

Efeitos do desgaste por abrasão, da concentração e do diâmetro médio da fase sólida de misturas nas curvas características de uma bomba centrífuga utilizada no recalque de esgoto

IVALDO MIRANDA COIADO

Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-USP, professor Assistente na Universidade Estadual de Campinas-Unicamp

ANTONIO AUGUSTO S. NOGUEIRA

Doutor em Ciências Física-Matemáticas, professor Titular na Escola Politécnica da USP

Para investigar as influências da concentração e do diâmetro da fase sólida da mistura bombeada nas curvas características da bomba empregada, verificar o efeito do desgaste por abrasão do rotor na altura manométrica e no rendimento da bomba centrífuga utilizada e apresentar solução econômica, foi projetada e montada uma bancada que permitiu variar o tipo de sólido da mistura, a concentração e a velocidade média do escoamento.

A crescente demanda de bombas para o recalque de misturas sólido-líquidas, principalmente nas indústrias de mineração, dragagens, estações de tratamento de esgotos, irrigação, drenagens etc, está requerendo o desenvolvimento de projetos de bombas centrífugas de modo a aumentar sua resistência ao desgaste por abrasão, reduzindo os custos de manutenção.

Para projetar um sistema de bombeamento de um líquido qualquer, é necessário conhecer apenas suas propriedades principais: viscosidade e densidade. Com a vazão desejada, dimensiona-se a canalização de sucção e recalque, calculam-se as perdas de cargas e a altura manométrica, determina-se o rendimento e, finalmente, calcula-se a potência da bomba.

A presença dos sólidos nas misturas bombeadas introduz muitas outras variáveis, cujas influências nas curvas características das bombas centrífugas ainda não são totalmente conhecidas.

O número de estudos publicados sobre a influência dos sólidos no desempenho das bombas centrífugas é relativamente pequeno. Além do que, na maioria dos trabalhos, trata-se geralmente de misturas compostas de partículas sólidas específicas, limitadas em tamanho e propriedades.

As pesquisas publicadas indicam que a altura manométrica e o rendimento das bombas centrífugas são influenciadas pela concentração, pelo tamanho, pela densidade, pela distribuição granulométrica, pela forma, e pela velocidade de sedimentação dos grãos sólidos, que compõem a mistura.

Para a rotação e descargas constantes, pode-se definir duas relações:

$$\begin{aligned} H_m/H_a &= \text{relação entre as alturas manométricas desenvolvidas pela bomba ao recalcar mistura e água limpa.} \\ \eta_m/\nu\eta &= \text{relação entre os rendimentos desenvolvidos pela bomba ao recalcar mistura e água limpa.} \end{aligned}$$

Stepanoff⁽⁹⁾, em 1965, ao recalcar misturas sólido-líquidas, observou uma queda na altura manométrica e no rendimento, e que a queda da altura manométrica da bomba, devido à presença dos sólidos, está diretamente relacionada com a redução do rendimento, ou seja:

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{\eta_m}{\eta_a} \quad (01)$$

portanto:

$$P_m = d_{r_m} \cdot P_a \quad (02)$$

Mostrou também, experimentalmente, que as quedas da altura manométrica e do rendimento independem da vazão e da rotação.

Frazier⁽⁴⁾, em 1968, relacionou as quedas da altura manométrica e do rendimento com a concentração em volume e com a densidade relativa da mistura, ficando:

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{\eta_m}{\eta_a} = \frac{1 - C}{d_{r_m}} \quad (03)$$

Wiedenroth⁽¹⁰⁾, em 1970, encontrou maiores quedas no rendimento ao recalcar partículas com arestas aguçadas do que partículas arredondadas.

McElvain⁽⁵⁾, em 1974, estudando a influência da densidade relativa do tamanho e da concentração dos sólidos na mistura sobre a altura manométrica e o rendimento de bombas centrífugas, encontrou uma dependência linear entre as relações das alturas manométricas e rendimentos com a concentração, através da seguinte equação:

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{\eta_m}{\eta_a} = 1 - f(d_{50}) \cdot \frac{C}{0,20} \quad (04)$$

Burgess et alii⁽²⁾, em 1976, dos ensaios de bombeamento de misturas feitas com uma bomba centrífuga, concluíram que as relações

entre as alturas manométricas e os rendimentos são funções da concentração em peso (C_w), do diâmetro médio representado pelo (d_{50}) e da densidade relativa do sólido, e que independem da vazão e da rotação:

$$\frac{H_m}{H_a} = \Phi \left(C_w, \frac{d_{50}}{D}, dr_s \right) \quad (05)$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} = \Phi \left(C_w, \frac{d_{50}}{D}, dr_s \right) \quad (06)$$

Cave⁽³⁾, em 1976, estudou os efeitos da concentração, da densidade relativa e do tamanho dos sólidos sobre o desempenho de bombas centrífugas, utilizando-se de dados experimentais determinados por outros pesquisadores.

Os dados obtidos de ensaios feitos com uma bomba de quatro polegadas (Warman Padrão), com todos os componentes desgastáveis fabricados em ferro fundido endurecido, submetida ao recalque de misturas cujas concentrações variaram de até 27% V.M., as vazões variaram entre 9,5 a 41,0 l/s. Os sólidos utilizados na composição das misturas foram: areia de praia ($dr_s = 2,67$; $d_{50} = 0,295$ mm), areia de rio ($dr_s = 2,64$; $d_{50} = 1,290$ mm), ilmenita ($dr_s = 4,63$; $d_{50} = 0,170$ mm) e minério pesado ($dr_s = 4,35$; $d_{50} = 0,290$ mm). Cave concluiu que a razão (H_m/H_a) decresce linearmente com a concentração para os quatro tipos de misturas. Os resultados obtidos com misturas compostas de areias de praia e rio, mostram certa queda adicional na razão (H_m/H_a) para concentrações acima de 27% V.M.. Concluiu ainda que a razão entre os valores de $[1 - (H_m/H_a)]$ para os sólidos de mesmo diâmetro médio (d_{50}), aproxima-se da razão de suas densidades relativas menos a unidade, ou seja:

$$\frac{[1 - (H_m/H_a)] \text{ areia praia}}{[1 - (H_m/H_a)] \text{ minério pesado}} = \frac{(dr) \text{ areia praia} - 1}{(dr) \text{ minério} - 1} \quad (07)$$

Em relação ao efeito do tamanho das partículas sólidas, Cave verificou que o tamanho da partícula tem uma influência importante sobre a razão (H_m/H_a). Para material de diâmetro médio (d_{50} de até 1,29mm, a relação entre as alturas manométricas $[1 - (H_m/H_a)]$ é aproximadamente proporcional a $\ln(d_{50}/22,7)$.

Finalmente, Cave chega numa expressão geral para se determinar os efeitos do peso específico, tamanho e concentração do sólido da mistura, baseado nos dados obtidos com a bomba de quatro polegadas:

$$1 - \frac{H_m}{H_a} = 0,000385 (dr_s - 1) \left(1 + \frac{4}{dr_s} \cdot C_w \cdot \ln \left(\frac{d_{50}}{22,7} \right) \right) \quad (08)$$

Em relação à variação do rendimento da bomba, devido à presença de sólidos, os resultados não foram suficientemente consistentes para chegar a conclusões, porém, para finalidades práticas, Cave sugere que as quedas da altura manométrica e rendimento sejam tomadas como sendo iguais.

Moore⁽⁶⁾, em 1978, concluiu que os sólidos em suspensão causam quedas nas curvas da altura manométrica e rendimento de bombas centrífugas; e que a correção baseada somente no peso específico da mistura não é suficiente para se calcular a potência da bomba.

A queda do rendimento de bombas centrífugas, ao recalcar misturas sólido-líquidas, deve-se principalmente ao deslizamento entre o fluido e as partículas sólidas durante a aceleração e desaceleração da mistura no instante em que está entrando ou saindo do rotor. Este deslizamento dos sólidos, e a conseqüente perda de carga, aumenta com partículas de velocidades de sedimentação mais altas.

Wiedenroth⁽¹¹⁾, em 1978, estudou experimentalmente o comportamento de bombas centrífugas ao transportar misturas compostas de quinze tipos diferentes de sólidos, principalmente areias e cascalhos (d_{50} variando entre 0,23 e 4,20mm, $dr_s = 2,60$), plástico ($d_{50} = 2,50$ mm, $dr_s = 1,03$), materiais artificiais ($d_{50} = 0,42$ e 3,80mm, $dr_s = 3,75$) e bauxita ($d_{50} = 2,10$ e 0,60mm, $dr_s = 3,15$). As concentra-

ções variaram de 5 a 30% V.M., iniciando e terminando os testes com água limpa.

Wiedenroth concluiu que as quedas da altura manométrica e do rendimento de uma bomba centrífuga, devido à presença dos sólidos na mistura bombeada, devem-se ao atrito dos sólidos sobre as faces das aletas do rotor e ao impacto das partículas sólidas contra o rotor, causando uma perda adicional. Devem-se, ainda, à redução da seção de escoamento da fase líquida, devido à presença do sólido, diminuindo a quantidade de energia transferida para a mistura.

Sellgren⁽⁸⁾, em 1979, investigou experimentalmente o desempenho de uma bomba centrífuga, revestida de borracha, ao bombear minérios com concentrações em peso na ordem de 65 a 70%. Utilizou partículas sólidas com diâmetros de até 8 mm e densidades relativas variando entre 2,3 e 4,2.

Sellgren verificou que a altura manométrica e o rendimento reduziram em 30 a 40% nos testes com minério de ferro bruto. A queda do rendimento foi equivalente à queda da altura manométrica para concentrações de 20 a 25% V.M., ou seja:

$$\frac{H_m}{H_a} = \frac{\eta_m}{\eta_a} \quad (10)$$

Para granito triturado ($d_{50} = 3,00$ mm; $dr_s \cong 2,68$) com concentrações entre 11 e 15% V.M., o rendimento da bomba reduziu de 70% quando comparado com água limpa, e que:

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} < \frac{H_m}{H_a} \quad (09)$$

Portanto, a potência requerida pela bomba é maior que a dada pela Equação (02), isto é:

$$P_m > dr_m \cdot P_a \quad (10)$$

Para o complexo de minério ($d_{50} = 0,22$ mm; $dr_s \cong 3,40$) o rendimento quase não sofreu alteração, quando comparado com água limpa, e que:

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} > \frac{H_m}{H_a} \quad (11)$$

portanto:

$$P_m < dr_m \cdot P_a \quad (12)$$

Os resultados apresentados por Sellgren demonstram a complexidade da influência das propriedades física e química dos sólidos sobre o desempenho da bomba. O complexo de minério contém uma grande quantidade de talco mineral que, quando misturado com água, tem um pronunciado efeito de lubrificação. A não queda no rendimento pode ser explicada pela redução do atrito no rotor da bomba, o qual compensa a perda de carga extra, devido à presença dos sólidos.

Sellgren verificou também que a não uniformidade da distribuição granulométrica das partículas sólidas influi na queda do rendimento da bomba em menor grau do que aquelas de tamanho uniforme. Questiona também o uso do diâmetro (d_{50}), como sendo um tamanho médio representativo das partículas sólidas que compõem as misturas. Observou, ainda, que a queda da altura manométrica independe da rotação e que há uma leve queda no rendimento para rotações maiores.

Um outro efeito que altera a altura manométrica e o rendimento de bombas, porém pouco investigado, é o desgaste dos componentes internos das bombas, devido à abrasão dos sólidos.

Sabe-se que, apesar dos cuidados especiais quanto à escolha do material de fabricação das bombas, o desgaste por abrasão é impossível de ser eliminado totalmente. Entretanto, a vida útil destes componentes em contacto com materiais abrasivos pode ser prolongada, reduzindo o custo de manutenção, caso se tomem os seguintes cuidados especiais ao projetar a bomba centrífuga:

1. O material de fabricação da bomba tenha dureza superior da-
quele a ser recalcado;

2. Os componentes sujeitos a desgastes sejam mais espessos;

3. Adotar formas hidrodinâmicas que minimizem o desgaste;

4. Adotar concepções mecânicas que permitam que as partes mais
sujeitas a desgastes sejam substituídas com facilidade.

Sabe-se que o formato da carcaça de bombas centrífugas
tem importante influência sobre a altura manométrica e o ren-
dimento. Variações nas rugosidades internas da carcaça e mes-
mo distorções no formato devido a desgastes por abrasão po-
dem dissipar parte da energia fornecida ao escoamento pelo ro-
tor, resultante em baixos rendimentos.

Os desgastes abrasivos aumentam rapidamente quando a
dureza da partícula sólida excede àquela do material das com-
ponentes das bombas.

Existem poucos trabalhos experimentais em laboratório sob-
re desgastes por abrasão dos componentes de bombas. As ob-
servações limitam-se apenas àquelas verificadas na prática
quando na reposição de peças inutilizadas pelo desgaste.

Bree⁽¹⁾ estudou o comportamento de diversos materiais para
a fabricação dos componentes de dragas submetidos a ensaios
com misturas de água e areias, sendo um dos poucos trabalhos
experimentais em laboratório existente sobre o assunto. Bree
considerou os seguintes fatores que levam os componentes de
dragas a sofrerem desgastes:

1. O tipo de solo a ser dragado;

2. A descarga e as condições de operação da draga;

3. Os formatos dos componentes da draga;

4. Os tipos dos materiais de que são fabricados os compo-
nentes da draga.

O tipo do solo bombeado é o fator mais importante na de-
terminação do grau de desgaste. Para determinar a relação en-
tre o tipo de solo e o desgaste, Bree classificou os solos em três
grupos principais:

I. Solos plásticos coesivos (inclui: argila, silte e similares
com diâmetros inferiores a 0,016mm);

II. Solos não coesivos (inclui: areia e cascalho com diâme-
tros entre 0,016 a 0,064 mm e iguais a 0,016 e 0,064 mm);

III. Material consolidado coesivo (inclui: ardósia, granito,
coral e similares com diâmetros superiores a 0,064 mm).

Bree verificou que, na dragagem de solos plásticos coesivos,
o desgaste é pequeno e que misturas compostas pelos solos (I),
mais (II) ou (III), em que o principal componente é o solo (I), a
taxa de desgastes é bem menor, caso fossem utilizados somente
os solos (II) ou (III).

Para o grupo dos solos (II), não coesivos, a taxa de desgaste
aumenta muitíssimo em comparação com os do grupo (I).

O desgaste abrasivo é influenciado pelo tipo de areia, pela
sua densidade relativa, dureza e rugosidade superficial. Em ge-
ral, pode-se assumir que o desgaste aumenta em proporções di-
retas com o diâmetro e que a distribuição granulométrica tam-
bém influi no desgaste, já que as partículas de tamanho maior
são um forte determinante do desgaste.

ASPECTOS TEÓRICOS

Como já foi citado e verificado pelos trabalhos publicados
na revisão de literatura, a altura manométrica e o rendimento
das bombas centrífugas são influenciados pela concentração,
pelo tamanho, pela densidade, pela distribuição granulométrica,
pela forma, pela rugosidade e pela velocidade de sedimen-
tação dos grãos sólidos que compõem a mistura.

Acrescentando a estas influências o efeito devido ao desgase-
te dos componentes internos da bomba, causado pela abrasão
dos sólidos, pode-se escrever:

$$\frac{H_m}{H_a} = f(C; ds; drs; Cu; \psi fr; vs; Dr; \Delta \epsilon) \quad (13)$$

e:

$$\frac{\eta m}{\eta a} = f(C; ds; drs; Cu; \psi fr; vs; Dr; \Delta \epsilon) \quad (14)$$

onde:

$\Delta \epsilon$ = variação do formato e da rugosidade da superfície
dos componentes internos da bomba, devido ao
desgaste por abrasão;

ψfr = coeficiente de forma e rugosidade do sólido.

Aplicando o teorema dos π s de Buckingham têm-se:

$$\frac{H_m}{H_a} = f(C, Cu, \psi fr, Res, \frac{ds}{Dr}, \frac{\Delta \epsilon}{ds}, drs) \quad (15)$$

e:

$$\frac{\eta m}{\eta a} = f(C, Cu, \psi fr, Res, \frac{ds}{Dr}, \frac{\Delta \epsilon}{ds}, drs) \quad (16)$$

onde:

$$Res = \frac{vs \cdot ds \cdot \rho l}{\mu} \quad (17)$$

Res = número de Reybolds da partícula sólida.

Os adimensionais Res, Cu, ψfr , ds/Dr , e drs representam
as propriedades características do sólido.

O adimensional $(\Delta \epsilon/ds)$ representa os desgastes internos da
bomba e é função: do tipo de material que é fabricada a bomba;
do tipo do sólido da mistura, representado pela sua densi-
dade relativa, dureza, rugosidade, forma, diâmetro médio e
distribuição granulométrica; da concentração do sólido da mis-
tura.

As influências dos adimensionais Res, Cu, ψfr podem ser
relacionados com o coeficiente de arrasto (cd), isto é, as Equações
(15) e (16) podem ser reescritas por:

$$\frac{H_m}{H_a} = \Phi(cd, \frac{ds}{Dr}, \frac{\Delta \epsilon}{ds}, drs, C) \quad (18)$$

e:

$$\frac{\eta m}{\eta a} = \Phi(cd, \frac{ds}{Dr}, \frac{\Delta \epsilon}{ds}, drs, C) \quad (19)$$

onde:

$$cd = \frac{4 \cdot g \cdot ds \cdot (drs - 1)}{3 vs^2} \quad (20)$$

O diâmetro representativo das partículas sólidas (ds) pode
ser tomado como sendo igual ao (d_{50}), quando os sedimentos
forem muito uniformes. Para partículas sólidas não uniformes,
recomenda-se o diâmetro representativo calculado pela Equação
(21).

A velocidade média de sedimentação que melhor represen-
ta a amostra é aquela calculada pela Equação (22).

$$\bar{d}_s = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot d_{si}}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (21)$$

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot V_{si}}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (22)$$

onde:

\bar{d}_s = diâmetro médio ou representativo;
 \bar{V}_s = velocidade de queda média ou representativa;
 p_i = peso da fração, de diâmetro (d_{si}) e velocidade (v_{si}).

OBJETIVOS DO TRABALHO

Investigar as influências da concentração e do diâmetro da fase sólida da mistura bombeada nas curvas características da bomba empregada.

Verificar o efeito do desgaste por abrasão do rotor na altura manométrica e no rendimento da bomba centrífuga utilizada, isolado e em conjunto com a concentração.

Apresentar solução econômica, para aumentar a vida útil do rotor submetido aos efeitos abrasivos da fase sólida da mistura.

BANCADA DE ENSAIO

Para alcançar os objetivos propostos deste trabalho, foi projetada e montada uma bancada que permitiu variar o tipo de sólido da mistura, a concentração e a velocidade média do escoamento.

A bomba empregada é centrífuga, da marca Lenz, modelo 800/14, entrada e saída com três e duas e meia polegada de diâmetros respectivamente, rotor semifechado com 120 mm de diâmetro, instalada a 3,00 metros abaixo do nível de operação do reservatório principal.

PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Introdução

Objetivando estudar todas as influências possíveis, devido à presença dos sólidos nas misturas bombeadas, determinaram-se as curvas características que relacionam altura manométrica e vazão, rendimento e vazão, potência e vazão para três tipos distintos de areias denominadas de areia "fina" ($d_{50} = 0,225$ mm; $d_{rs} = 2,71$), areia "n.º 01" ($d_{50} = 0,650$ mm; $d_{rs} = 2,65$, e areia "n.º 02" ($d_{50} = 1,200$ mm; $d_{rs} = 2,62$).

Com cada tipo de areia foram compostas várias misturas de concentrações diferentes.

A bomba foi acoplada a um motor de alta rotação (3500 r.p.m.) para que os efeitos devidos aos desgastes por abrasão, pudessem aparecer em períodos de tempo mais curtos.

Foram testados dois rotores com 120 mm de diâmetro, de ferro fundido e de aço inoxidável e um rotor de 126 mm de diâmetro, de ferro fundido revestido com borracha natural.

Para verificar possíveis variações, devido ao desgaste de cada rotor pelos efeitos abrasivos da fase sólida da mistura, antes e depois de ensaios com misturas, levantaram-se as curvas características com água limpa.

O desgaste de cada rotor também foi controlado, pesando-o antes e depois dos ensaios com misturas. As pesagens foram feitas após perfeita secagem do rotor em estufa a 80°C durante 4 (quatro) horas.

Os ensaios foram divididos em três fases, distinguidas pelo rotor usado. Na fase 1 foi testado o rotor de ferro fundido (rotor n.º 01); na fase 2 o rotor de aço inoxidável (rotor n.º 02) e na fase 3 o rotor de ferro fundido revestido com borracha natural (rotor n.º 03).

Fase 1 — Análise e conclusões

Nesta fase foi testado o rotor original de ferro fundido com 120 mm de diâmetro e dureza de 580 Brinell.

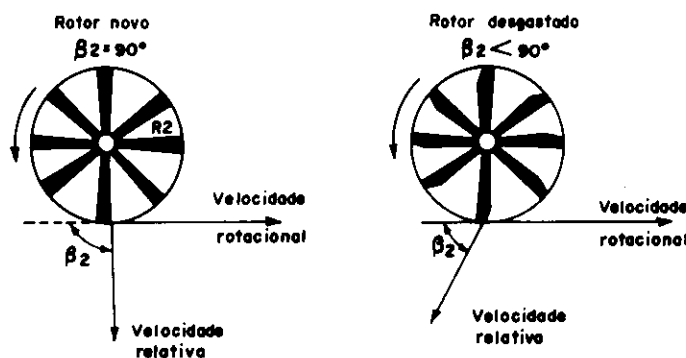
Este rotor foi submetido ao recalque de uma mistura constituída de água e areia n.º 1 ($d_{rs} = 2,65$; $d_{50} = 0,650$ mm; $V_s = 8,39$ cm/s).

Nos gráficos da Figura (1) são apresentadas as curvas características da bomba ensaiada com água limpa, antes e depois do ensaio com mistura, e também os pontos obtidos durante o recalque da mistura água e areia n.º 1 de concentração igual a (4,9 ± 0,08) % do volume da mistura.

Analisando os gráficos da Figura (1), verificam-se quedas nas curvas características da altura manométrica e do rendimento correspondentes à mistura, quando comparadas com as curvas características da altura manométrica e do rendimento, levantadas com água limpa, após o ensaio com mistura.

Comparando as curvas características da altura manométrica e do rendimento, levantadas com água limpa antes e depois do ensaio com mistura, verificam-se aumentos da altura manométrica e do rendimento. Justifica tal ocorrência o fato de que o rotor, após ter sofrido desgastes por abrasão, suas aletas adquiriram um formato hidrodinâmico, com diminuição do ângulo (β_2), como pode ser visto comparando as Figuras (2) e (3).

O ângulo (β_2) expressa a inclinação das aletas em pontos da saída de rotor. É formado entre a direção do vetor velocidade rotacional e a direção do vetor velocidade relativa (tangência as aletas do rotor).



Segundo Nekrasov⁽⁷⁾, a diminuição do ângulo (β_2) e o aumento da relação entre a velocidade radial na saída (componente da velocidade absoluta na direção radial) e a velocidade rotacional provocam transformação da energia cinética em energia potencial de pressão, aumentando, assim, a altura manométrica.

A altura manométrica da bomba é obtida subtraindo-se, da reta teórica que relaciona a altura manométrica e a vazão, as perdas de carga hidráulicas (por atrito e pela formação de turbilhão) e as perdas por choque do líquido contra o rotor.

Portanto, o aumento verificado na altura manométrica, devido ao desgaste do rotor, deve-se:

1. À diminuição do ângulo (β_2);
2. Ao aumento da relação entre as velocidades radial e rotacional. A primeira, para determinada vazão, manteve-se constante, a segunda sofreu um decréscimo com a diminuição do raio (R_2) do rotor devido ao desgaste.

3. À queda das perdas hidráulicas, devida ao formato hidrodinâmico e ao polimento adquiridos pelas aletas do rotor com o desgaste.

4. À queda das perdas por choque devida ao desgaste dos cantos vivos das aletas na entrada do rotor.

O aumento do rendimento da bomba, devido ao desgaste do rotor, deve-se:

1. À diminuição do ângulo (β_2), a qual provoca quedas na componente tangencial da velocidade absoluta de saída (responsável pela turbulência) e conseqüentemente decréscimo na energia dissipada.

2. À diminuição das perdas hidráulicas, devida ao formato hidrodinâmico adquirido pelas aletas e a queda da rugosidade das superfícies externas do rotor pelo desgaste, transferindo mais energia no líquido.

Embora deva ter ocorrido uma queda na parcela do rendimento devido ao aumento da vazão de fuga nas extremidades desgastadas das aletas, tudo indica que os aumentos do rendimento devidos às diminuições, do ângulo (β_2) e das perdas hidráulicas, superam-na, resultando a elevação do rendimento.

As pesagens do rotor de ferro fundido, antes e depois do ensaio com mistura, indicaram uma perda de 15,4% do peso inicial.

Para toda a faixa de vazões testadas, a média das razões entre as alturas manométricas desenvolvidas pela bomba, ao recalcar mistura e água limpa, assume um valor bem próximo da média entre os rendimentos desenvolvidos pela bomba, ao recalcar mistura e água limpa, ou seja:

$$\frac{H_m}{H_a} = 0,87 \pm 0,06$$

e:

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} = 0,86 \pm 0,02$$

O quociente entre as médias das razões entre as alturas manométricas e os rendimentos assume um valor próximo da unidade. Portanto, a potência da bomba neste caso pode ser calculada corrigindo somente o efeito da densidade relativa da mistura, cometendo um erro de 1,2%. Portanto:

$$P_m \cong dr.m. Pa$$

Fase 2 — Análises e conclusões

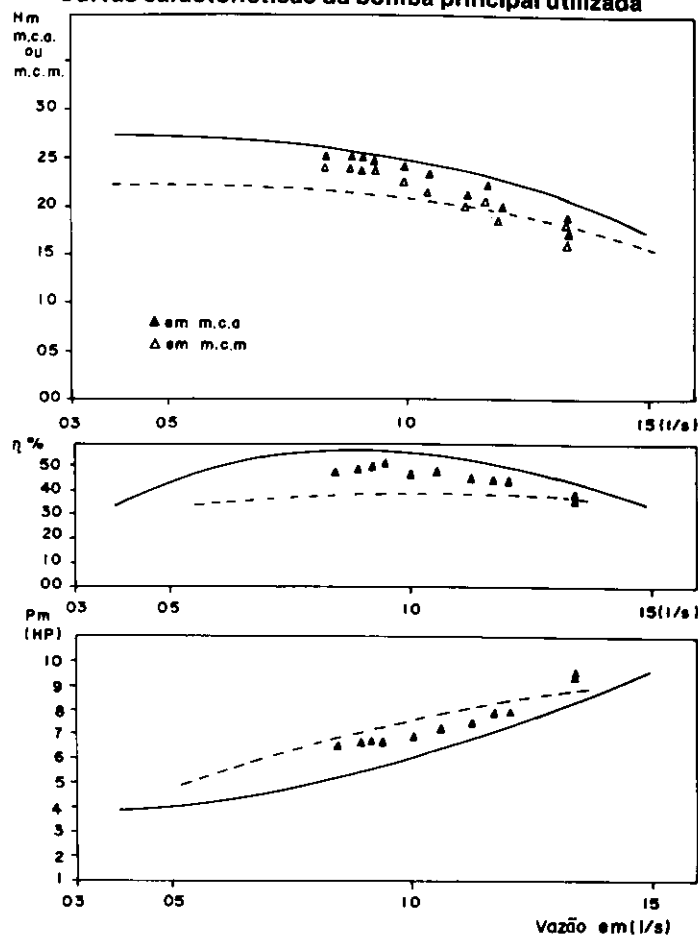
Com o propósito de aumentar a vida útil do rotor da bomba principal, foi usinado o rotor n.º 2, de aço inoxidável, com 120 mm de diâmetro e dureza de 745 Erinell.

Este rotor foi submetido a ensaios com misturas de água e areia fina de concentrações que variaram até 22,7% em volume, perfazendo um total de 86 horas para ser totalmente avariado.

Foram levantadas as curvas características da bomba principal relativas ao rotor n.º 2 com água limpa, inicialmente, antes de submetê-lo ao recalque de misturas, após 28 horas de ensaios com misturas de concentrações de até 1,7% V.M., após 70 horas de ensaios com misturas de concentrações até 10% V.M., e após 86 horas com misturas de concentrações de até 22,7% V.M.

O objetivo principal desta fase foi determinar o grau de dependência das relações (H_m/H_a) e (η_m/η_a) com os desgastes do rotor (componente interno da bomba de maior importância), e com a concentração da fase sólida da mistura. Para isto foram mantidas constantes as demais variáveis, uma vez que foi

FIGURA 1
Curvas características da bomba principal utilizada



— = Ensaio com água limpa, rotor n.º 1 — FoFo com zero hora de uso
 △ = Mistura (água + areia n.º 1) — $\bar{C} = (4,9 \pm 0,08)\%$ V.M.
 — = Água limpa após 16 horas de ensaios com mistura (água + areia n.º 1). $\bar{C} = (4,9 \pm 0,08)\%$ do volume da mistura.

FIGURA 2
Vista do rotor n.º 1 novo

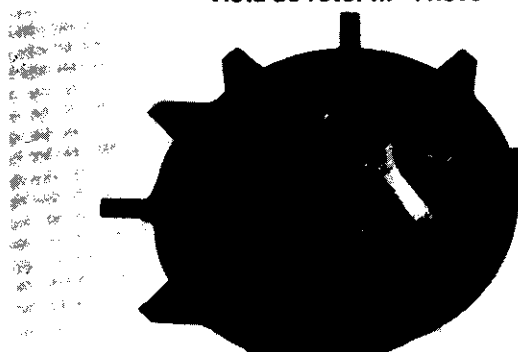


FIGURA 3
Vista do rotor n.º 1, após ter funcionado com misturas de água e areia durante 16 horas



utilizada somente a areia fina como componente sólido da mistura. Portanto, as Equações (18) e (19) podem ser reescritas por:

$$\frac{H_m}{H_a} = \text{cte.} \cdot \Phi \left(\frac{\Delta \epsilon}{ds}, C \right) \quad (23)$$

$$\frac{\eta_m}{\eta_a} = \text{cte.} \cdot \Phi \left(\frac{\Phi \epsilon}{ds}, C \right) \quad (24)$$

Nos ensaios de bombeamento de misturas constituídas por água e areia fina, de concentrações média em porcentagem do volume da mistura que variaram de $(3,6 \pm 0,10)\%$ a $(22,7 \pm 0,80)\%$, as variações das alturas manométricas e dos rendimentos foram influenciadas, ao mesmo tempo, pela concentração e pelo desgaste, devido aos efeitos abrasivos da areia.

Na coluna 3 da Tabela 1 a soma destes dois efeitos são apresentados em função do tempo de funcionamento e da concentração, verificando-se quedas crescentes da altura manométrica.

Os valores das quedas da altura manométrica foram locados num papel bi-logarítmico, em função das correspondentes concentrações, resultando um conjunto de pontos, os quais foram ajustados à seguinte equação:

$$\log \left(1 - \frac{H_m}{H_a} \right) = \log C^{1,36} - 0,237 \quad (25)$$

onde:

- 1 - H_m/H_a = queda da altura manométrica devido à concentração e ao desgaste em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

As curvas características da bomba principal, que relacionam a altura manométrica com a vazão, levantadas com água limpa antes e depois dos bombeamentos de misturas, permitiram isolar a influência do desgaste. Esta influência, denominada na Tabela 1, coluna 4, de "correção da altura manométrica devido ao desgaste", causa quedas crescentes na altura manométrica com o tempo de funcionamento.

Subtraíu-se da queda da altura manométrica resultante dos dois efeitos (concentração e desgaste) a queda da altura manométrica, devido ao desgaste, obtendo-se os valores da coluna 5 da Tabela 1, que representam as quedas da altura manométrica devido somente à concentração, os quais foram locados num

papel bi-logarítmico, em função das correspondentes concentrações e ajustados à seguinte equação:

$$\log \left(1 - \frac{H_m}{H_a} \right) = \log C^{1,25} - 0,36 \quad (26)$$

onde:

- 1 - H_m/H_a = queda da altura manométrica devido à concentração do sólido da mistura em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

Para concentrações superiores a 8% do volume da mistura, os pontos calculados pela equação de CAVE ajustam-se satisfatoriamente à Equação (26), o que é justificável, já que a equação do referido pesquisador foi ajustada a pontos correspondentes às misturas compostas por sólidos diferentes e concentrações equivalentes a 20% do volume da mistura.

As quedas da altura manométrica, devidas ao desgaste apresentados na coluna 4 da Tabela 1, foram locados em função das correspondentes concentrações e estas em função dos tempos de funcionamento.

As quedas das alturas manométricas, devido ao desgaste em função das concentrações das misturas ensaiadas, ajustam-se à seguinte equação:

$$\log \left(1 - \frac{H_m}{H_a} \right) = \log C^{1,488} - 0,77 \quad (27)$$

onde:

- 1 - H_m/H_a = queda da altura manométrica, devida ao desgaste por abrasão em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

As concentrações, em função dos tempos de funcionamento, ajustam-se à seguinte equação:

$$\log t = \log C^{0,33} + 1,493 \quad (28)$$

onde:

- t = tempo de funcionamento em horas;
- C = concentração em porcentagem do volume da mistura.

TABELA 1
Valores corrigidos das quedas da altura manométrica e rendimento, devidas ao desgaste por abrasão

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Tempo	Intervalo do tempo de funcionamento	Concentração em % do volume da mistura	Queda da altura manométrica $(1 - \frac{H_m}{H_a})$ %	Correção da altura manométrica, devido ao desgaste	Queda da altura manométrica (corrigida)	Queda do rendimento $(1 - \frac{\eta_m}{\eta_a})$ %	Correção do rendimento, devido ao desgaste	Queda do rendimento corrigido
hs	hs			%	%		%	%
43,3	28 — 70	3,6 ± 0,10	3 ± 1	1,0	2,0 ± 1	4 ± 2	1,8	2,2
52,2	28 — 70	4,1 ± 0,18	4 ± 1	1,5	2,5 ± 1	6 ± 2	2,5	3,5
56,8	28 — 70	5,2 ± 0,23	6 ± 2	2,5	3,5 ± 2	10 ± 3	3,0	7,0
62,0	28 — 70	8,4 ± 0,25	10 ± 0	3,5	6,5 ± 0	13 ± 3	3,5	9,5
65,3	28 — 70	9,3 ± 0,17	12 ± 1	4,0	8,0 ± 1	15 ± 3	3,6	11,4
70,0	28 — 70	10,0 ± 0,30	15 ± 3	5,0	10,0 ± 3	17 ± 6	4,0	13,0
77,3	70 — 86	14,9 ± 0,40	26 ± 3	9,5	16,5 ± 3	20 ± 1	3,3	16,7
78,8	70 — 86	16,4 ± 0,30	24 ± 1	10,5	13,5 ± 1	21 ± 2	3,1	17,9
81,7	70 — 86	17,9 ± 0,40	31 ± 4	13,5	17,5 ± 4	23 ± 3	2,8	20,2
84,8	70 — 86	19,6 ± 0,63	34 ± 4	16,5	17,5 ± 4	27 ± 3	2,4	24,6
86,0	70 — 86	22,7 ± 0,80	34 ± 3	17,0	17,0 ± 3	29 ± 1	2,0	27,0

Isolando $\log C$ da Equação (28) e substituindo-o na Equação (27), resulta a seguinte equação:

$$\log(1 - H_m/H_a) = \log^{4,53} - 7,52 \quad (29)$$

A Equação (29) ajusta-se satisfatoriamente aos pontos obtidos que relacionam as quedas da altura manométrica devido ao desgaste por abrasão, com os respectivos tempos de funcionamento.

Na coluna 6 da Tabela 1 são apresentados os resultados das quedas dos rendimentos da bomba devidas à concentração e ao desgaste por abrasão, verificando-se quedas crescentes do rendimento com a concentração e com o tempo de funcionamento. Estas quedas dos rendimentos foram locadas num papel mono-logarítmico, em função da concentração, resultando um conjunto de pontos, os quais foram ajustados à seguinte equação:

$$1 - \frac{\eta_m}{\eta_a} = \log C^{28,79} - 12,149 \quad (30)$$

onde:

- $1 - \eta_m/\eta_a$ = queda do rendimento, devido à concentração e ao desgaste por abrasão em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

As curvas características da bomba principal, que relacionam o rendimento com a vazão, levantadas com água limpa antes e depois dos bombeamentos de misturas, permitiram isolar a influência do desgaste. Esta influência denominada na Tabela 1, coluna 7, de "correção do rendimento devido ao desgaste", provoca quedas crescentes no rendimento, atinge um valor máximo e decresce com o tempo de funcionamento.

Subtraiu-se da queda do rendimento, resultante dos dois efeitos (concentração e desgaste), a queda do rendimento devido ao desgaste, obtendo-se os valores da coluna 8 da Tabela 1, que representam as quedas do rendimento, devido somente à concentração, os quais foram locados num papel mono-logarítmico, em função das correspondentes concentrações e ajustados à seguinte equação:

$$1 - \frac{\eta_m}{\eta_a} = \log C^{28,59} - 14,86 \quad (31)$$

onde:

- $1 - \eta_m/\eta_a$ = queda do rendimento, devido à concentração do sólido da mistura em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

As quedas do rendimento, devidas ao desgaste por abrasão, apresentadas na coluna 7 da Tabela 1, foram locadas em função das concentrações e estas em função dos tempos de funcionamento.

Os pontos que relacionam as quedas do rendimento, devido ao desgaste com a concentração, ajustam-se à seguinte equação:

$$1 - \frac{\eta_m}{\eta_a} = (23,5 - C)^{1/2} \cdot \log C^{1,04} \quad (32)$$

onde:

- $1 - \eta_m/\eta_a$ = queda do rendimento devido ao desgaste por abrasão em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura.

Isolando $\log C$ da Equação (28) e substituindo na Equação (32), resulta a Equação (33):

$$1 - \frac{\eta_m}{\eta_a} = (23,5 - C)^{1/2} \cdot (\log t^{3,15} - 4,705) \quad (33)$$

onde:

- $1 - \eta_m/\eta_a$ = queda do rendimento devida ao desgaste por abrasão em porcentagem;
- C = concentração do sólido da mistura em porcentagem do volume da mistura;
- t = tempo de funcionamento em horas.

A Equação (33) ajusta-se satisfatoriamente aos pontos obtidos que relacionam as quedas do rendimento, devido ao desgaste por abrasão com os respectivos tempos de funcionamento.

Isolando as relações entre as alturas manométricas e os rendimentos desenvolvidos pela bomba ao recalcar mistura e água limpa das Equações (25) e (30) respectivamente, expressando-as em números decimais e dividindo (H_m/H_a) por (η_m/η_a) , obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{H_m/H_a}{\eta_m/\eta_a} = \frac{1 - 10^{(\log C^{1,36} - 2,237)}}{1 - \log C^{0,2879} + 12,149 \cdot 10^{-2}} \quad (34)$$

A Equação (34) permite calcular o quociente das relações entre as alturas manométricas e os rendimentos, devido aos efeitos provocados pela concentração e pelo desgaste por abrasão.

Isolando as relações entre as alturas manométricas e os rendimentos desenvolvidos pela bomba ao recalcar mistura e água limpa das Equações (26) e (31) respectivamente, expressando-as em números decimais e dividindo (H_m/H_a) por (η_m/η_a) , obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{H_m/H_a}{\eta_m/\eta_a} = \frac{1 - 10^{(\log C^{1,25} - 2,36)}}{1 - \log C^{0,2859} + 0,1486} \quad (35)$$

A equação (35) permite calcular o quociente das relações entre as alturas manométricas e os rendimentos, devido somente à concentração.

Isolando as relações entre as alturas manométricas e os rendimentos desenvolvidos pela bomba ao recalcar misturas e água limpa das Equações (27) e (32) respectivamente, expressando-as em números decimais e dividindo (H_m/H_a) por (η_m/η_a) , obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{H_m/H_a}{\eta_m/\eta_a} = \frac{1 - 10^{(\log C^{1,488} - 2,77)}}{1 - [(23,5 - C)^{1/2} \cdot \log C^{1,04} \times 10^{-2}]} \quad (36)$$

A Equação (36) permite calcular o quociente das relações, entre as alturas manométricas e os rendimentos desenvolvidos pela bomba ao recalcar misturas e água limpa, devido somente ao desgaste por abrasão.

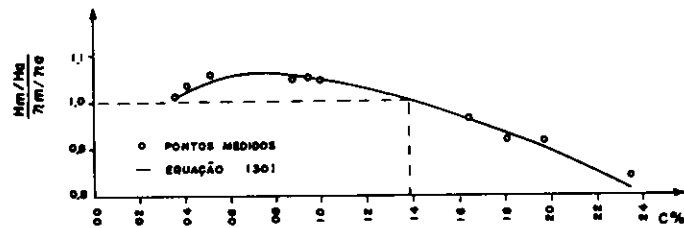
Os valores dos quocientes das relações entre as alturas manométricas e os rendimentos devidos aos efeitos conjunto da

concentração e desgaste por abrasão, e devidos a estes efeitos isolados, foram calculados em função das concentrações das misturas ensaiadas, através das Equações (34), (35) e (36). Estes valores encontram-se na Tabela 2, os quais permitiram levantar as curvas das Figuras 4, 5 e 6.

TABELA 2
Quocientes entre as relações das alturas manométricas e rendimentos calculados pelas Equações (34), (35) e (36)

C	$\frac{Hm/Ha}{\eta m/\eta a}$	$\frac{Hm/Ha}{\eta m/\eta a}$	$\frac{Hm/Ha}{\eta m/\eta a}$
	Devido à concentração e ao desgaste	Devido à concentração	Devido ao desgaste
% V.M.	EQ. (34)	EQ. (35)	EQ. (36)
3,6	1,006	0,989	1,015
4,1	1,016	1,001	1,015
5,2	1,033	1,023	1,013
8,4	1,047	1,060	0,997
9,3	1,044	1,066	0,990
10,0	1,040	1,069	0,985
14,9	0,985	1,073	0,939
16,4	0,959	1,068	0,922
17,9	0,929	1,062	0,904
19,6	0,892	1,052	0,881
22,7	0,814	1,029	0,834

FIGURA 4
Variação do quociente entre as razões das alturas manométricas e rendimentos devida à concentração e ao desgaste.



Verifica-se no gráfico da Figura 4 que os pontos medidos ajustam-se satisfatoriamente à Equação (34) e que para concentrações inferiores a 14%, a relação entre as alturas manométricas (Hm/Ha), é maior que a relação entre os rendimentos ($\eta m/\eta a$); portanto, a potência requerida pela bomba é maior que aquela calculada corrigindo somente o efeito da densidade relativa da mistura, isto é:

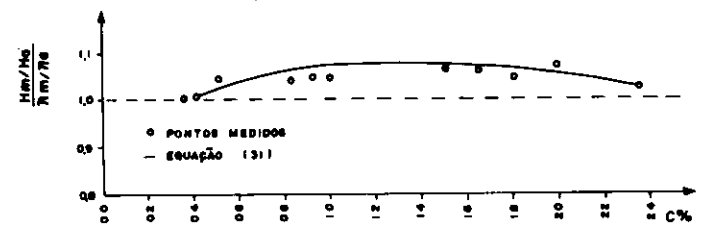
$$P_m > d_{rm} \cdot P_a \quad (10)$$

Para concentrações superiores a 14% do volume da mistura, a relação entre as alturas manométricas (Hm/Ha) assume valores menores que a relação entre os rendimentos, isto porque o efeito do desgaste provoca quedas bem pronunciadas na altura manométrica para concentrações mais altas, como pode ser verificado através do gráfico da Figura 6. Portanto, a potência requerida pela bomba é menor que aquela calculada, corrigindo somente o efeito da densidade relativa da mistura, isto é:

$$P_m < d_{rm} \cdot P_a \quad (12)$$

Os pontos que relacionam o quociente entre as razões das alturas manométricas e rendimentos com a concentração, levando em consideração somente o efeito da concentração dos sólidos da mistura, ajustam-se à Equação (35), como pode ser verificado na Figura 5.

FIGURA 5
Variação do quociente entre as razões das alturas manométricas e rendimentos devida à concentração.

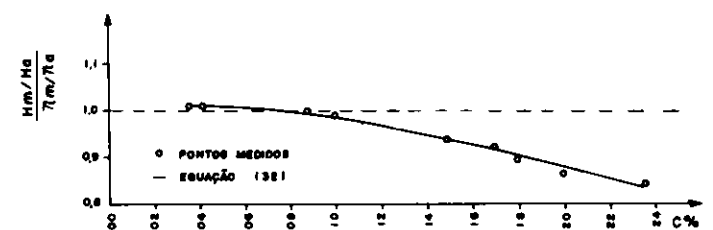


Observa-se na Figura 5 que a relação entre as alturas manométricas (Hm/Ha) é superior à relação entre os rendimentos ($\eta m/\eta a$) para toda faixa de concentrações testadas. Portanto, para se calcular a potência requerida pela bomba, levando em consideração as variações da altura manométrica e rendimento devido à concentração, deve-se multiplicar ($d_{rm} \cdot P_a$) por um fator de correção maior que a unidade. O valor médio deste fator de correção para as concentrações das misturas ensaiadas na fase 2 é de $(1,045 \pm 0,028)$; Ou seja, a potência requerida pela bomba, ao transportar misturas constituídas por água e areia fina de várias concentrações, é cerca de 4,5% maior que aquela calculada, considerando somente o efeito da densidade relativa da mistura.

Os pontos que relacionam o quociente entre as razões das alturas manométricas e rendimentos com a concentração, levando em consideração somente o efeito do desgaste, ajustam-se à Equação (36), como pode ser verificado na Figura 6.

Observa-se na Figura 6 que para concentrações inferiores a 8% V.M., a relação entre as alturas manométricas (Hm/Ha) é maior que a relação entre os rendimentos ($\eta m/\eta a$) e para concentrações superiores a 8% V.M., a relação entre as alturas manométricas (Hm/Ha) é menor que a relação entre os rendimentos ($\eta m/\eta a$).

FIGURA 6
Variação do quociente entre as razões das alturas manométricas e rendimentos devida ao desgaste por abrasão.



Fase 3 – Análises e conclusões

Como tentativa de solução para reduzir o desgaste por abrasão e aumentar a vida útil de rotores submetidos à abrasividade de misturas, foi testado na fase 3 um rotor de ferro fundido, revestido com borracha natural com 3mm de espessura e dureza de (60 ± 5) shore-A, com média resistência a abrasão, denominado *rotor n.º 3*.

Após feito o revestimento, o *rotor n.º 3* ficou com um diâmetro de 126mm; portanto, com um diâmetro de 6mm maior do que os das fases 1 e 2.

O custo de revestimento elevou o preço do rotor em 14%.

Este rotor foi submetido a ensaios com misturas de água e areia fina, n.º 1 e n.º 2, de concentrações que variaram de até 22,5% do volume da mistura, perfazendo um total de 35 horas de funcionamento.

Antes e após aos ensaios de misturas compostas por cada um dos tipos de areia, foram levantadas as curvas características, da bomba principal equipada com o *rotor n.º 3*, referentes à água limpa.

TABELA 3

Variações na altura manométrica, no rendimento, e no peso do rotor, devidas ao desgaste por abrasão, com o tempo de funcionamento, com o tipo de areia e com as concentrações.

Intervalo de tempo de funcionamento (hs)	Tempo de funcionamento acumulado (hs)	Material sólido recalcado	Concentração em (%) do volume da mistura	Perda do peso do rotor devido ao desgaste		Perda do peso do rotor acumulado		Queda média da altura manométrica devido ao desgaste em %	Queda média acumulada da altura manométrica devido ao desgaste em %	Queda média do rendimento devido ao desgaste em %	Queda média acumulada do rendimento devido ao desgaste em %
				(g)	%	(g)	%				
16	16	areia fina	0 — 22,4	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	27	areia n.º 1	0 — 22,5	25,6	1,8	25,6	1,8	0,0	0,0	3,8	3,8
8	35	areia n.º 2	0 — 16,7	77,0	5,4	102,6	7,2	11,3	11,3	8,6	12,4

PESAGENS

	(g)
Novo	1450,60
Após 16 horas	1450,55
Após 27 horas	1425,00
Após 35 horas	1348,00

Na Tabela 3, os dados calculados mostram que o diâmetro dos sólidos das misturas é um forte responsável pelo desgaste por abrasão. Verifica-se que o rotor submetido a ensaios com misturas de água e areia fina, com concentrações que chegaram a 22,4% do volume da mistura, durante o período de funcionamento de 16 horas, não sofreu nenhum tipo de variação quer no seu peso, quer em suas curvas características. Já os escoamentos com as misturas de água e areia n.º 1, com concentrações iguais às das misturas de água e areia fina, num período de funcionamento menor, de 11 horas, provocaram um pequeno desgaste no rotor, diminuindo seu peso em 1,8%, e alterando a curva característica do rendimento, resultando numa queda de 3,8%. O rotor submetido a ensaios com misturas constituídas de água e areia n.º 2, de concentrações inferiores àquelas das misturas anteriores, durante o período de funcionamento de 8 horas, sofreu um desgaste que provocou alterações significativas, tanto no seu peso como em suas curvas características. A diminuição de seu peso foi de 5,4%, e as quedas da altura manométrica e do rendimento foram de 11,3% e 8,6%, respectivamente.

Estes dados demonstram que a abrasividade da mistura é elevada à medida que se aumenta o diâmetro das areias.

As quedas médias acumuladas dos rendimentos devidos ao desgaste, que estão apresentadas na Tabela 3, foram locadas em função dos respectivos tempos acumulados de funcionamento, resultando pontos que se ajustam à seguinte equação:

$$\left[1 - \frac{\eta_a(t)}{\eta_a(t=0)} \right] \% = 0,023 (t - 16)^{2,13} \quad (37)$$

onde:

$$\left[1 - \frac{\eta_a(t)}{\eta_a(t=0)} \right] \% = \text{queda do rendimento em porcentagem devido ao desgaste.}$$

t = tempo acumulado de funcionamento em horas.

A Equação (37) permitiu calcular as quedas médias do rendimento, devido ao desgaste no tempo médio em que foram processados os ensaios de cada mistura. Este tempo médio foi considerado como sendo igual à média aritmética entre os tempos acumulados do início e término de cada ensaio.

Por tanto, as quedas dos rendimentos, devidas somente ao efeito da concentração, foram calculadas subtraindo-se da que-

da total, resultante dos efeitos conjuntos (concentração e desgastes), a queda do rendimento devida somente ao desgaste calculado através da Equação (37).

Como somente houve variação da altura manométrica devido ao efeito do desgaste nas 8 horas finais de ensaios com misturas de água e areia n.º 2, obtiveram-se as quedas da altura manométrica devido ao efeito da concentração referentes às misturas de água e areias, fina e n.º 1 diretamente nas curvas características levantadas. As quedas da altura manométrica, devido à concentração das misturas de água e areia n.º 2, foram obtidas subtraindo-se da queda da altura manométrica, devido aos efeitos conjuntos (concentração e desgaste), o valor médio da queda da altura manométrica, devido ao desgaste, obtido na Tabela 3, que é de 11,3%.

Os valores médios das quedas da altura manométrica e rendimento devidos à concentração encontram-se na Tabela 4, em função do tipo de areia e da concentração. Observa-se que estas quedas aumentam com a elevação da concentração. Para a mesma concentração, as quedas da altura manométrica e do rendimento elevam-se com o aumento do diâmetro das areias.

TABELA 4
Quedas das alturas manométricas e rendimentos, devidas à concentração das misturas constituídas de água e areias, fina, n.º 1 e n.º 2

Tipo de areia	C %	$(1 - \frac{H_m}{H_a})\%$	$(1 - \frac{\eta_m}{\eta_a})\%$
Fina drs = 2,71 d ₅₀ = 0,225 mm	7,3±0,2	12±1	15±4
	12,0±0,5	15±2	23±2
	16,4±0,5	20±2	26±3
	18,9±0,4	23±2	31±4
	22,4±0,4	26±2	35±2
n.º 1 drs = 2,65 d ₅₀ = 0,650 mm	11,9±0,2	21±2	29±2
	16,5±0,7	29±2	38±3
	18,6±0,4	34±2	43±1
	19,6±0,5	36±2	44±1
	22,5±0,5	39±2	50±5
n.º 2 drs = 2,62 d ₅₀ = 1,20 mm	4,1±0,4	16±2	17±3
	9,3±0,1	24±1	34±1
	12,0±0,3	31±0	43±2
	16,7±0,0	39±0	58±0

As quedas médias das alturas manométricas, referentes às areias fina, n.º 1 e n.º 2, para as diversas concentrações, que são mostradas na Tabela 4, foram plotadas em papéis monolgarítmicos, em função das concentrações, resultando pontos os

quais foram ajustados às Equações (38), (39) e (40), referentes às misturas compostas de água e areias fina, n.º 1 e n.º 2, respectivamente.

$$\log \left(1 - \frac{Hm}{Ha} \right) = 0,91 + 0,0232 C \quad (38)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia fina

$$\log \left(1 - \frac{Hm}{Ha} \right) = 1,025 + 0,0263 \cdot C \quad (39)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia n.º 1.

$$\log \left(1 - \frac{Hm}{Ha} \right) = 1,071 + 0,031 \cdot C \quad (40)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia n.º 2.

$\left(1 - \frac{Hm}{Ha} \right)$ = queda da altura manométrica em porcentagem.

Os valores dos coeficientes angulares e os valores das ordenadas para abscissa zero das retas obtidas foram ajustados em função dos diâmetros médios das areias, resultando a Equação (41), que permite calcular as quedas da altura manométrica devidas à concentração e ao diâmetro médio da areia que constitui a mistura.

$$\log \left(1 - \frac{Hm}{Ha} \right) = 10^{0,023} + \log (d_{50})^{0,1} + (0,0216 + 0,009 \cdot d_{50}) C \quad (41)$$

Portanto, as quedas da altura manométrica da bomba principal, equipada com o rotor revestido de 126mm de diâmetro, devido às concentrações de até 22,5% do volume da mistura e aos diâmetros médios das areias, variando entre 0,2 a 1,3mm, podem ser calculadas através da Equação (41).

As quedas médias dos rendimentos, referentes às areias fina, n.º 1 e n.º 2 para diversas concentrações, as quais são mostradas na Tabela 4, foram plotadas em papéis bilogárítmicos em função das concentrações, resultando pontos os quais foram ajustados às Equações (42), (43) e (44), referentes às misturas compostas de água e areias fina, n.º 1 e n.º 2, respectivamente.

$$\log \left(1 - \frac{\eta m}{\eta a} \right) = 0,546 + \log C^{0,737} \quad (42)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia fina.

$$\log \left(1 - \frac{\eta m}{\eta a} \right) = 0,553 + \log C^{0,846} \quad (43)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia n.º 1.

$$\log \left(1 - \frac{\eta m}{\eta a} \right) = 0,665 + \log C^{0,896} \quad (44)$$

onde:

C = concentração em porcentagem do volume da mistura de água e areia n.º 2.

$$\left(1 - \frac{\eta m}{\eta a} \right)$$
 = queda do rendimento em porcentagem.

Os valores dos coeficientes angulares e os valores das ordenadas para abscissa igual a zero das retas obtidas foram ajustados em função dos diâmetros médios das areias, resultando na Equação (45), que permite calcular as quedas do rendimento devido à concentração e ao diâmetro médio do sólido da mistura.

$$\log \left(1 - \frac{\eta m}{\eta a} \right) = (0,546 + 0,048 \cdot d_{50}^2) + (0,915 - 0,299 \cdot 0,1 d_{50}) \log C \quad (45)$$

Portanto, as quedas do rendimento da bomba principal, equipada com o rotor revestido, de 126mm de diâmetro, devido às concentrações de até 22,5% do volume da mistura e aos diâmetros médios das areias, variando entre 0,2 e 1,3mm, podem ser calculadas através da Equação (45).

TABELA 5
Razões entre as alturas manométricas e rendimentos da bomba, recalando misturas e água limpa

Tipo de areia	C %	Hm/Ha	$\frac{\eta m}{\eta a}$	$\frac{Hm/Ha}{\eta m/\eta a}$
Fina drs = 2,71 $d_{50} = 0,225$ mm	7,3±0,2	0,88±0,01	0,85±0,04	1,035
	12,0±0,5	0,85±0,02	0,77±0,02	1,104
	16,4±0,5	0,80±0,02	0,74±0,03	1,081
	18,9±0,4	0,77±0,02	0,69±0,04	1,112
	22,4±0,4	0,74±0,02	0,65±0,02	1,138
n.º 1 drs = 2,65 $d_{50} = 0,650$ mm	11,9±0,2	0,79±0,02	0,71±0,02	1,113
	16,5±0,7	0,71±0,02	0,62±0,03	1,145
	18,6±0,4	0,66±0,02	0,57±0,01	1,158
	19,6±0,5	0,64±0,02	0,56±0,01	1,143
	22,5±0,5	0,61±0,02	0,50±0,05	1,220
n.º 2 drs = 2,62 $d_{50} = 1,20$ mm	4,1±0,4	0,84±0,02	0,83±0,02	1,012
	9,3±0,1	0,76±0,01	0,66±0,01	1,152
	12,0±0,3	0,69±0,01	0,57±0,02	1,210
	16,7±0,0	0,61±0,00	0,42±0,00	1,450

Verifica-se, na Tabela 5, que os coeficientes das razões, entre as alturas manométricas e rendimentos dos recalques de misturas e água limpa, são maiores que a unidade para todas as misturas ensaiadas; portanto, a potência requerida pela bomba para bombear misturas é maior que aquela, considerando no cálculo, apenas, a densidade relativa da mistura, ou seja: $PM > drm \cdot Pa$ (10)

CONCLUSÕES

As informações obtidas experimentalmente neste trabalho, consideradas mais importantes, são sintetizadas nas seguintes conclusões:

- À medida que se aumenta a concentração ou o diâmetro dos grãos de areias, a potência requerida pela bomba vai tornando-se cada vez maior que aquela calculada, considerando somente o efeito da densidade relativa da mistura.

- O acréscimo que se deve dar à potência requerida pela bomba, equipada com o rotor de aço, devido somente ao efeito da concentração, para recalcar misturas de água e areia fina, po-

de ser calculado através da equação (35), desenvolvida experimentalmente neste trabalho.

▪ Independente do tipo de areia e do tipo do material do rotor, as alturas manométricas e os rendimentos sofrem quedas crescentes com a elevação da concentração das areias nas misturas. Para uma mesma concentração dos sólidos na mistura, as quedas da altura manométrica e de rendimento aumentam com a elevação do diâmetro da areia.

▪ As quedas da altura manométrica e do rendimento, devidas ao recalque de misturas de água e areias com diâmetros médios entre 0,2 e 1,3mm e concentrações de até 22,5% do volume da mistura, seguem leis logarítmicas, e podem ser calculadas através das equações (41) e (45), respectivamente, desenvolvidas experimentalmente neste trabalho.

▪ O desgaste do rotor por abrasão altera as curvas características das bombas centrífugas. As variações da altura manométrica e do rendimento, devidas ao desgaste, dependem: da concentração, do diâmetro das areias, do tempo de funcionamento e do tipo de material de fabricação do rotor.

▪ O desgaste por abrasão deu às aletas dos rotores de metal ensaiados um formato hidrodinâmico com diminuição do ângulo de inclinação das aletas. Estas causas provocam aumentos na altura manométrica e no rendimento da bomba.

▪ Quanto menor é a dureza do metal utilizado na fabricação do rotor, tanto mais lisa torna-se sua superfície em contato com o fluxo, devido ao desgaste, diminuindo as perdas hidráulicas e por choque, resultando maiores elevações na altura manométrica e no rendimento.

▪ Para metal de dureza elevada, utilizado na fabricação do rotor, os desgastes por abrasão aumentam a rugosidade da superfície do rotor em contato com o fluxo, aumentando muito as perdas hidráulicas e por choque, resultando quedas na altura manométrica e no rendimento.

▪ A vida útil dos rotores de metal pode ser aumentada, de forma econômica, revestindo-os com borracha natural. As borrachas utilizadas no revestimento dos rotores devem apresentar propriedades específicas para cada tipo de areia a ser recalçada.

SÍMBOLOS USADOS

cd = coeficiente de arrasto da partícula sólida
C = concentração média em volume da mistura
Cu = coeficiente de uniformidade
Cw = concentração em peso
drm = densidade relativa da mistura
drs = densidade relativa do sólido
ds = diâmetro equivalente da partícula ou diâmetro da partícula
ds = diâmetro médio da partícula sólida ou representativa
dsi = diâmetro médio de cada fração de areia
d₃₀ = diâmetro da partícula sólida, tal que 50% da amostra têm diâmetro inferior a ela
D = diâmetro do conduto
DR = diâmetro do rotor
g = aceleração da gravidade
Ha = altura manométrica da bomba recalçando água limpa

Hm' = altura manométrica da bomba recalçando mistura

pi = peso do picnômetro areia e água

Pa = potência da bomba recalçando água limpa

Pm = potência da bomba recalçando mistura

Res = número de Reynolds da partícula sólida

t = tempo

V_s = velocidade de sedimentação ou de queda do sedimento

V_s = velocidade de queda média ou representativa

β2 = coeficiente de proporcionalidade entre os coeficientes de difusão dos sedimentos e da massa líquida

Δε = variação do formato e da rugosidade da superfície dos componentes internos da bomba devido ao desgaste por abrasão

ηa = rendimento da bomba recalçando água limpa

ηm = rendimento da bomba recalçando mistura

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica do líquido

pl = massa específica do líquido

ψfr = coeficiente de forma e rugosidade do sólido

BIBLIOGRAFIA

- 1 — Bree, S. E. M. — The Abrasion Behaviour of Materials for Dredger Components, Due to Sand/Water Mixtures. **Dredging Technology**, Granfield, Bedford, England, BHRA Fluid Engineering, (Paper G3): 35-57, sept, 1975.
- 2 — Burgess, K. E. et alii — The Effect of Sizing, Specific Gravity and Concentration on the Performance of Centrifugal Slurry Pumps. **The Inst. of Mech. Eng.**, Vol. 190 (36), 1976.
- 3 — Cave, I. — The Effects of Solids in Suspension on the Performance of a Centrifugal Pumps. **Hydrotransport 4**, Cranfield, Organized by BHRA Fluid Engineering, may, 1976.
- 4 — Frazier, D. M. — New Solids Pumping Techniques and Analyses. **International Symposium in Solid-Liquid Flow in Pipes and its Applications**, Philadelphia, USA, 1968.
- 5 — McElvain, R. E. — High Pressure Pumping. **Skills Mining Review**, Vol. 63 (n.º 4), 1974.
- 6 — Moore, G. R. — Centrifugal Slurry Pumps. **Hydrotransport 5**, Cranfield, Organized by BHRA, may, 1978.
- 7 — Nekrasov, B. — **Hidráulica**. Moscú, Editorial Mir, Segunda Edición, 278 p., 1966.
- 8 — Sellgren, A. — Performance of a Centrifugal Pump when Pumping Ores and Industrial Minerals. **Hydrotransport 6**, Cranfield, BHRA, (Paper G1): 291-305, sept., 1979.
- 9 — Stepanoff, A. J. — **Pumps and Blowers, Two-Phase Flow**. John Wiley and Sons Inc., New York, 1965.
- 10 — Wiedenroth, W. — The Influence of Sand Gravel on the Characteristics of Centrifugal Pumps. **Hydrotransport 1**, Cranfield, BHRA, (Paper E1), may, 1970.
- 11 — Wiedenroth, W. — Experimental Work on the Transportation of Solid-Liquid Mixtures Through Pipelines an Centrifugal Pumps. **Hydrotransport 5**, Cranfield, BHRA, (Paper A2):13-36, may, 1978.

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-Fapesp.