

2298629

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Trabalho de Formatura

ENSAIO DE CAVITAÇÃO

Autor: Aristides Masuchelli Filho
Orientador: Francisco E. Baccaro Nigro

1 9 8 1

PREFÁCIO

Em princípio, o presente trabalho visava o estudo de Vibrações devido a cavitação de bombas, ou seja, fazer uma análise de vibrações na cavitação, inclusive com medições experimentais, e com isso tentar obter uma correlação entre as vibrações e o início da cavitação. Os testes experimentais seriam feitos no Centro Tecnológico de Hidráulica - C.T.H. em bombas centrífugas nas quais iriam se fazer testes de cavitação.

O primeiro problema que surgiu foi o atraso para o início dos testes, previsto para o mês de setembro e por razões que desconheço somente agora estão sendo realizados. Paralelamente ao atraso, na pesquisa bibliográfica feita, não se encontrou nenhum estudo a respeito do assunto mencionado. Foi inclusive feita uma visita a firma SCHENK do Brasil, fabricante de aparelhos para medição e avaliação de vibrações, para se obter informações ou se algum cliente já os tinha procurado para fazer uma análise semelhante e a resposta foi negativa.

Com base no relatado acima e devido ao tempo escasso para se continuar tentando o proposto, mudou-se o objetivo do trabalho, fazendo-se então o estudo de ensaios de cavitação em bombas centrífugas, tentando mostrar como é feito, na prática, um ensaio de cavitação.

Colocou-se nos anexos, de modo genérico, um outro método para determinação de cavitação. Colocou-se também a tentativa no Centro Tecnológico de Hidráulica da obtenção de informações a respeito do início da cavitação através de um transdutor de pressão acoplado a um osciloscópio.

São Paulo, 08 de dezembro de 1981

O Autor

Agradecimentos:

Agradeço a compreensão e apoio dado pelo orientador Francisco E. Baccaro Nigro com relação as dificuldades encontradas para se desenvolver o tema inicial, dando-me a liberdade de modificar os objetivos deste trabalho.

Agradeço também as informações fornecidas pelo Engº. Ricardo Cilento da Semco do Brasil.

I N D I C E		PAG.
I - PREFÁCIO		I
II - AGRADECIMENTOS		II
III - CAPÍTULO	I - INTRODUÇÃO TEÓRICA	01
	1.1 Descrição do Fenômeno de Cavitação	01
	1.2 Conceito de NPSH	02
IV - CAPÍTULO	II - CONCEITOS, GRANDEZAS, ESCLARECIMENTOS	03
	2.1 Critérios de Cavitação	03
	2.1.1 Tamanho das Bolhas de Vapor	03
	2.1.2 Redução da Altura Manométrica com comparação com a operação isenta de cavitação, para mesma vazão.	03
	2.1.3 Ruídos ou Modificações do ruído em comparação com a Operação Isenta de Cavitação, para mesma vazão bombeada	03
	2.1.4 Redução do rendimento em comparação com a operação isenta de cavitação em igual vazão bombeada.	04
	2.1.5 Perturbação no funcionamento	04
	2.1.6 Desgaste na peças internas da bomba em consequência da cavitação, após determinação do tempo de operação.	04
	2.2 Equação do NPSH disponível	04
	2.2.1 Plano de Referência	04
	2.2.2 Indicação de Pressão	04
	2.2.3 Pressão Absoluta e Sobrepressão	05
	2.2.4 Altura Líquida de Energia e NPSHd	05
	2.2.5 Perda de Carga	06
	2.2.6 Temperatura	07
V - CAPÍTULO	III - ENSAIO DE CAVITAÇÃO	08
	3.1 Cálculo do Valor do NPSHd Com Base Em Medições	09
	3.2 Manobras e Determinação do NPSH requerido	09
	3.3 Tipos de Testes	09
	3.4 Memorial de Cálculo	09
	3.5 Limites de Erros na Determinação do Valor do NPSHr Garantido	09
	3.6 Segregação de Gases	09
	3.7 Caso em que o NPSH requerido é Desconhecido	10
VI - ANEXOS		
	1 Experiências com Métodos Acústicos Para detecção de Cavitação	12
	2 Experiência com Transdutor de Pressão acoplada a um Osciloscópio	14
	3 Conclusão	15
	4 Figuras e Tabelas	16
	5 Memorial de Cálculo	26
	6 Fotos	29

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO TEÓRICA

1.1 - DESCRIÇÃO DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO

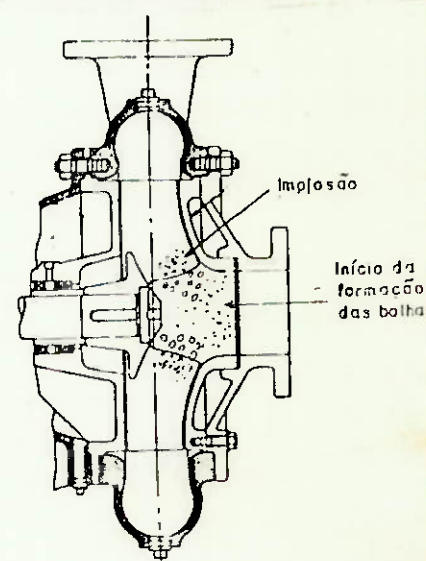
Toda bomba centrífuga, assim como bomba de qualquer outro tipo, funciona normalmente somente quando a pressão à sua entrada não é demasiadamente reduzida. Em caso contrário na entrada da bomba, ou mais exatamente na entrada do rotor, onde a pressão é mínima poder-se-á atingir a pressão de vaporização do líquido aquela temperatura. Neste local inicia-se intensa formação de vapor. É a ebulição local do líquido. As bolhas de vapor assim formadas são conduzidas pelo fluxo do líquido até atingir locais de pressão mais elevada em que se verifica a condição de condensação ocorrendo a implosão de tais bolhas.

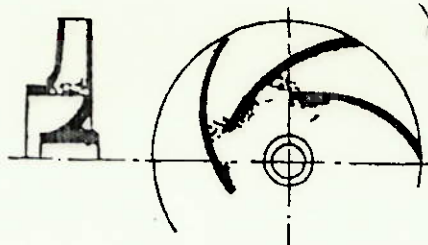
Esta ebulição local do líquido condicionada pela queda de pressão local do fluxo e a subsequente condensação dos vapores em lugares de pressão elevadas denomina-se CAVITAÇÃO. O fenômeno é mostrado na figura ao lado.

Tal fenômeno é acompanhado por um ruído característico e, no caso do fenômeno ser intenso poderá ocasionar a destruição erosiva das paredes metálicas do rotor - "pitting" - Note-se que a destruição do material provocada pela cavitação não se verifica no lugar onde as bolhas se formam, mas sim onde estas se condensam.

A ocorrência de cavitação, com o subsequente desprendimento de gases e vapores, provoca uma perturbação na continuidade do fluxo e variações nas condições de funcionamento da bomba. A intensidade dessas alterações aumenta com a diminuição da pressão do líquido à entrada da bomba. Na construção de máquinas hidráulicas, há uma tendência para a escolha de rotações elevadas de funcionamento com a finalidade de se reduzir as dimensões da máquina e portanto o custo. Em tais condições aumenta-se o risco de cavitação.

Os danos provocados por cavitação em uma bomba centrífuga ocorrem não somente nas pás, mas também no rotor. Os pontos atacados pela cavitação estão situados no dorso da pás, próximo à entrada à juzante da região onde se verifica velocidades elevadas que favorecem o aparecimento do fenômeno, como se indica na figura a seguir.





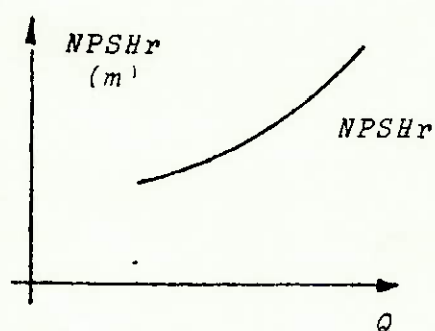
Erosão devido à cavitação, no rotor de uma bomba centrífuga.

1.2 - CONCEITO DE NPSH

Comercialmente os fabricantes de bombas apresentam o valor limite para pressão à entrada da bomba para que se evite o fenômeno da cavitação, através de uma expressão definida como sendo NPSH - requerido (Net Positive Suction Head over pressure) ' que é a carga total absoluta no flanco de entrada da bomba menos a carga correspondente a pressão de vapor do líquido àquela temperatura.

Então podemos determinar para cada vazão o valor mínimo da carga na entrada da bomba correspondente à condição de não cavitação e daí o valor do NPSHr.

As curvas são apresentadas pelos fabricantes da forma abaixo indicada:



A condição de não cavitação impõe que não se atinja, para uma dada vazão, o NPSHr, devendo para tal vazão a pressão na flange de entrada da bomba permanecer acima do valor mínimo.

NPSHdisponível - O valor NPSHd sob o ponto de vista da instalação é a altura líquida de energia existente na seção transversal da entrada da bomba.

A condição para que a cavitação não ultrapasse a intensidade tolerável é que o valor NPSHd deve ser, pelo menos, igual ou maior que NPSHr

$$\text{NPSHd} \geq \text{NPSHr}$$

O excesso de NPSHd acima de NPSHr é uma medida de segurança.

O desenvolvimento de uma expressão para o NPSHd será feito mais adiante quando analisarmos as grandezas necessárias para o ensaio de cavitação.

O influência do NPSHd sobre a curva de funcionamento da bomba, bem como a comparação com a curva do NPSHr obtida em testes é mostrada na fig. 2.

CAPÍTULO II - CONCEITOS, GRANDEZAS, ESCLARECIMENTOS

2.1 - CRITÉRIOS DE CAVITAÇÃO

Nas bombas centrífugas só se pode permitir cavitação em escala limitada. Até que ponto se pode permitir a cavitação para cada caso específico depende, entre outras coisas, das condições operacionais, do líquido bombeado, do material do rotor e das outras peças internas da bomba. Depende também do tempo durante o qual a bomba é operada em cavitação. Pode-se determinar até que ponto é permissível a cavitação, tomando-se como base os seguintes critérios:

2.1.1 - Tamanho das bolhas de vapor, que pode ser determinado visualmente ou com base em fotografias. Só se pode empregar este critério quando as bolhas podem ser observadas por providências adequadamente tomadas (por exemplo visores na carcaça da bomba ou no tubo de sucção.)

Este critério geralmente é feito somente em laboratórios, pois exige montagens especiais.

2.1.2 - Redução da altura manométrica em comparação com a operação isenta de cavitação, para mesma vazão. Normalmente indica-se a redução em porcentagem da altura manométrica.

Nas bombas com vários estágios, indica-se em porcentagem da altura do primeiro estágio.

Este critério é o mais utilizado na prática, devido a simplicidade de obtenção das medidas necessárias através de aparelhos bem conhecidos.

2.1.3 - Ruídos ou modificações do ruído em comparação com a operação isenta de cavitação, para mesma vazão bombeada. Esses ruídos podem ser avaliados por uma observação subjetiva ou por medição.

Ruídos não são necessariamente indícios de cavitação, pois estes podem se originar quando a bomba trabalha em um ponto operacional distante do ponto de melhor rendimento, sem que por isso, haja cavitação.

Em relação a este critério tecemos algumas considerações a respeito de uma experiência com métodos acústicos feitos por T. Tem Wolde e W. H. Moelker, nos anexos.

- 2.1.4 - Redução do rendimento em comparação com a operação isenta de cavitação em igual vazão bombeada.
- 2.1.5 - Perturbação no funcionamento, isto é, modificação do comportamento de vibração da bomba em comparação com a operação isenta de cavitação.
Este critério é o que mais se aproxima do objetivo inicial do trabalho, e como já foi mencionado não encontrou-se nenhum estudo a respeito.
- 2.1.6 - Desgaste nas peças internas da bomba em consequência da cavitação, após determinado tempo de operação. Esse desgaste pode ser determinado com base na redução de peso. O reparo pode ser feito por deposição de solda elétrica na oficina de manutenção.
A avaliação por desgaste não é feita pois a máquina teria de ficar funcionando por um longo período para poder se avaliar a perda de peso. Além do que o próprio fluido produz um arranque de material provocando uma acomodação do rotor.

Como mencionado nos critérios de cavitação o método mais utilizado para ensaios é o levantamento de curvas no qual observa-se a queda nas características da bomba quando na cavitação.

No item seguinte, desenvolveremos uma equação para NPSH_d necessária para se fazer um ensaio de cavitação, definindo todas as grandezas envolvidas. (vide fig. 1)

2.2 - EQUAÇÃO DO NPSH_d disponível

2.2.1 - Plano de Referência

Como plano de referência para alturas geométricas e alturas de energias, define-se o plano horizontal que passa pelo centro do rotor (fig.3). Em caso de dupla sucção (eixo horizontal) é muito importante a entrada do rotor que fica mais elevada. Em bombas de eixo horizontal, o plano de referência situa-se, portanto, na altura do eixo. Para bombas de eixo vertical ou oblíquo, o plano de referência do rotor é indicado pelo fabricante.

2.2.2. - Indicação de Pressão

As indicações de pressões das bombas são válidas conforme o referencial adotado (fig. 1).

Em reservatórios e canais com coluna de líquido, a pressão é indicada pela sua altura.

2.2.3 - Pressão Absoluta e Sobrepressão

Pressão absoluta = Pressão Atmosférica (P_a) e a Pressão de Evaporação (P_v).

Qualquer outra pressão indica-se como sobrepressão acima da pressão atmosférica.

A sobrepressão é negativa quando a pressão absoluta é mais baixa que a atmosférica.

2.2.4 - Altura Líquida de Energia e NPSHd

Como definido em 1.2. o NPSHd é a altura de energia existente, por parte da instalação, na seção transversal de entrada da bomba, que resulta na seguinte equação:

$$NPSHd = Z_s + \frac{P_s + P_a - P_v}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} \quad (1)$$

Onde:

P_s = Sobrepressão na seção transversal da entrada da bomba (Kgf/cm^2)

P_a = Pressão atmosférica (Kgf/cm^2)

P_v = Pressão de vapor do líquido (Kgf/cm^2)

V_s = Velocidade média de escoamento do fluido na seção transversal de entrada da bomba (m/s)

γ = Peso específico do líquido bombeado (Kgf/m^3)

Z_s = Diferença de altura entre o centro da seção transversal de entrada e o plano de referência (m)

$Z_s > 0$ quando o centro da seção transversal da entrada da bomba está mais alto que o plano de referência.

A mesma equação com relação ao nível do reservatório:

$$NPSHd = Z_e + \frac{P_e + P_a - P_v}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} - H_{v,s} \quad (2)$$

Onde:

P_e = Sobrepressão no nível do líquido no reservatório (Kgf/cm^2)

P_a, P_v já definidos

Z_e = Diferença de altura entre o nível do líquido no reservatório e o plano de referência (m)

$Z_e > 0$ quando o nível do líquido do reservatório está mais alto que o plano de referência.

V_e = Velocidade de escoamento do fluido no nível do líquido do reservatório (m/s)

$H_{v,s}$ = Altura de perda de carga na tubulação de sucção - perdas distribuídas e localizadas entre a seção transversal da entrada da instalação e a seção transversal da entrada da bomba.

Observação: A velocidade V_e do nível do líquido do reservatório é na maioria dos casos, pequena, podendo-se por isso ignorá-la.

Na equação (2) os dois primeiros elementos são independentes da vazão. Os dois últimos elementos, dos quais, geralmente a perda $H_{v,s}$ é mais importante, aumentam na proporção do quadrado da vazão. Daí, resulta a curva característica do NPSHd em dependência da vazão Q (fig. 2)

2.2.5 - Perdas de Carga

Especiais dificuldades apresenta o cálculo da altura de perda H_{vs} , porque com frequência não são conhecidos com suficiente exatidão os coeficientes de resistência dos tubos, curvas e componentes.

Em consequência de incrustações nos tubos e obstruções nos filtros as perdas podem aumentar com o decorrer do tempo. Qualquer aumento de perda no tubo de entrada reduz o valor do NPSHd, podendo levar a uma cavitação não permissível na bomba.

Procuramos agora apresentar um método rápido para o cálculo da perda de carga distribuída. A fórmula de Hazen-Williams.

A formulação encontrada pelos dois pesquisadores foi colocada em um nomograma (fig.4) que nos fornece a perda de carga "J" por Km.

No nomograma temos:

D = Diâmetro da tubulação (pol)

J = Perda de carga por Km

Q = Vazão (l/seg)

V = Velocidade (m/seg)

C = Coeficiente que depende da natureza (material e estado) das paredes do tubo.

O nomograma é construído para valores de $C=100$.

A tabela T-1 obtida das investigações de Hazen-Williams é de grande utilidade para aplicações práticas. Ela nos fornece os valores de C de acordo com o diâmetro da tubulação e sua idade. Essa tabela é feita para tubos de ferro e aço.

Como o nomograma é construído para o valor de C=100 teremos um coeficiente de correção K (tabela T-2) que multiplicado a J nos dará a perda de carga para qualquer valor de C.

O procedimento é o seguinte:

Dados o diâmetro e vazão obtemos através do nomograma para C=100 o valor da perda de carga por quilômetros (J). Sendo o valor de C=f' (material, tempo, diâmetro) e diferente de 100 determinamos o seu valor através da tabela T-1. Determinado o valor de C vamos à tabela T-2 e achamos o valor do coeficiente de correção K. E, finalmente multiplicando-se o valor de K pela perda J determinada anteriormente encontramos a perda de carga distribuída para as condições da tubulação.

Perdas Localizadas - de um modo geral as perdas são dadas pela fórmula:

$$H_f = \frac{KV^2}{2g} \quad (3)$$

K= Coeficiente obtido experimentalmente para cada caso e dado na tabela T-3.

Assim podemos determinar todas as perdas nas canalizações.

2.2.6 - Temperatura

Com relação a temperatura do líquido bombeado deve-se levar em consideração que a pressão de vapor (Pv) é determinante para a cavitação da bomba, sendo que esta pressão depende da temperatura do líquido que se encontra na entrada do rotor. Isto é, particularmente importante em reservatórios fechados nos quais o líquido está na sua pressão de evaporação

CAPÍTULO III - ENSAIO DE CAVITAÇÃO

3.1 - CÁLCULO DO VALOR DO NPSHd COM BASE EM MEDIÇÕES

Para o cálculo do NPSHd com base em valores de medição determinados na seção transversal de entrada da bomba vale a equação 1. Como a seção de medição não coincide com a seção transversal de entrada a equação para determinação do NPSHd será dada por (fig.1) :

$$\text{NPSHd} = Z_1 + \frac{P_1 - P_v}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - H_{l,s} \quad (4)$$

1 = seção de medição

Os testes de cavitação, isto é, a variação do NPSHd, pode ser efetuado das duas maneiras apresentadas nas figuras A1 e A2. Fazendo o ensaio de acordo com a fig. A2 (válvula de estrangulamento na sucção) e considerando o lanco de ensaios de acordo com a figura 6, a instrumentação necessária para o cálculo do NPSHd é:

Manômetro de mercúrio para medição da pressão na tubulação de secção

$$P_1 = 13,6 (h_1 - h_2)$$

P_a = Pressão Atmosférica = é medida em barômetro ou avaliada de acordo com a altitude na tabela T-5

Manômetro de peso morto para medição da pressão no recalque. Esta pressão é usada no cálculo da altura manométrica.

Tubo de Vazão (Insert Flow Tube) para medições de vazões.

Com a vazão e a área da seção transversal do tubo obtemos a velocidade v_1

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{16Q^2}{2g\pi^2 D_i^4}$$

A temperatura é avaliada, geralmente no reservatório antes e após o ensaio.

A literatura fornece para muitos tipos de líquidos os valores da densidade e pressão de vapor em função da temperatura tabela T-4.

Nas medições em posto de ensaio, a seção transversal de medição é normalmente colocada em um trecho de tubo reto disposto imediatamente após a bomba, e que possui a mesma seção transversal da entrada, por tanto $Z_1=0$ na maioria dos casos.

A altura adicional de perda de carga $H_{l,s}$ é aí via de regra, tão pequena que pode ser desprezada no cálculo do NPSHd.

3.2 - MANOBRAS E DETERMINAÇÃO DO NPSH requerido

O ensaio é feito manobrando-se simultaneamente os registros R1 e R2 (Fig.6), de forma que, mantida constante uma determinada vazão, há variação do NPSH_d na entrada da bomba. Medindo-se a altura de elevação para os diversos valores de NPSH_d, fica identificado o ponto da cavitação (NPSH_r) como aquele em que o rendimento ou a altura total de elevação decresce 3% em relação ao valor inicial.

As curvas obtidas no ensaio são mostradas nas figuras 5a, 5b e 5c indicando o critério de 3%.

3.3 - TIPOS DE TESTES

Existem dois tipos de testes de cavitação.

Um teste que indicará apenas que a bomba está isenta de cavitação quando trabalhar para uma dada vazão no NPSH_r garantido pelo fabricante (este tipo de teste é geralmente solicitado pelo cliente ao fabricante.)

O outro é a diminuição do valor NPSH_d até obter-se o efeito da cavitação, fazendo-se isto para diversas vazões e levantando-se a curva do NPSH_r.

3.4 - MEMORIAL DE CÁLCULO

Anexo ao trabalho temos um memorial de cálculo do NPSH_r, que inclui os dois tipos de testes mencionados no item 3.3.

Um teste que indicará apenas que a bomba está isenta de cavitação, num grau suficiente, no ponto em que esta trabalhará, e de acordo com o NPSH_r garantido pelo fabricante. Este teste está indicado no memorial de cálculo como "Cálculo do NPSH".

O outro teste é o levantamento de alguns pontos para o traçado da curva do NPSH_r (no caso foram levantados 3 pontos) e está indicado no memorial como "Teste de NPSH".

3.5 - LIMITES DE ERROS NA DETERMINAÇÃO DO VALOR NPSH_r GARANTIDO

Como margem máxima de erros na medição do NPSH_r indica-se 5,3% do valor do NPSH medido ou 0,3 m prevalecendo o maior valor.

3.6 - SEGREGAÇÃO DE GASES

Normalmente a água contém gases, especialmente ar, em forma de solução.

Ao baixar a pressão, segregam-se bolhas de gases na água. Este processo é tão mais intenso quanto mais elevada for a temperatura. A separação de gás tem uma certa semelhança com a

evaporação. Por isso, ela tem importância também em bombas quando o líquido transportado contém em solução gases (ar por exemplo). As bolhas de gás podem segregar-se em pontos de baixa pressão no tubo de entrada ou na bomba e, conseqüentemente, prejudicar e até interromper o fluxo. Esta segregação não é tão prejudicial para a bomba como a cavitação (de vapor).

Quando a evaporação do líquido e a segregação de gás ocorrem simultaneamente e as bolhas resultantes contêm vapor e gás, em geral essas bolhas não se agrupam tão repentinamente como ocorrem com as bolhas puramente de vapor. Por isso, os efeitos danificadores da cavitação podem, às vezes, serem reduzidos pela introdução de pequena quantidade de ar no lado da entrada.

3.7 - CASO EM QUE O NPSHREQUERIDO É DESCONHECIDO

Se por algum motivo qualquer não se dispuser do NPSHr da bomba pode-se usar um gráfico muito útil, determinado em função da rotação específica e de um coeficiente $\frac{H_t}{NPSHd}$

denominado coeficiente de Thoma.

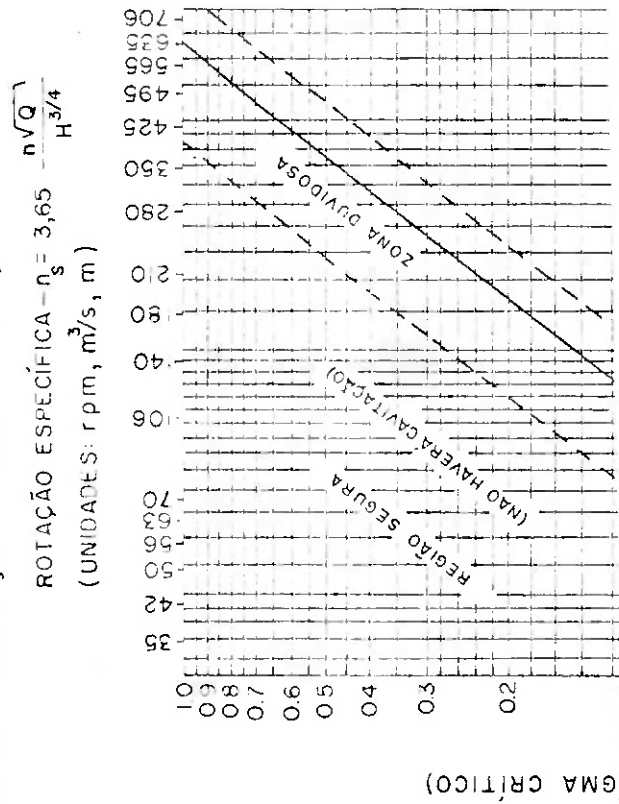
$$ns = \text{rotação específica} = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

onde: n=rotação (rpm)

Q=vazão (m³/s)

H=altura manométrica da bomba

O gráfico abaixo indica a relação de $\frac{H_t}{NPSHd}$ e ns e as regiões de cavitação e não cavitação.



ANEXOS

ANEXO I

EXPERIÊNCIAS COM MÉTODOS ACÚSTICOS PARA DETECÇÃO DE CAVITAÇÃO

T. TEN WULDE

W. H. MOELKER

Sumário: Em princípio, os métodos acústicos são adequados para detecção dos seguintes fenômenos:

- 1) Cavidades
- 2) Ruído de Cavitação
- 3) Bolhas de gás

A detecção de cavitação baseada na detecção de cavidades é mais direta mas também o método mais difícil na prática. Consideravelmente mais fácil é a detecção do ruído da cavitação e a detecção de bolhas de gás.

Há dois métodos considerados para este estudo : o Passivo e o Ativo.

Por método Passivo entendemos como aquele em que as fontes de som provêm de dentro da bomba, enquanto que o Ativo significa que uma fonte de som é usada. As várias possibilidades para detecção acústica da cavitação são discutidas com base em medidas em circuitos de água e sódio.

No relatório feito pelos dois pesquisadores foi dada uma atenção especial para o efeito das bolhas de gases na medida do som ou espectro da vibração.

Introdução: É conhecida que a cavitação em máquinas hidráulicas pode ser detectada por meio das medidas de ruído.

O som produzido pela cavitação é medido de uma das três seguintes maneiras:

- a) Com a ajuda de um microfone na superfície da máquina.
- b) Com um acelerômetro na estrutura da máquina.
- c) Com um hidrofone no líquido.

Sendo que para alguns casos tem sido mostrado que há uma correlação entre o nível do ruído da cavitação e a intensidade da erosão.

O método acústico fornece mais possibilidades que as resumidas acima. Não somente o ruído da cavitação mas também dois outros fenômenos relacionados com a cavitação podem ser investigados por meio do método acústico, isto é, a presença de cavidades nas lamina (pás) do rotor e também a presença de gás no fluxo.

O método Passivo considerado na experiência feita cobre

a faixa de frequências de 100 Hz a 100 KHz.

O método Ativo cobre a faixa de 100Hz a 10MHz.

As experiências foram feitas em um testloop de água para rotores modelos.

Evitamos de colocar neste anexo todos os resultados obtidos pela experiência, mas sim somente mostrar a existência de outro método para a detecção de cavitação (maiores detalhes vide ref. 3)

As conclusões devido a essa experiência foram:

- a) Os resultados dos métodos acústicos para detecção de cavitação são muito sensíveis para a presença de bolhas de gás livres no líquido. As bolhas livres afetam tanto a cavitação na bomba como a transmissão do som de cavitação na posição de observação.
- b) A detecção de cavitação erosiva baseada na detecção de um máximo na gravação do barulho ou níveis de vibração é questionável, especialmente devido a possível presença de bolhas de gás livre no sistema.
- c) Com ambos os métodos: Passivo e Ativo parece possível detectar 10^{-4} m³ bolhas de gás em 1 m³ de líquido. É possível também obter informações da distribuição do tamanho das bolhas.
- d) As medidas de vibrações nas bombas grandes de sódio fornece uma advertência para danos no rotor.

ANEXO II

EXPERIÊNCIA COM TRANSDUTOR DE PRESSÃO ACOPLADO A UM OSCILOSCÓPIO NA TUBULAÇÃO DE RECALQUE

Esta experiência feita em um banco de ensaio no Centro Tecnológico de Hidráulica - C.T.H., que procurava através da frequência de variação da pressão captada pelo osciloscópio, obter-se uma correlação com início da cavitação não obteve resultados, isto é, não se conseguiu chegar a nenhuma conclusão.

A colocação de um transdutor de pressão na tubulação de recalque para análise da frequência de variação de pressão é incorreta, pois, neste local a pressão varia, sem periodicidade, mesmo sem haver cavitação. Talvez a colocação de um transdutor na carcaça da bomba levaria a uma análise mais correta, devido a maior proximidade com o local do fenômeno.

ANEXO III

CONCLUSÃO

Ilustrou-se no presente trabalho o critério mais utilizado pelos fabricantes para determinação da curva do NPSH requerido em bombas centrífugas. Porém a definição de um único critério para ensaios de cavitação não é possível. Outros critérios como os mencionados no item 2.1. poderam, eventualmente serem utilizados de pendendo de cada caso específico.

Por exemplo, para bombas que operam por curto tempo o critério de erosão pode ser, particularmente de pouca importância, enquanto que há casos em que a erosão deve ser evitada totalmente. Há casos também onde ruídos ou níveis de vibrações são os parâmetros críticos para o sistema.

Portanto, o critério escolhido deve ser o mais conveniente para cada caso específico.

Fig. 1 - Lado da sucção de uma instalação de bomba, da seção transversal da entrada da instalação até a entrada do rotor.

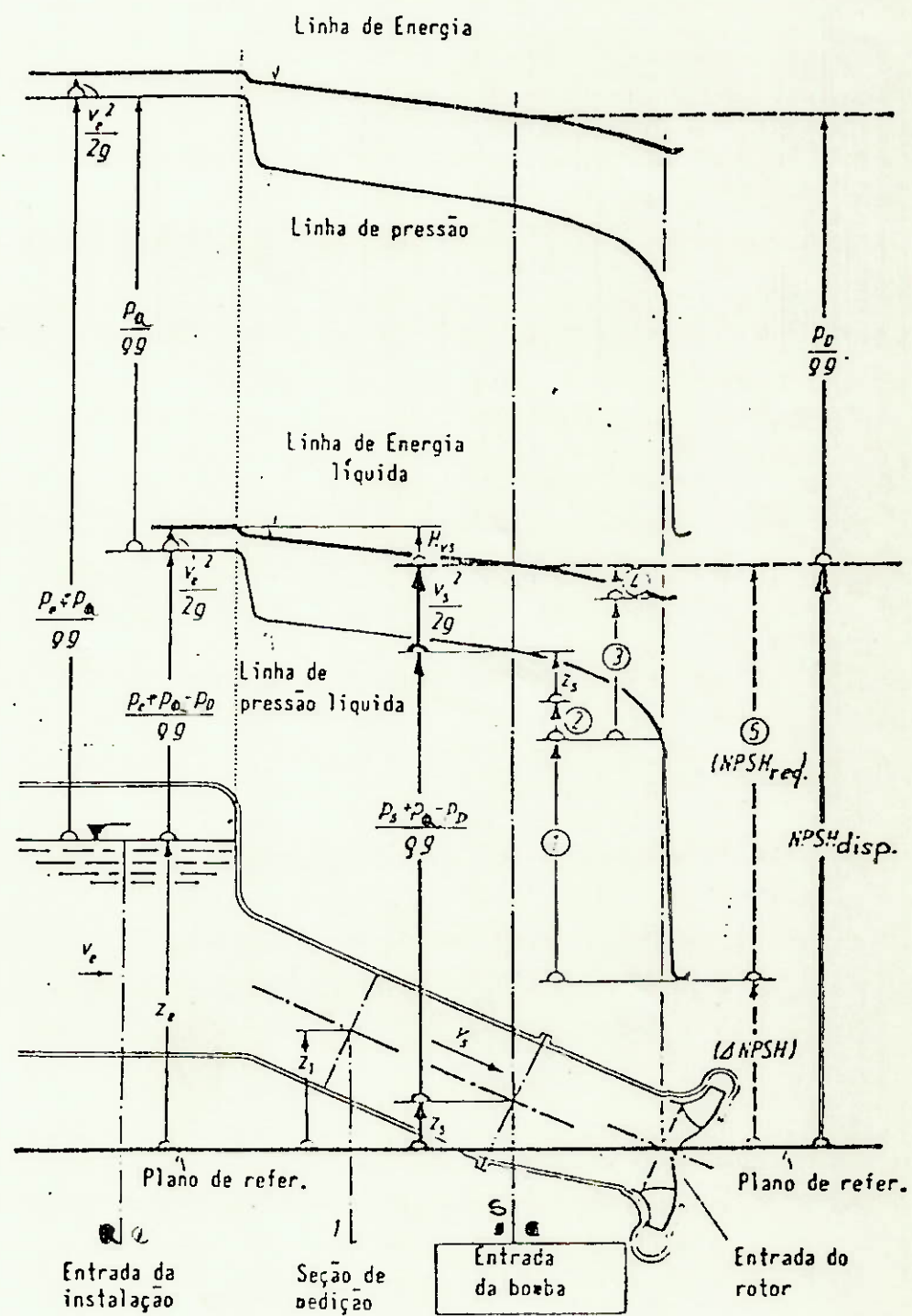


Fig. 2 - Influência do $NPSH_{disp}$ sobre a curva de funcionamento

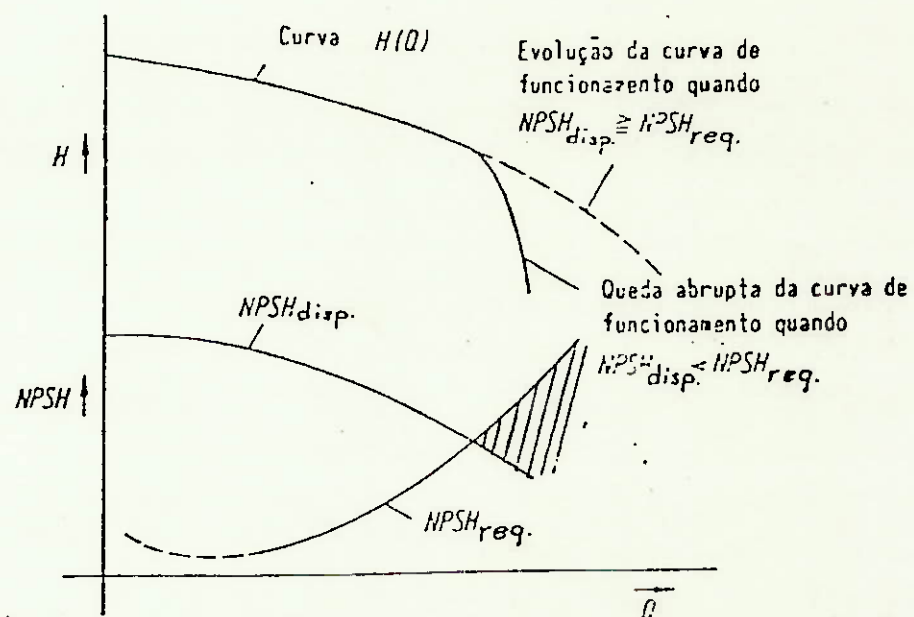
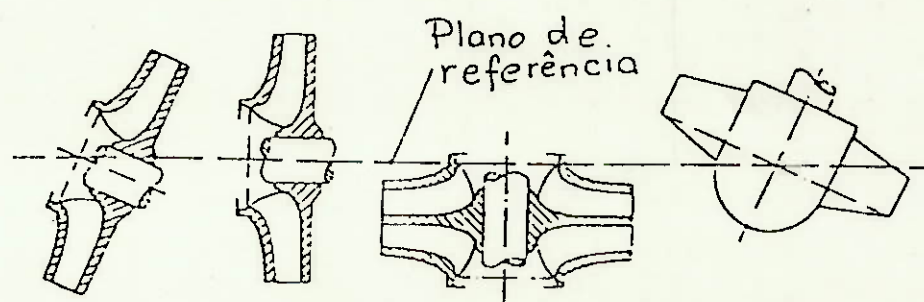


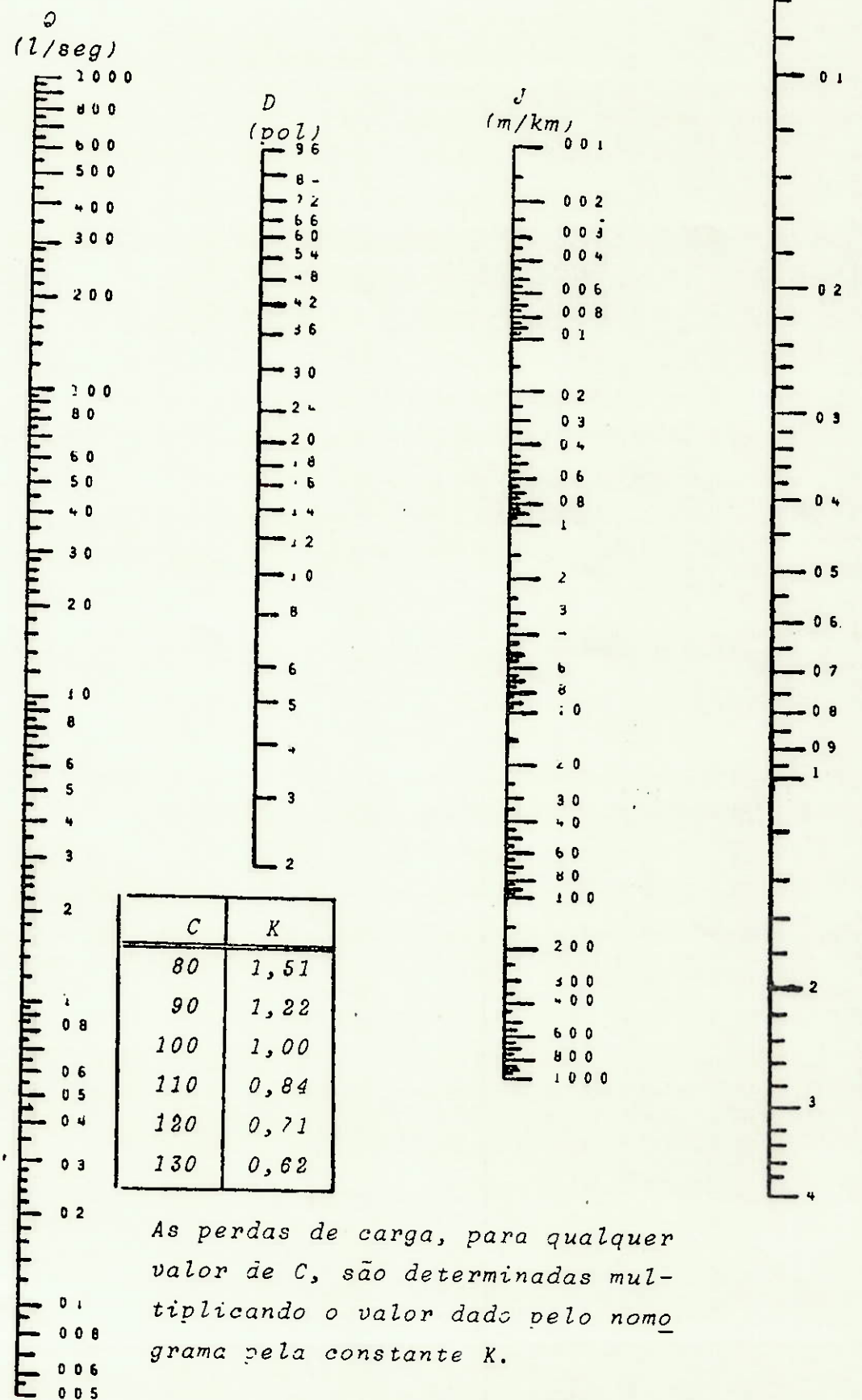
Fig. 3 - Definição do plano de referência em diferentes rotores



ANEXO IV - FIGURAS E TABELAS

Fig. 4

NOMOGRAMA DA FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS
 $C = 100$



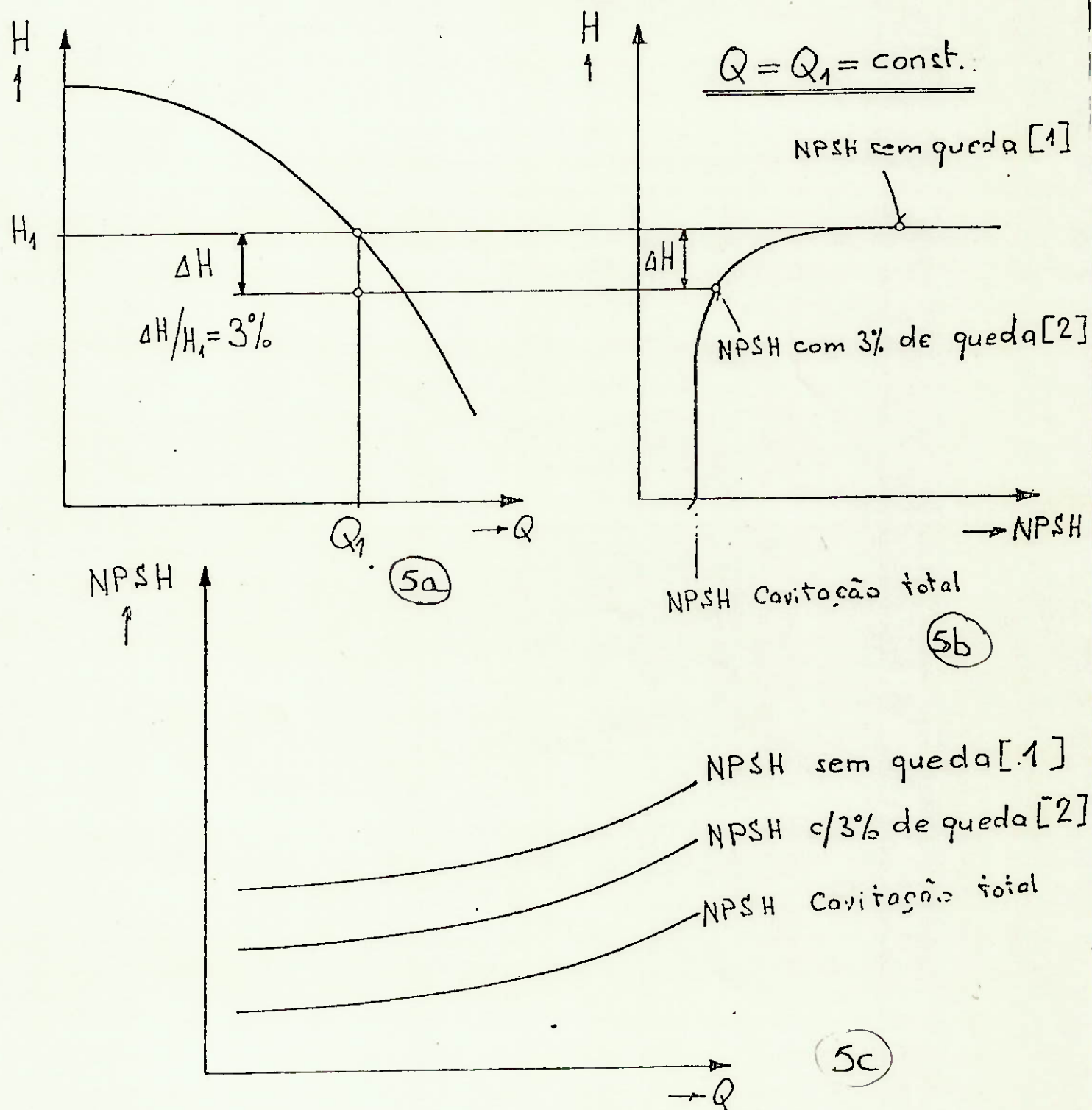
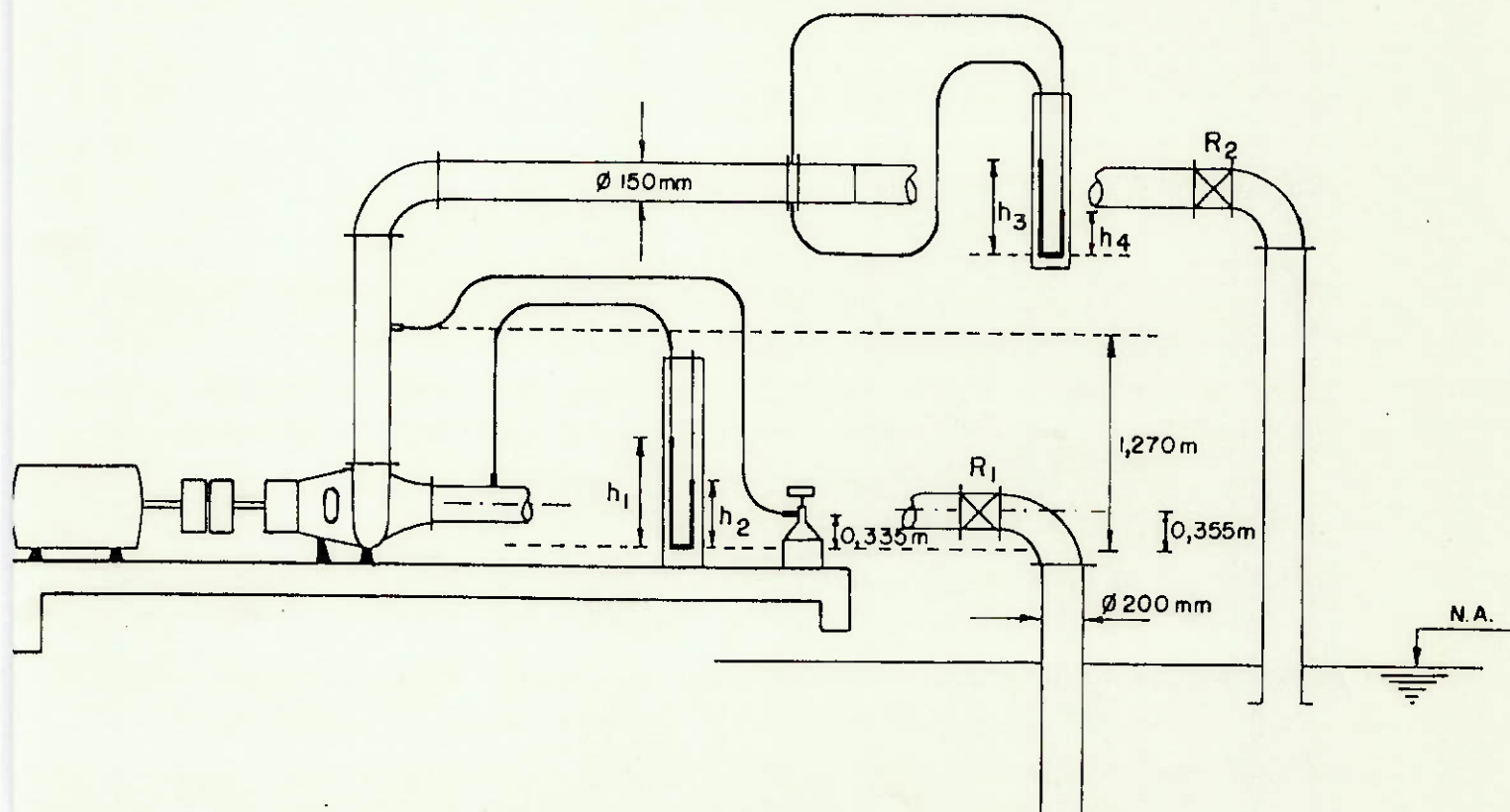


Fig. 6



Para a válvula de estrangulamento e Medidor de vazão

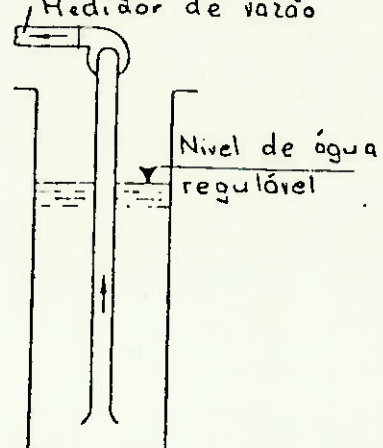


Fig. A1 - Teste de cavitação
Variação do valor $NPSH_{disp}$,
em consequência da modifica-
ção do nível do líquido no
reservatório de sucção

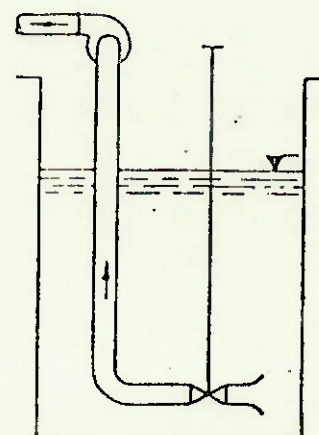


Fig. A2 - Teste de Cavitação
Variação do valor $NPSH_{disp}$, em
consequência de uma válvula de
estrangulamento na tubulação
de sucção.

ANEXO IV - FIGURAS E TABELAS

TABELA T-1 - VALORES DO COEFICIENTE C SEGUNDO OS DADOS ANALISADOS POR HAZEN-WILLIAMS. TUBOS DE FERRO FUNDIDO***.

ANOS	010 4"	015 6"	020 8"	025 10"	030 12"	035 14"	040 16"	045 18"	050 20"	075 24"	090 30"	105 36"	150 42"	150 60"
00**	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
0	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130
5	117	118	119	120	120	120	120	120	120	120	121	122	122	122
10	106	108	109	110	110	110	111	112	112	112	113	113	113	113
15	96	100	102	103	103	103	104	104	105	105	106	106	106	106
20	88	93	94	96	97	97	98	98	99	99	100	100	100	100
25	81	86	89	91	91	91	92	92	93	93	94	94	94	95
30	75	80	83	85	86	86	87	87	88	89	90	90	90	91
35	70	75	78	80	82	82	83	84	85	85	86	86	87	88
40	64	71	74	77	78	78	79	80	81	81	82	83	83	84
45	60	67	71	73	75	76	76	77	77	78	78	79	80	81
50	56	63	67	70	71	72	73	73	74	75	76	76	77	78

(**) O valor 140 corresponde ao início de funcionamento de linhas muito bem executadas, com tubos de boa qualidade.

(***) Para tubulações de aço.

a. Com juntas "Lock-bar": Adotar os mesmos coeficientes indicados para os tubos de ferro fundidos.

b. Soldadas: Tomar como valores de C os valores indicados para tubos de ferro fundido 5 anos mais velhos.

c. Rebitados: Tomar como valores de C os valores indicados para tubos de ferro fundido 10 anos mais velhos.

d. Com revestimentos especiais: Admitir 130.

ANEXO IV - FIGURAS E TABELAS

TABELA T-2 - FATORES DE CORRESPONDÊNCIA "K" PARA OS VÁRIOS VALORES DE "C" NA FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS.

C	K	C	K	C	K	C	K
40	5.453	70	1.936	100	1.000	130	0.615
41	5.213	71	1.886	101	0.982	131	0.606
42	4.986	72	1.837	102	0.964	132	0.598
43	4.773	73	1.791	103	0.947	133	0.590
44	4.574	74	1.747	104	0.930	134	0.582
45	4.388	75	1.704	105	0.914	135	0.574
46	4.213	76	1.662	106	0.898	136	0.566
47	4.048	77	1.623	107	0.882	137	0.558
48	3.893	78	1.584	108	0.867	138	0.551
49	3.748	79	1.547	109	0.852	139	0.543
50	3.610	80	1.512	110	0.838	140	0.536
51	3.480	81	1.477	111	0.824	141	0.529
52	3.370	82	1.444	112	0.811	142	0.522
53	3.241	83	1.412	113	0.797	143	0.516
54	3.131	84	1.381	114	0.785	144	0.509
55	3.026	85	1.351	115	0.772	145	0.503
56	2.927	86	1.322	116	0.760	146	0.496
57	2.832	87	1.294	117	0.748	147	0.490
58	2.742	88	1.267	118	0.736	148	0.484
59	2.657	89	1.241	119	0.725	149	0.478
60	2.576	90	1.215	120	0.713	150	0.472
61	2.498	91	1.191	121	0.703	151	0.466
62	2.424	92	1.167	122	0.692	152	0.461
63	2.353	93	1.144	123	0.682	153	0.455
64	2.285	94	1.121	124	0.671	154	0.449
65	2.221	95	1.100	125	0.661	155	0.444
66	2.159	96	1.079	126	0.652	156	0.439
67	2.099	97	1.058	127	0.642	157	0.434
68	2.043	98	1.038	128	0.633	158	0.429
69	1.988	99	1.019	129	0.624	159	0.424

Obs.: Os valores de T-2 são aplicados para correção de resultados.
(Valores de C diferentes de 100)

TABELA T-3 - VALORES APROXIMADOS DE K (Perdas Localizadas).

Peça e Perda	K
Ampliação gradual	0,30 *
Bocais	2,75
Comporta, aberta	1,00
Controlador de vazão	2,50
Cotovêlo de 90°	0,90
Cotovêlo de 45°	0,40
Crivo	0,75
Curva de 90°	0,40
Curva de 45°	0,20
Curva de 22 1/2°	0,10
Entrada Normal em Canalização	0,50
Entrada de Borda	1,00
Existência de pequena derivação	0,03
Junção	0,40
Medidor Venturi	2,50 **
Redução gradual	0,15 *
Registro de ângulo, aberto	5,00
Registro de gaveta, aberto	0,20
Registro de globo, aberto	10,00
Saída de canalização	1,00
Tê, passagem direta	0,60
Tê, saída de lado	1,30
Tê, saída bilateral	1,80
Válvula de pé	1,75
Válvula de retenção	2,50
Velocidade	1,00

(**) Relativa à velocidade na canalização.

(*) Com base na velocidade maior (seção menor).

ANEXO IV - FIGURAS E TABELAS

Tabela T-4 - Pressão de Saturação e peso específico em função da temperatura

Temperatura oC	Pressão de Saturação kp/cm ²	Peso específico kp/cm ³	Temperatura oC	Pressão de Saturação kp/cm ²	Peso específico kp/cm ³	Temperatura oC	Pressão de Saturação kp/cm ²	Peso específico kp/cm ³
0	0,0062	0,9008	125	2,3666	0,9380	250	40,56	0,7992
5	0,0089	1,0000	130	2,7514	0,9348	255	44,10	0,7918
10	0,0125	0,9996	135	3,192	0,9305	260	47,87	0,7840
15	0,0174	0,9990	140	3,685	0,9260	265	51,88	0,7759
20	0,0268	0,9982	145	4,237	0,9216	270	56,14	0,7678
25	0,0323	0,9970	150	4,854	0,9169	275	60,66	0,7593
30	0,0482	0,9956	155	5,540	0,9121	280	65,46	0,7506
35	0,0573	0,9939	160	6,302	0,9073	285	70,54	0,7416
40	0,0752	0,9921	165	7,146	0,9023	290	75,92	0,7323
45	0,0977	0,9900	170	8,076	0,8973	295	81,60	0,7227
50	0,1258	0,9880	175	9,101	0,8920	300	87,61	0,7124
55	0,1605	0,9857	180	10,225	0,8879	305	93,95	0,7015
60	0,2031	0,9831	185	11,456	0,8814	310	100,64	0,6906
65	0,2550	0,9804	190	12,800	0,8760	315	107,69	0,6793
70	0,3177	0,9777	195	14,265	0,8703	320	115,13	0,6671
75	0,3931	0,9748	200	15,857	0,8646	325	122,95	0,6510
80	0,4329	0,9718	205	17,585	0,8587	330	131,18	0,6402
85	0,5894	0,9687	210	19,456	0,8528	335	139,85	0,6257
90	0,7149	0,9653	215	21,477	0,8465	340	148,96	0,6098
95	0,8619	0,9619	220	23,659	0,8403	345	153,54	0,5910
100	1,0032	0,9583	225	26,007	0,8339	350	168,63	0,5724
105	1,2318	0,9517	230	28,531	0,8272	355	179,24	0,5512
110	1,4609	0,9510	235	31,239	0,8206	360	190,42	0,5243
115	1,7239	0,9471	240	34,140	0,8136	365	202,21	0,4926
120	2,0245	0,9431	245	37,244	0,8064	370	214,68	0,4481

ANEXO IV - FIGURAS E TABELAS

Tabela T-5

Altitude acima do nível do mar m	Pressão Atmosférica Média p_a			
	N/m^2	mbar	Torr	kp/cm^2
0	101 300	1 013	760	1,033
250	98.064	981	736	1,0
500	95 500	955	716	0,973
750	92.670	927	695	0,945
1 000	89 900	899	674	0,916
1 500	84.825	848	636	0,865
2 000	79 500	795	596	0,811
3 000	70.606	706	530	0,72

SEMCO
DO
BRASIL
S A

MEMORIAL DE CALCULO

CLIENTE PETROBRAS. S/A - PETROBRÁS AMLUC

REF P-7121 -A

26

BOMBA TIPO CM 150-100-320 L

SERVIÇO: Inter Resid

BOMBA Nº SHT 11.1. 010

MOTOR Nº HM 09015

CÁLCULO DE NPSH

- 1 Pressão barométrica P_b (mm Hg): 686
- 2 Correção (altitude) (mm Hg) : +16,0
- 3 Pressão Barométrica Corrigida P_{bc} (mm Hg)
 $P_{bc} = P_b (\text{mm Hg}) + 16,0 = 702$
- 3.1 Pressão Barométrica Corrigida (m.C.A.)
 $P_{bc} (\text{mm Hg}) \times 0,0136 = 9,547$ (Ha)
- 4 Pressão Parcial de vapor d'água (m.C.A.)
 $t = 26^\circ\text{C}$ 0,345 (Hv)
- 5 $(H_a - H_v)$ (m.C.A.) = 9,202
- 6 Vazão do Líquido (m^3/h): 111
- 7 $\varnothing$ Sucção (mm): 152,4
- 8 Velocidade do Líquido na Sucção de Medição (m/s): 1,689
- 9 Pressão Dinâmica (m.C.A.): $H_d = \frac{v^2}{2g} = 0,145$
- 10 NPSH requerido pelo cliente (m.C.A.): 4,4
- 11 Valor Nominal de H_m em função do NPSH requerido (m.C.A.)
 $H_m = (H_a - H_v) + H_d - \text{NPSH requerido} = 4,948$
- 12 H_m no Vacuômetro de mercúrio (m.C.A.): 4,948
 H_m no Vacuômetro de mercúrio (mm Hg) = m.C.A. / 0,0136 = 363,8
- 13 NPSH obtido pelo teste conforme valor H_m de teste (m.C.A.):
 $\text{NPSH}_t = (H_a - H_v) + H_d - H_m \text{ teste (m.C.A.)} = 3,4$

TESTE DE NPSH

DATA: 18.11.77

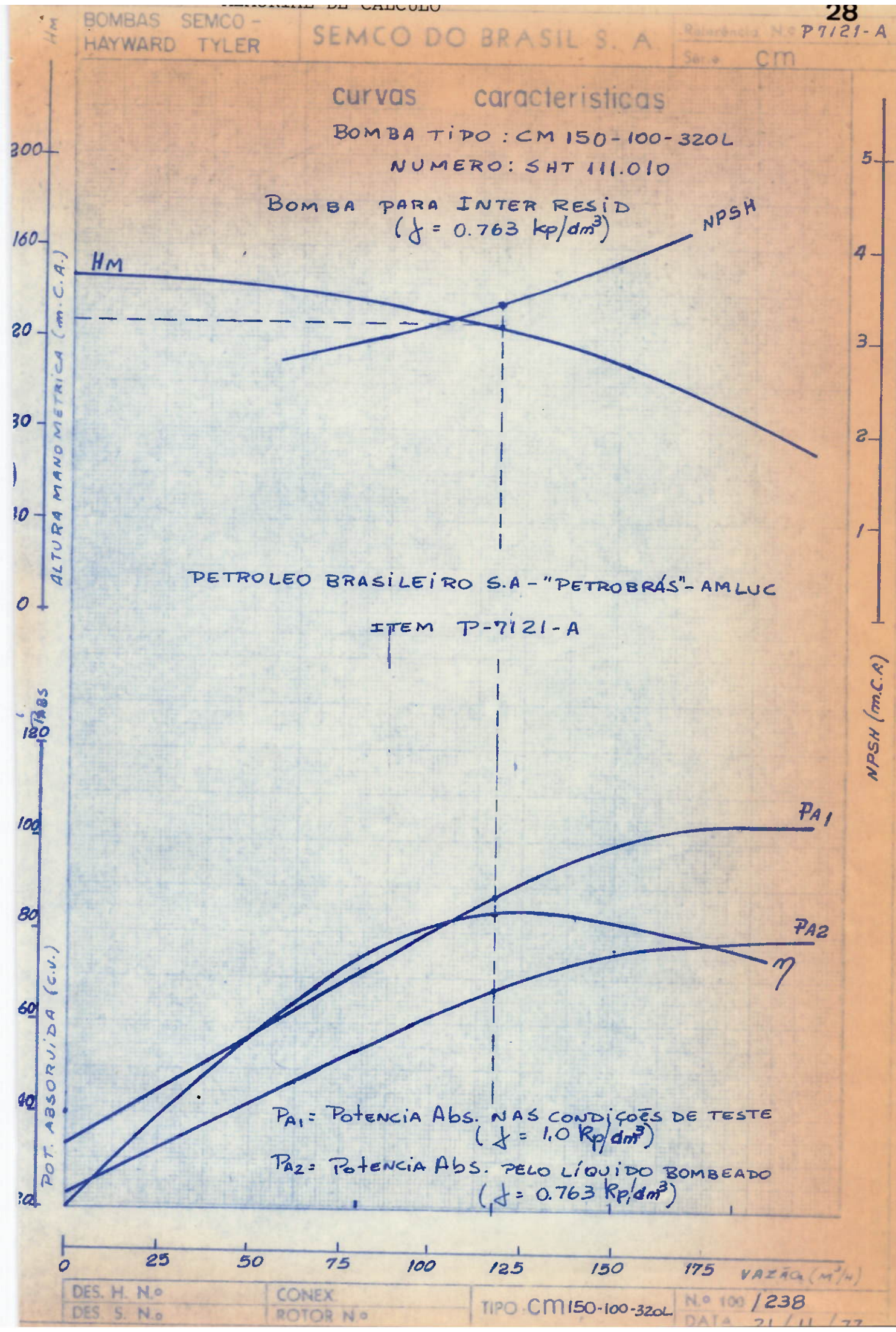
	1	2	3	4	5	6
Vazão (m^3/h)	111	79	150			
NPSH req. (m.C.A.)	4,4	3,6	5,5			
8 Velocidade (m/s)	1,689	1,202	2,282			
9 H_d (m.C.A.)	0,146	0,073	0,264			
12 H_m nominal (mm Hg)	363,8	417,3	291,6			
13 H_m teste (mm Hg)	437	483	409			
13 NPSH _t (m.C.A.)	3,4	2,7	3,9			

Nota:

H_m de teste é determinada pela coluna de mercúrio no mesmo instante em que a vazão, H_m total e Pot. Abs. caem

BOMBAS SEMCO- HAYWARD TYLER

17.12.77



ANEXO VI - FOTOS

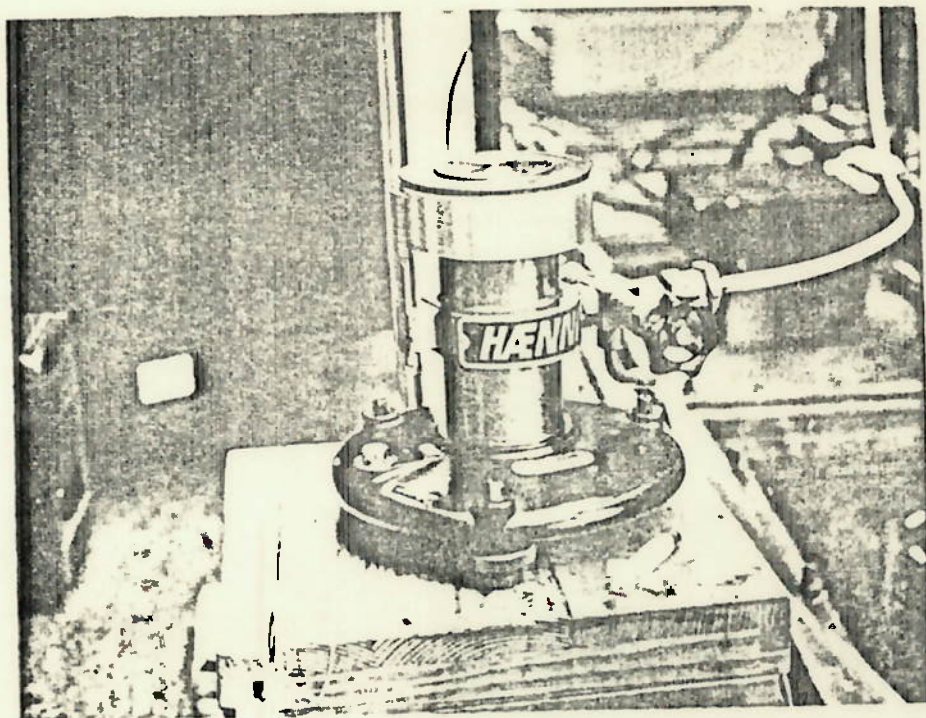


FOTO Nº 2
Manômetro de peso morto

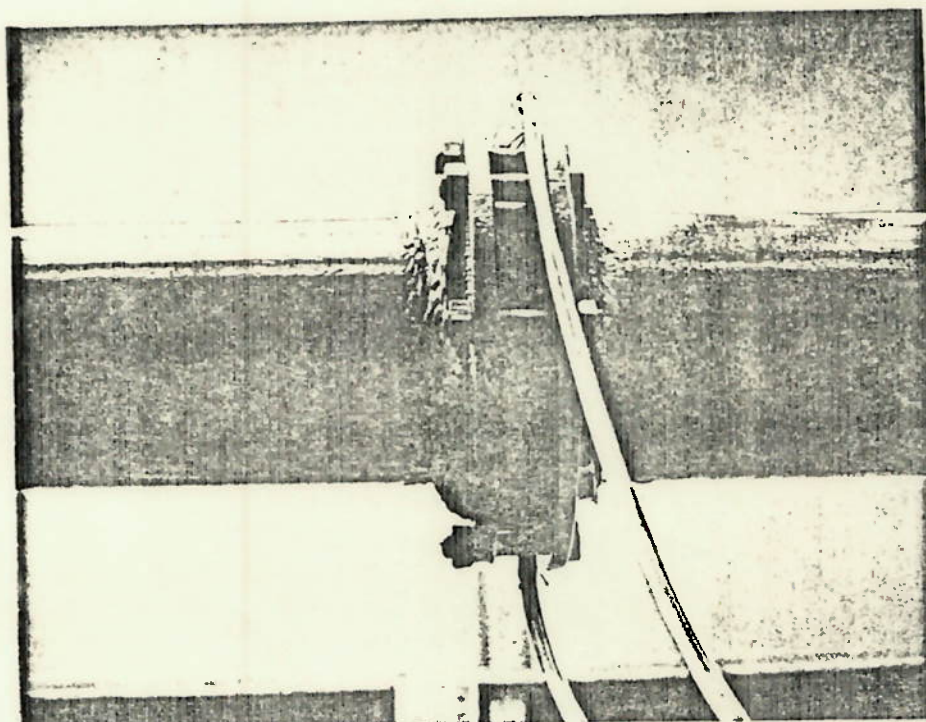


FOTO Nº 3
Tubo de vazão (Insert Flow Tube)

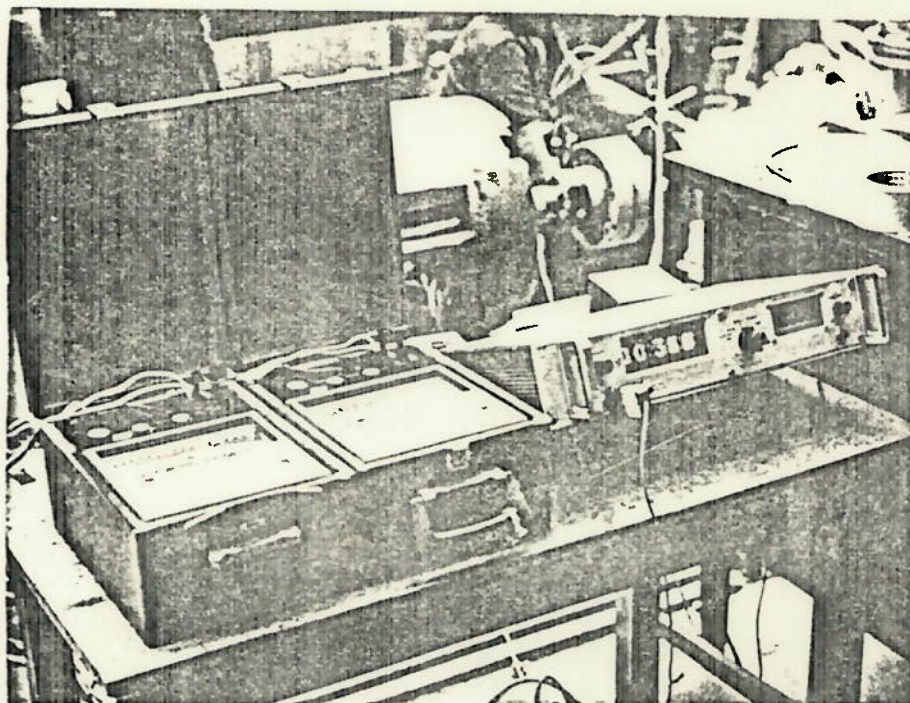


FOTO Nº 4

Wattímetros (medição da potência elétrica com
tador de pulsos (medição da rotação)

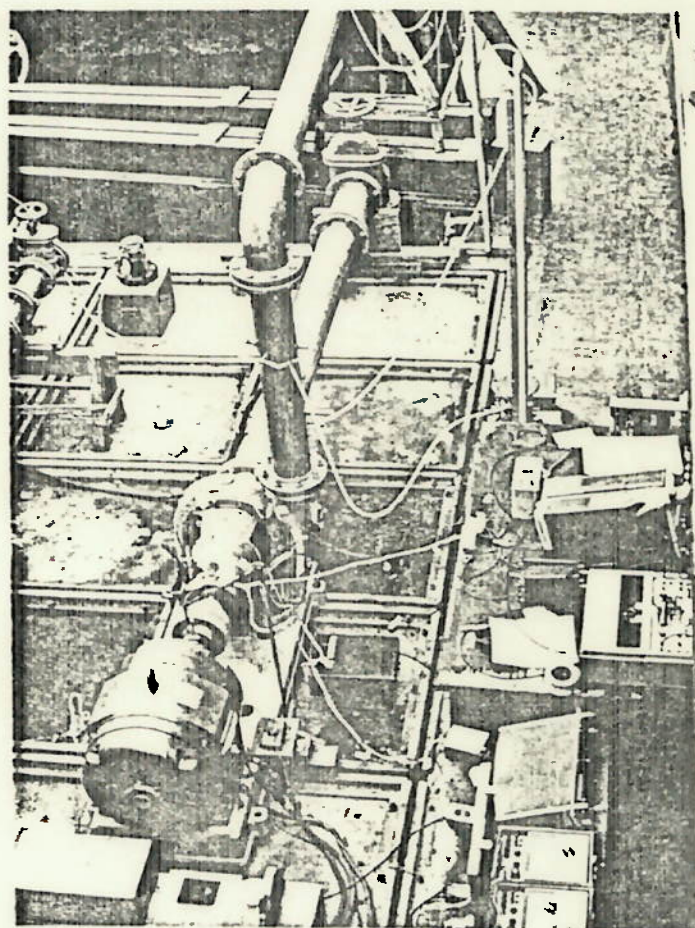


FOTO Nº 1

Vista geral do banco de ensaios

BIBLIOGRAFIA

1. Prof. Dr. Edmundo Koelle. Bombas - Introdução ao Estudo. Apostila da EPUSP - 1978, fascículo 1
2. Sulzer Weise. Apostila de NPSH
3. A Conference arranged by the Fluid Machinery Group of the Institution of Mechanical Engineers Heriot - Watt University, Edinburgh 3-5 September 1974. Cavitation. Published by Mechanical Engineering Publications Limited. 1974
4. Hydraulic Institute Standards for centrifugal , rotary and reciprocating pumps, 20a edição