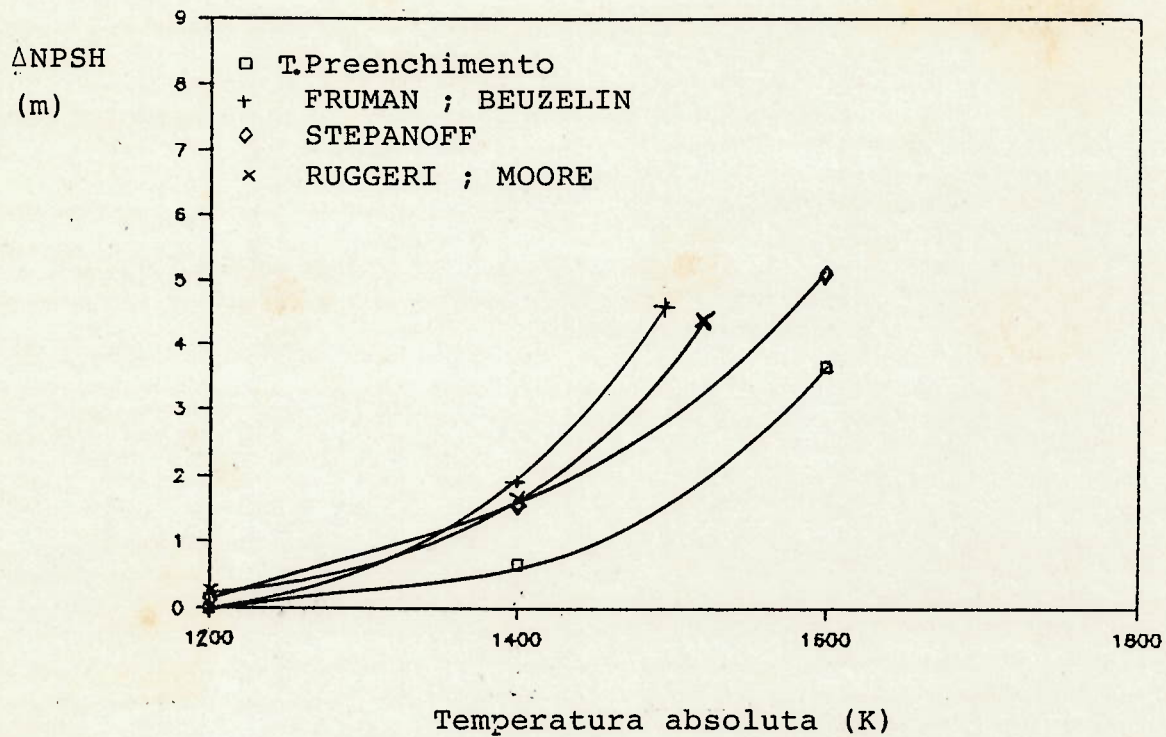


Figura 16. Correção do  $NPSH_r$  para o sódio: comparação entre os métodos utilizados.

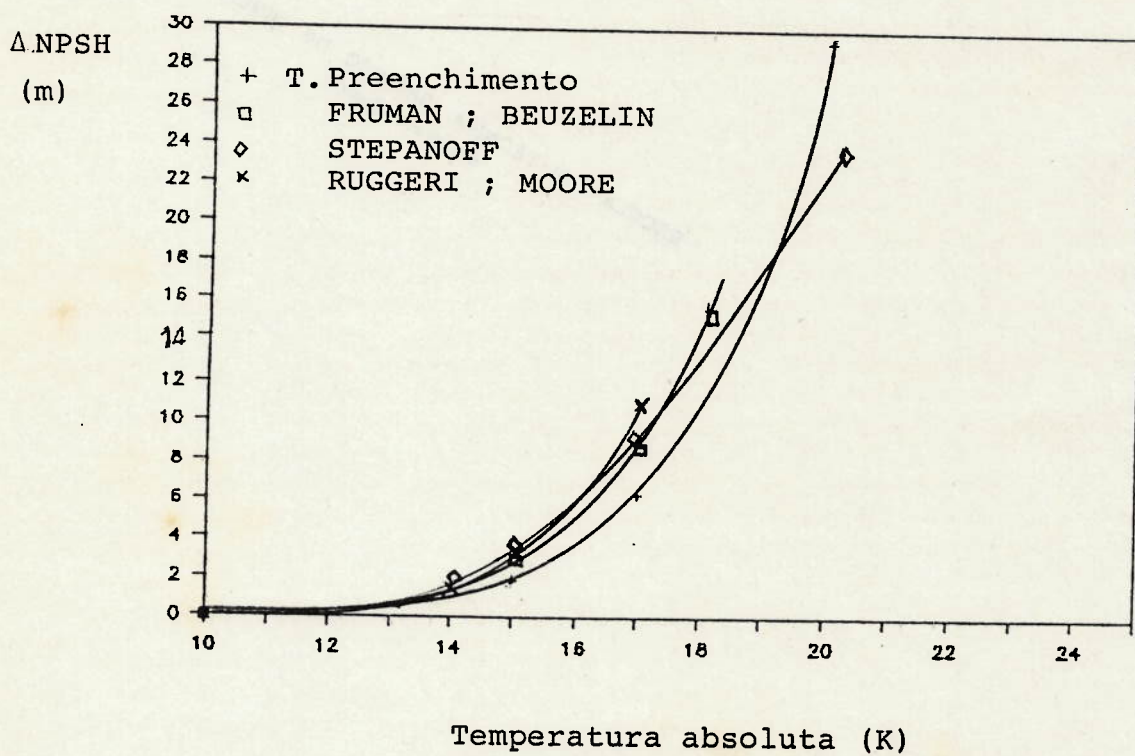


Figura 17. Correção do  $NPSH_r$  p/ o hidrogenio: comparação entre os métodos utilizados.



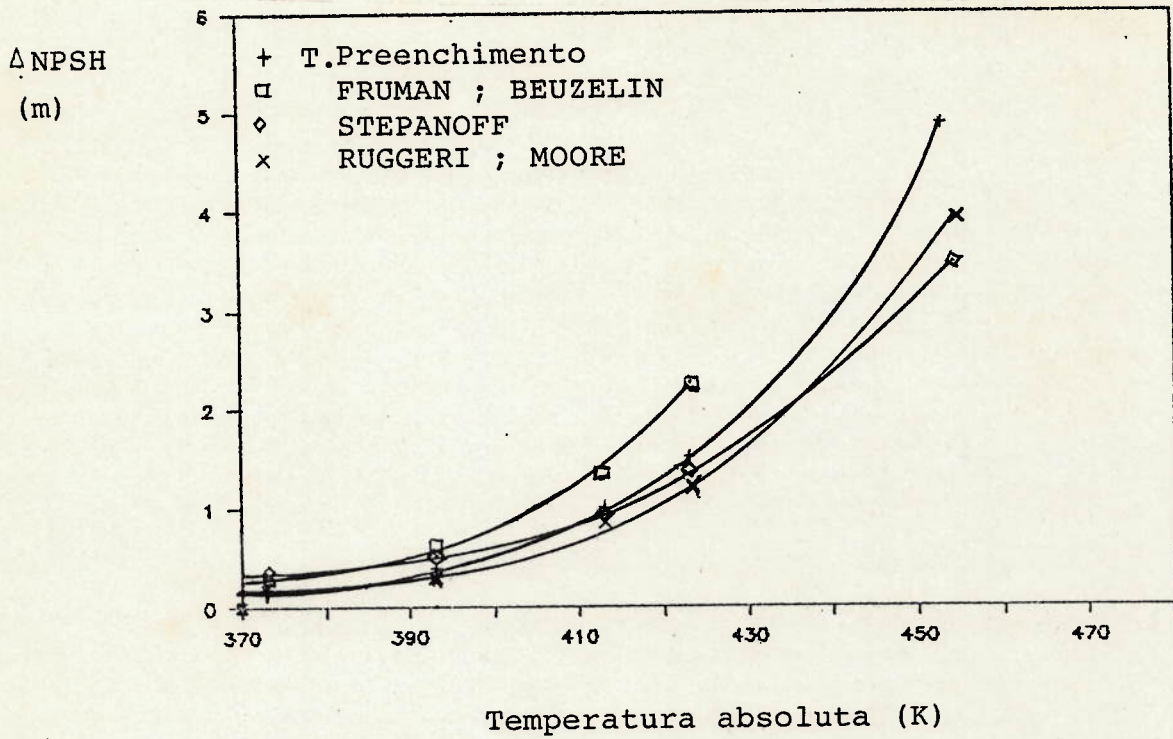


Figura 18 . Correção do  $NPSH_r$  para a água: comparação entre os métodos utilizados.

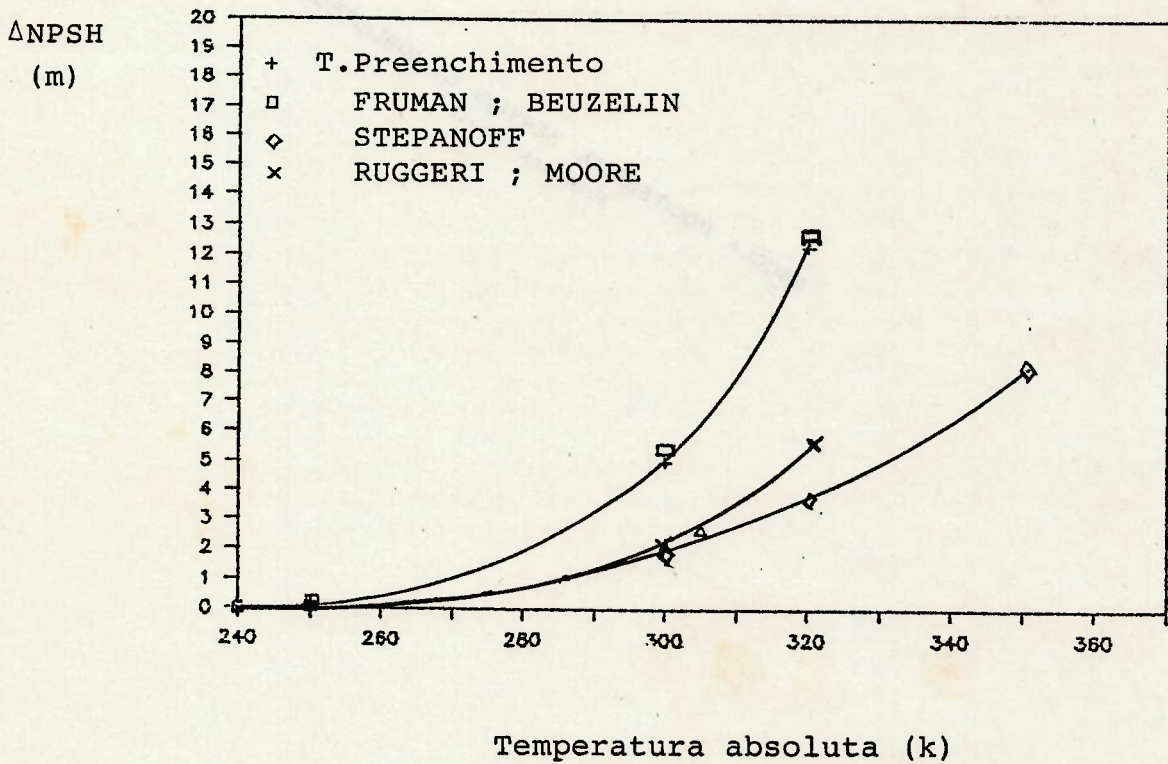


Figura 19. Correção do  $NPSH_r$  para o butano: comparação entre os métodos utilizados.

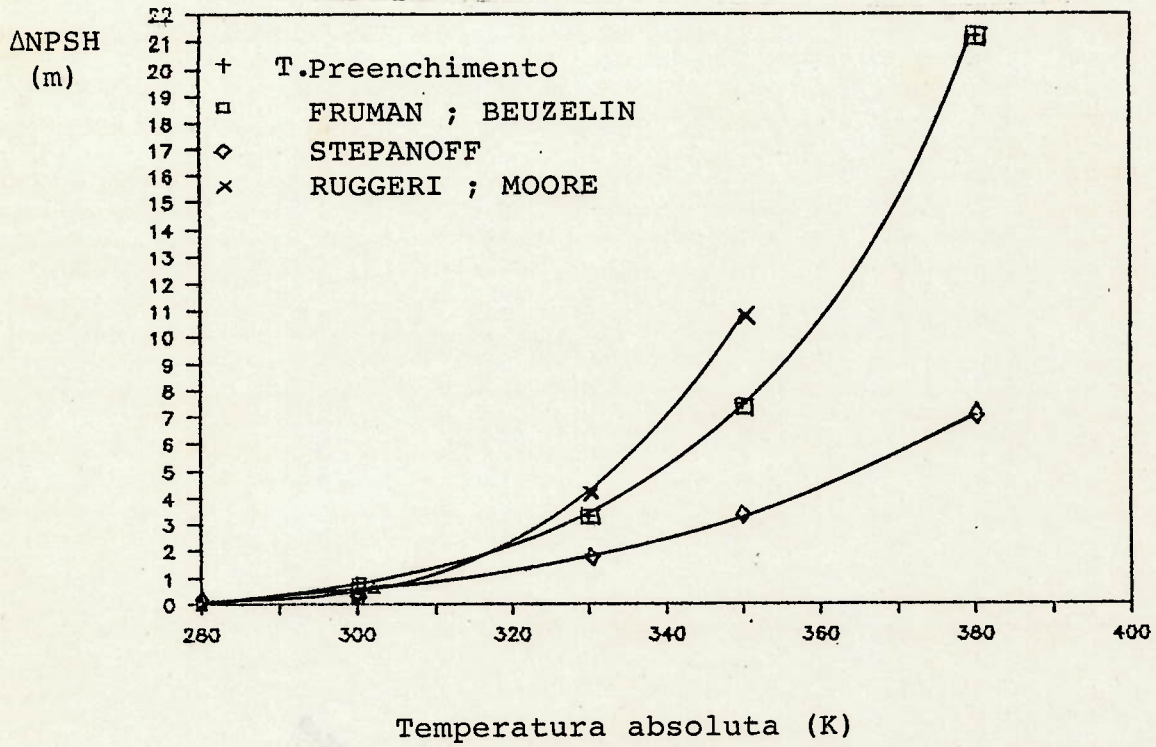


Figura 20 . Correção do  $NPSH_r$  para o Freon-11: comparação entre os métodos utilizados.



**CAPITULO 4**

**COMENTARIOS FINAIS**

#### 4.1. INFLUENCIA DAS PROPRIEDADES FISICAS

Como

$$p_v \ll p_l$$

Pode-se considerar

$$\frac{p_v}{p_l} \ll 1$$

E a equação (48) fica:

$$\Delta P_v = \frac{p_v \cdot \lambda}{T_{\infty}} \cdot \Delta T \quad (74)$$

Substituindo a equação (6) na equação (74) resulta:

$$\Delta P_v = \frac{B}{T_{\infty}} \cdot \frac{p_v^2 \cdot \lambda^2}{C_{p1} \cdot p_l} \quad (75)$$

Substituindo (75) em (52) e levando-se em conta a compatibilidade de unidades

$$\Delta NPSH = - B \cdot \left[ \frac{J}{g} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2 \cdot p_v^2}{T_{\infty} \cdot C_{p1} \cdot p_l} \right] \quad (76)$$



Em processo análogo, substituindo (29) em (74) e a equação resultante em (52) resulta

$$\Delta\text{NPSH} = - C_4 \cdot \left[ \frac{L}{D} \right]^k \cdot \text{Re}^1 \cdot \text{Fr}^m \cdot \text{Pr}^p \cdot \text{Pe} \cdot \left[ \frac{J}{g} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2 \cdot \rho v^2}{T_\infty \cdot C_{p1} \cdot \rho l^2} \right] \quad (77)$$

Da mesma forma, trabalhando com as equações (30), (74) e (52) chega-se a

$$\Delta\text{NPSH} = - 2 \cdot \left[ \frac{C_Q}{C_f} \right] \cdot \left[ 1 + 2,11 \cdot (\text{Pr} - 1) \cdot \text{Re}_1^{-0,1} \right] \cdot \left[ \frac{J}{g} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2 \cdot \rho v^2}{T_\infty \cdot C_{p1} \cdot \rho l^2} \right] \quad (78)$$

Levando-se sempre em conta a compatibilidade de unidades e substituindo a equação (44) na equação (52), tem-se

$$\Delta\text{NPSH} = - B_{\text{prev}} \cdot \left[ \frac{J}{g} \right] \cdot \left[ \frac{\lambda^2 \cdot \rho v^2}{T_\infty \cdot C_{p1} \cdot \rho l^2} \right] \quad (79)$$

Comparando as equações resultantes para o cálculo de NPSH para cada um dos métodos utilizados, ou seja, equações (76), (77), (78) e (79), verifica-se que o conjunto de propriedades físicas (o qual é função do fluido e da temperatura de trabalho):

$$\frac{\lambda^2 \cdot \rho v^2}{T_\infty \cdot C_{p1} \cdot \rho l^2}$$

é comum a todos os métodos e aparece sempre multiplicado pela relação  $J/g$  e por um adimensional ou uma relação entre adimensionais.

Foi verificado ao longo desse trabalho que  $\Delta NPSH$  é bastante sensível à variação de temperatura. O fato deve-se, em sua maior parte, ao conjunto de propriedades físicas referido acima, e em especial à relação

$$\left[ \frac{\rho v}{\rho_1} \right]^2$$

A qual aumenta acentuadamente com o aumento da temperatura, qualquer que seja o fluido estudado.



#### 4.2. CONCLUSOES

Comparando os métodos utilizados para correção do  $NPSH_r$  com os resultados experimentais de SPRAKER (1965), verifica-se que o método que mais se aproxima dos dados experimentais é o proposto por STEPANOFF (1964), talvez porque o método seja próprio às bombas centrífugas e resulta de dados experimentais.

A Teoria do Preenchimento representa o método mais consistente entre os analisados e os resultados obtidos são razoáveis, dentro do esperado, embora esta teoria sofra a influência de dados obtidos experimentalmente com venturis e ogivas.

Um fator de imprecisão, tanto no método original do fator B, como na Teoria do Preenchimento, é a necessidade de se manter a hipótese de equilíbrio térmico, o qual nunca ocorrerá na prática.

O método de RUGGERI; MOORE (1969) não permite o cálculo de  $\Delta NPSH$  diretamente, sendo necessário dispor do valor de  $NPSH_r$  da bomba para água fria, uma vez que chega-se somente ao valor de  $NPSH_r$  para o fluido e temperatura em estudo.

O método tem como finalidade principal o cálculo de B, o que constituía a grande dificuldade do método original do fator B.

Entretanto, esse método apresenta uma grande desvantagem: a substituição dos fluidos e/ou temperaturas utilizados na medição dos dois conjuntos de valores necessários (sendo um deles de referência), altera de forma significativa o resultado final de  $\Delta NPSH$ . Isso deve-se ao fato de que  $B_{prev}$  é diretamente proporcional ao produto:

$$B_{ref} \cdot \alpha_{ref} ,$$

o qual não se mantém constante na mudança de fluido e/ou temperatura.

A variação sofrida na soma,

$$NPSH_r + (\Delta P_v)_{ref}$$

deveria compensar a variação de  $B_{prev}$ , o que não acontece na prática.

Além disso, existe a desvantagem da necessidade de se ensaiar a bomba por duas vezes. Em virtude disso tudo, o ideal seria que os dois ensaios fossem realizados com o fluido com qual pretende-se trabalhar.

Segundo BAILEY; WIKES (1974), de acordo com seus próprios cálculos, a influência de  $\alpha$  nesse método é muito menor que a de  $B$ , de modo que a equação (11) não representaria um avanço significativo. Além disso, os expoentes de  $\alpha_{ref}/\alpha$  e  $N/N_{ref}$ , respectivamente 1,0 e 0,8, não teriam sido adequadamente escolhidos.



Embora os resultados obtidos pelo método de FRUMAN e BEUZELIN não tenham se afastado tanto dos demais métodos, quanto se poderia esperar, uma pequena alteração nos valores adotados para  $x$  e  $L$  pode levar a uma modificação razoável nos resultados finais, o que torna o método bastante impreciso para as aplicações pretendidas. Mesmo assim, o método foi mantido, a título de comparação, com os demais.

De uma maneira geral, os resultados obtidos com os métodos aplicados mostraram-se próximos dos valores obtidos experimentalmente por SPRAKER (1965) e o HYDRAULIC INSTITUTE (1982).

A exceção do butano e do Freon-11, os métodos estudados apresentaram resultados próximos entre si. Esse fato deve-se ao forte Efeito Termodinâmico registrado pelo butano e o Freon-11 em relação a outros líquidos, conforme pode ser verificado na figura 14.

Os métodos conhecidos aplicam-se em princípio somente a líquidos puros. No caso de uma mistura de dois ou mais líquidos, espera-se que cada componente contribua com uma fração de seu  $\Delta NPSH$  individual igual à sua fração em peso na mistura. Não se justifica a utilização do  $\Delta NPSH$  unicamente do componente mais leve conforme sugerido por STEPANOFF (1964), porque a uma determinada pressão vários componentes podem existir, seja como vapor ou seja como líquido, a uma temperatura intermediária entre o maior e o menor ponto de ebulição.

Uma sequência natural desse trabalho seria a medição de valores de  $NPSH_r$  para diversos fluidos a várias temperaturas, para comparação com os valores calculados.

ANEXO A

CALCULO DA CORREÇÃO DO  $NPSH_r$   
(TEORIA DO PREENCHIMENTO)



$T_{co}$ (K)	373	393	413	423	453	Equa- ção	
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	4,22	4,24	4,29	4,31	4,41	---	
$K$ (w/m ° C)	0,680	0,687	0,688	0,687	0,677	---	
$\lambda$ (KJ/Kg)	2257	2203	2144	2114	2013	---	
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,60	1,10	1,94	2,52	5,11	---	
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	958	943	926	916	887	---	
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$2,79 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,81 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-4}$	---	
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,91 \times 10^{-7}$	$2,45 \times 10^{-7}$	$2,12 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	---	
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	(22)	
$P_r$	1,73	1,42	1,23	1,14	0,97	(54)	
$\Delta T$ (° C)	$w =$ 1 m/s	0,094	0,144	0,219	0,265	0,455	(53)
	$w =$ 15m/s	0,364	0,558	0,848	1,03	1,76	
$\Delta P_v$ (KPa)	$w =$ 1 m/s	0,341	0,889	2,21	3,35	10,4	(48)
	$w =$ 15m/s	1,32	3,44	8,56	13,0	40,3	
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	$w =$ 1 m/s	-0,036	-0,096	-0,24	-0,37	-1,20	(52)
	$w =$ 15m/s	-0,14	-0,37	-0,94	-1,45	-4,63	

Tabela 3 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para a água.  
(Teoria do preenchimento)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{\infty}$	250	300	320	350	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg $^{\circ}$ C)	2,19	2,44	2,58	2,84	----
$K$ (w/m $^{\circ}$ C)	0,136	0,116	0,109	0,097	----
$\lambda$ (KJ/Kg)	404	360	338	299	----
$\rho_v$ (Kg/m $^3$ )	1,12	6,52	11,3	23,4	----
$\rho_l$ (Kg/m $^3$ )	625	571	546	506	----
$\mu$ (Ns/m $^2$ )	$2,55 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,34 \times 10^{-4}$	$0,97 \times 10^{-4}$	----
$\nu$ (m $^2$ /s)	$4,08 \times 10^{-7}$	$2,84 \times 10^{-7}$	$2,45 \times 10^{-7}$	$1,92 \times 10^{-7}$	----
$\alpha$ (m $^2$ /s)	$9,94 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-8}$	$6,75 \times 10^{-8}$	(22)
$P_r$	4,10	3,41	3,17	2,84	(54)
$\Delta T$ ( $^{\circ}$ C)	$w =$ 1 m/s	0,205	0,911	1,39	(53)
	$w =$ 15m/s	0,794	3,53	5,38	
$\Delta P_v$ (KPa)	$w =$ 1 m/s	0,372	7,21	16,9	(48)
	$w =$ 15m/s	1,44	27,9	65,5	
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	$w =$ 1 m/s	-0,061	-1,29	-3,16	(52)
	$w =$ 15m/s	-0,235	-4,98	-12,2	

Tabela 4 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o butano.  
(Teoria do preenchimento)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



$T_{\infty}$ (K)	1200	1400	1600	1800	Equa- ção	
$C_{p1}$ (KJ/Kg <sup>o</sup> C)	1,29	1,37	1,47	1,57	---	
$K$ (w/m °C)	48,4	39,5	30,6	21,7	---	
$\lambda$ (KJ/Kg)	3832	3633	3400	3130	---	
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,389	1,45	3,86	8,47	---	
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	729	681	633	584	---	
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$13,9 \times 10^{-3}$	$11,4 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$	---	
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$1,42 \times 10^{-5}$	---	
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$5,15 \times 10^{-5}$	$4,23 \times 10^{-5}$	$3,29 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	(22)	
$P_r$	0,371	0,395	0,462	0,599	(54)	
$\Delta T$ (°C)	$w =$ 1 m/s	0,061	0,237	0,694	1,85	(53)
	$w =$ 15m/s	0,236	0,918	2,69	7,17	
$\Delta P_v$ (KPa)	$w =$ 1 m/s	0,076	0,893	5,72	27,6	(48)
	$w =$ 15m/s	0,294	3,46	22,2	107	
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	$w =$ 1 m/s	-0,011	-0,134	-0,921	-4,82	(52)
	$w =$ 15m/s	-0,043	-0,519	-3,57	-18,7	

Tabela 5 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o sódio.  
(Teoria do preenchimento)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{co}$ (K)	15	17	20	22	Equa- ção	
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	6,91	7,88	9,45	10,8	---	
$K$ (w/m ° C)	0,083	0,098	0,098	0,101	---	
$\lambda$ (KJ/Kg)	452	453	446	435	---	
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,223	0,492	1,25	2,07	---	
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	76,0	74,2	71,1	68,7	---	
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$2,18 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$	---	
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,87 \times 10^{-7}$	$2,36 \times 10^{-7}$	$1,90 \times 10^{-7}$	$1,69 \times 10^{-7}$	---	
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,58 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,46 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-7}$	(22)	
$P_r$	1,82	1,40	1,30	1,24	(54)	
$\Delta T$ (° C)	$w =$ 1 m/s	0,057	0,090	0,187	0,265	(53)
	$w =$ 15m/s	0,221	0,349	0,724	1,03	
$\Delta P_v$ (KPa)	$w =$ 1 m/s	0,384	1,19	5,31	11,2	(48)
	$w =$ 15m/s	1,49	4,61	20,6	43,4	
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	$w =$ 1 m/s	-0,515	-1,63	-7,61	-16,6	(52)
	$w =$ 15m/s	-2,00	-6,33	-29,5	-64,4	

Tabela 6 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o hidrogênio.  
(Teoria do preenchimento)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



$T_{co}$ (K)	280	300	330	350	380	Equa- ção	
$C_{p1}$ (KJ/Kg <sup>o</sup> C)	0,870	0,887	0,917	0,939	0,975	---	
$K$ (w/m <sup>o</sup> C)	0,093	0,087	0,079	0,073	0,065	---	
$\lambda$ (KJ/Kg)	188	181	168	159	143	---	
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	3,24	6,49	15,5	25,5	49,8	---	
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1518	1472	1397	1344	1254	---	
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$5,04 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$2,76 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-4}$	---	
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$3,32 \times 10^{-7}$	$2,81 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-7}$	$2,05 \times 10^{-7}$	$1,83 \times 10^{-7}$	---	
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$7,04 \times 10^{-8}$	$6,66 \times 10^{-8}$	$6,17 \times 10^{-8}$	$5,78 \times 10^{-8}$	$5,32 \times 10^{-8}$	(22)	
$P_r$	4,72	4,22	3,71	3,55	3,44	(54)	
$\Delta T$ ( <sup>o</sup> C)	$w =$ 1 m/s	0,334	0,597	1,23	1,88	3,35	(53)
	$w =$ 15m/s	1,29	2,31	4,76	7,28	13,0	
$\Delta P_v$ (KPa)	$w =$ 1 m/s	0,729	2,35	9,78	22,2	65,3	(48)
	$w =$ 15m/s	2,82	9,10	37,9	86,0	253	
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	$w =$ 1 m/s	-0,049	-0,163	-0,713	-1,68	-5,31	(52)
	$w =$ 15m/s	-0,190	-0,631	-2,76	-6,51	-20,6	

Tabela 7 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o Freon-11.  
(Teoria do preenchimento)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

ANEXO B

CALCULO DA CORREÇÃO DO  $NPSH_r$   
(EQUAÇÃO DE FRUMAN E BEUZELIN)



$T_{\infty}$ (K)	373	393	413	423	453	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg <sup>o</sup> C)	4,22	4,24	4,29	4,31	4,41	---
$K$ (w/m <sup>o</sup> C)	0,680	0,687	0,688	0,687	0,677	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	2257	2203	2144	2114	2013	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,60	1,10	1,94	2,52	5,11	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	958	943	926	916	887	---
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$2,79 \times 10^{-4}$	$2,31 \times 10^{-4}$	$1,96 \times 10^{-4}$	$1,81 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-4}$	---
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,91 \times 10^{-7}$	$2,45 \times 10^{-7}$	$2,12 \times 10^{-7}$	$1,98 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	(22)
$P_r$	1,73	1,42	1,23	1,14	0,97	(54)
$Re_l^{-0,1}$	0,228	0,225	0,221	0,220	0,216	(31)
$\Delta T$ ( <sup>o</sup> C)	0,472	0,757	1,21	1,50	2,71	(55)
$\Delta P_v$ (KPa)	1,72	4,67	12,2	18,9	61,9	(48)
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	-0,183	-0,505	-1,34	-2,10	-7,11	(52)

Tabela 8 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para a água (Equação de FRUMAN; BEUZELIN).

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{co}$	250	300	320	350	Equação
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	2,19	2,44	2,58	2,84	----
$K$ (w/m ° C)	0,136	0,116	0,109	0,097	----
$\lambda$ (KJ/Kg)	404	360	338	299	----
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1,12	6,52	11,3	23,4	----
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	625	571	546	506	----
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$2,55 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,34 \times 10^{-4}$	$0,97 \times 10^{-4}$	----
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$4,08 \times 10^{-7}$	$2,84 \times 10^{-7}$	$2,45 \times 10^{-7}$	$1,92 \times 10^{-7}$	----
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$9,94 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-8}$	$6,75 \times 10^{-8}$	(22)
$P_r$	4,10	3,41	3,17	2,84	(54)
$Re_l^{-0,1}$	0,236	0,228	0,225	0,219	(31)
$\Delta T$ (°C)	0,877	3,78	5,72	9,35	(55)
$\Delta P_v$ (KPa)	1,59	29,9	69,7	196	(48)
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	-0,259	-5,34	-13,0	-39,5	(52)

Tabela 9 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o butano (Equação de FRUMAN; BEUZELIN)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



$T_{\infty}$ (K)	1200	1400	1600	1800	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg <sup>o</sup> C)	1,29	1,37	1,47	1,57	---
$K$ (w/m °C)	48,4	39,5	30,6	21,7	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	3832	3633	3400	3130	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,389	1,45	3,86	8,47	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	729	681	633	584	---
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$13,9 \times 10^{-3}$	$11,4 \times 10^{-3}$	$9,6 \times 10^{-3}$	$8,3 \times 10^{-3}$	---
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,91 \times 10^{-5}$	$1,67 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$1,42 \times 10^{-5}$	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$5,15 \times 10^{-5}$	$4,23 \times 10^{-5}$	$3,29 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	(22)
$P_r$	0,371	0,395	0,462	0,599	(54)
$Re_l^{-0,1}$	0,347	0,343	0,339	0,337	(31)
$\Delta T$ (°C)	0,892	3,31	9,02	21,5	(55)
$\Delta P_v$ (KPa)	1,11	12,5	74,4	321	(48)
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	-0,155	-1,87	-12,0	-56,0	(52)

Tabela 10 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o sódio (Equação de FRUMAN; BEUZELIN)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{\infty}$ (K)	15	17	20	22	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg°C)	6,91	7,88	9,45	10,8	---
$K$ (w/m °C)	0,083	0,098	0,098	0,101	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	452	453	446	435	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,223	0,492	1,25	2,07	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	76,0	74,2	71,1	68,7	---
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$2,18 \times 10^{-5}$	$1,75 \times 10^{-5}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$	---
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$2,87 \times 10^{-7}$	$2,36 \times 10^{-7}$	$1,90 \times 10^{-7}$	$1,69 \times 10^{-7}$	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,58 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,46 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-7}$	(22)
$P_r$	1,82	1,40	1,30	1,24	(54)
$Re_l^{-0,1}$	0,228	0,224	0,219	0,216	(31)
$\Delta T$ (°C)	0,278	0,472	0,979	1,39	(56)
$\Delta P_v$ (KPa)	1,87	6,23	27,8	58,7	(48)
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	-2,51	-8,56	-39,9	-87,1	(52)

Tabela 11 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o hidrogênio  
(Equação de FRUMAN; BEUZELIN)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



$T_{\infty}$ (K)	280	300	330	350	380	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg <sup>o</sup> C)	0,870	0,887	0,917	0,939	0,975	---
$K$ (w/m °C)	0,093	0,087	0,079	0,073	0,065	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	188	181	168	159	143	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	3,24	6,49	15,5	25,5	49,8	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1518	1472	1397	1344	1254	---
$\mu$ (Ns/m <sup>2</sup> )	$5,04 \times 10^{-4}$	$4,13 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$2,76 \times 10^{-4}$	$2,29 \times 10^{-4}$	---
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$3,32 \times 10^{-7}$	$2,81 \times 10^{-7}$	$2,29 \times 10^{-7}$	$2,05 \times 10^{-7}$	$1,83 \times 10^{-7}$	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$7,04 \times 10^{-8}$	$6,66 \times 10^{-8}$	$6,17 \times 10^{-8}$	$5,78 \times 10^{-8}$	$5,32 \times 10^{-8}$	(22)
$P_r$	4,72	4,22	3,71	3,55	3,44	(54)
$Re_l^{-0,1}$	0,232	0,228	0,223	0,221	0,218	(31)
$\Delta T$ (°C)	1,35	2,38	4,81	7,32	12,9	(55)
$\Delta P_v$ (KPa)	2,94	9,36	38,4	86,4	252	(48)
$\Delta NPSH^*$ (m.c.l.)**	-0,197	-0,648	-2,80	-6,55	-20,5	(52)

Tabela 12 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o Freon-11 (Equação de FRUMAN; BEUZELIN)

\* Vide nota no final das tabelas

\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

ANEXO C

CALCULO DA CORREÇÃO DO  $NPSH_r$   
(METODO DE STEPANOFF)



T <sub>co</sub>	(K)	373	393	413	423	453	Equa- ção
	(°R)	671,4	707,4	743,4	761,4	815,4	
P <sub>v</sub> (pé c.l.)*		35,4	70,7	131	174	378	---
C <sub>p1</sub> (Btu/lb °F)		1,008	1,012	1,024	1,029	1,053	---
λ (BTu/lb)		971	947	922	909	866	---
ρ <sub>v</sub> (lb/pé <sup>3</sup> )		3,75x10 <sup>-4</sup>	6,87x10 <sup>-4</sup>	1,21x10 <sup>-3</sup>	1,57x10 <sup>-3</sup>	3,19x10 <sup>-3</sup>	---
ρ <sub>l</sub> (lb/pé <sup>3</sup> )		0,598	0,589	0,578	0,572	0,554	---
B <sub>1</sub>		2,35	0,754	0,262	0,161	4,43x10 <sup>-2</sup>	(57)
ΔNPSH** (m.c.l.)***		-0,176	-0,402	-0,888	-1,28	-3,29	(56)

Tabela 13 - Cálculo do ΔNPSH para a água (Método de STEPANOFF)

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{co}$	(K)	250	300	320	350	Equa- ção
	(°R)	450	540	576	630	
$P_v$ (pé c.l.)*		21	151	280	625	---
$C_{p1}$ (Btu/lb °F)		0,523	0,583	0,616	0,678	---
$\lambda$ (BTu/lb)		174	155	145	129	---
$P_v$ (lb/pé <sup>3</sup> )		$6,99 \times 10^{-4}$	$4,07 \times 10^{-3}$	$7,06 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-2}$	---
$P_l$ (lb/pé <sup>3</sup> )		0,390	0,357	0,341	0,316	---
$B_1$		3,11	0,129	$5,06 \times 10^{-2}$	$1,54 \times 10^{-2}$	(57)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)***		-0,205	-1,98	-3,72	-8,15	(56)

Tabela 14 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o butano (Método de STEPANOFF)

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



T <sub>co</sub>	(K)	1200	1400	1600	1800	Equa- ção
	(°R)	2160	2520	2880	3240	
P <sub>v</sub> (pé c.l.)*		69	307	952	2343	---
C <sub>p1</sub> (Btu/lb °F)		0,308	0,327	0,351	0,375	---
λ (BTu/lb)		1648	1563	1462	1346	---
P <sub>v</sub> (lb/pé <sup>3</sup> )		2,43x10 <sup>-4</sup>	9,05x10 <sup>-4</sup>	2,41x10 <sup>-3</sup>	5,29x10 <sup>-3</sup>	---
ρ <sub>l</sub> (lb/pé <sup>3</sup> )		0,455	0,425	0,395	0,365	---
B <sub>1</sub>		1,11	0,096	0,016	4,10x10 <sup>-3</sup>	(57)
ΔNPSH** (m.c.l.)***		-0,246	-1,45	-5,08	-12,7	(56)

Tabela 15 - Cálculo do ΔNPSH para o sódio (Método de STEPANOFF)

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

$T_{\infty}$	(K)	14	15	17	20	22	Equa- ção
	(°R)	25,2	27	30,6	36	39,6	
$P_v$ (pé c.l.)*		32,2	55,9	142	424	772	----
$C_{p1}$ (Btu/lb °F)		1,54	1,65	1,88	2,26	2,58	----
$\lambda$ (BTu/lb)		193	194	195	192	187	----
$\rho_v$ (lb/pé <sup>3</sup> )		$8,67 \times 10^{-5}$	$1,39 \times 10^{-4}$	$3,07 \times 10^{-4}$	$7,81 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-3}$	----
$\rho_l$ (lb/pé <sup>3</sup> )		$4,80 \times 10^{-2}$	$4,75 \times 10^{-2}$	$4,63 \times 10^{-2}$	$4,44 \times 10^{-2}$	$4,29 \times 10^{-2}$	----
$B_1$		0,411	0,177	0,044	$9,2 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-3}$	(57)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)***		-1,98	-3,51	-8,84	-23,9	-38,5	(56)

Tabela 16 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o hidrogênio (Método de STEPANOFF)

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido



$T_{co}$	(K)	280	300	330	350	380	Equa- ção
	(°R)	504	540	594	630	684	
$P_v$ (pé c.l.)*		11,8	25,8	68,9	121	253	---
$C_{p1}$ (Btu/lb °F)		0,208	0,212	0,219	0,224	0,233	---
$\lambda$ (BTu/lb)		80,9	77,8	72,3	68,4	61,5	---
$\rho_v$ (lb/pé <sup>3</sup> )		$2,02 \times 10^{-3}$	$4,05 \times 10^{-3}$	$9,68 \times 10^{-3}$	$1,59 \times 10^{-2}$	$3,11 \times 10^{-2}$	---
$\rho_l$ (lb/pé <sup>3</sup> )		0,948	0,919	0,872	0,839	0,783	---
$B_1$		4,52	1,25	0,260	0,108	$3,43 \times 10^{-2}$	(57)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)***		-0,221	-0,561	-1,71	-3,13	-6,92	(56)

Tabela 17 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o Freon-11 (Método de STEPANOFF)

\* pé c.l. = pé de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

ANEXO D

CALCULO DA CORREÇÃO DO  $NPSH_r$   
(METODO DE RUGGERI E MOORE)



$T_{\infty}$ (K)	373	393	413	423	453	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	4,22	4,24	4,29	4,31	4,41	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	2257	2203	2144	2114	2013	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,60	1,10	1,94	2,52	5,11	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	958	943	926	916	887	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^{-7}$	$1,73 \times 10^{-7}$	(22)
$B_{prev}$	0,571	----	0,555	----	0,555	(62)
$\Delta P_v(Prev)$ (m.c.l.)*	$7,40 \times 10^{-2}$	----	0,644	----	3,81	(63)
$NPSH_r$ (m.c.l.)*	3,55	3,4 ***	2,98	2,6 ***	-0,185	(64)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)*	-0,15	-0,3	-0,719	-1,1	-3,88	(65)

Tabela 19 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para a água (Método de RUGGERI e MOORE).

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* Valor medido. Vide tabela 18, pg. 40

$T_{co}$ (K)	250	300	320	350	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	2,19	2,44	2,58	2,84	----
$\lambda$ (KJ/Kg)	404	360	338	299	----
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1,12	6,52	11,3	23,4	----
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	625	571	546	506	----
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$9,94 \times 10^{-8}$	$8,33 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-8}$	$6,75 \times 10^{-8}$	(22)
$B_{prev}$	0,703	----	0,902	1,03	(66)
$\Delta P_v(Prev)$ (m.c.l.)*	$6,86 \times 10^{-2}$	----	5,45	20,3	(64)
$NPSH_r$ (m.c.l.)*	3,49	1,6***	-1,89	-16,7	(67)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)*	-0,206	-2,1	-5,59	-20,4	(65)

Tabela 20 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o butano (Método de RUGGERI e MOORE)

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* Valor medido. Vide tabela 18, pg. 40



$T_{\infty}$ (K)	280	300	330	350	380	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg° C)	0,870	0,887	0,917	0,939	0,975	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	188	181	168	159	143	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	3,24	6,49	15,5	25,5	49,8	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1518	1472	1397	1344	1254	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$7,04 \times 10^{-8}$	$6,66 \times 10^{-8}$	$6,17 \times 10^{-8}$	$5,78 \times 10^{-8}$	$5,32 \times 10^{-8}$	(22)
$B_{prev}$	3,22	----	3,68	3,93	4,27	(68)
$\Delta P_v(Prev)$ (m.c.l.)*	0,217	----	4,31	11,1	37,9	(63)
$NPSH_r$ (m.c.l.)*	3,7	3,1 ***	-0,375	-7,16	-34,0	(69)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)*	0	-0,6	-4,08	-10,9	-37,7	(65)

Tabela 21 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o Freon-11 (Método de RUGGERI e MOORE)

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* Valor medido. Vide tabela 18, pg. 40.

$T_{co}$ (K)	1200	1400	1600	1800	Equa- ção
$C_{p1}$ (KJ/Kg°C)	1,29	1,37	1,47	1,57	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	3832	3633	3400	3130	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,389	1,45	3,86	8,47	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	729	681	633	584	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$5,15 \times 10^{-5}$	$4,23 \times 10^{-5}$	$3,29 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	(22)
$B_{prev}$	-----	----	0,521	0,724	(70)
$\Delta P_v(\text{prev})$ (m.c.l.)*	-----	----	9,72	53,8	(63)
$NPSH_r$ (m.c.l.)*	3,45 ***	2,25***	-6,18	-50,3	(71)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)*	-0,25	-1,45	-9,88	-54,0	(65)

Tabela 22 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o sódio (Método de RUGGERI e MOORE)

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* Valor obtido a partir do método de Stepanoff



$T_{co}$ (K)	14	15	17	20	Equa- ção
$Cp_l$ (KJ/Kg° C)	6,47	6,91	7,88	9,45	---
$K$ (w/m ° C)	0,075	0,083	0,098	0,098	---
$\lambda$ (KJ/Kg)	450	452	453	446	---
$\rho_v$ (Kg/m <sup>3</sup> )	0,139	0,223	0,492	1,25	---
$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	76,9	76,0	74,2	71,7	---
$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	$1,51 \times 10^{-7}$	$1,58 \times 10^{-7}$	$1,68 \times 10^{-7}$	$1,46 \times 10^{-7}$	(22)
$B_{prev}$	-----	----	1,51	1,74	(72)
$\Delta P_v(Prev)$ (m.c.l.)*	-----	----	10,4	57,7	(63)
$NPSH_r$ (m.c.l.)*	1,72***	0,19 ***	-7,40	-54,7	(73)
$\Delta NPSH^{**}$ (m.c.l.)*	-1,98	-3,51	-11,1	-58,4	(65)

Tabela 23 - Cálculo do  $\Delta NPSH$  para o hidrogênio  
(Método de RUGGERI e MOORE)

\* m.c.l. = metro de coluna de líquido

\*\* Vide nota no final das tabelas

\*\*\* Valor obtido a partir do método de Stepanoff

Nota: um valor resultante de  $NPSH_r$  negativo, significa que a carga total absoluta na entrada do flange de sucção da bomba será menor que a pressão de vapor à temperatura  $T_{\infty}$ . Esse fato provavelmente provocará uma vaporização do líquido, o que incapacitaria a bomba de continuar operando.

De acordo com a equação da definição de  $NPSH_r$  abaixo, o valor negativo limite para  $NPSH_r$  será sempre

$$NPSH_r \cong \frac{V_e^2}{2 \cdot g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Ou seja, pressão absoluta total igual a zero na entrada da bomba

$$NPSH_r = \frac{P_e'}{\gamma} + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2 \cdot g} - \frac{P_v}{\gamma}$$



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABRAMOWITZ M.; STEGUN, I. A.. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc. New York. 1965.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE), 1985. Fundamentals, SI Edition.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). NBR 10462. Bomba Centrífuga Baval. Ensaio de Cavitação. Setembro, 1988.
- BAILEY, A. B.; WYKES, M. E. P.. Thermodynamic Aspects of Cavitation: A Research Project. Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Publications. London, England. 1974. pp. 321-328.
- BILLET, M. L.; HOLL, J. W.; WEIR, D. S.. Correlations of Thermodynamic Effects for Developed Cavitation. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. December, 1981, pp. 534-542.
- BONNIN, J.. Incipient Cavitation In Liquids Other Than Cold Water. ASME Cavitation Forum. 1971. pp. 14-16.
- \_\_\_\_\_. Influence de la Température sur le Début de Cavitation dans L'Eau. Hydrotechnique des Liquides Industriels. Question I. Rapport 1. Société Hydrotechnique de France. XIèmes journées de L'hydraulique. Paris, France. 1972.
- \_\_\_\_\_. Thermodynamic Effects In Cavitation. Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Publications. London, England. 1974. pp. 355-362.
- FRUMAN, D. H.; BEUZELIN, F.. Effets Thermiques dans la Cavitation des Fluides Cryogeniques. Société Hydrotechnique de France. Colloque D'hydrotechnique. 2eme Journées (Cavitation). Aspects Fondamentaux de la Cavitation. Paris, France. 1992.
- FUJIKAWA, S; AKAMATSU, T.. On the Mechanisms of Cavitation Bubble Collapse. Proceedings of the IAHR - Symposium., Tokio, Japan. 1980.
- GARCIA, R.; HAMMITT, F. G.. Cavitation Damage and Correlations with Material and Fluid Properties. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. December, 1967. pp. 753-763.
- GELDER, T. F.; RUGGERI, R. S.; MOORE, R. D.. Cavitation Similarity Considerations Based on Measured Pressure and Temperature Depressions in Cavitated Regions of Freon 114. NASA Technical Note TN D-3509. Lewis Research Center. July, 1966.
- HAMMITT, F. G.. Cavitation and Multiphase Flow Phenomena. McGraw-Hill International Book Company. Advanced Book Program. 1980.



- HOLL, J.W.; WISLICENUS, G. F.. Scale Effects on Cavitation. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. September, 1961. pp. 385-398.
- \_\_\_\_.; BILLET, M. L.; WEIR, D. S.. Thermodynamic Effects on Developed Cavitation. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. December, 1975. pp. 507-514.
- HYDRAULIC INSTITUTE STANDARDS for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps. 14th Edition. 1982.
- KREITH, F.. Princípios da Transmissão de Calor. 3a. Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. 1977.
- PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK. 6th. Edition. McGraw-Hill Book Company, 1984.
- PLESSET, M.S.. The Dynamics of Cavitation Bubbles. Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics. September, 1949. pp. 277-282.
- RUGGERI, R. S.; MOORE, R. D.. Method for Prediction of Pump Cavitation Performance for Various Liquids, Liquid Temperatures, and Rotative Speeds. NASA Technical Note TND-5292. Lewis Research Center. June, 1969.
- SALEMANN, V.. Cavitation and NPSH Requirements of Various Liquids. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. June, 1959. pp. 167-180.
- SPRAKER, W. A.. The Effects of Fluid Properties on Cavitation in Centrifugal Pumps. Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Power. July, 1965. pp. 309-318.
- STAHL, W. A.; STEPANOFF, A. J.. Thermodynamic Aspects of Cavitation in Centrifugal Pumps. Transactions of the ASME. November, 1956. pp. 1691-1693.
- STEPANOFF, A. J.. Cavitation in Centrifugal Pumps with Liquids Other than Water. Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Power. January, 1961. pp. 79-90.
- \_\_\_\_. Cavitation Properties of Liquids. Transactions of the ASME. Journal of Engineering for Power. April, 1964. pp. 195-200.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 2a. Edição. Editora Edgard Blucher Ltda. 1976.

**BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA**



BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10384. Bomba Centrífuga Naval. Ensaio de Desempenho. Método de Ensaio.
- BAKIR, F.; REY, R.; NOGUERA, R.; MASSOUH, F.; KOUIDRI, S.. Methode de Prevision du NPSH Requis. Société Hydrotechnique de France. Colloque D'hydrotechnique. 2eme journées (Cavitation). Cavitation dans les Composants Industriels. Paris, France. 1992.
- BILLET, M. L.; WEIR, D. S.. The Effect of Gas Diffusion on the Flow Coefficient for a Ventilated Cavity. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. December, 1975. pp. 501-506.
- GIKAS, I.. Tópicos de Cavitação. Dissertação de Mestrado apresentado à EPUSP. São Paulo. 1986.
- HOLL, J. W.; KORNHAUSER, A. L.. Thermodynamic Effects on Desinent Cavitation on Hemispherical Nosed Bodies in Water at Temperatures From 80 Deg. F to 260 Deg. F. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. March, 1970. pp. 44-58.
- HORD, J.. Cavitation in Liquid Cryogenics IV - Combined Correlations for Ventury, Hydrofoil, Ogives and Pumps. NASA Report CR-2448. Lewis Research Center. 1974.
- HUTTOM, S. P.; FURNESS, R. A.. Thermodynamic Scale Effects in Cavitating Flows and Pumps. Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Publications. London, England. 1974. pp. 329-340.
- JACOBS, R. B.; MARTIN, K. B.; HARDY, R. J.. Direct Measurement of Net Positive Suction Head. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. June, 1959. pp.147-152.
- KELLER, A. P.. Investigations Concerning Scale Effects of the Inception of Cavitation. Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Publications. London, England. 1974. pp. 109-117.
- KNAPP, R. T.; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G.. Cavitation. McGraw-Hill International Book Company. 1970.
- KUENY, J.L.; GENEVEY, J.; DESCLAUX, J.. Plate - Forme D'essais de Cavitation pour Liquides a Effets, Thermodynamiques. Société Hydrotechnique de France. Colloque D'hydrotechnique. 2eme journées (Cavitation). Cavitation dans les Composants Industriels. Paris, France. 1992.
- LANGHAAR, H. L.. Analyse Dimensionnelle et Théorie des Maquettes. Dunod Editeur. Paris, France. 1956.
- MITCHELL, T.; HAMMITT, F.G.. On the Effects of Heat Transfer upon Collapsing Bubbles. Nuclear Science and Engineering, 53. 1974. pp.263-276.



- MOORE, R. D.; RUGGERI, R. S.. Prediction of Thermodynamic Effects of Developed Cavitation Based on Liquid-Hydrogen and Freon-114 Data in Scaled Venturis. NASA Technical Note TND-4899. Lewis Research Center. November. 1968.
- PERSSON, B.. On the Scaling of Cavitation Bubble Growth. Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers. Conference Publications. London, England. 1974. pp. 229-231.
- PLESSET, M. S.. Physical Effects in Cavitation and Boiling. Naval Hydrodynamics, pp. 515. 1957.
- ROHSENOW, W. M.; CLARK, L. A.. A Study of the Mechanism of Boiling Heat Transfer. Transactions of the ASME. July, 1951. pp. 609-620.
- ROOD, E. P.. Review - Mechanisms of Cavitation Inception. Transactions of the ASME. Journal of Fluids Engineering. June, 1991. pp. 163-289.
- SAROSDY, L. R.; ACOSTA, A. J.. Note on Observations of Cavitation in Different Fluids. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. September, 1961. pp. 399-400.
- STEPANOFF, A. J.. Centrifugal and Axial Flow Pumps. Theory, Design and Applications. 2nd. Edition. John Wiley & Sons, Inc.. 1957.
- \_\_\_\_\_. Pumps and Blowers. Two Phase Flow. John Wiley & Sons, Inc.. 1965.
- ZIKA, V.J.. A Correlation of Cavitating Centrifugal Pumps. Cavitation and Polyphase Flow Forum. 1981. pp. 41 - 44.
- \_\_\_\_\_. Thermodynamics of Incipient Cavitation (3% Head Drop) in Centrifugal Pumps. International Symposium on Cavitation Inception. 1984. pp. 161-167.



APENDICE I

DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O  
CALCULO DE  $\Delta T$  EM FUNÇÃO DE B

Considere-se o seguinte processo adiabático e reversível de formação de vapor: um cilindro isolado, sem vazamentos e sem atrito, cheio de líquido saturado e cujo pistão é recuado lentamente até a formação de um determinado volume de vapor.

Então

$$s_2 = s_1 \quad (I)$$

Onde o índice 1 refere-se ao instante inicial e o índice 2 refere-se ao instante final do processo.

Da termodinâmica

$$s_2 = s_{l_2} + X \cdot (s_v - s_{l_2}) \quad (II)$$

$$s_1 = s_{l_1} \quad (III)$$

Onde

$$X = \frac{m_v}{m_v + m_l} = \frac{m_v/m_l}{m_v/m_l + 1}$$

Ou

$$\frac{m_v}{m_l} = \frac{X}{1 - X} \quad (IV)$$



Substituindo as equações (II) e (III) em (I), vem

$$s_{1z} + X \cdot (s_v - s_1)_z = s_{11} \quad (V)$$

$$X \cdot (s_v - s_1)_z = s_{11} - s_{1z} \quad (VI)$$

Pela 2a. Lei da Termodinâmica

$$ds = \left[ \frac{dq}{T} \right]_{\text{reversível}} \quad (VII)$$

Daí

$$s_v - s_1 = \frac{\lambda}{T}$$

Ou

$$(s_v - s_1)_z = \frac{\lambda_z}{T_z} \quad (VIII)$$

Através das equações da definição de trabalho, 1a. e 2a. Leis da Termodinâmica pode-se chegar a

$$T \cdot ds = du + P \cdot dv \quad (IX)$$

Para os líquidos será considerado que

$$dv \approx 0$$

Assim

$$dw = P \cdot dv = 0$$

$$T \cdot ds = du \quad (X)$$

A equação da 1a. Lei da Termodinâmica fica

$$dq = du$$

E

$$Cp_1 = \frac{dq}{dT} = \frac{du}{dT} = Cv_1$$

$$du = Cv_1 \cdot dT = Cp_1 \cdot dT \quad (XI)$$

Igualando as equações (X) e (XI)

$$ds = Cp_1 \cdot \frac{dT}{T}$$

Assumindo  $Cp_1$  como constante

$$Cp_1 = Cp_{1_1}$$

E

$$s_{1_1} - s_{1_2} = Cp_{1_1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (XII)$$



Substituindo as equações (VIII) e (XII) na equação (VI), resulta

$$\frac{X \cdot \lambda_x}{T_2} = C_{p1} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}$$

Ou

$$\frac{X \cdot \lambda_x}{T_2} = C_{p1} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{\Delta T}{T_2} \right] \quad (\text{XIII})$$

Onde

$$\Delta T = T_1 - T_2 \quad (\text{XIV})$$

Como  $(\Delta T/T_2)^2 < 1$ , pode-se expandir em série de potências conforme ABRAMOWITZ; STEGUN (1965)

$$\ln \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta T}{T_2} \right] = \frac{\Delta T}{T_2} - \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\Delta T}{T_2} \right]^2 + \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{\Delta T}{T_2} \right]^3 - \dots$$

Supondo  $\Delta T \ll T_2$  pode-se fazer

$$\ln \cdot \left[ 1 + \frac{\Delta T}{T_2} \right] \approx \frac{\Delta T}{T_2} \quad (\text{XV})$$

E a equação (XIII) fica

$$\frac{X \cdot \lambda_x}{T_2} = C_{p1} \cdot \frac{\Delta T}{T_2}$$

$$\Delta T = \frac{X \cdot \lambda_x}{C_{p1}} \quad (\text{XVI})$$

Da definição de B no item 2.1.1.

$$B = \frac{m_v \cdot v_v}{m_l \cdot v_l} \quad (\text{XVII})$$

Substituindo (IV) em (XVII) e isolando X

$$X = \frac{B}{\frac{v_v}{v_l} + B}$$

Ou

$$X = \frac{B}{\frac{p_l}{p_v} + B} \quad (\text{XVIII})$$

Substituindo (XVIII) em (XVI)

$$\Delta T = \frac{\lambda_2}{Cp_{l1}} \cdot \frac{B}{\frac{p_l}{p_v} + B} \quad (\text{XIX})$$

Assumindo  $\lambda_2$  aproximadamente igual a  $\lambda_1$ , vem

$$\Delta T = \frac{\lambda_1}{Cp_{l1}} \cdot \frac{B}{\frac{p_l}{p_v} + B}$$

Como

$$\frac{p_l}{p_v} \gg B$$



Resulta

$$\Delta T = \frac{\lambda_1}{Cp_{11}} \cdot \frac{P_v}{P_1} \cdot B \quad (XX)$$

A equação (XX) corresponde à equação (6) do item 2.1.1.

Se o escoamento do fluido de trabalho através da região de baixa pressão no rotor de uma bomba centrífuga, reduzindo-se o valor de  $NPSH_d$  a partir da condição de cavitação incipiente, for considerado equivalente ao problema de expansão de líquido saturado em um cilindro isolado, sem vazamentos e sem atrito, então a equação (6) do item 2.1.1. poderia ter sido deduzida como mostrado acima.

APENDICE II

DETERMINAÇÃO DA EQUAÇÃO PARA O  
CÁLCULO DE  $\Delta T$  UTILIZANDO O  
TEOREMA DOS  $\pi$



Assumindo inicialmente que as grandezas que intervêm na formação de cavidades de vapor em um escoamento são

$\Delta T$	$Q_v$	$\sigma$
$\lambda$	$A_w$	$\alpha$
$\rho_v$	$h$	$P_v$

Tem-se

$$f(\Delta T, \lambda, \rho_v, Q_v, A_w, h, \sigma, \alpha, P_v) = 0 \quad (I)$$

As equações dimensionais das respectivas grandezas são:

$$\begin{aligned} [\Delta T] &= \theta \\ [\lambda] &= HM^{-1} \\ [\rho_v] &= ML^{-3} \\ [Q_v] &= L^3 \\ [A_w] &= L^2 \\ [h] &= MT^{-2} \theta^{-1} \\ [\sigma] &= MT^{-2} \\ [\alpha] &= L^2 T^{-1} \\ [P_v] &= ML^{-1} T^{-2} \end{aligned}$$

Onde

M = massa

L = comprimento

$T$  = tempo

$\theta$  = temperatura

$H$  = calor

Da equação (I) verifica-se que o número de grandezas envolvidas no fenômeno é

$$n = 9$$

O número de grandezas fundamentais envolvidas no fenômeno é

$$r = 4$$

Ou seja : M, L, T e  $\theta$

Portanto o número de adimensionais independentes que podem ser obtidos são

$$m = n - r = 5$$

Escolhendo como base  $\sigma$ ,  $\alpha$ ,  $P_v$  e  $\Delta T$  resulta

$$\pi_1 = \sigma^a \cdot \alpha^b \cdot P_v^c \cdot \Delta T^d \cdot h$$

$$\pi_2 = \sigma^e \cdot \alpha^f \cdot P_v^g \cdot \Delta T^h \cdot \lambda$$

$$\pi_3 = \sigma^i \cdot \alpha^j \cdot P_v^l \cdot \Delta T^m \cdot \rho_v$$

$$\pi_4 = \sigma^n \cdot \alpha^o \cdot P_v^p \cdot \Delta T^q \cdot Q_v$$

$$\pi_5 = \sigma^r \cdot \alpha^s \cdot P_v^t \cdot \Delta T^u \cdot A_w$$



Resolvendo, chega-se a

$$\pi_1 = \frac{h \cdot \Delta T}{\sigma} \quad (\text{II})$$

$$\pi_2 = \frac{\lambda \cdot \sigma^2}{\alpha^2 \cdot P_V^2} \quad (\text{III})$$

$$\pi_3 = \frac{P_V \cdot \alpha^2 \cdot P_V}{\sigma^2} \quad (\text{IV})$$

$$\pi_4 = \frac{Q_V \cdot P_V^3}{\sigma^3} \quad (\text{V})$$

$$\pi_5 = \frac{Aw \cdot P_V^2}{\sigma^2} \quad (\text{VI})$$

Sabe-se que

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)$$

Fazendo

$$\pi_1 \cdot \pi_5 = \pi_2 \cdot \pi_3 \cdot \pi_4$$

Ou

$$\frac{\pi_1 \cdot \pi_5}{\pi_2 \cdot \pi_3 \cdot \pi_4} = 1 \quad (\text{VII})$$

Substituindo (II), (III), (IV), (V) e (VI) em (VII) resulta

$$\frac{\Delta T \cdot h \cdot Aw}{P_V \cdot \lambda \cdot Q_V} = 1$$

Ou

$$\Delta T = \frac{P_V \cdot \lambda \cdot Q_V}{h \cdot Aw} \quad (\text{VIII})$$

Que é a equação para o cálculo de  $\Delta T$  da Teoria do Preenchimento.

APENDICE III

EXEMPLO DE CALCULO DE UMA  
INSTALAÇÃO DE BOMBEAMENTO



Dispõe-se de uma instalação de bombeamento com os seguintes dados:

Perda de carga total:  $\Delta h = 1,2 \text{ m}$

Reservatório a pressão atmosférica, 3 m acima da linha de centro da bomba:  $h_s = + 3 \text{ m}$

$NPSH_r = 2,0 \text{ m}$  para água fria (a  $20^\circ\text{C}$ ) =  $NPSH_{A.F.}$

Da definição de  $NPSH_d$  do item 2.3 vem, para água fria

$$NPSH_d = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + h_s - \Delta h \quad (I)$$

$$NPSH_d = 10,02 - 0,24 + 3 - 1,2$$

$$NPSH_d = 11,58 \text{ m}$$

Como  $NPSH_d > NPSH_r$ , a instalação opera na ausência de cavitação.

Se a mesma instalação for utilizada para bombear água a  $120^\circ\text{C}$  (393 K)

$$NPSH_d = 10,60 - 21,47 + 3 - 1,2$$

$$NPSH_d = -9,07 \text{ m}$$

Como  $NPSH_d < NPSH_r$ , tem-se a formação de cavidades. Pa-

ra que a presença dessas cavidades ocasione uma queda de 3% na altura manométrica da bomba, a partir das (51) e (52) do item 2.5, chega-se a

$$\text{NPSH}_r = \text{NPSH}_{A.F.} - \Delta\text{NPSH} \quad (\text{II})$$

Pelo método de STEPANOFF, tabela 13, para a água a 393 K

$$\Delta\text{NPSH} = - 0,40 \text{ m}$$

Da equação (II) resulta

$$\text{NPSH}_r = 2 - 0,40$$

$$\text{NPSH}_r = 1,60 \text{ m}$$

Como  $\text{NPSH}_d < \text{NPSH}_r$ , deve-se elevar o reservatório em relação a bomba de

$$1,6 - (- 9,07) = 10,67 \text{ m}$$

Nesse caso o ganho em NPSH devido ao Efeito Termodinâmico foi de 40 cm. Esse valor poderia ser maior para uma temperatura maior da água ou para um outro fluido de trabalho. Por exemplo, para Butano a 320 K, pelo mesmo método, haveria um ganho de NPSH de 3,72 m, de acordo com a tabela 14.



APENDICE IV

CONDUÇÃO DE CALOR ATRAVES DA  
CAMADA DE LIQUIDO PROXIMA A  
CAVIDADE

Considerando uma cavidade esférica, a massa de vapor que formará a cavidade é

$$m_v = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho_v \quad (\text{I})$$

E a quantidade de calor necessária será

$$Q = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho_v \cdot \lambda \quad (\text{II})$$

Segundo PLESSET (1949), a espessura da camada de líquido através da qual o calor é conduzido será aproximadamente

$$d = \sqrt{\alpha \cdot t} \quad (\text{III})$$

O volume de líquido envolvido na troca de calor é aproximadamente

$$V_1 = 4\pi \cdot R_0^2 \cdot d \quad (\text{IV})$$

Portanto a quantidade de calor fornecida pelo líquido é

$$Q = V_1 \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T \quad (\text{V})$$

Substituindo as equações (III) e (IV) na equação (V), vem

$$Q = 4\pi \cdot R_0^2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} \cdot \rho_1 \cdot C_{p1} \cdot \Delta T \quad (\text{VI})$$



Igualando as equações (II) e (VI), resulta

$$\Delta T = \frac{R_0 \cdot \rho_v \cdot \lambda}{3 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} \cdot \rho_l \cdot C_{p1}} \quad (\text{VII})$$

Como  $\rho_v \ll \rho_l$ , a equação (48) deduzida no item 2.4 fica

$$\Delta P_v = \frac{\rho_v \cdot \lambda}{T_{\infty}} \cdot \Delta T \quad (\text{VIII})$$

Substituindo a equação (VII) na equação (VIII) resulta

$$\Delta P_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{R_0}{\sqrt{\alpha \cdot t}} \cdot \frac{\rho_v^2 \cdot \lambda^2}{C_{p1} \cdot \rho_l \cdot T_{\infty}} \quad (\text{IX})$$

Considerando o vapor como um gás perfeito

$$\frac{P_v}{\rho_v} = R_v \cdot T_{\infty} \quad (\text{X})$$

Substituindo (X) em (IX) resulta

$$\Delta P_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{R_0}{\sqrt{\alpha \cdot t}} \cdot \frac{\rho_v \cdot P_v \cdot \lambda^2}{\rho_l \cdot C_{p1} \cdot R_v \cdot T_{\infty}^2} \quad (\text{XI})$$

Que é a equação apresentada por FUJIKAWA; AKAMATSU (1980), sendo  $R_0$  e  $t$  de difícil determinação.

A equação (VII) e (XI) acima pressupõem uma situação estática, portanto não levam em consideração o escoamento do fluido. Assim sendo, não é aconselhável sua aplicação a bom-

bas centrifugas ou venturis, onde o fornecimento da quantidade de calor necessária se dá por convecção e a velocidade é uma variável importante.