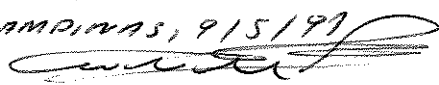


DECLARO TRATAR-SE DA VERSÃO DEFINITIVA,
POIS, TODAS AS CORREÇÕES SUGERIDAS PELA
COMISSÃO JULGADORA FORAM PROCESSADAS.

CAMPINAS, 9/5/91


EVALDO MIRANDA COIADO
ORIENTADOR

INFLUÊNCIA DE POLÍMEROS REDUTORES DE ARRASTE NO DESGASTE POR
ABRASÃO DOS COMPONENTES INTERNOS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS RE-
CALCANDO MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS - REDUÇÃO DOS CUSTOS DE
MANUTENÇÃO

Edilson Aparecido Abdul Nour
Engenheiro Civil

Orientador: Prof.Dr. EVALDO MIRANDA COIADO

Dissertação apresentada à Fa-
culdade de Engenharia Civil, da
Universidade Estadual de Campi-
nas para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil,
Área de Concentração: Recursos
Hídricos e Saneamento.

CAMPINAS

Estado de São Paulo - Brasil

Março - 1991

à Deus,
aos meus antepassados,
aos meus pais,
ao meu irmão,
e a todos que acreditaram neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Ao Prof.Dr. Evaldo Miranda Colado pela orientação, revisão dos originais, apoio e estímulo durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento pelo apoio inestimável, durante todo o programa de pós-graduação.

Aos Departamentos de Construção Civil e de Engenharia de Transportes, pelo auxílio durante o transcorrer deste trabalho.

A Paulo Aparecido Cintra, Carlos Alberto Alcalde, Luís Fernando Chang de Oliveira, Benedito Dragoni, Mercedes Maria de Souza, Pedro Sérgio Fadini, Geraldo Dragoni Sobrinho e Antonio Roberto Siviero, pela amizade, auxílio e contribuição inestimáveis, durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Aos alunos do curso de pós-graduação, pela amizade e estímulo, em especial à Roberto, Glacir, Rinaldo e José Assis.

Aos funcionários da obra, marcenaria e serralheria, pelo auxílio durante a fase experimental deste trabalho.

Aos funcionários do setor gráfico e de computação pelo apoio durante a confecção deste trabalho.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo apoio financeiro durante o desenvolvimento da pesquisa.

A Coordenadoria da Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento do programa de pós-graduação.

SUMARIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FOTOGRAFIAS	xiv
SÍMBOLOS USADOS	xv
GREGAS	xvii
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xix
 INTRODUÇÃO	 1
 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 4
1.1. Desgaste	4
1.1.1. Introdução	4
1.1.2. Desgaste em tubulações	10
1.1.3. Desgaste em bombas centrífugas	15
1.1.4. Métodos experimentais de determinação do desgaste abrasivo	21
1.2. Formas de redução do desgaste	29
1.2.1. Introdução	29
1.2.2. Revestimento de tubulações e componen- tes internos de bombas	31
1.2.2.1. Introdução	31
1.2.2.2. Borrachas	32
1.2.2.3. Plásticos	34
1.2.3. Aplicação de polímeros à mistura sólido-	

do-líquida	41
1.2.3.1. Introdução	41
1.2.3.2. Utilização do polímero como reduzidor da energia consumida por uma instalação de recalque	42
1.2.3.3. Degradação do polímero	47
2. BANCADA DE ENSAIO; MEDIÇÕES; MÉTODOS DE CÁLCULOS; PREPARO: DAS SOLUÇÕES DE ÁGUA-POLÍMERO; DAS MISTU- RAS DE ÁGUA-AREIA E DAS MISTURAS DE ÁGUA-POLÍMERO- AREIA	48
2.1. Bancada de ensaio	48
2.1.1. Bomba principal	48
2.1.2. Canalização de sucção	48
2.1.3. Canalização de recalque	48
2.2. Medições	51
2.2.1. Medidas da vazão e da concentração mé- dia do sólido na mistura	51
2.2.2. Medida do peso do rotor	52
2.2.3. Outras medidas	52
2.2.3.1. Corrente elétrica	52
2.2.3.2. Tensão elétrica	52
2.2.3.3. Outros aparelhos, equipamentos e materiais não acoplados à bancada de ensaio, porém uti- lizados na obtenção de dados .	52

	Página
2.3. Metodologia de cálculos	53
2.3.1. Cálculo da vazão	53
2.3.2. Cálculo da concentração média do sólido na mistura	54
2.4. Preparo das soluções de água e polímero	54
2.4.1. A água utilizada	55
2.4.2. O polímero utilizado	55
2.5. Preparo das misturas sólido-líquidas (água-a- reia)	56
2.5.1. O sólido utilizado no preparo das mis- turas	56
2.5.1.1. Análise granulométrica	57
2.5.1.2. Peso específico real da areia.	57
2.5.2. Preparo da mistura água-areia	57
2.6. Preparo da mistura constituída de água-políme- ro-areia	59
3. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
3.1. Processamento dos resultados	60
3.1.1. Primeira fase	60
3.1.2. Segunda fase	63
3.1.3. Fixação da corrente elétrica do motor do conjunto motor-bomba	63

3.1.4. Monitoramento das medidas de vazão e concentração de sólidos da mistura	64
3.1.5. Apresentação dos resultados dos ensaios da primeira e segunda fases	64
3.1.6. Determinação das perdas de peso dos ro- tores devidas ao desgaste abrasivo	65
3.2. Análise dos resultados da 1ª fase (Cv ~ 7,0% V.M.)	65
3.2.1. Desgaste acumulado do rotor - 1ª fase .	65
3.2.1.1. Rotor 1 : Cp = 0	65
3.2.1.2. Rotor 2 : Cp = 200 ppm	67
3.2.1.3. Rotor 3 : Cp = 400 ppm	67
3.2.1.4. Rotor 4 : Cp = 600 ppm	71
3.2.1.5. Conclusões	71
3.2.2. Desgastes parciais do rotor - 1ª fase .	75
3.2.2.1. Rotor 1 : Cp = 0	75
3.2.2.2. Rotor 2 : Cp = 200 ppm	75
3.2.2.3. Rotor 3 : Cp = 400 ppm	79
3.2.2.4. Rotor 4 : Cp = 600 ppm	79
3.2.2.5. Conclusões	79
3.3. Análise dos resultados da 2ª fase (Cv ~ 13,0% V.M.)	83
3.3.1. Introdução	83
3.3.2. Desgaste acumulado do rotor - 2ª fase .	83
3.3.3. Desgastes parciais do rotor - 2ª fase .	90

	Página
3.4. Ajustes matemáticos aos dados experimentais ..	93
3.4.1. Primeira fase	93
3.4.1.1. Desgaste acumulado do rotor ..	93
3.4.2. Segunda fase	100
3.5. Melhor concentração de polímero	100
3.6. Melhor concentração de areia	102
4. DIFICULDADES SURGIDAS E SOLUÇÕES PRÁTICAS ENCONTRA- DAS REFERENTES AO DESGASTE ABRASIVO	103
4.1. Introdução	103
4.2. Registros	104
4.2.1. Registro de controle da vazão da mistu- ra	104
4.2.1.1. Primeira fase	104
4.2.1.2. Segunda fase	106
4.3. Tubulação	108
4.4. Voluta ou carcaça da bomba principal	108
4.5. Conclusões	110
5. CONCLUSÕES	115
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119

APÊNDICES	126
-----------------	-----

APÊNDICE 1 - DADOS DA VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DA MISTURA ÁGUA-AREIA E ÁGUA-POLÍMERO-A- REIA - PRIMEIRA FASE	127
---	-----

APÊNDICE 2 - DADOS DA VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DA MISTURA ÁGUA-AREIA E ÁGUA-POLÍMERO-A- REIA - SEGUNDA FASE	144
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.01.	Fatores que influenciam o desgaste	7
1.02.	Três principais formas de desgaste erosivo: (a) erosão por deslizamento, (b) erosão por impactos aleatórios, (c) erosão por impacto direto	9
1.03.	Diagrama de causa/efeito do desgaste	13
1.04.	Desgaste do rotor em relação ao rendimento de uma bomba centrífuga, com a vazão ($C_v = 30\%$)	22
1.05.	Ensaio do disco (DISC WEAR TEST)	28
1.06.	Decréscimo na massa dos materiais utilizados para as tubulações (aço, etc.)	36
1.07.	Decréscimo na massa dos revestimentos inter- nos utilizados nas tubulações com o tempo de ensaio ...	37
1.08.	Decréscimo na espessura do material da tubu- lação e dos revestimentos internos com o tempo de ensaio	38
2.01.	Bancada de ensaio da primeira fase	49
2.02.	Bancada de ensaio da segunda fase	50
2.03.	Curva granulométrica da areia utilizada	58
3.01.	Dimensões e características dos rotores uti- lizados	61
3.02.	Desgaste acumulado do rotor 1, com o tempo de ensaio ($C_p = 0$ ppm)	68
3.03.	Desgaste acumulado do rotor 2, com o tempo de ensaio ($C_p = 200$ ppm)	69
3.04.	Desgaste acumulado do rotor 3, com o tempo de ensaio ($C_p = 400$ ppm)	70
3.05.	Desgaste acumulado do rotor 4, com o tempo de ensaio ($C_p = 600$ ppm)	72
3.06.	Desgaste acumulado dos rotores da primeira fase, com o tempo de ensaio	73
3.07.	Desgaste parcial do rotor 1, com o tempo de	

Figura	Página
ensaio ($C_p = 0$ ppm)	76
3.08. Desgaste parcial do rotor 2, com o tempo de ensaio ($C_p = 200$ ppm)	80
3.09. Desgaste parcial do rotor 3, com o tempo de ensaio ($C_p = 400$ ppm)	81
3.10. Desgaste parcial do rotor 4, com o tempo de ensaio ($C_p = 600$ ppm)	82
3.11. Desgastes acumulados dos rotores 1 e 6, com o tempo de ensaio ($C_p = 0$ ppm)	86
3.12. Desgastes acumulados dos rotores 4 e 7, com o tempo de ensaio ($C_p = 600$ ppm)	87
3.13. Desgastes parciais dos rotores 1 e 6, com o tempo de ensaio ($C_p = 0$ ppm)	91
3.14. Desgastes parciais dos rotores 4 e 7, com o tempo de ensaio ($C_p = 600$ ppm)	92
3.15. Desgaste acumulado do rotor 1 ($C_p = 0$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. Ajuste de curva aos dados experimentais	95
3.16. Desgaste acumulado do rotor 2 ($C_p = 200$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. A- juste de curva aos dados experimentais	96
3.17. Desgaste acumulado do rotor 3 ($C_p = 400$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. A- juste de curva aos dados experimentais	97
3.18. Desgaste acumulado do rotor 4 ($C_p = 600$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. A- juste de curva aos dados experimentais	98
3.19. Desgastes acumulados dos rotores da primeira fase, com o tempo de ensaio, e os polinômios ajustados aos dados experimentais	101
4.01. Sequência do fenômeno de desgaste do registro com flanges (usado na 1ª fase) e operações de reparos dos danos causados	107

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1.01.	Efeitos dos fatores do desgaste	11
1.02.	Tipo do material de fabricação da bomba ou draga em função de sua aplicação	18
1.03.	Comparação entre as durezas de substâncias contidas na estrutura de alguns tipos de aço e ferro fundido, de minerais e de exemplos típicos	20
1.04.	Equipamentos utilizados para a obtenção do valor do desgaste abrasivo	27
1.05.	Resistência Relativa ao Desgaste para as ligas Cr27, NiCr1-550 e CrMo15 3, comparadas aos valores obtidos no campo	30
1.06.	Resistência Relativa ao Desgaste para vários materiais (40% de areia sílica na mistura; pH = 7)	30
1.07.	Propriedades físicas dos polímeros	33
1.08.	Condições de ensaio, resultados da perda de espessura e resistências relativas ao desgaste do poliuretano R.T.V. e do poliuretano tradicional, utilizados no revestimento interno de tubulações, comparados à tubulação de aço	40
2.01.	Conjunto de peneiras	53
2.02.	Valores de DBO e DQO das várias concentrações de polímero utilizadas	56
3.01.	Definição da primeira fase de ensaios	62
3.02.	Definição da segunda fase de ensaios	63
3.03.	Pesos dos rotores e porcentagens parciais e acumuladas do desgaste abrasivo (primeira e segunda fases)	66
3.04.	Porcentagem de redução do desgaste abrasivo	

	acumulado nos rotores 2, 3 e 4 da primeira fase (que recalçaram misturas de água-polímero-areia) em relação do rotor 1, sem polímero ($C_p = 0$).	74
3.05.	Porcentagens de redução do desgaste acumulado entre os rotores 1 e 6 ($C_p = 0$ ppm) e 4 e 7 ($C_p = 600$ ppm), devida ao aumento da concentração de areia de $\sim 7,0\%$ V.M. para $\sim 13,0\%$ V.M.	88
3.06.	Porcentagens de redução do desgaste acumulado entre os rotores 1 e 4 da primeira fase (C_v $7,0\%$ V.M.) e os rotores 6 e 7 da segunda fase (C_v $13,0\%$ V.M.), devidas à adição de polímero à 600 ppm	89
3.07.	Valores do desgaste acumulado, com o tempo de de ensaio (1° fase)	94
4.01.	Dificuldades surgidas e soluções práticas encontradas referentes ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio (1° fase)	112
4.02.	Dificuldades surgidas e soluções práticas encontradas referentes ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio (2° fase)	113

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto	Página
3.01. Rotor 1, novo	77
3.02. Rotor 1, após 3 horas de ensaio. Nota-se o formato hidrodinâmico	77
3.03. Rotor 1, após 12 horas de ensaio. Notam-se aberturas na parte inferior das aletas	78
4.01. Registro de gaveta com flanges utilizado para o controle da vazão da mistura durante a primeira fase de ensaios	105
4.02. Válvula de pressão de 2" utilizada como "registro" de controle da vazão da mistura	109
4.03. Registro com rosca revestido em concreto armado, utilizado na segunda fase de ensaios ..	109
4.04. Bomba principal com a carcaça revestida em concreto armado (2ª fase de ensaios)	111
4.05. Vista geral da bomba principal e registro de controle da vazão da mistura, ambos revestidos em concreto armado	111

LISTA DE SÍMBOLOS

- A_0 = área inicial da seção transversal da tubulação.
 C_p = concentração de polímero.
 C_v = concentração média do sólido, expressa em porcentagem do volume da mistura.
 C_w = concentração média do sólido, expressa em porcentagem do peso da mistura.
 d = diâmetro médio da partícula sólida (mm).
 dr_m = densidade relativa da mistura água-areia ou água-polímero-areia.
 dr_s = densidade relativa do sólido.
 D = diâmetro da tubulação.
 D_{om} = diâmetro interno inicial da tubulação.
 H_m = altura manométrica.
 K = fator da relação $\Delta V = K \cdot (1 - e^{-\beta \cdot C_v})$.
 L_m = comprimento do trecho de tubulação ensaiada.
 i = corrente elétrica.
 m = expoente da relação $\Delta d/t = C_v \cdot V^m$.
 M = massa de areia transportada.
 Md_1 = massa final da amostra totalmente seca no instante 1.
 Md_2 = massa final da amostra totalmente seca no instante 2.
 n = expoente na relação $W \propto V^n$.
 P = peso da mistura armazenada no tanque volumétrico, durante a operação descrita no ítem (2.2.1.), em Kgf.
 P_c = peso do tanque volumétrico cheio, em Kgf.
 P_v = peso do tanque volumétrico vazio, em Kgf.
 Q_m = vazão da mistura sólido-líquida, em l/s.
 RRA = resistência relativa à abrasão.
 RRD = resistência relativa ao desgaste.
 t = tempo de ensaio.
 T = vida útil, em horas.

- U = tensão elétrica, em Volts.
 V = velocidade de escoamento da mistura.
 V_p = velocidade da partícula.
 V_i = velocidade de escoamento da mistura no ensaio.
 x = volume armazenado no tanque volumétrico durante a operação descrita no item (2.2.1.), em litros.
 X = leitura na escala do piezômetro instalado no tanque volumétrico, em centímetros.
 W = desgaste abrasivo.
 W_a = desgaste abrasivo acumulado, em porcentagem.
 W_p = desgaste abrasivo parcial, em porcentagem.

z = expoente na relação $t = T \cdot \left(\frac{V}{V_i} \right)^z$.

% V.M. = porcentagem do volume da mistura.

OBS.: Na pesquisa foi utilizado o Sistema Internacional de unidades

GREGAS

α = ângulo de impacto da partícula sólida.

β = expoente na relação $\Delta V = K \cdot (1 - e^{-\beta \cdot C_v})$.

γ_a = peso específico da água, em Kgf/m³.

γ_m = peso específico da mistura, em Kgf/m³.

γ_s = peso específico real da areia, em Kgf/m³.

Δd = decréscimo na espessura da parede da tubulação devido ao desgaste abrasivo.

Δh_a = valor máximo permissível da redução da espessura da parede da tubulação.

Δm = redução da massa do material da tubulação.

ΔM = diferença das massas totais da amostra antes e depois do ensaio de desgaste.

ΔV = volume de desgaste.

η = rendimento da bomba.

η_{30} = rendimento da bomba recalçando misturas em concentração de sólidos de 30%, em volume.

ρ_p = massa específica do material da tubulação.

ϵ = fator na relação $Md_1 - Md_2 = \Delta M \cdot (1 - \epsilon)$.

ξ = desgaste específico (adimensional).

OBS.: Na pesquisa foi utilizado o Sistema Internacional de unidades

RESUMO

O desgaste abrasivo, devido ao transporte de misturas sólido-líquidas em escoamentos turbulentos, tem sido objeto de muitos estudos. Além disso a redução desses desgastes é de grande importância para o aumento da vida útil de tubulações e bombas.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental sobre a influência de uma poli(acrilamida) aniônica, solúvel em água, no desgaste por abrasão dos componentes internos de bombas centrífugas recalçando misturas sólido-líquidas.

Os resultados da adição do polímero em concentrações de 200, 400 e 600 ppm apresentaram boas reduções nos valores do desgaste abrasivo dos rotores da bomba centrífuga.

ABSTRACT

The abrasive wear due to slurry transportation in turbulent flows, have been a subject of several works. Besides, the reduction of wear is very important to increase the life of pipelines and pumps.

In this work is showed a experimental study of water soluble anionic polyacrylamide effect on abrasive wear due to slurry in centrifugal pump internal components.

The tests carried out with 200, 400 and 600 ppm polymer concentration presented a good reduction of abrasive wear on centrifugal pump impellers.

INTRODUÇÃO

As bombas centrífugas vêm sendo utilizadas com muita frequência em instalações de recalque de misturas sólido-líquidas. Exemplos práticos podemos encontrar em estações de tratamento de esgoto, dragagem de leitos de rios, drenagem, transporte hidráulico de minérios e de seus resíduos, desassoreamento de reservatórios, etc..

Essas bombas sofrem danos internos em seus componentes, devido à dois fenômenos: corrosão e abrasão.

A corrosão, caracterizada pela ação química das misturas, e a abrasão, responsável pelo atrito e impacto das partículas sólidas sobre a superfície dos componentes internos de bombas e também das tubulações, ocasionam o desgaste do material de fabricação, diminuindo rapidamente a vida útil desses materiais.

Neste trabalho abordaremos os efeitos do desgaste por abrasão dos sólidos, por ser predominante no transporte de misturas de água e areia.

Existem fatores básicos que influenciam o desgaste abrasivo, e são citados na literatura como sendo:

- Densidade, dureza, tamanho e forma das partículas sólidas;
- Concentração e viscosidade da mistura;
- Diâmetro e material da tubulação;
- Velocidade da mistura e ângulo de impacto da partícula sólida;

- Composição, estrutura e dureza dos materiais de fabricação das bombas.

Velocidade e concentração altas, dureza da partícula maior que a do material sujeito à abrasão, são pontos importantes do desgaste abrasivo. Além disso as curvas características das bombas, também sofrem influências do desgaste.

No estudo do escoamento de misturas sólido-líquidas é necessário caracterizar bem o sólido, com o qual serão compostas as misturas. Assim, foi utilizado na composição dessas, uma única areia de granulometria definida, altamente abrasiva para acelerar o processo de desgaste.

Os desgastes abrasivos foram quantificados pelo método da perda de peso, e com isso se pode prever a vida útil dos materiais utilizados.

Como não é possível eliminar totalmente os desgastes dos componentes internos de bombas e das tubulações, devido ao efeito abrasivo dos sólidos, a vida útil destes materiais em contato com materiais abrasivos pode ser prolongada, reduzindo os custos de manutenção.

Dureza elevada, formas hidrodinâmicas, espessuras maiores e revestimentos internos, são maneiras encontradas para a diminuição do desgaste a valores aceitáveis.

A opção por materiais de dureza alta resolveria parcialmente o problema, porém, a custos elevados.

O revestimento de tubulações e componentes internos de bombas têm-se tornado comum em aplicações de transporte de misturas abrasivas. Nestes revestimentos encontramos os polímeros, como as borrachas e os plásticos.

Os polímeros também têm larga aplicação quando adicionados, em solução, à misturas sólido-líquidas, proporcionando, principalmente, a redução da energia consumida em instalações de recalque.

Em vista da necessidade de diminuirmos o desgaste por abrasão em componentes internos de bombas e diante da inexistência de trabalhos que levem em conta os efeitos da adição de polímeros, em solução, sobre os desgastes por abrasão, pretende-se através desta pesquisa obter informações conclusivas a respeito do assunto.

O objetivo principal será a verificação da influência do polímero, nos desgastes por abrasão do rotor da bomba utilizada, buscando uma alternativa nova para amenizar este problema que eleva em demasia os custos de manutenção e reposição de peças em sistemas de recalques.

O capítulo 1 apresenta um levantamento de bibliografias recentes sobre o assunto.

O capítulo 2 mostra os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

O processamento e análise dos resultados são apresentados no capítulo 3; e no capítulo 4 são mostradas as soluções práticas para as dificuldades surgidas durante o trabalho referentes ao desgaste abrasivo dos componentes da bancada de ensaio.

Por fim são apresentadas as conclusões, onde se chegou a resultados bastante positivos com relação às reduções do desgaste.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Desgaste

1.1.1. Introdução:

No transporte hidráulico de sólidos através de condutos forçados, o desgaste interno é causado pela ação combinada entre a corrosão, ligada ao fluido transportado, e a abrasão, devido à ação física das partículas sólidas sobre as paredes da tubulação e dos componentes internos de bombas.

Corrosão é um processo químico realizado por reações catódicas e anódicas, as quais, na prática, conduzem à oxidação contínua de átomos do metal da tubulação ou componentes internos de bombas, tornando-os solúveis no fluido transportado. Os principais fatores que influenciam a corrosão são:

- pH;
- Quantidade de oxigênio dissolvido;
- Concentração iônica de cálcio, ferro, cloro e compostos de enxofre no fluido transportado;
- Condutividade elétrica;
- Temperatura e pressão;
- Material da tubulação.

Abrasão é um processo físico realizado pelo impacto e atrito de partículas sólidas contra a parede da tu-

bulação ou componentes internos de bombas, proporcionando uma remoção contínua do material da superfície sólida.

Os parâmetros que afetam a abrasão são:

- Densidade, dureza, tamanho e forma das partículas sólidas;
- Concentração de sólidos e viscosidade da mistura;
- Diâmetro e material da tubulação ou componentes internos de bombas;
- Condições de escoamento e vazão.

A abrasão também afeta o valor da corrosão, visto que a remoção contínua da camada de passivação (formada durante o processo de corrosão sobre a superfície oxidada) torna o material mais suscetível às reações químicas resultando elevada corrosão.

Assim, quanto ao transporte hidráulico de sólidos, o desgaste é causado pela corrosão e abrasão, e é necessário obter um entendimento completo de cada processo de forma a encontrar soluções mais apropriadas para todas as possíveis situações operacionais.

Neste trabalho, abordaremos o desgaste por abrasão dos sólidos, lembrando que ambos têm suas importâncias, mas que neste caso, o desgaste por abrasão é substancialmente superior à corrosão.

TRUSCOTT (1972), cita, em seu trabalho de levantamento da literatura sobre o desgaste abrasivo em máquinas hidráulicas, os fatores básicos que afetam o desgaste:

- (1) Partículas sólidas: dureza, tamanho, forma, densidade relativa e concentração;
- (2) Materiais de construção das máquinas hidráulicas: composição, estrutura e dureza;
- (3) Escoamento: velocidade, ângulo de impacto, tensões de cisalhamento turbulentas.

WILSON (1976), estudando os materiais para fabricação de bombas para o transporte de misturas sólido-líquidas, classifica a abrasão em tres tipos:

1. Abrasão por impacto: ocorre quando partículas de tamanho grande colidem sobre superfícies sólidas, com forças tão intensas, resultando tensões muito altas, capazes de arrancar pedaços do material da superfície sólida de tamanho considerável. Para esse tipo de abrasão, WILSON recomenda o uso do aço manganês austenita de 220 BH (12 a 14% de manganês). Este material deve ser usado na fabricação de dragas e bombas para cascalho.

2. Abrasão trituratora: resulta da ação trituratora sobre partículas localizadas entre duas superfícies friccionadas. Para este tipo de abrasão, WILSON recomenda o uso de ferro branco martensita, tal como o aço Cr-Ni (4% de níquel e 2% de cromo) e ligas com 15% de cromo e 3% de molibdênio com dureza de 550 a 650 BH, podendo através de tratamento térmico, chegar a 730 BH. Pode-se também, usar borracha natural com dureza entre 38 e 44 SHORE-A. A borracha natural tem fraca resistência a corte, ficando limitada a aplicações onde as partículas têm diâmetros menores ou iguais a 2,83 mm.

3. Abrasão erosiva: ocorre da colisão de partículas movendo-se livremente sobre superfícies desgastantes. Os desgastes abrasivos aumentam rapidamente quando a dureza da partícula sólida excede àquela do material dos componentes das bombas.

A MANNESMANNROHREN-WERKE AG (1979), na Alemanha, cita como causas do desgaste, a abrasão mecânica e a corrosão. A Figura (1.01) resume os fatores que influenciam o desgaste.

A corrosão, que depende da velocidade de escoamento e da turbulência, é causada pelo oxigênio dissolvido (O_2), ácidos (CO_2), valor do pH da mistura sólido-líquida e sais, e é controlada pela adição à mistura de inibidores, mantendo condições de segurança.

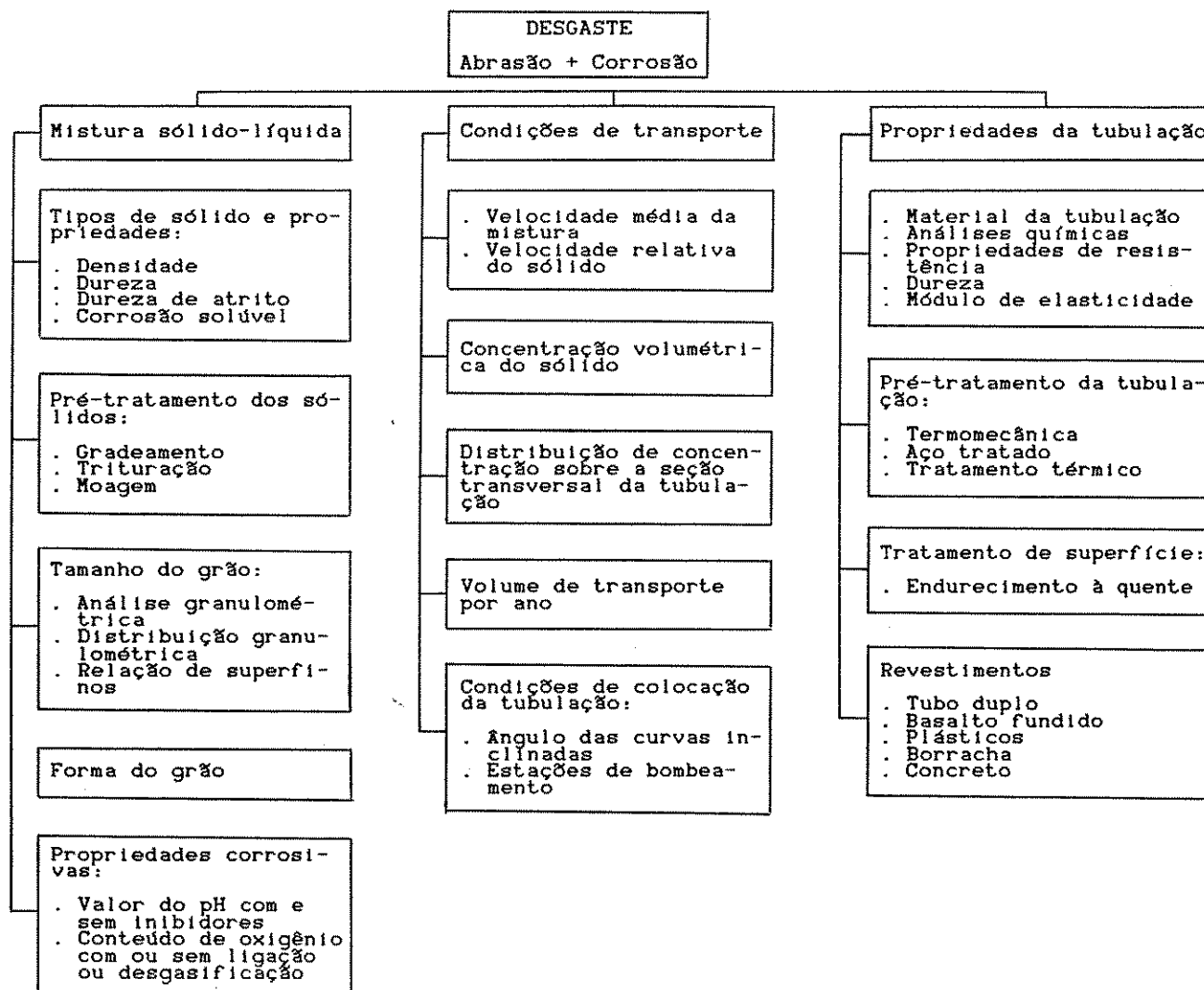


Figura 1.01. Fatores que influenciam o desgaste. Por MANNESMANNROHREN-WERKE AG (1979)

A abrasão mecânica depende de muitos fatores. Um fator decisivo que influencia a abrasão é a velocidade, na forma V^2 ou V^3 , citada também por TRUSCOTT (1972), WILSON (1976), BREE et alii (1982) e JAMES & BROAD (1983). O tipo de mistura, tamanho da partícula e granulometria, assim como a dureza da partícula sólida e seu fator de forma, também são fatores importantes.

A MANNESMANNROHREN-WERKE AG (1979), considera ainda que o desgaste pode ser evitado se no projeto, construção e operação de sistemas de tubulações de longa distância considerarmos:

- a) Otimização da velocidade e das propriedades do sólido;
- b) Redução do desgaste da parede da tubulação, assegurando um monitoramento constante do valor do pH e dos componentes solúveis na mistura;
- c) Para tubulações desmontáveis o uso de revestimento interno ou uso de materiais altamente resistentes ao desgaste.

HUGGETT & WALKER (1988), definem abrasão como o desgaste provocado pelas partículas sólidas movimentando-se e colidindo contra uma superfície sólida, enquanto que erosão é a perda progressiva do material original de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre aquela superfície e: um fluido, um fluido com vários componentes, ou partículas sólidas ou líquidas em colisão. A essencial diferença entre abrasão e erosão é que erosão envolve uma transferência de energia cinética da partícula para o substrato ou material desgastante, enquanto que abrasão não.

Ainda segundo HUGGETT & WALKER (1988), existem tres principais formas de desgaste erosivo, como mostra a Figura (1.02):

1. Erosão por deslizamento: ocorre em áreas onde as concentrações de sólidos são altas, e a energia é trans-

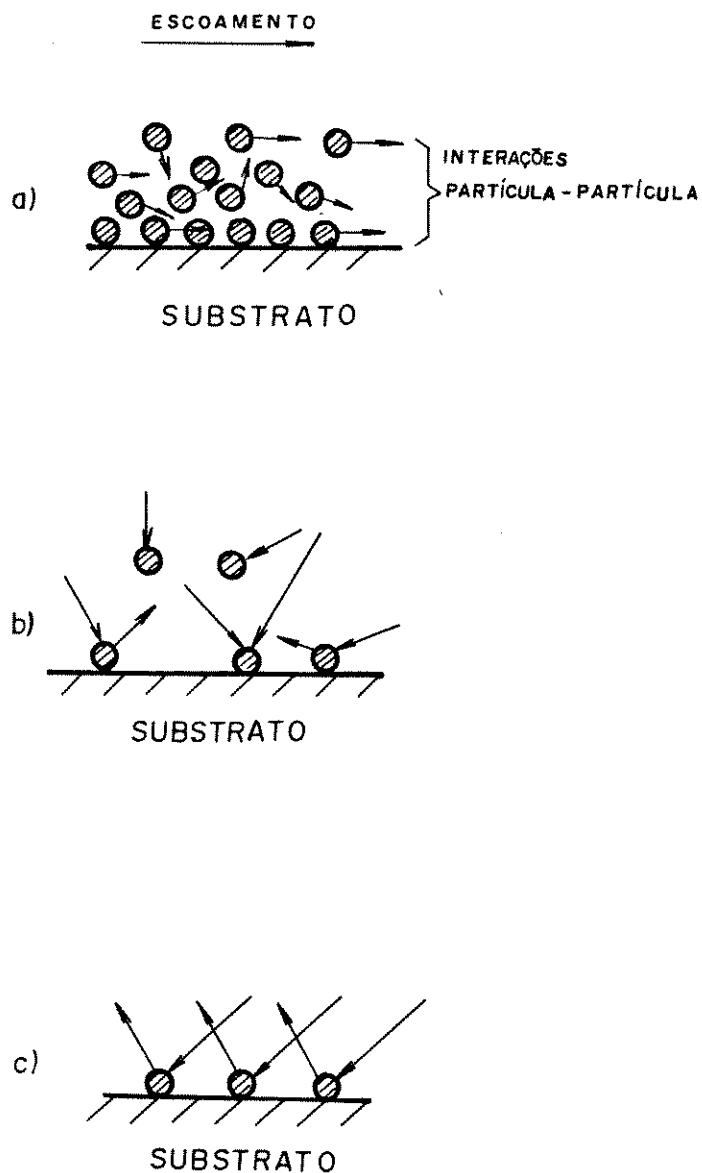


Figura 1.02. Tres principais formas de desgaste erosivo: (a) erosão por deslizamento, (b) erosão por impactos aleatórios, (c) erosão por impacto direto.

(HUGGETT & WALKER, 1988)

ferida do transporte médio e de interações partícula-partícula. As partículas percorrem as paredes do substrato em ângulos próximos à tangente. Deste modo, a facilidade em transferir a energia das partículas para causar deformação do substrato, é reduzida. (Figura 1.02a)

2. Erosão por impactos aleatórios: acontece em áreas onde ocorrem vórtices e correntes de turbilhonamento, e não há ângulos de impacto específicos. (Figura 1.02b)

3. Erosão por impacto direto: ocorre principalmente em áreas onde a corrente principal de partículas muda a direção com o escoamento (curvas, cotovelos, etc.). (Figura 1.02c)

1.1.2. Desgaste em tubulações:

KAWASHIMA et alii (1978), apresentando um levantamento da literatura sobre desgaste em tubulações, citou os principais fatores que influenciam o desgaste:

- diâmetro médio da partícula (d);
- velocidade média da mistura (V);
- diâmetro da tubulação (D);
- concentração média de sólidos na mistura (C_v).

Foram analisados dados experimentais e de campo à respeito do desgaste, obtido de várias fontes (principalmente japonesas), por um comitê japonês de pesquisas (ou estudos) em desgaste de tubulações. A Tabela (1.01) resume os resultados de 26 pesquisas de desgaste, onde a velocidade varia, em sua potência, de 1 a 4,6.

Infelizmente a previsão do desgaste em tubulações, contudo, não foi bem estabelecida. Por esta razão são consideradas as três seguintes causas principais:

1) O desgaste da tubulação é causado por ações complicadas de vários fatores;

Tabela 1.01. Efeitos dos fatores do desgaste. Por KAWASHIMA et alii (1978)

PESQUISADORES	EFEITOS DOS FATORES DO DESGASTE (D, d, V, C _v , C _w)	CONDIÇÕES DE ENSAIO	UNIDADES	OBSERVAÇÕES
STAUFFER 1956	$W \propto V^3$	TE: Aço V = 5,83 m/s	Resistência ao Desgaste $R = \frac{L_s}{L} \cdot \frac{W_s}{W}$	L, Ls: Perdas no Peso W, Ws: Peso Original Sufixo s: metal padrão
YAMASHITA 1957	$W \propto v^{2,0-2,5}$	TE: Latão; Sólido: Areia V = 2,5 a 5,0 m/s C _v = 10%	mg/cm ²	
YAMASHITA 1957	Desgaste máx. à d = 0,2mm $W \propto C_v^{1,22}$	TE: Latão; Sólido: Areia V = 3,1 m/s; C _v = 5-30%	g/cm ²	
KUSAMA 1961	$W = (8,31 \frac{C_w}{100} + 1,33) \cdot 10^{-3} \cdot V^{2,13}$	Tubo: Metal Branco Sólido: Areia V = 3-5 m/s; C _w = 10-30%	g/cm . hora	
INDUSTRIAS DE METAIS SUMITOMO 1964	W = 28,24 - 0,0177 Hv H _v : dureza	Tubo: Aço; Sólido: carvão V = 2,56 m/s; C _w = 31,9%	Resistência à erosão $R_w = W_s/W$	W, Ws: desgaste em peso dos T.E. e Padrões
BRAUER 1964	Desgaste máximo p/ R/D = 2,8 (Curva do tubo)	Tubo: Aço; Sólido: Minério de Ferro V = 1,8 m/s; C _v = 20%	µm/hora	R = Raio da Curva
MUKAEWAKI 1965	$W = f \cdot 2^d$ d = 12 : 8-12 : 8 (Peneira)	TE: Aço; Sólido: areia	mg/cm ²	
OGAWA 1966	$W \propto D^{-4}$	Tubo: Aço; Sólido: areia e pedregulho V = 1,7-4,5 m/s	g/m ² /m ³	
OTOTANI & SATO 1968		TE: Aço; Sólido: areia V = 6,45 m/s	Resistência à erosão da areia: $R = W_s/V$	V, V _s : Perdas no Volume dos T.E. e Padrão
MULLER & POLTHIER 1970	$W \propto V^2$ (Impacto)			
ROHNISCH & VOLLMER 1970	$W = a \cdot t + p \cdot t \cdot V^{1,5}$	TE: Aço; Concreto, Plástico Sólido: esferas de corindon V = 6,45 m/s	mm/100	a: desgaste devido ao deslizamento p: desgaste devido ao impacto t: tempo
WATANABE 1970		Tubo: Aço; Sólido: carvão V = 2,7-3,6 m/s; C _v = 30%	mm/ton	
OGAWA 1970	$W \propto D^{-2,3}$ (p/ pedregulho) $W \propto D^{-2,1}$ (p/ areia)	Tubo: Aço; Sólido: Areia e Pedregulho V = 1,7-4,5 m/s	g/m ³	
CONDOLIOS & CHAPUS 1970	$W \propto V^3$			
TURCANINOV 1971	$W \propto V$ (p/ quartzo) $W \propto V^n$ n > 1 (P/ areia) $W \propto (S_m - S_w)^2$	Sólido: Quartzo : Areia : Materiais grossos		S _m , S _w peso específico da mistura e água
KALCENKO 1971	$W \propto V^2$			
WELLINGER & VETZ 1971	$W \propto V^{1,5}$ $W \propto V^{3,0}$ $W \propto V^{4,5}$	Tubo: Aço : Basalto : Borracha		
OMUDE 1971	$W \propto d$ $W \propto v^{2,2-2,5}$	TE: Aço; Sólido: Pedregulho V = 0,83-2,08 m/s	g/cm ²	
WELLINGER 1972	$W \propto v^{1,4}$ $W \propto v^{1,5}$	TE: Aço Borracha		
GOODWIN 1972	$W \propto v^{2,3}$	TE: Metais e Plásticos d > 0,125mm; V < 1800 pés/s		Ensaio seco
BERGEPON 1972	$W \propto d^{0,75}$ $W \propto D^{-1}$	TE: Alumínio; Latão		
KOZIREV 1972	$W \propto v^{2,2}$ $W \propto C_v$	C _v < 10%		Ensaio com impacto de jato
VASILIEV 1972	$W \propto C_v^{0,82}$	Sólido: areia C _v = 3-15%		Ensaio de bombeamento
ANTUNES & YOLDEN 1972	$W \propto V^3$ $W \propto V^2$	TE: Metal flexível V < 100 pés/s; V > 100 pés/s		
TARJAN & DEBRECZENI 1972	$\xi \propto C_v^2$	Tubo: Alumínio, Ferro fundido e Aço	Desgaste específico da Tubulação $\xi = W/V \cdot t$	W: desgaste do tubo em peso t: tempo de desgaste
BARKER & TRUSCOTT 1974	$W \propto V^{4,3}$	Tubo: Aço; Sólido: Minério de ferro V = 2-4 m/s, C _v = 5%		

OBS: D = DIÂMETRO DA TUBULAÇÃO ; d = DIÂMETRO DA PARTÍCULA ; V = VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

C_v = CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NA MISTURA, EM VOLUME ; C_w = CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS NA MISTURA, EM PESO.

T.E. = TUBULAÇÃO DE ENSAIO

2) Os dados não são suficientes para analisar os fatores do desgaste;

3) Os resultados dos ensaios não estão ligados diretamente ao desgaste da tubulação.

Assim, KAWASHIMA et alii (1978), propõem, para tornar claro o desgaste na tubulação, coletar um número de dados que se refiram à várias condições de operação e à vários fatores do desgaste.

Deste modo, são apresentadas planilhas padronizadas de coleta de dados, baseadas no diagrama de causa/efeito, Figura (1.03).

BREE et alii (1982), estudando as relações entre o desgaste erosivo para dois tipos de aços de tubulações (42 e CBR 315.3) e os parâmetros:

- ângulo de impacto: α
- velocidade da mistura: V
- diâmetro médio da partícula: d
- concentração de areia: C_v

concluíram que:

1) Para α entre 30° e 40° , independentemente da concentração de areia, C_v , ocorre o maior desgaste;

2) A relação

Volume de desgaste da maior partícula ($d = 0,990 \text{ mm}$)

Volume de desgaste da menor partícula ($d = 0,260 \text{ mm}$)

diminui com o aumento da velocidade da mistura, V .

3) A relação desgaste versus velocidade da mistura obedece à seguinte lei:

LEGENDA: → FATORES SIGNIFICANTES
 → FATORES MUITO SIGNIFICANTES

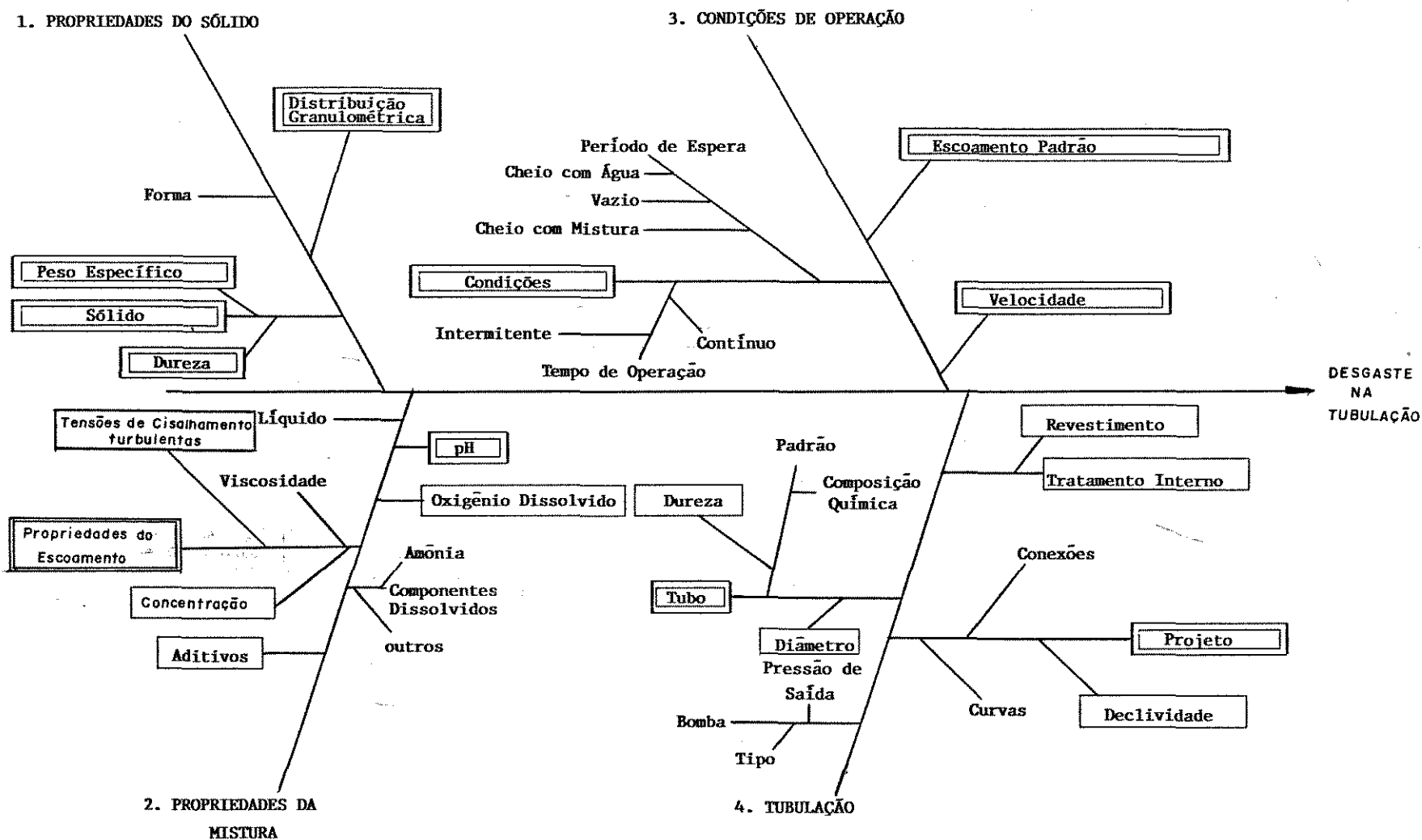


Figura 1.03 - Diagrama de Causa/Efeito do desgaste. Por KAWASHIMA et alii (1978)

$$\frac{\Delta d}{t} = C_v \cdot V^m \quad (1.01)$$

onde: m = depende do material ensaiado e do tamanho da partícula de areia ($3 < m < 4$);

Δd = decréscimo da espessura da parede da tubulação devido ao desgaste (mm);

t = tempo de ensaio (dias).

4) O volume de desgaste aumenta com o aumento da concentração de sólidos na mistura, C_v , na forma:

$$\Delta V = K \cdot (1 - e^{-\beta \cdot C_v}) \quad (1.02)$$

onde: ΔV = volume de desgaste ($\text{mm}^3/6$ horas);

K = depende das características do material ensaiado (9,8 para o aço 42 e 2,35 para o aço CBR 315.3);

β = depende das condições experimentais (0,08 para ambos os aços testados);

C_v = concentração média do sólido, expressa em porcentagem do volume da mistura (% V.M.).

Uma consequência prática da relação acima é que o volume de desgaste por unidade de massa de areia transportada ($\Delta V/M$), diminui consideravelmente com o aumento da concentração de areia. Isso significa que o recalque de misturas com alta concentração de areia é mais favorável do que o recalque de misturas com baixa concentração de areia.

As conclusões acima de BREE et alii (1982), são encontradas sob uma variedade de condições de operação, e são deste modo, consideradas de significância para a prática do transporte de misturas. Mas ainda existe claramente a necessidade de interpretarmos em termos de "primeiros princí-

plos" e não obstante devem ser considerados: a mecânica do processo de erosão e a influência das propriedades básicas dos materiais ensaiados.

1.1.3. Desgaste em bombas centrífugas:

Existe uma crescente demanda de bombas que transportam misturas sólido-líquidas abrasivas.

Esta necessidade ocorre em projetos de bombas para esgoto, dragagem ou qualquer outra aplicação no transporte hidráulico de sólidos.

Em qualquer caso, o desgaste resultante é um problema crescente, principalmente com o aumento das velocidades de escoamento.

TRUSCOTT (1972), apresentando um levantamento da literatura sobre o desgaste abrasivo em máquinas hidráulicas, considerou alguns pontos principais:

(1) O desgaste aumenta rapidamente quando a dureza da partícula excede a da superfície do metal sujeito à abrasão;

(2) O desgaste aumenta, geralmente, com o tamanho, dureza e concentração do grão sólido.

(3) A dureza do metal não é um critério absoluto de desgaste, embora, para metais ferrosos, é geralmente esperada uma tendência no aumento da resistência ao desgaste. Uma razoável resistência pode ser alcançada em cerca de 300 BH. As ligas muito duras (por exemplo: carbeto de tungstênio) e as superfícies tratadas, são extremamente resistentes.

(4) A composição química, a microestrutura e a capacidade de endurecimento, representam parte importante na resistência ao desgaste dos metais. Austenita Cr-Ni (12-14% Cr) e ligas de aço-manganes são tão boas quanto o ferro fundido "duro-níquel" (Ni-Cr). O aço inoxidável 18/8 (embora

resistente à cavitação) e a maioria dos metais não ferrosos, com exceção à liga alumínio-cobre, têm pobre resistência à abrasão;

(5) O desgaste aumenta rapidamente com a velocidade de escoamento, e é frequentemente apresentado como sendo aproximadamente proporcional à V^3 ou à $Hm^{3/2}$, a partir de considerações teóricas e resultados de ensaios. O valor real do expoente para quaisquer condições dadas, depende provavelmente de pelo menos algum, se não de todos os outros fatores envolvidos em todo o processo de desgaste.

(6) O ângulo de impacto tem um efeito pronunciado sobre o desgaste, e os metais e as borrachas comportam-se de formas opostas;

(7) Bons projetos hidráulicos, particularmente para evitar mudanças bruscas na direção do escoamento, como a escolha de curvas de grandes raios, diminuem o desgaste.

BREE (1975), estudou o comportamento de diversos materiais para a fabricação dos componentes de dragas submetidos a ensaios 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 componentes da draga.

O tipo de solo bombeado é o fator mais importante na determinação do grau do desgaste. Para determinar a relação entre o tipo de solo e o desgaste, BREE classificou os solos em tres grupos principais:

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

II. Solos não coesivos (inclui: areia e cascalho com diâmetros entre 0,063 e 64 mm e iguais a 0,063 e 64 mm),

III. Material consolidado coesivo (inclui: ardósia, granito, coral e similares com diâmetros superiores a 64 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 desgaste 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 geral, pode-se assumir que o desgaste aumenta em proporções diretas com o diâmetro e que a distribuição granulométrica também influi no desgaste, já que, as partículas de tamanho maior são um forte determinante do desgaste.

Embora a pesquisa desenvolvida por BREE tenha sido baseada nos desgastes ocorridos nos componentes de dragas, é de muita valia para os projetos de bombas centrífugas destinadas ao recalque de misturas sólido-líquidas.

Os resultados da pesquisa de BREE encontram-se resumidos na Tabela (1.02), os quais permitem a escolha do tipo de material de que devem ser fabricadas os componentes internos de bombas em função de suas aplicações práticas.

As propriedades mecânicas dos grãos contidos no solo a ser bombeado, são também de grande importância na escolha do tipo de material de que devem ser fabricados os

Tabela 1.02 - Tipo do material de fabricação da bomba ou draga em função de sua aplicação - Por BREE (1975)

TIPO DE MATERIAL	DUREZA VICKERS (Hv)	PROPRIEDADES DE USINAGEM	APLICAÇÕES
Aço fundido contendo uma quantidade de carbono eutéticos - relativamente forte do ponto de vista de sua natureza.	270 a 380 Valor recomendado 340	Torneia, punciona e perfura facilmente. Pode ser soldado observando instruções especiais.	Para componentes os quais estão sujeitos a esforços mecânicos e a desgastes (água e areia) e os quais requerem usinagens. Usado para revestir o interior da carcaça e entrada de sucção.
Liga especial baseada em alta porcentagem de cromo. Devido ao tratamento térmico. Não é quebradiço como sua natureza sugere.	310 a 420 Valor recomendado 380	Torneia facilmente. Pode ser puncionado e perfurado razoavelmente.	Para componentes os quais estão sujeitos a alguns esforços mecânicos e ao desgaste (água e areia) e os quais requerem usinagem. Usado para anéis e chapas de revestimento de bombas e dragas.
Aço fundido contendo uma quantidade de carbono eutéticos em estrutura muito fina. Relativamente forte do ponto de vista de sua natureza.	310 a 420 Valor recomendado 380	Torneia facilmente. Pode ser puncionado e perfurado razoavelmente.	Para componentes os quais estão sujeitos a alguns esforços mecânicos e ao desgaste e requerem usinagem. Usado para rotores nas chamadas bombas duras de dragas.
Liga especial fundida baseada em alta porcentagem de cromo. Devido à sua natureza o material é quebradiço. Não pode ser feito alongamento	390 a 540 Valor recomendado 460	Pode ser torneado razoavelmente. É impossível, puncionar e perfurar.	Para componentes os quais estão sujeitos a pouco ou nenhum esforço mecânico. Sujeitos ao desgaste e que necessitam ser torneados. Usado para anéis de revestimento da entrada de sucção.
Liga especial fundida de cromo níquel. Devido à sua natureza ela é quebradiça, mas ela também incorpora um grau de dureza resultante do tratamento metalúrgico.	460 a 640	Apenas é torneável, mas somente com ferramenta de corte especial. Acabamento final é frequentemente executado pelo esmeril. Não pode ser puncionado ou perfurado.	Para componentes os quais estão sujeitos a alguns esforços mecânicos e ao desgaste (areia) e os quais requerem pouca ou nenhuma usinagem. Usado para anéis de revestimento da sucção das bombas duras de dragas.
Liga fundida especial baseada em alta porcentagem de cromo-molibdênio. A natureza do material implica que ela é quebradiça. Não pode ser alongada.	640 a 930 Valor recomendado acima de 770	Não pode ser esmerilhada	Para componentes submetidos a baixos esforços ou cargas de impacto devidas à queda de pressão, mas sujeitas ao desgaste e os quais requerem a mais simples usinagem. Usado para revestir o interior da carcaça e anéis de revestimento de bombas de dragas de parede dupla.

componentes internos de bombas. A Tabela (1.03) apresenta as durezas de alguns minerais comparadas com as durezas de exemplos típicos e com as durezas de substâncias contidas na estrutura de alguns tipos de aço e ferro fundido.

O valor do desgaste em bombas centrífugas, segundo WILSON (1976), está relacionado à mistura sólido-líquida bombeada e aos materiais de fabricação das bombas.

WILSON cita que:

- o desgaste aumenta com o aumento do tamanho da partícula;
- o desgaste aumenta rapidamente quando a dureza da partícula excede a da superfície do metal desgastante;
- as partículas de forma angular causam maior desgaste do que as partículas arredondadas;
- o desgaste aumenta com o aumento da concentração das partículas;
- A velocidade da partícula, sua energia cinética e seu ângulo de impacto são considerações primárias na escolha do material de fabricação das bombas. Os metais com alto limite elástico são requeridos para resistir a impactos diretos; metais com alta dureza são usados quando existe relativamente baixo impacto, isto é, quando o escoamento é quase paralelo à superfície;
- A expressão $W \propto V_p^n$, onde W é o desgaste, V_p é a velocidade da partícula e n varia entre 2,2 e 3, é frequentemente citada.

COIADO (1985), além da concentração e do tamanho dos grãos das areias utilizadas, considerou também o desgaste por abrasão como fator de influência nas curvas características da bomba.

WIEDENROTH (1988), estudando o desgaste em rotores de bombas centrífugas, concluiu que quando a bomba trabalha fora de seu ponto de máximo rendimento, o desgaste do

Tabela 1.03 - Comparação entre as durezas de substâncias contidas na estrutura de alguns tipos de aço e ferro fundido, de minerais e de exemplos típicos. Compilada de GUY (1980) BREE (1975), AUGUSTO (1974) e PROVENZA (1978).

SUBSTÂNCIAS	DUREZA BRINELL BH	MINERAIS	DUREZA BRINELL BH	EXEMPLOS TÍPICOS	DUREZA BRINELL BH
Grafita	2-11	Talco	3-4	Chumbo, polietileno, polipropileno	3-4
Ferrita	70-200	Gipsita	20-30	Alumínio, unha	20-30
Perlita	250-450	Calcita (Ca CO_3)	100-150	Moeda de cobre, gram po de aço para papel	100-150
Austenita	170-600	Apatita	300-400	Vidro de cal de soda Vidro de sílica Aço de fácil usina gem	300-400
Mortensita	500-1100	Feldspato	400-500	Aço-temperado (Lima)	400-500
Cementita	800-1100	Quartzo (Si O_2)	600	Aços ferramentas	600
Carboneto de cromo do tipo $\text{Cr}_7 \text{C}_3$	1200-1600	Topázio	900-1000	Aços nitretados	900-1000
Carboneto de molibdênio ($\text{MO}_2 \text{C}$)	1500	Corundum ($\text{Al}_2 \text{O}_3$)	1000-1500	Carbeto de tungstênio Carbeto de silício	1000-1500
		Diamante	> 4000		

BRINELL - Esfera de aço temperado, ϕ 10mm, carga 3000 kg.

rotor aumenta consideravelmente (Figura 1.04). WIEDENROTH utilizou mistura de água e areia, em concentração de 30% em volume e diâmetro da areia de 1 mm. Os resultados dos ensaios exibiram uma interdependência bem definida entre a abrasão e o ponto de trabalho da bomba.

1.1.4. Métodos experimentais de determinação do desgaste abrasivo:

A necessidade de conhecimento dos materiais utilizados em sistemas de transporte de misturas sólido-líquidas, bem como sua vida útil frente ao elevado desgaste tornou possível o desenvolvimento de ensaios que determinam o desgaste, tanto em tubulações quanto em bombas.

SWAN et alii (1963), AILOR (1971), BARKER & TRUSCOTT (1974) e JACOBS & BOOTHROYDE (1977), utilizaram o método da perda de peso para medir o desgaste total, tanto em ensaios simulados de campo como em laboratório.

Este método é bem demonstrado, e dá informação exata tanto da quantidade de material removido como da forma como tal desgaste acontece.

WIEDENROTH (1971), utilizando um ensaio de medição do desgaste por jateamento em rotores de bombas, estabeleceu os pontos de maior e menor desgaste para vários tamanhos de partículas, com concentração constante, no ponto de máximo rendimento da bomba.

FADDICK (1975) afirmou que como não é possível identificar precisamente, através de correlações teóricas, os efeitos do desgaste nos materiais das tubulações, é necessário realizar ensaios simulados para cada caso individual, reproduzindo com exatidão no interior da tubulação testada, as condições de escoamento próximas da verdadeira.

DEBRECZENI et alii (1978), apresentam dois métodos de determinação do desgaste abrasivo em tubulações. O

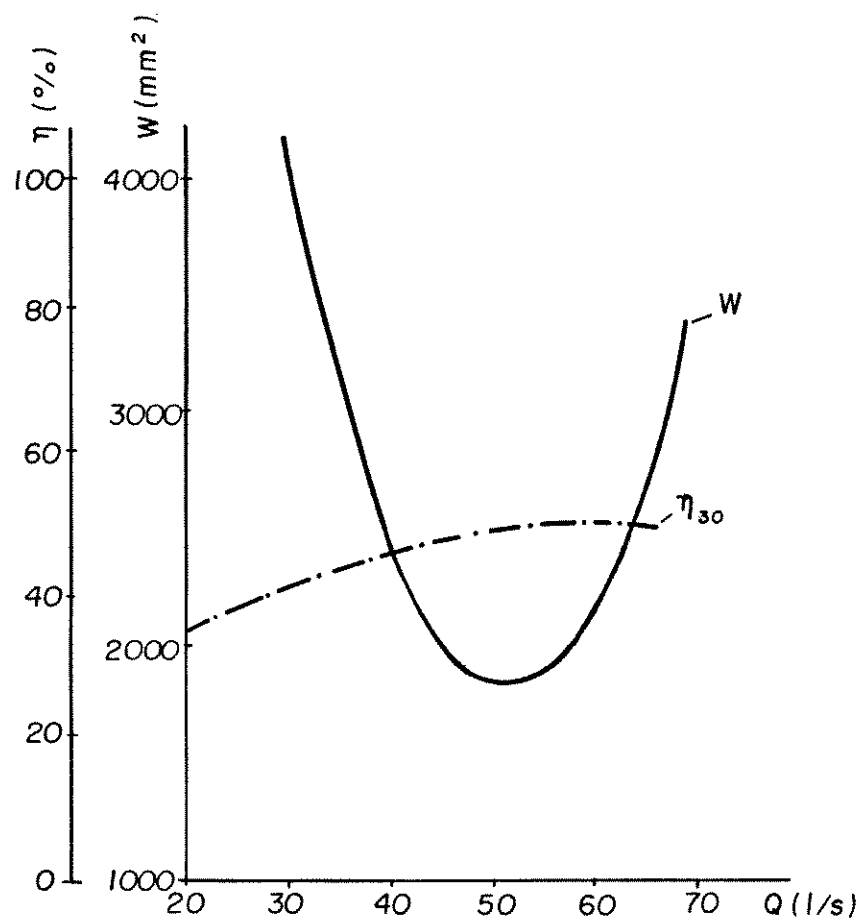


Figura I.04. Desgaste do rotor em relação ao rendimento de uma bomba centrífuga, com a vazão.
($C_v = 30\%$)
(WIEDENROTH, 1988)

método da medida da massa e da medida do volume, asseguram, em um período de ensaio bastante curto, a determinação do desgaste total, desde que evitado os efeitos da corrosão para o método da medida da massa.

O método da medida da massa determina a redução de massa, Δm , durante um período de tempo, t , para dados parâmetros hidráulicos.

O desgaste obtido pelo outro método é realizado medindo-se a diferença de volume interno da seção de amostra da tubulação.

DEBRECZENI et alii (1978), apresenta o desgaste específico, ξ , da tubulação:

$$\xi = \frac{\Delta m \cdot D_{om}}{Q_m \cdot t \cdot L_m \cdot \rho_p} \quad (1.03)$$

onde: Q_m = vazão da mistura;

L_m = comprimento do trecho de tubulação ensaiada;

D_{om} = diâmetro interno inicial da tubulação;

Δm = redução da massa do material da tubulação;

t = tempo de ensaio;

ρ_p = massa específica do material da tubulação;

ξ = é adimensional.

DEBRECZENI et alii (1978), demonstram ainda que a vida útil da tubulação pode ser prevista com base em medidas feitas do desgaste específico da tubulação:

$$T = \frac{\Delta h_a \cdot A_o}{Q_m \cdot \xi} \quad (1.04)$$

onde: T = vida útil, em horas;

Δh_0 = valor máximo permissível da redução da espessura da parede da tubulação;

A_0 = área inicial da seção transversal da tubulação;

Q_m = vazão da mistura.

NGUYEN & SAEZ (1979), estudando o transporte de mistura água-resíduos de cobre de uma mina de cobre para uma barragem de resíduos com 40% de sólidos em peso na mistura, sendo 60% de sílica (alta abrasão) e pH < 4,5 (poder de corrosão), realizaram ensaios num circuito fechado (200 metros de comprimento e 36 polegadas de diâmetro) de uma planta piloto em escala verdadeira, particularmente em seções de amostra de 2 polegadas com diferentes materiais de revestimentos anti-abrasivos, sob mesma velocidade de escoamento, mesma mistura e mesmos parâmetros físicos. Eles determinaram um método que relaciona a velocidade e o tempo (vida útil) do material de revestimento, dado por:

$$t = T \cdot \left(\frac{V}{V_1} \right)^z \quad (1.05)$$

onde: t = tempo de ensaio (horas);

T = vida útil (horas);

V = velocidade de escoamento da mistura;

V_1 = velocidade de escoamento da mistura no ensaio;

z = variou de 2 a 3, de acordo com o tipo de revestimento interno ou tipo de material da tubulação.

O efeito da abrasão nos materiais de revestimento foi verificado através das diferenças de peso das amostras, cujos valores foram muito pequenos (da ordem de mg/100 horas de ensaio), com exceção do aço.

NGUYEN & SAEZ (1979), segundo os resultados dos ensaios, também apresentam uma regra aproximada para o cálculo da espessura do revestimento.

Para uma vida útil de 20 anos, a espessura varia de 3 a 10 mm, de acordo com a natureza do material de revestimento.

JACOBS (1982), descrevendo a importância da determinação do valor do desgaste abrasivo dos materiais de tubulações que transportam misturas sólido-líquidas de forma a estudar a vida útil do sistema, apresentou um método de medida do desgaste baseado na perda de peso do material (método da perda de peso) levando em consideração a água absorvida por este material. Cita exemplos de tubulações hidroabsorventes, como o cimento amianto e a borracha.

A equação abaixo, dada por JACOBS, calcula o desgaste de materiais hidroabsorventes:

$$Md_1 - Md_2 = \Delta M (1 - \epsilon) \quad (1.06)$$

onde: Md_1 = massa final da amostra totalmente seca no instante 1;

Md_2 = massa final da amostra totalmente seca no instante 2;

ΔM = diferença das massas totais da amostra antes e depois do teste de desgaste;

ϵ = variável que depende do tempo de secagem da amostra e da quantidade de água perdida.

De forma a avaliar efetivamente o desgaste erosivo de materiais sob condições semelhantes às aquelas encontradas em bombas centrífugas que transportam misturas sólido-líquidas, HUGGETT & WALKER (1988), decidiram que para um ensaio satisfatório, os aparelhos de medida teriam as seguintes qualidades:

- a) O aparelho deve ser compacto;
- b) Deve ser pequeno, para amostras de tamanho conveniente, geralmente representativas de espessuras de seção típica de bombas (particularmente ligas fundidas);
- c) Deve ter baixo consumo de energia e baixos custos de operação;
- d) O tempo de ensaio deve ser curto;
- e) Que possa ser ensaiado grande variedade de materiais;
- f) Seja adaptável para ensaios de erosão e corrosão.

A Tabela (1.04) apresenta um número de diferentes métodos e equipamentos de ensaios disponíveis, os quais podem ser utilizados para determinar o valor do desgaste dos materiais, e o grau de degradação das misturas.

Contudo, nem todos os métodos simulam os parâmetros que existem na maioria das bombas centrífugas como a porcentagem de sólidos, velocidades periféricas, formas de desgaste e tipo de material.

Em vista disso, HUGGETT & WALKER (1988), apresentaram o ensaio do disco (DISC WEAR TEST), Figura (1.05), para avaliar a resistência relativa ao desgaste de materiais utilizados na fabricação de bombas centrífugas. Existem, obviamente, limitações ao uso e aplicabilidade de quaisquer tipos de ensaios para avaliar o desgaste. Contudo, este ensaio parece fornecer uma melhor simulação do desgaste erosivo do que os outros ensaios apresentados na Tabela (1.04).

Este método mantém a maioria das variáveis constantes durante cada ensaio, permitindo a possibilidade de se alterar variáveis particulares independentemente de determinar seus efeitos nos valores do desgaste dos materiais. Os ensaios determinaram, separadamente, o efeito da concentração de sólidos na mistura, assim como o tamanho das partículas, pH e temperatura. Além disso, as propriedades da mistu-

Tabela 1.04. Equipamentos utilizados para a obtenção do valor do desgaste erosivo . Por HUGGETT & WALKER (1988).

Nome do Equipamento de Ensaio	Tamanho do Equipamento	Tamanho da Amostra	Ensaio		Material Ensalado
			Custo	Tempo	
MILLER TEST	pequeno	pequena	alto	16 horas	Metais, Cerâmicos, Polímeros.
RUBBER WHEEL	médio	pequena	moderado	70 horas	Metal, Cerâmico.
LOW ANGLE SLURRY POT	pequeno	pequena	moderado	12 horas	Metal, Cerâmico, Polímero.
BALL MILL	médio	pequena	moderado	----	Metal, Cerâmico.
PIN-ON-DRUM	médio	pequena	moderado	----	Metal, Cerâmico.
HUB	grande	média	pequeno	400 horas	Metal.
JET EROSION	médio	pequena	alto	----	Metal, Cerâmico, Polímero.
SLURRY POT Nº 2	pequeno	pequena	pequeno	200 horas	Metal.

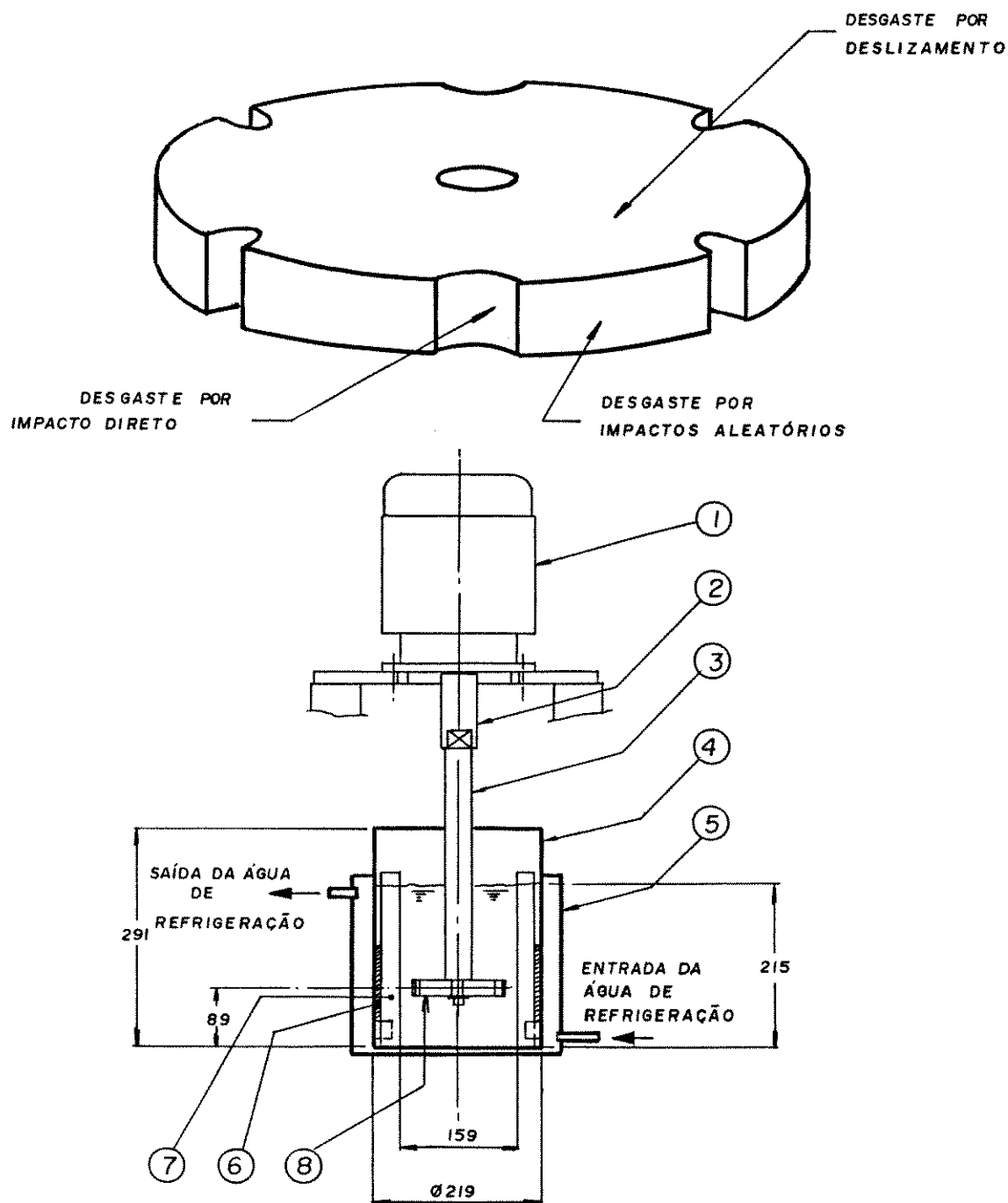


Figura 1.05. Ensaio do disco (DISC WEAR TEST)
(HUGGETT & WALKER, 1988)

ra podem ser mantidas constantes e o efeito da velocidade isolado.

O objetivo geral de um programa de testes como esse é ter dados básicos que podem ser utilizados na previsão do melhor material das bombas para qualquer aplicação.

O ensaio resume-se em apresentar a Resistência Relativa ao Desgaste (RRD), relativo ao desgaste da liga de ferro branco AS 2027/Cr27, utilizada como padrão de comparação.

O valor da RRD é dada por:

$$RRD \text{ (material)} = \frac{\text{desgaste do material (mm/ano)}}{\text{desgaste da liga Cr27 (mm/ano)}} \quad (1.07)$$

A Tabela (1.05) mostra as RRD para as ligas de Cr27, NiCr 1-550 e CrMo15 3, comparadas aos valores obtidos no campo.

A Tabela (1.06) mostra as RRD para vários materiais, em função da mistura sólido-líquida utilizada nos ensaios, que apresentou 40% de areia sílica, com pH 7.

WIEDENROTH (1988), utilizou um aparelho ultrassônico que mediu o desgaste nas faces dos componentes da bomba centrífuga, notadamente o rotor e as hélices do rotor. Para tanto foi desenvolvido um rotor experimental, desmontável, e em cada uma das faces das partes componentes do rotor da bomba, foi medido o desgaste pela diferença da espessura.

A medida do desgaste também foi realizada na tubulação que transportava a mistura sólido-líquida.

1.2. Formas de redução do desgaste

1.2.1. Introdução:

Tabela 1.05. Resistência Relativa ao Desgaste para as ligas Cr27, NiCr 1-550 e CrMo 15 3, comparadas aos valores obtidos no campo. Por HUGGETT & WALKER (1988).

Liga	R.R.D.	Valor médio da R.R.D. no campo
Cr 27	1,00	1,00
NiCr 1-550	1,53	1,30
CrMo 15 3	1,32	1,20

Tabela 1.06. Resistência Relativa ao Desgaste para vários materiais (40% areia sílica na mistura, pH = 7) Por HUGGETT & WALKER (1988).

Nome do material	R.R.D.
Ferro com 27% de Cr	1,00
Duro níquel 1	1,53
Ferro 15/3 Cr Mo	1,32
Warman A12	0,51
Alumina Sinterizada	0,91
Borracha Natural 43	0,07

é impossível eliminar totalmente os desgastes dos componentes de bombas centrífugas, devido aos efeitos abrasivos dos sólidos. Entretanto, a vida útil destes componentes em contato com materiais abrasivos, pode ser prolongada, reduzindo os custos de manutenção, caso sejam tomados os seguintes cuidados especiais ao projetar a bomba centrífuga:

1. O material de fabricação da bomba tenha dureza superior àquela do material a ser recalcado,
2. Os componentes sujeitos a desgastes sejam mais espessos;
3. Adotar formas hidrodinâmicas que minimizem os desgastes,
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 rendimento. Variações nas rugosidades internas da carcaça e mesmo distorções no formato devido a desgastes por abrasão, podem dissipar parte da energia fornecida ao escoamento pelo rotor, resultando em baixos rendimentos.

Além disso, o revestimento das tubulações e dos componentes internos de bombas centrífugas tem sido usados com sucesso, visando aumentar a vida útil do sistema.

1.2.2. Revestimento de tubulações e componentes internos de bombas:

1.2.2.1. Introdução:

O desgaste por abrasão em sistemas que transportam misturas sólido-líquidas pode tornar inviável a utilização desse sistema.

Para essas misturas abrasivas, a utilização de revestimentos resistentes podem reduzir o valor do desgaste a limites aceitáveis.

Os revestimentos utilizados em tubulações e componentes internos de bombas centrífugas têm sido feitos com polímeros especiais.

ALLINGER et alii (1978) classificam os polímeros utilizados em revestimento de acordo com suas propriedades físicas que, por sua vez, determinarão suas aplicações.

Os polímeros, de alto peso molecular, são classificados por ALLINGER et alii em tres grupos importantes: elastômeros, plásticos e fibras. As propriedades que ajudam a determinar a classificação de um dado polímero são apresentadas na Tabela (1.07).

Em particular, citaremos os tipos de polímeros usualmente utilizados em revestimentos de componentes internos de bombas e tubulações que transportam misturas sólido-líquidas.

1.2.2.2. Borrachas:

Segundo TRUSCOTT (1972), o valor do desgaste depende tanto do tipo de borracha utilizada como da forma da abrasão.

TRUSCOTT cita que os rotores revestidos com borracha sintética forneceram boa resistência ao desgaste em comparação à ligas de metais de alta resistência. O desgaste é reduzido: com a dureza da borracha para partículas sólidas inferiores a 1 mm, e com o aumento da elasticidade e resistência elástica para partículas entre 5 e 6 mm.

Ainda em sua revisão da literatura, TRUSCOTT (1972), salienta a recomendação de borrachas de dureza de 50° - 65° SHORE para revestimentos de rotores e carcaças, e 40° - 60° SHORE para rotores e eixos selantes de dragas, lembrando

Tabela 1.07. Propriedades físicas dos polímeros. Por ALLINGER et alii (1978)

Propriedades	Elastômeros	Plásticos	Fibras
Exemplos típicos	Borracha natural, poliisobutileno, policloropreno	Poliestireno, acetato de polivinila, cloreto de polivinila	Celulose, fibraína da seda, poliamidas
Capacidade de estiramento	Cerca de 1000%	Cerca de 100-200%	Cerca de 10-20%
Natureza da deformação	Completa, reversível e instantaneamente elástica	Alguma elasticidade reversível e alguma deformação permanente	Alguma elasticidade instantânea, alguma elasticidade atrasada, alguma deformação permanente
Dependência das propriedades mecânicas à temperatura	Elasticidade: aumenta com a temperatura; quebra e inextensível a baixas temperaturas	Elasticidade dependente da temperatura	Elasticidade: quase independente da temperatura entre - 50°C e + 150°C
Tendência a cristalizar	Muito baixa	Moderada	Muito grande

sempre de um possível impacto de partículas sólidas grandes no caso de uma draga.

As borrachas sintéticas mais macias e as borrachas naturais são mais resistentes ao desgaste abrasivo do que as semi-duras, mas não o são para desgastes devido à corrosão.

TRUSCOTT (1972), recomenda também revestimentos com borracha macia para misturas sólidas abrasivas, enquanto que para aplicações com misturas que contenham produtos químicos é recomendável as borrachas duras.

É importante destacar que para os revestimentos de borracha, os efeitos do tamanho e forma da partículas sólidas transportadas são mais críticos do que com metais. Muitos dos trabalhos publicados mencionam alguma limitação, e TRUSCOTT (1972) cita algumas referências que limitam o tamanho da partícula entre 2 mm (peneira 10) a 50,8 mm, 5 a 6 mm, 4 mm, ou ainda algumas referências que simplesmente citam que os sólidos não devem ser grandes ou ponteagudos. Em resumo, o limite de tamanho das partículas sólidas depende muito do tipo de desgaste abrasivo e do tipo de borracha utilizada.

COIADO (1985), utilizando rotores revestidos com borracha natural para recalcar misturas de água e areia em ensaios experimentais, notou grande resistência ao desgaste por abrasão dos sólidos.

1.2.2.3. Plásticos:

TRUSCOTT (1972), em seu levantamento da literatura sobre o desgaste abrasivo em máquinas hidráulicas, destaca alguns autores que realizaram ensaios com determinados tipos de revestimento plástico. Dentre esses encontramos "Lupolen H" (Polietileno estabilizado) que foi superior à borracha "Perbunan", ou quase igual ao aço inoxidável 18/8.

"Vinidur"(vinil) e "Polistírol EH"(Poliestireno), foram muito menos resistentes. "Polietileno" foi o melhor, seguido do "Nylon" e "Teflon". "Perpex", "Baquelite" e outras resinas sintéticas foram ruins.

Outros artigos citados por TRUSCOTT (1972), apresentam resultados interessantes em testes de abrasão e cavitação com polieter, resina epoxi e elastômero, mas dão poucos detalhes, apenas mencionando que as amostras estavam sem nenhum dano após 30 horas.

As resinas incluíram 20-40%, em peso, de material de enchimento (por ex.: pó de granito) ou reforço de fibra de vidro, e mostraram boas aplicações em rotores de bombas axiais e semi-abertos.

TRUSCOTT (1972), ainda cita pesquisa onde o polipropileno obteve a maior resistência dos plásticos, seguido do nylon reforçado de vidro, e fibra de vidro como um fraco terceiro lugar, sendo todos inferiores aos metais.

Resina epoxi, polieter clorado, PVC e polipropileno são citados como revestimento de bombas químicas.

Não é mencionada a resistência à abrasão desses materiais.

MURAKAMI et alii (1980), devido à necessidade de projetar uma instalação para recalcar uma mistura de água e areia dos depósitos de fundo de uma barragem no Japão, desenvolveram testes de laboratório para verificar o desgaste dos materiais das tubulações e também dos revestimentos utilizados.

As Figuras (1.06) e (1.07) mostram os desgastes progressivos na massa dos materiais ensaiados, e as reduções de espessura são mostrados na Figura (1.08). Nestas figuras, os valores do poliuretano e da borracha levam em consideração a quantidade de água absorvida, aumentando a massa. Contudo, no caso dos poliuretanos, o aumento na massa e espessura foi observado devido ao desgaste ser muito pequeno. Nota-se, portanto, que os revestimentos anti-abrasivos de poliuretano serão melhores do que o aço ou borracha natural.

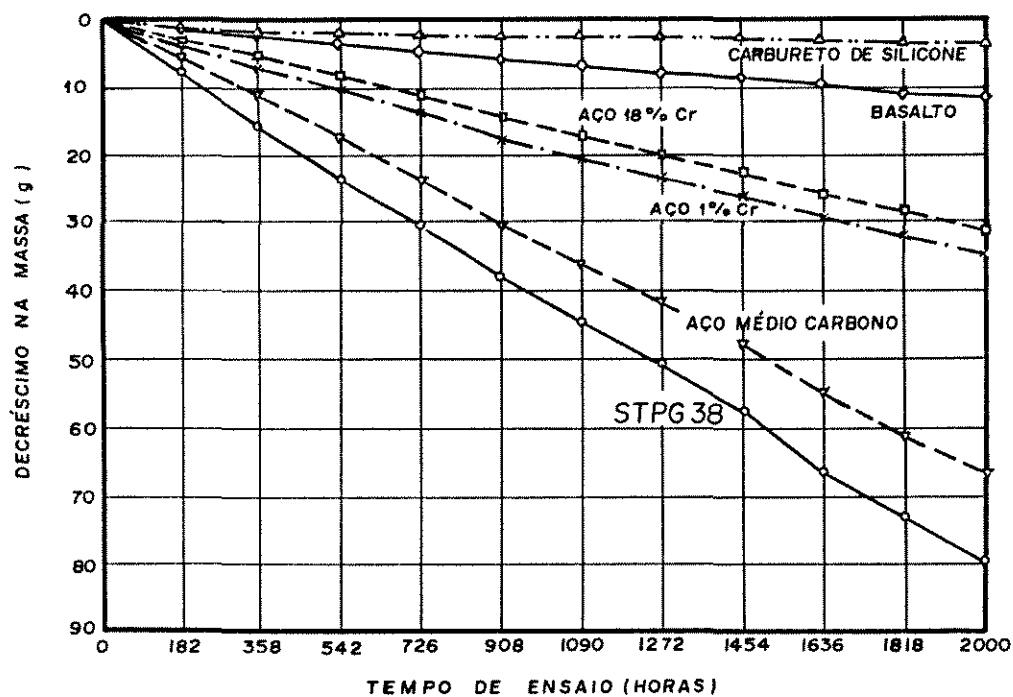


Figura 1.06. Decréscimo na massa dos materiais utilizados para as tubulações (aço, etc.)
(MURAKAMI et alii, 1980)

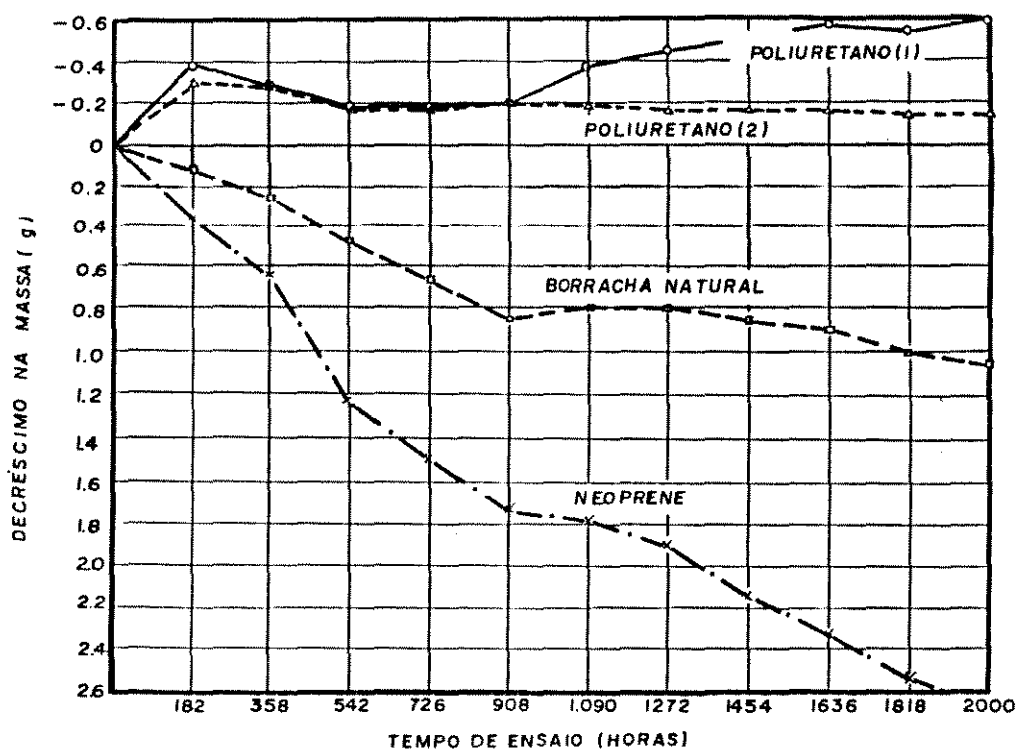


Figura 1.07. Decréscimo na massa dos revestimentos internos utilizados nas tubulações com o tempo de ensaio. (MURAKAMI et alii, 1980)

$$\text{RRA} = \frac{\text{Volume perdido de aço-doce}}{\text{Volume perdido do material da amostra}} \quad (1.08)$$

As propriedades mecânicas estudadas por STEWARD & HECKROODT (1988), para o poliuretano, foram dureza, recuperação da elasticidade, resistência elástica, módulo de elasticidade, alongamento e resistência ao corte.

O importante a ser observado é que STEWARD & HECKROODT ao escolherem poliuretano como material resistente ao desgaste, destacaram a forma da partícula como variável fundamental.

Um aumento na RRA para partículas ponteagudas, como também para partículas arredondadas, está associado com uma diminuição da dureza e um aumento no alongamento para os poliuretanos testados. A resistência elástica, a resistência ao corte e módulo de elasticidade não apresentaram qualquer influência na resistência ao desgaste desses poliuretanos, enquanto que a recuperação da elasticidade parece ter uma influência somente na RRA para partículas arredondadas.

1.2.3. Aplicação de polímeros à mistura sólido-líquida:

1.2.3.1. Introdução:

Os polímeros têm larga aplicação em misturas sólido-líquidas, sendo utilizados em sua forma líquida.

SELLIN et alii (1982), destacam a utilização desses polímeros em operações de dragagem de leitos de rios, transporte de misturas água-carvão, água-minério de ferro e lodo de esgoto, além de estudar a influência do polímero na floculação e sedimentação das partículas sólidas. Os resultados dessas aplicações mostraram a eficiência do polímero

As poliacrilâmidas também vêm sendo muito utilizadas para a redução da energia dissipada por escoamentos turbulentos. KILLEN & ALMO (1961), publicaram os resultados da adição da poliacrilâmida do tipo "separan AP-273", numa linha de recalque de resíduos doméstico digeridos, com 6.620 metros de comprimento e 250 mm de diâmetro, ligando a estação de tratamento ao leito de secagem. Verificaram uma redução no fator de atrito de 15 a 20%, para a faixa do número de Reynolds entre 6500 a 8500 e concentração do polímero de 25 ppm em peso.

HEROD & TIEDERMAN (1974), publicaram os resultados da adição da poliacrilâmida do tipo "separan AP-273", numa linha de recalque de misturas sólido-líquidas. Verificaram uma redução na perda de carga de até 79% ao adicionar o polímero.

HULL (1978), publicou os resultados da adição de uma poliacrilâmida aniônica, de peso molecular elevado, numa linha de recalque de esgoto doméstico com 1500 metros de comprimento. A adição do polímero, num ponto da tubulação de sucção da bomba principal, à concentrações de 30 e 100 ppm em peso, resultou acréscimos, na capacidade de transporte do sistema, de 16 e 29%, respectivamente.

KOLAR et alii (1988), publicaram os resultados da adição de um polímero do tipo "separan AP-302", numa linha de recalque de cinzas e escórias de metal, com 16.600 metros de comprimento e 610 mm de diâmetro, de uma usina térmica na Tchecoslováquia. Os testes de campo indicaram, ao adicionar o polímero, diminuição da velocidade crítica e aumento da quantidade de sólido transportado de até 42% para a concentração do polímero de 60 ppm em peso.

O efeito da concentração do polímero na energia dissipada por um escoamento turbulento, num conduto forçado, foi investigado experimentalmente e citado por SELLIN & HOYT (1982), verificando-se, queda sensível na energia dissipada ao aumentar a concentração do polímero. Observaram que a

partir de determinado valor da concentração, a elevação da concentração não resultam benefícios consideráveis em termos de redução da energia dissipada.

Alguns pesquisadores, como METZNER (1977), Mc-COMB & CHAN (1984), utilizaram tipos especiais de fibras sintéticas para reduzir a energia dissipada por escoamentos turbulentos. As fibras, associadas a polímeros, podem reduzir a energia dissipada em até 85%, dependendo da concentração do polímero empregado.

Os trabalhos citados mostram a preocupação existente nos países desenvolvidos em maximizar o aproveitamento da energia dispendida nos sistemas de bombeamento através da adição de polímeros especiais.

A utilização de polímeros, pode também prolongar os anos de operação de instalações de recalque existentes, dimensionadas para descargas médias ultrapassadas pelo crescimento populacional. Nesses casos, o emprego do polímero economizará investimentos com ampliações dos sistemas.

Nos países desenvolvidos, devido à demanda grande de polímero redutor de energia dissipada, as indústrias químicas desenvolveram e fabricam, em escala comercial, os tipos mais diversos de polímeros, a custos baixos, viabilizando ainda mais o seu emprego.

No Brasil esses tipos de polímeros ainda não são fabricados comercialmente, para o uso específico em instalações de recalque, por falta de pesquisas e divulgação ou por desinteresses dos consumidores e das indústrias.

COIADO (1989), apresentou um estudo da aplicação de polímeros em instalações de recalque de misturas de água e areia e suas influências sobre os parâmetros do escoamento turbulento ao longo de um conduto forçado e no interior de uma bomba centrífuga, tais como:

- distribuição vertical de velocidade;
- concentração e tamanho do grão sólido;

- perda de carga unitária;
- fator de atrito;
- curvas características de uma bomba centrífuga;
- estudo comparativo entre o custo do polímero e o valor da energia economizada.

As reduções médias máximas de energia, obtidas nos escoamentos de misturas de concentrações médias de areia igual a 7,3% V.M. e 15,3% V.M., em um trecho de canalização de 2 polegadas, foram 59% e 52%, respectivamente.

Todos os trabalhos acima referidos sobre a redução da energia consumida não mencionam os efeitos dos polímeros nos desgastes por abrasão, embora sabe-se que, a curto ou longo prazo, desgastes ocorrerão.

1.2.3.3.Degradação do polímero:

A perda da eficiência do polímero, em relação ao seu efeito redutor de perda de carga, foi denominado por SELLIN & HOYT (1982), de degradação. A causa mais provável é o excesso de cisalhamento mecânico provocado pelo bombeamento da solução.

SELLIN & HOYT verificaram que a eficiência maior do polímero ocorre nas primeiras 24 horas, após preparada a solução.

COIADO (1989), não verificou degradação do polímero ao utilizar a solução durante período curto, mas verificou degradação após utilizada a solução e mantida em repouso durante 24 horas. COIADO também verificou quedas na capacidade redutora do polímero devido a elevação da temperatura da solução em escoamento.

2. BANCADA DE ENSAIO; MEDIÇÕES; MÉTODOS DE CÁLCULOS; PREPARO: DAS SOLUÇÕES DE ÁGUA-POLÍMERO; DAS MISTURAS DE ÁGUA-AREIA E DAS MISTURAS DE ÁGUA-POLÍMERO-AREIA.

2.1. Bancada de ensaio:

Nesta pesquisa foi utilizada a mesma bancada de ensaio, Figura (2.01), usada por COIADO (1989), e posteriormente modificada quando da alteração da concentração de areia na mistura, Figura (2.02).

Para as investigações sobre a influência da adição do polímero no desgaste por abrasão do rotor da bomba, instrumentou-se melhor a bomba principal.

2.1.1. Bomba principal

É centrífuga, entrada e saída com três e duas e meia polegadas, respectivamente, rotor semi-fechado com 140 mm de diâmetro em ferro fundido. Está instalada a 3,00 metros abaixo do nível de operação do reservatório principal, acoplada a um motor elétrico trifásico de 10 CV.

2.1.2. Canalização de sucção

De PVC rígido com três polegadas de diâmetro, une o reservatório principal à bomba principal.

2.1.3. Canalização de recalque

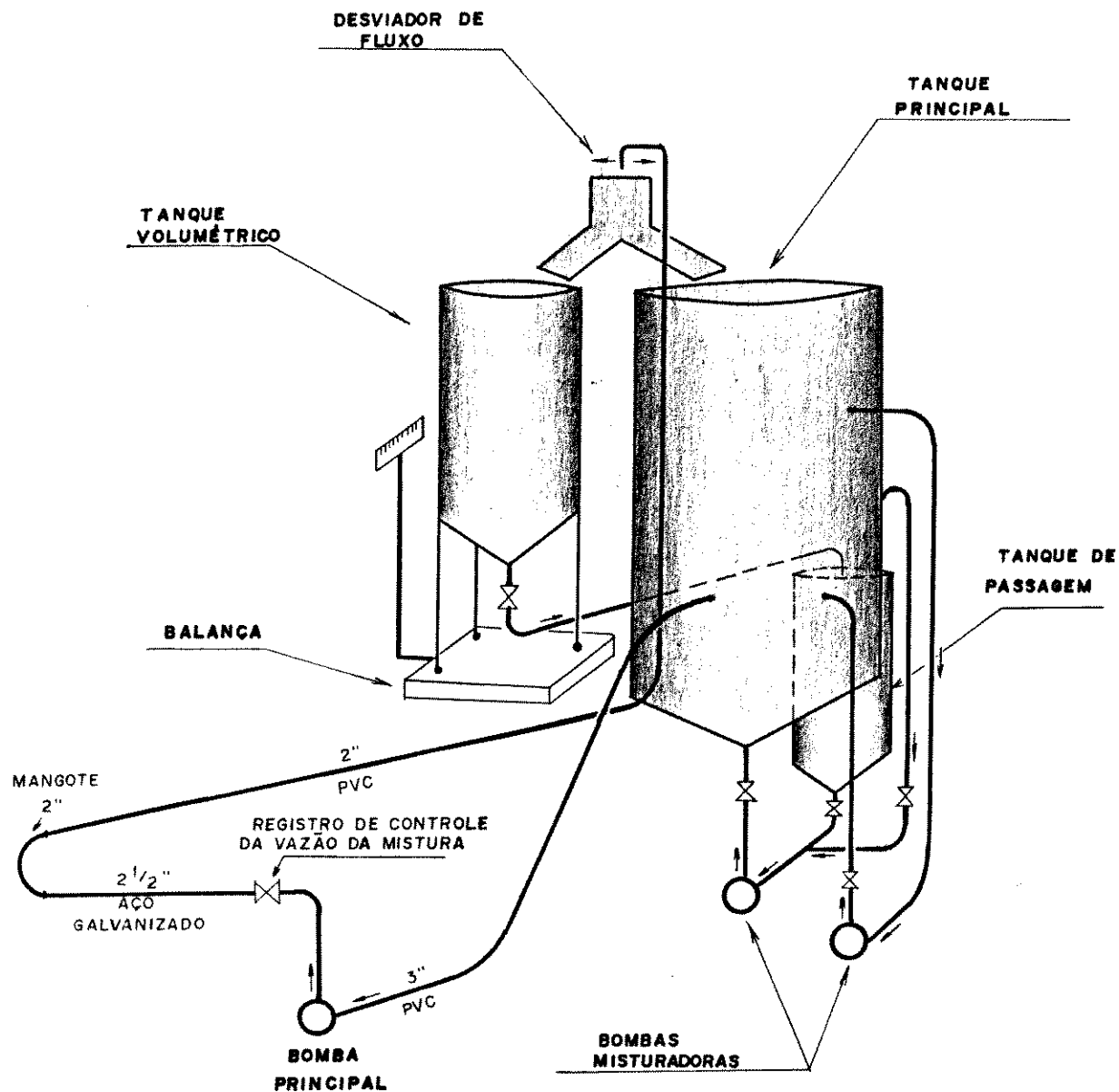


Figura 2.01. Bancada de ensaio da 1ª Fase

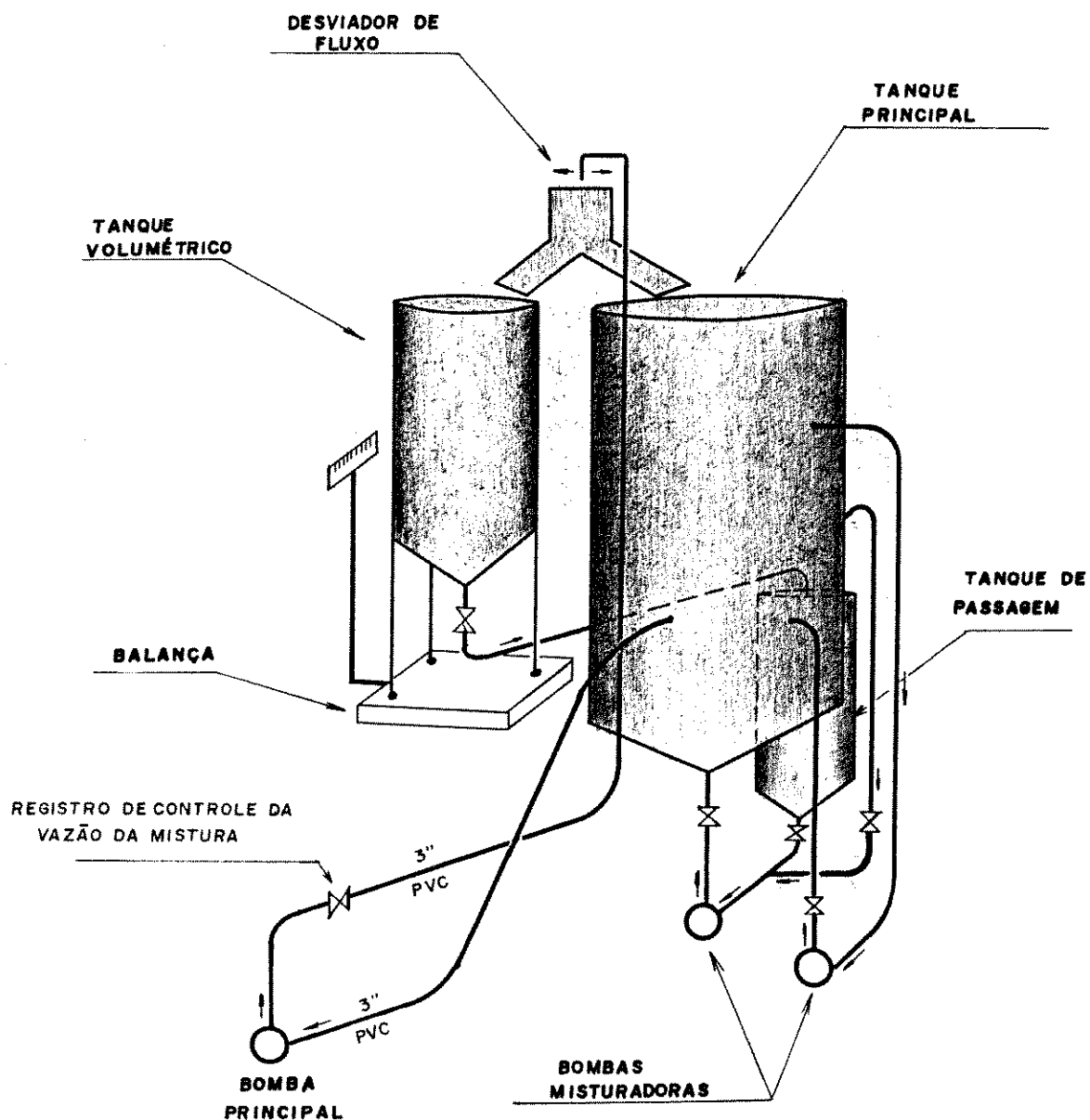


Figura 2.02. Bancada de ensaio da 2ª Fase

A canalização de recalque é inicialmente constituída por um trecho horizontal de aço galvanizado com 2 1/2 " (0,0687 m) de diâmetro e 6 metros de comprimento, seguido pela canalização restante, de PVC, com 2 " (0,0502 m) de diâmetro.

Parte do trecho de duas polegadas é horizontal com seis metros de comprimento. Este trecho é seguido por um outro vertical contendo o desviador rotacional de fluxo, que permite o desvio do fluxo para o tanque volumétrico ou para o reservatório principal, Figura (2.01).

Posteriormente a canalização de recalque foi modificada unindo-se a saída da bomba direto ao trecho vertical contendo o desviador de fluxo, agora em PVC com 3 " (0,075 m) de diâmetro, Figura (2.02).

2.2. Medições

2.2.1. Medidas da vazão e da concentração média do sólido na mistura

A vazão foi medida pelo método volumétrico. No momento em que o fluxo, da mistura água-areia ou água-polímero-areia, era desviado do reservatório principal para o tanque volumétrico através do desviador rotacional de fluxo, acionava-se o cronômetro. Momentos antes da água transbordar do tanque volumétrico, desviava-se o fluxo de volta ao reservatório principal, desligando instantaneamente o cronômetro, ficando registrado o tempo (t).

Em toda operação, liam-se, o peso do tanque volumétrico, cheio e vazio, a temperatura e o volume da mistura armazenada.

A vazão foi controlada através de um registro de gaveta colocado na canalização de recalque próximo à saída da bomba.

2.2.2. Medida do peso do rotor

O peso do rotor foi determinado através de uma balança marca Record, com precisão de até 0,1 gramas.

O rotor, antes da pesagem, foi colocado em estufa entre 105 e 110 °C, durante duas horas, para secagem.

2.2.3 Outras medidas

2.2.3.1 Corrente Elétrica

Era medida, sempre que medida a vazão, através de tres amperímetros, instalados na rede elétrica que alimenta o motor da bomba principal, com escalas que permitem uma precisão de até 0,5 A.

2.2.3.2 Tensão Elétrica

Era medida, sempre que medida a vazão, através de dois voltímetros instalados na rede elétrica que alimenta o motor da bomba principal, com precisão de 5,0 V.

2.2.3.3 Outros aparelhos, equipamentos e materiais não acoplados à bancada de ensaio, porém utilizados na obtenção de dados

- Termômetro: com uma escala que permite leituras com precisão de até 0,5°C;
- Cronômetro: com uma escala que permite leituras com precisão de até 0,01 s;
- Conjunto de peneiras, Tabela (2.01):

Tabela 2.01. Conjunto de peneiras

Número da peneira	Abertura (mm)
Tampa	—
4	4,760
10	2,000
20	0,840
40	0,420
60	0,250
100	0,149
200	0,074
Prato	—

2.3. Metodologia de cálculos

2.3.1. Cálculo da vazão

A vazão da mistura água-areia ou água-polímero-areia foi calculada através da seguinte relação:

$$Q_m = \frac{x}{t} \quad (2.01)$$

onde:

x = volume armazenado no tanque volumétrico, durante a operação descrita no item (2.2.1.), em litros;

$$x = (1896,5.X + 24054,48)/1000 \quad (2.02)$$

X = leitura em centímetros na escala do piezômetro instalado no tanque volumétrico;

t = tempo de ensaio, em segundos, da operação descrita no item (2.2.1).

2.3.2. Cálculo da concentração média do sólido na mistura

A concentração média do sólido, expressa em volume da mistura, foi calculado através da seguinte equação:

$$C_v = \frac{dr_m - 1}{dr_s - 1} \quad (2.03)$$

onde:

$$dr_m = \frac{Y_m}{Y_o} \quad (2.04)$$

$$dr_s = \frac{Y_s}{Y_o} \quad (2.05)$$

dr_m = densidade relativa da mistura;

dr_s = densidade relativa do sólido;

Y_s = peso específico do sólido;

Y_m = peso específico da mistura = P/x ;

P = peso da mistura armazenada no tanque volumétrico, durante a operação descrita no item (2.2.1);

Y_o = peso específico da água;

C_v = concentração média em volume do sólido na mistura.

2.4. Preparo das soluções de água e polímero

Num recipiente contendo 10 litros de água, mantidos agitados manualmente através de um bastão de madeira, adicionava-se lentamente 150 ml de polímero obtendo-se uma

solução homogênea e altamente viscosa. A seguir a solução era adicionada lentamente no reservatório principal contendo água e areia em movimento turbulento provocado pelas bombas misturadoras. Adicionava-se tantos recipientes, contendo a solução homogênea, quantos necessários para se obter no reservatório principal a concentração desejada do polímero.

2.4.1.A água utilizada

A água utilizada na preparação das soluções foi retirada diretamente da rede pública de abastecimento sem nenhum tratamento especial.

2.4.2.0 polímero utilizado

O polímero utilizado, de fabricação nacional, tipo NALCO 7745-A, é um polímero floculante líquido, aniônico, de elevado peso molecular. Aspecto: branco opaco. Densidade: a 20°C, aproximadamente 1,1 . Viscosidade: a 20 °C, $5 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$.

Este polímero, usado com sucesso por COIADO (1989) na redução da perda de carga, foi escolhido para este trabalho.

Foram realizadas análises de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio) de soluções água-polímero em concentrações de 200, 400 e 600 ppm (ml/1000l) para se verificar um eventual efeito poluidor destas soluções quando lançadas à rede pública de esgotos.

Os valores de DBO e DQO para as várias concentrações de polímero, utilizadas posteriormente nesta pesquisa, estão resumidos na Tabela (2.02).

Tabela 2.02. Valores de DBO e DQO das várias concentrações de polímero utilizadas

Concentração de Polímero (ml/1000l)	DBO (mgO ₂ /l)	DQO (mgO ₂ /l)	$\frac{DBO}{DQO}$ (%)
200	39	357	10,9
400	95	657	14,5
600	113	907	12,5

Comentários:

* Através dos valores da relação DBO/DQO, em porcentagem, verificamos a pequena biodegradabilidade do polímero utilizado: entre 10,9 e 14,5% quando comparado ao esgoto doméstico: aproximadamente 40% , segundo METCALF & EDDY (1979).

* Os valores de DQO para as diversas concentrações de polímero são semelhantes aos valores encontrados de DQO para esgotos domésticos: 250 a 1000 mgO₂/l, segundo METCALF & EDDY (1979).

* Houve a necessidade de utilização de semente para a realização da análise de DBO, de acordo com a normatização técnica da CETESB (1978).

2.5.Preparo das misturas sólido-líquidas (água-areia)

2.5.1.0 sólido utilizado no preparo das misturas

Trata-se de uma areia que foi tratada, ficando completamente isenta de matérias orgânicas ou outros elementos estranhos. Passou pelo processo de secagem em estufa a 100°C, durante 24 horas, de modo a ficar com umidade praticamente zero.

2.5.1.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica da areia foi feita pelo método do peneiramento.

Para solos finos, isto é, com dimensões inferiores a 0,074 mm, não se pode usar o método do peneiramento. Utiliza-se então o método da sedimentação contínua em meio líquido.

A Figura (2.03) apresenta a curva granulométrica da areia utilizada, levantada pelo método do peneiramento, já que somente 0,9%, em peso, dos grãos são de diâmetros inferiores a 0,074 mm.

2.5.1.2. Peso específico real da areia

O peso específico real da areia utilizada foi determinado pelo processo do picnômetro, obtendo o seguinte valor:

$$\gamma_s = 2.710 \text{ Kgf/m}^3$$

2.5.2. Preparo da mistura água e areia

Para cada ensaio, preparou-se no reservatório principal uma mistura de concentração conhecida, obtida pela adição de um determinado peso de areia seca a um volume conhecido de água limpa.

CURVA GRANULOMÉTRICA

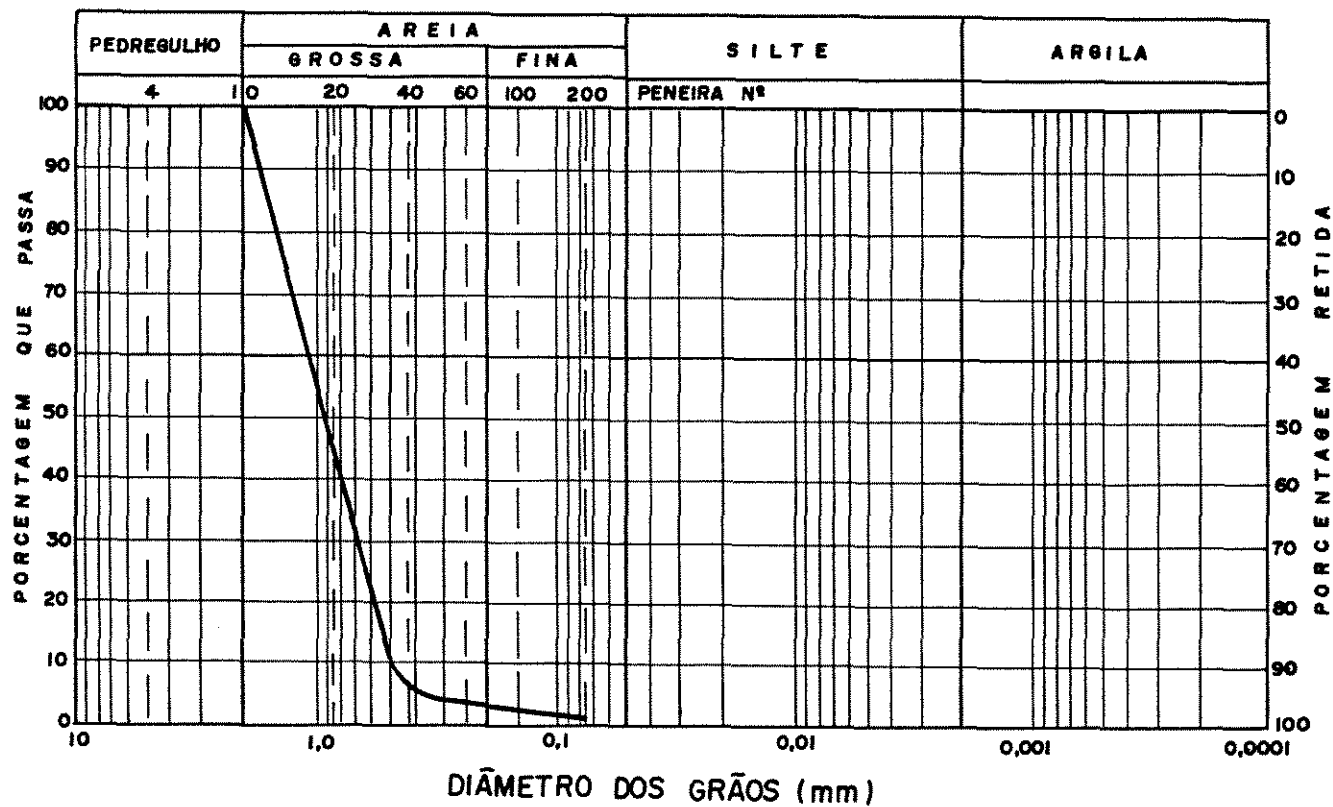


Figura 2.03. Curva granulométrica da areia utilizada

As medidas somente eram feitas após assegurada a estabilidade dos processos de bombeamentos desenvolvidos pela bomba principal e pelas bombas misturadoras.

2.6.Preparo da mistura constituída de água-polímero-areia

Após preparada a mistura de água e areia, conforme o procedimento apresentado no ítem (2.5.2), adicionava-se o polímero seguindo o mesmo método descrito no ítem (2.4).

3. PROCESSAMENTO E ANALISE DOS RESULTADOS

3.1.Processamento dos resultados

Para o processamento dos resultados, o trabalho foi dividido em duas fases.

3.1.1.Primeira Fase

Na primeira fase foram utilizados para os ensaios, quatro rotores semi-fechados de ferro fundido, com as dimensões e características indicadas na Figura (3.01).

Os rotores da primeira fase, numerados de 1 a 4, estão, cada um associados a uma concentração específica de polímero e todos estão sujeitos a uma mesma concentração de areia, que nesta fase variou, na média, em 7,0 % V.M..

De acordo com COIADO (1989), as reduções da perda de carga, com a adição de polímero à mistura, aumentam com a elevação da concentração do polímero, mas são limitadas pela própria concentração do polímero. As variações máximas da redução da perda de carga ocorreram para concentrações inferiores a 400 ppm.

Portanto, baseado nas conclusões de COIADO, foram adotadas concentrações de 200, 400 e 600 ppm, em volume, para efeito do estudo da redução do desgaste abrasivo dos rotores.

A Tabela (3.01) define a primeira fase:

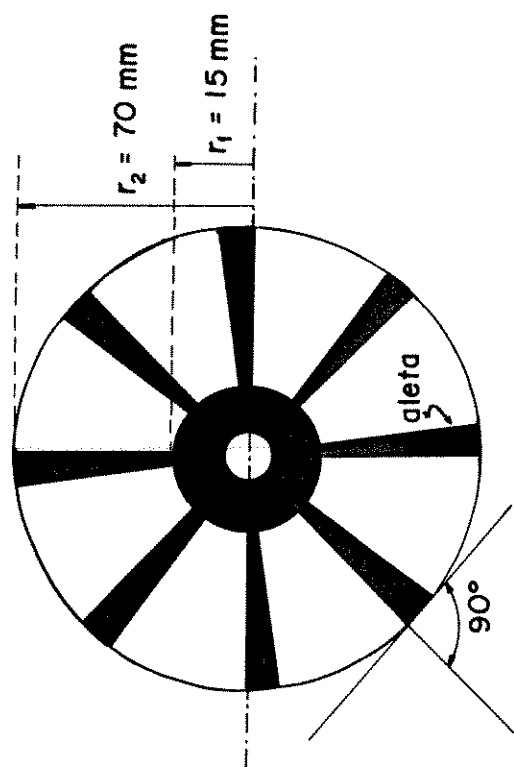


Figura 3.01. Dimensões e características dos rotores utilizados

Tabela 3.01. Definição da primeira fase de ensaios

Rotor	Concentração de polímero (Cp), (ppm)
1	0 (sem polímero)
2	200
3	400
4	600

O período de ensaio foi fixado em 12 horas para cada rotor o qual posteriormente, foi verificado suficiente para a análise dos resultados, devido à grande abrasividade da areia estudada, o que proporcionou desgastes sensíveis e conclusivos para o período adotado.

Para efeito da análise da evolução do desgaste durante essas 12 horas, o tempo total foi dividido em 4 períodos de 3 horas, onde no final de cada período, mediu-se o peso do rotor, de acordo com o item (2.2.2).

Quando da realização do ensaio com polímero, esses intervalos de 3 horas, foram subdivididos em 3 períodos de uma hora, porém não retirando o rotor da bomba para a pesagem, fazendo-o somente após cada período de 3 horas. Isso deve-se ao fato de que a mistura sofreu durante o recalque, aumento de temperatura de até 4°C em uma hora, o que para o polímero, segundo COIADO (1989), ocasiona diminuição de sua capacidade redutora, devido à degradação.

Assim, após uma hora de ensaio com a mistura água-polímero-areia, o ensaio era paralisado para a troca da solução água-polímero.

3.1.2.Segunda Fase

A segunda fase em princípio, idêntica à primeira, apenas variando a concentração da areia de 7,0% V.M. em média, para 13,0% V.M. em média, foi simplificada devido às conclusões obtidas da primeira fase.

Deste modo, a Tabela (3.02) define a segunda fase:

Tabela 3.02. Definição da segunda fase de ensaios

Rotor	Concentração de polímero (Cp), (ppm)
5	0 (sem polímero)
6	0 (sem polímero)
7	600

Também o período de ensaio foi diminuído para 6 horas, com dois períodos de 3 horas, observados os procedimentos da primeira fase, em particular quando da adição do polímero à mistura.

Os rotores da 2ª fase são idênticos aos da Figura (3.01).

3.1.3.Fixação da corrente elétrica do motor do conjunto motor-bomba

Segundo COLADO (1989), para misturas de água-polímero-areia, verificou-se que o rendimento máximo do con-

junto motor-bomba corresponde, aproximadamente, à vazão de 10 l/s. No entanto, este valor de vazão está ligado à um valor da corrente elétrica do motor acima da corrente nominal de 26,2 A, o que compromete o funcionamento do motor por um longo tempo.

Assim, optamos por fixar a corrente elétrica do motor em seu valor nominal de 26,2 A, e assim medir a vazão de escoamento.

3.1.4. Monitoramento das medidas de vazão e concentração de sólidos da mistura

A obtenção da vazão da mistura e concentração de sólidos, de acordo com os itens (2.3.1) e (2.3.2), foram feitas a cada 15 minutos para o recalque de misturas de água e areia (Ensaio de 1 a 4 e 17 a 19) e a cada 10 minutos para o recalque de misturas água-polímero-areia (Ensaio de 5 a 16 e 20 a 21), tempos esses adotados para um melhor monitoramento dos parâmetros acima referidos.

É importante lembrar que variações na concentração dos sólidos provocam variações no desgaste. Portanto foi necessário um monitoramento intensivo durante o período de ensaio, para que essas concentrações se mantivessem constantes, evitando resultados irreais dos valores do desgaste.

3.1.5. Apresentação dos resultados dos ensaios da primeira e segunda fases

O apêndice 1 apresenta os ensaios de 1 a 16 com os resultados da primeira fase (concentração de areia $\sim 7,0\%$ V.M.), e o apêndice 2 apresenta os ensaios de 17 a 21 com os resultados da segunda fase (concentração de areia $\sim 13,0\%$ V.M.).

3.1.6.Determinação das perdas de peso dos rotores devido ao desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo dos rotores foi obtido pelo método da perda de peso.

Antes e após os ensaios, os rotores foram pesados, sempre depois de secos em estufa por duas horas à temperatura que variou entre 105 e 110°C. Como se tratava de rotores de ferro fundido, não foi considerado o efeito da absorção de água, por se tratar de um material que é muito pouco hidroabsorvente.

Logo, o período em que o rotor permaneceu na estufa foi suficiente para a evaporação da água superficial.

Assim, determinado o peso do rotor após cada intervalo de 3 horas, estabeleceram-se as porcentagens do desgaste parcial e acumulado para cada concentração de polímero.

A Tabela (3.03) resume os pesos dos rotores, bem como as porcentagens do desgaste parcial e acumulado em relação ao peso inicial do rotor, para as fases 1 e 2.

3.2.Análise dos resultados da 1ª fase - (Cv ~ 7,0% V.M.)

3.2.1.Desgaste acumulado do rotor - 1ª fase

A partir da Tabela (3.03) com os valores dos pesos dos rotores após cada intervalo de 3 horas, foi analisado, graficamente, o desgaste acumulado do rotor. As Figuras (3.02) a (3.05), apresentam esses gráficos para cada rotor da primeira fase.

3.2.1.1.Rotor 1 : Cp = 0 (sem polímero)

Tabela 3.03. Peso dos rotores e porcentagens parciais e acumuladas do desgaste abrasivo (1ª e 2ª fases)

FASE	Rotor nº	Cp (ppm)	Peso inicial do rotor (g)	Wp (%)	Wa (%)	Peso do rotor após 3 horas (g)	Wp (%)	Wa (%)	Peso do rotor após 6 horas (g)	Wp (%)	Wa (%)	Peso do rotor após 9 horas (g)	Wp (%)	Wa (%)	Peso do rotor após 12 horas (g)	Wp (%)	Wa (%)
1	1	0	1504,7	----	----	1379,5	8,3	8,3	1309,5	4,7	13,0	1263,0	3,1	16,1	1196,0	4,4	20,5
	2	200	1468,8	----	----	1375,4	6,4	6,4	1298,5	5,2	11,6	1257,0	2,8	14,4	1212,0	3,1	17,5
	3	400	1417,5	----	----	1338,5	5,6	5,6	1276,0	4,4	10,0	1234,0	3,0	13,0	1187,3	3,2	16,2
	4	600	1463,0	----	----	1391,0	4,9	4,9	1339,5	3,5	8,4	1303,0	2,5	10,9	1279,5	1,6	12,5
2	5	0	1534,5	----	----	1434,5	6,5	6,5	-----	---	---	-----	---	---	-----	---	---
	6	0	1531,5	----	----	1431,0	6,6	6,6	1353,0	5,1	11,7	-----	---	---	-----	---	---
	7	600	1585,5	----	----	1527,0	3,7	3,7	1476,5	3,2	6,9	-----	---	---	-----	---	---

Para o rotor 1, $C_p = 0$, verificou-se um desgaste acumulado elevado no início, diminuindo o seu crescimento com o tempo. (Figura 3.02)

O desgaste maior foi de 8,3% , nas tres primeiras horas, e o desgaste acumulado em 12 horas, de 20,5% .

Foi verificado que no período de 0 a 3 horas, o desgaste parcial correspondeu à 40,5% do desgaste total em 12 horas.

3.2.1.2.Rotor 2 : $C_p = 200$ ppm

Para o rotor 2, $C_p = 200$ ppm, também o desgaste acumulado é maior no início, reduzindo o seu crescimento com o tempo de ensaio (Figura 3.03).

Em relação à mistura sem polímero com o rotor 1, podemos notar uma redução do desgaste de 8,3% da mistura sem polímero, para 6,4% da mistura com polímero, nas 3 primeiras horas.

Isso significa uma redução do desgaste, em relação a $C_p = 0$, de 23,6%, no período de 0 a 3 horas.

O desgaste de 6,4% para o rotor 2, representou 36,4% do total do desgaste em 12 horas.

3.2.1.3.Rotor 3 : $C_p = 400$ ppm

Para o rotor 3, $C_p = 400$ ppm, o desgaste acumulado também é maior nas 3 primeiras horas, diminuindo seu crescimento com o tempo de ensaio (Figura 3.04).

A redução do desgaste do rotor 3, em relação ao rotor 1 sem polímero, foi de 8,3% para 5,6% , representando uma redução de 33,1%, superior àquela encontrada com o rotor 2 ($C_p = 200$ ppm, período de 0 a 3 horas).

Esse desgaste de 5,6% do rotor 3, representa 34,3% do total do desgaste em 12 horas.

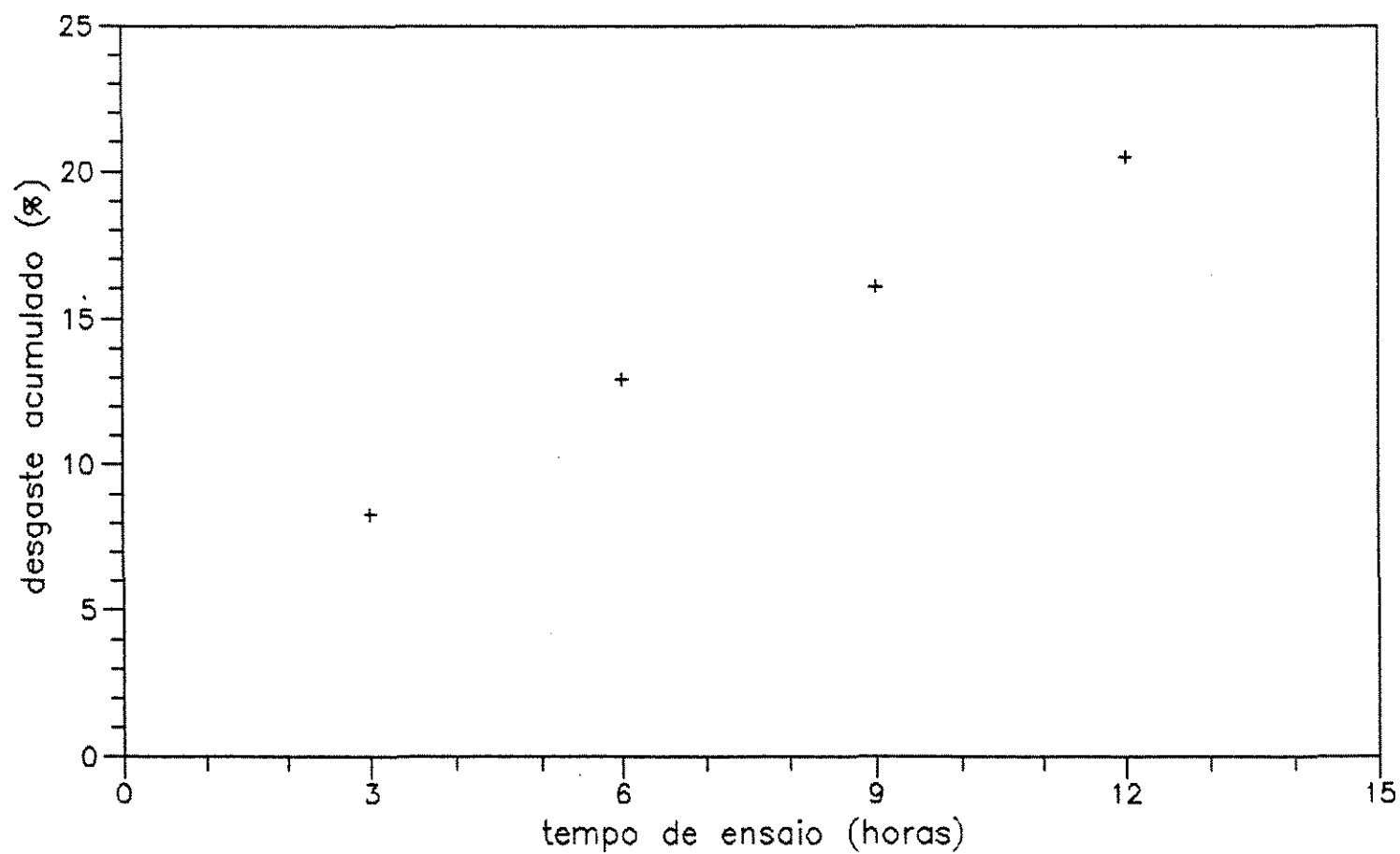


Figura 3.02. Desgaste acumulado do rotor 1, com o tempo de ensaio.
($C_p = 0$ ppm)

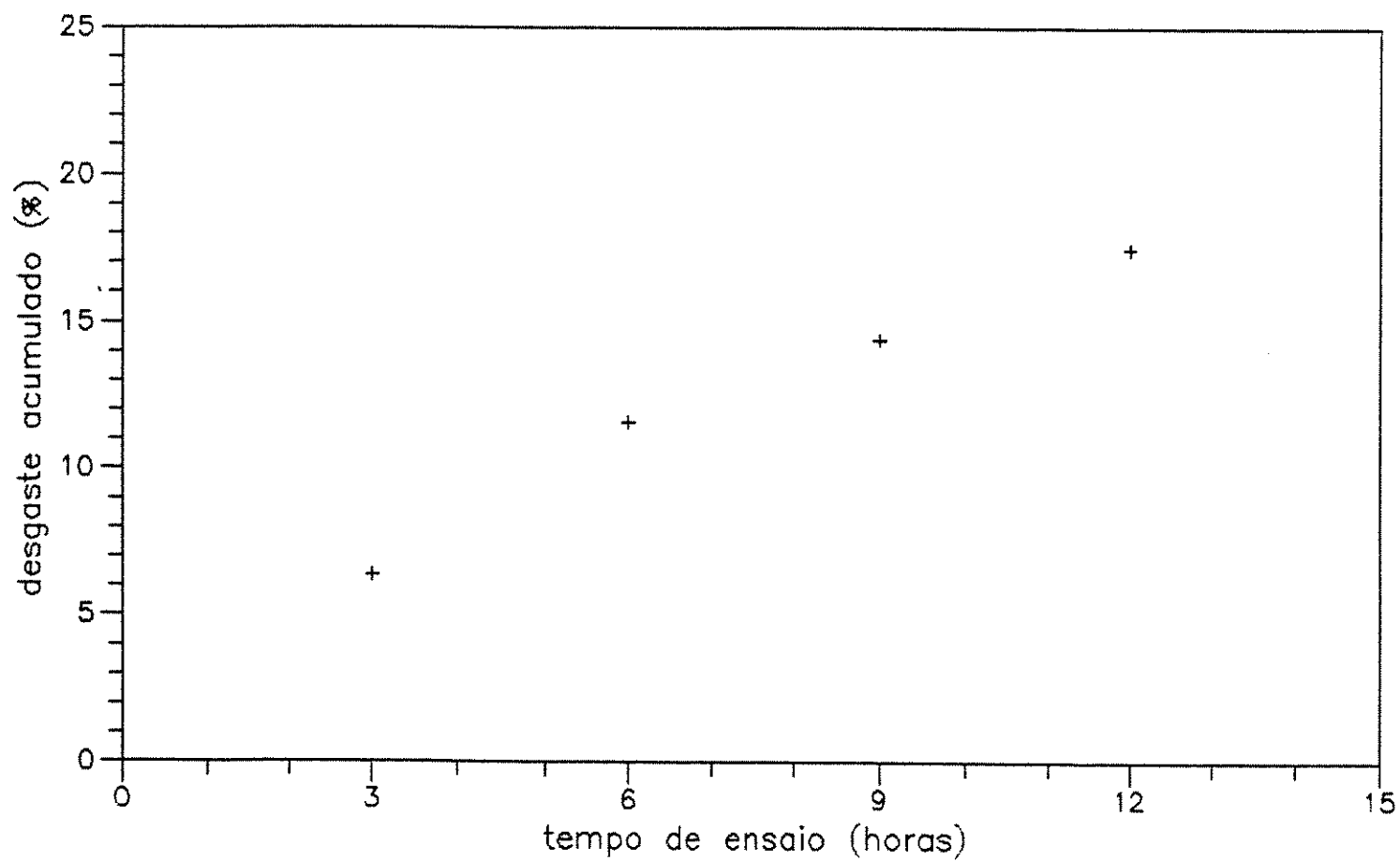


Figura 3.03. Desgaste acumulado do rotor 2, com o tempo de ensaio.
($C_p = 200$ ppm)

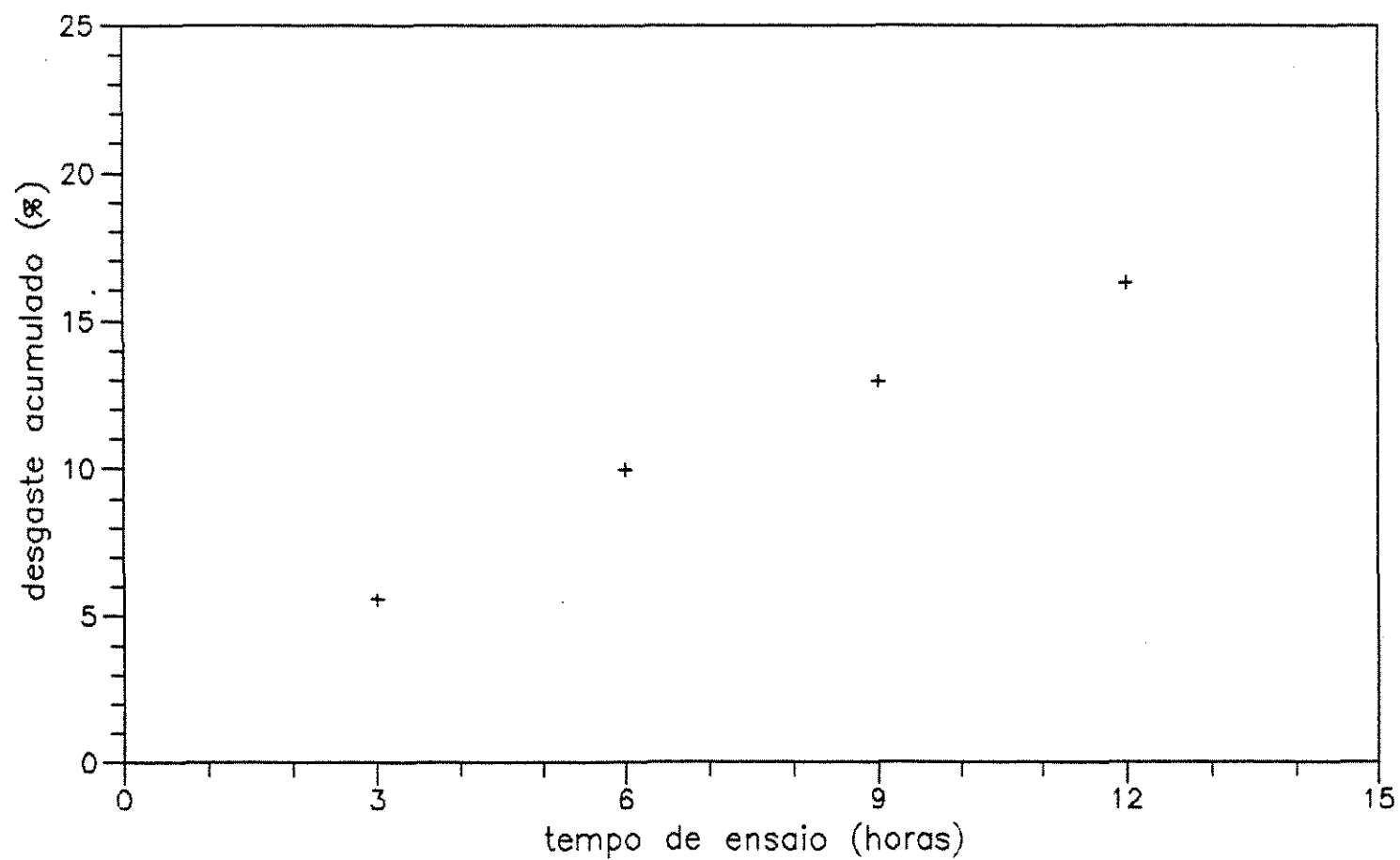


Figura 3.04. Desgaste acumulado do rotor 3, com o tempo de ensaio.
($C_p = 400$ ppm)

3.2.1.4. Rotor 4 : $C_p = 600$ ppm

O desgaste acumulado do rotor 4, $C_p = 600$ ppm, a exemplo das concentrações anteriores, é maior no início, diminuindo o seu crescimento com o tempo (Figura 3.05).

A redução do desgaste do rotor 4 em relação ao rotor 1, foi de 8,3% para 4,9%, representando uma redução de 40,9% , para o período de 0 a 3 horas.

Esse desgaste de 4,9% do rotor 4, representa 39,2% do total do desgaste em 12 horas.

3.2.1.5. Conclusões

Na Figura (3.06) foram plotados os pontos que constam nas Figuras (3.02) a (3.05), onde se verifica a diminuição do crescimento do desgaste acumulado e o aumento da redução do desgaste com o aumento da concentração do polímero.

Observa-se também que a diminuição do crescimento do desgaste acumulado com o tempo, mantém as mesmas características sem ou com a adição do polímero a diversas concentrações.

A Tabela (3.04) resume as porcentagens de redução do desgaste acumulado, relativo ao rotor 1 sem polímero.

Analisando a Tabela (3.04), verificamos que:

- * A porcentagem de redução do desgaste acumulado é maior após o período de 0 a 3 horas, diminuindo entre 3 e 9 horas e voltando a aumentar entre 9 e 12 horas.

- * As variações máximas das reduções do desgaste ocorreram para concentrações do polímero inferiores a 400 ppm no período de 0 a 6 horas, e para concentrações entre 400 e 600 ppm no período de 6 a 12 horas.

- * A mistura água-polímero-areia, em concentrações de polímero à 600 ppm, provocou as maiores reduções do desgaste acumulado.

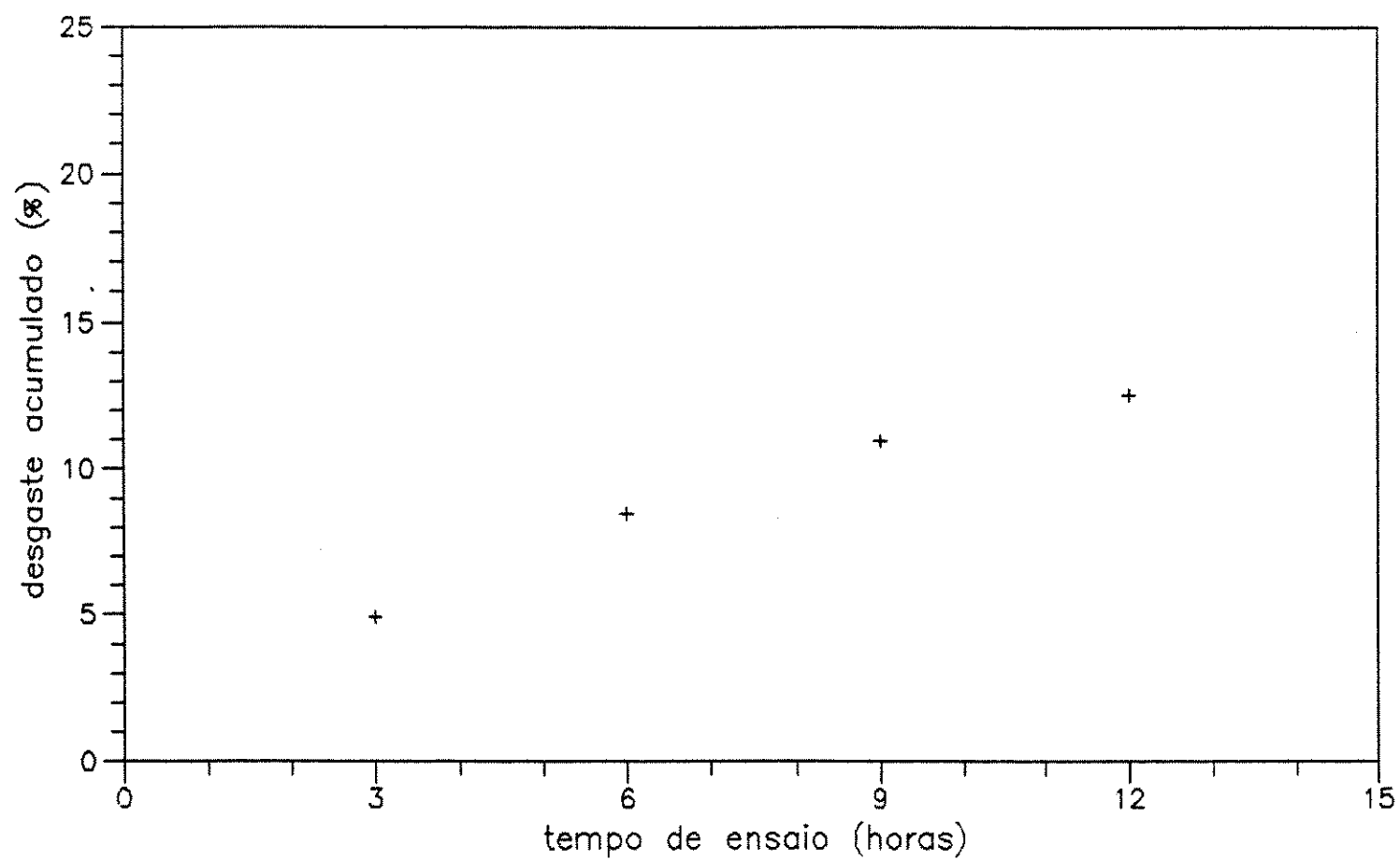


Figura 3.05. Desgaste acumulado do rotor 4, com o tempo de ensaio.
($C_p = 600$ ppm)

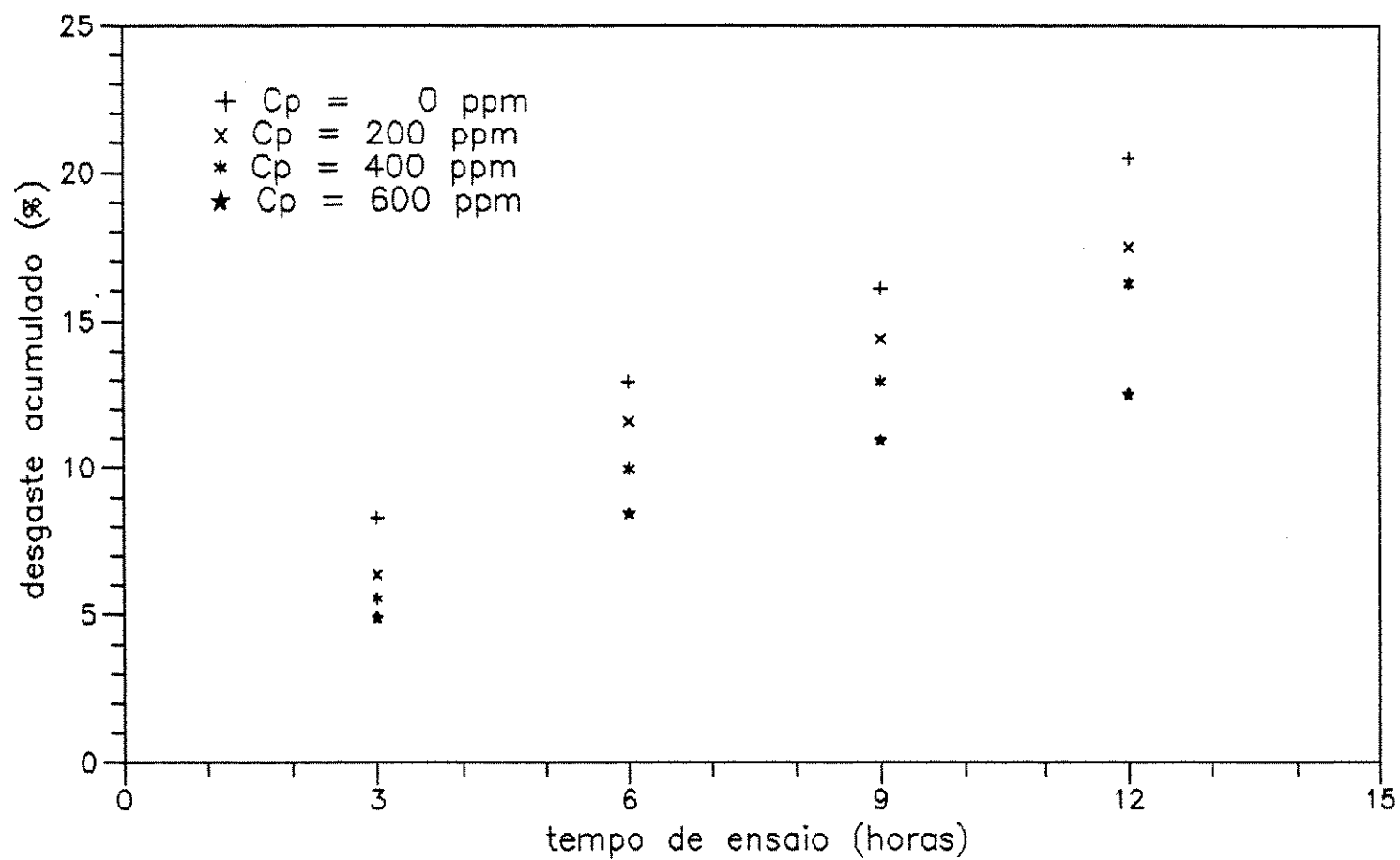


Figura 3.06. Desgaste acumulado dos rotores da primeira fase, com o tempo de ensaio.

Tabela 3.04. Porcentagem de redução do desgaste acumulado nos rotores 2, 3 e 4 da primeira fase (que recalçaram misturas de água-polímero-areia) em relação ao rotor 1, sem polímero ($C_p = 0$).

Período de ensaio (horas)	ROTOR : CONCENTRAÇÃO DE POLÍMERO				
	Rotor 2: $C_p = 200$ ppm		Rotor 3: $C_p = 400$ ppm		Rotor 4: $C_p = 600$ ppm
0 a 3	23,6	9,5	33,1	7,8	40,9
3 a 6	10,6	12,5	23,1	11,8	34,9
6 a 9	10,2	9,2	19,4	12,5	31,9
9 a 12	14,8	6,1	20,9	18,0	38,9

9,5 = variação da redução do desgaste em relação à concentração de polímero na mistura.

3.2.2.Desgastes parciais do rotor - 1ª fase

O desgaste do rotor, em porcentagem, para intervalos de 3 horas, foi analisado à partir dos dados da Tabela (3.01).

As Figuras (3.07) a (3.10), apresentam os gráficos do desgaste parcial versus o tempo de ensaio.

3.2.2.1.Rotor 1 : $C_p = 0$ (sem polímero)

Na mistura água-areia, sem polímero, o desgaste abrasivo foi maior nas 3 primeiras horas, diminuindo até 9 horas de ensaio, e voltando a aumentar, até 12 horas (Figura 3.07).

No período de 0 a 3 horas, ocorreu o desgaste das "arestas vivas" das aletas do rotor, até este estabelecer um "formato hidrodinâmico", como pode ser visto comparando-se as Fotos (3.01) e (3.02), que, entre 3 e 9 horas, foi responsável pelo decréscimo do desgaste, pois diminuiu as resistências internas e transferiu mais energia ao escoamento, comprovando as observações de COIADO (1985), que também verificou acréscimos na altura manométrica e rendimento do conjunto motor-bomba (menor ângulo de saída da pá).

Com a continuidade do processo de desgaste, o rotor foi perdendo o formato hidrodinâmico adquirido, observando-se aberturas na parte inferior das aletas, como ilustra a Foto (3.03), verificado no intervalo de 9 a 12 horas, o que resultou num aumento do desgaste.

3.2.2.2.Rotor 2 : $C_p = 200$ ppm

Os desgastes parciais do rotor 2 ($C_p = 200$ ppm) comportaram-se de forma semelhante aos desgastes parciais do rotor 1 sem polímero, porém foram menores, com excessão do

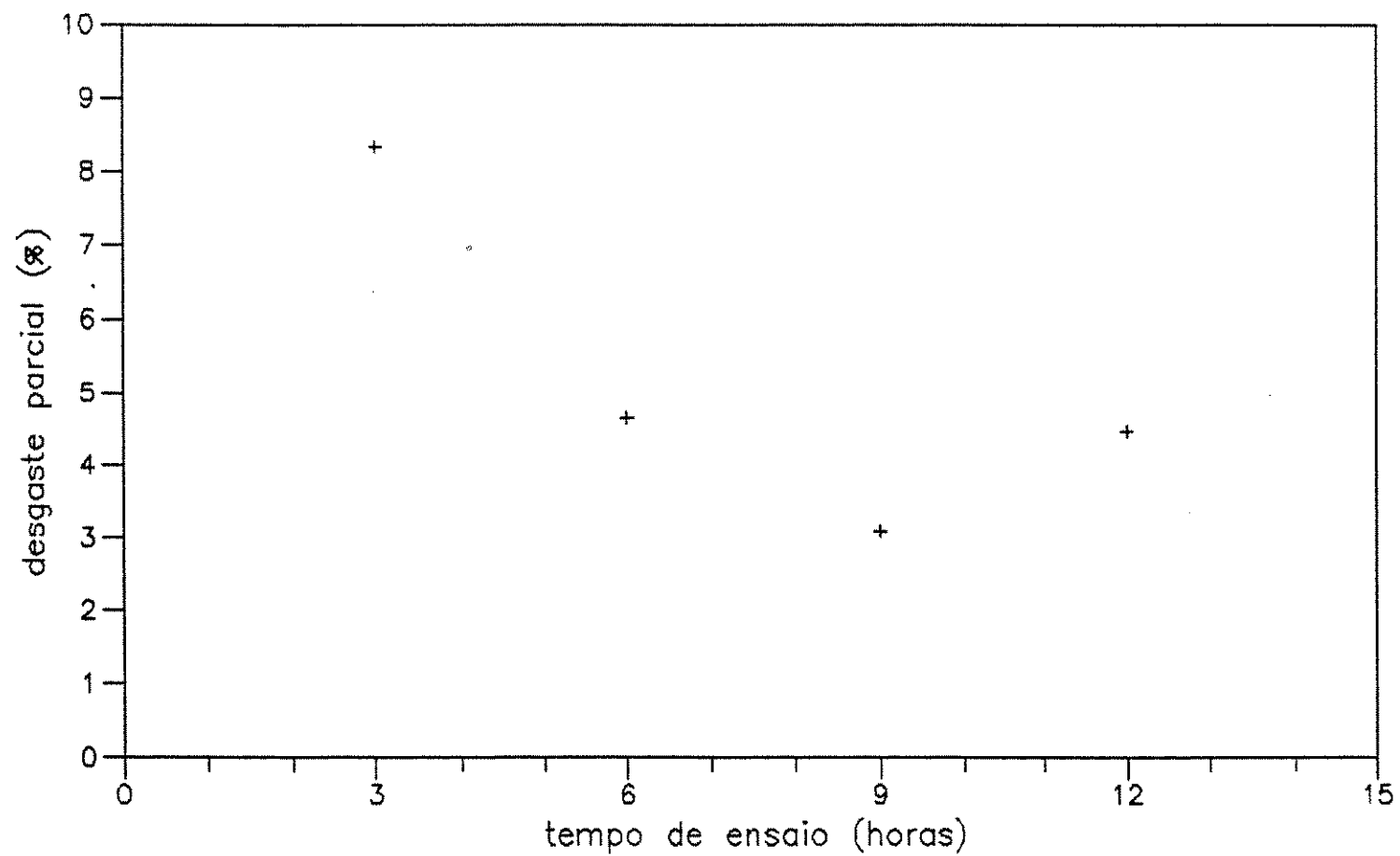


Figura 3.07. Desgaste parcial do rotor 1, com o tempo de ensaio.
($C_p = 0$ ppm)

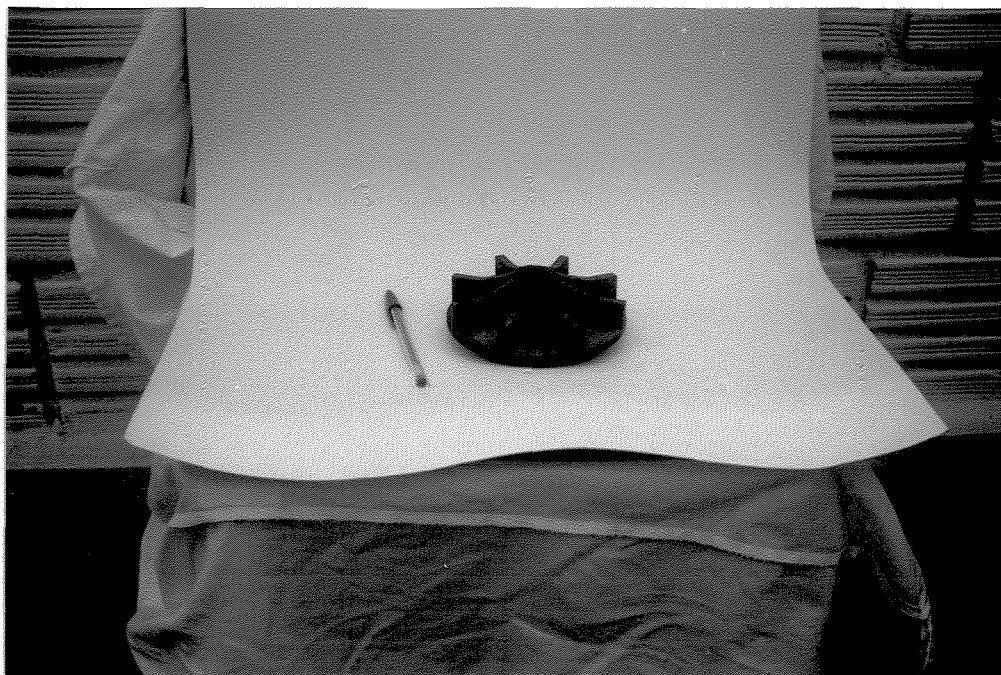


Foto 3.01. Rotor 1, novo.

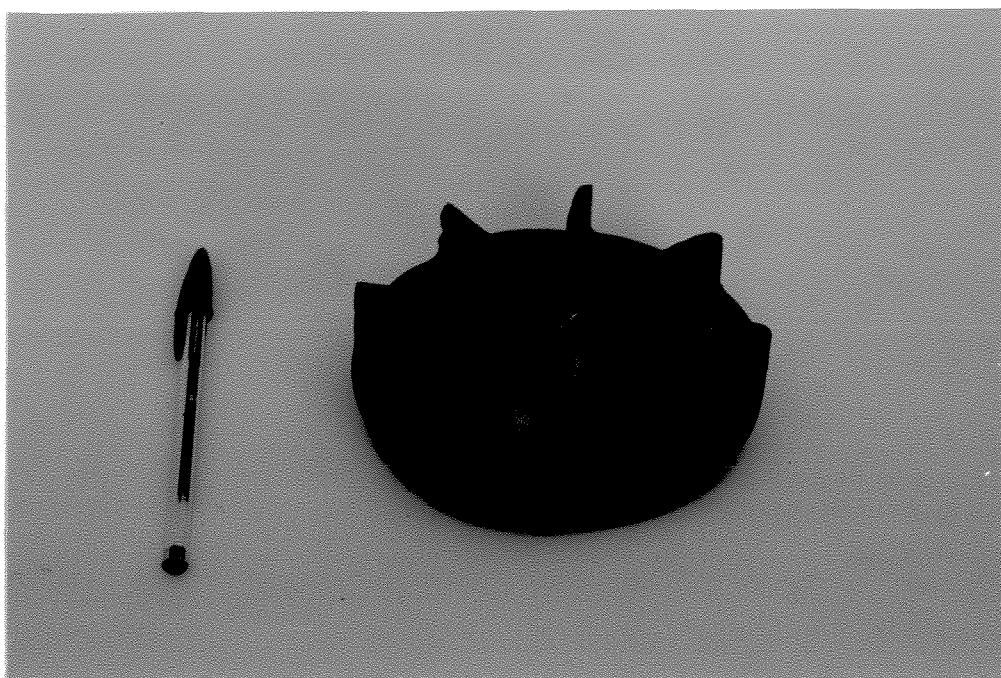


Foto 3.02. Rotor 1, após 3 horas de ensaio. Nota-se o formato hidrodinâmico.

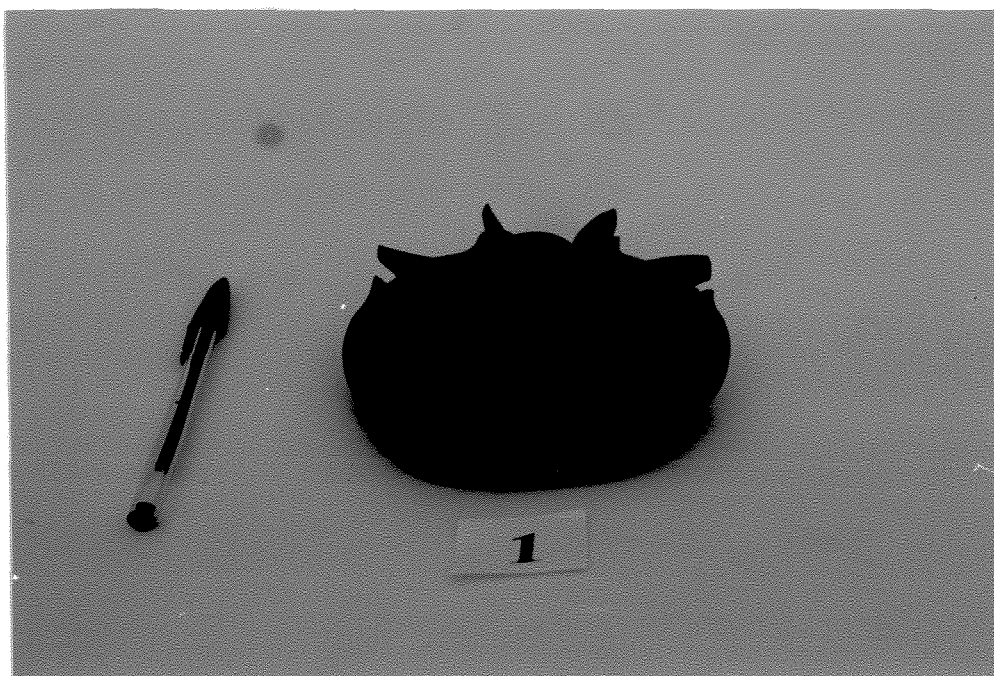


Foto 3.03. Rotor 1, após 12 horas de ensaio. Notam-se aberturas na parte inferior das aletas.

desgaste parcial após o período de 3 a 6 horas, que foi maior para $C_p = 200$ ppm (5,2%, contra 4,7% para $C_p = 0$ ppm). (Figura 3.08)

3.2.2.3. Rotor 3 : $C_p = 400$ ppm

Os desgastes parciais do rotor 3 ($C_p = 400$ ppm) também se comportaram de forma semelhante aos desgastes parciais do rotor 1 sem polímero, porém foram menores. (Figura 3.09)

3.2.2.4. Rotor 4 : $C_p = 600$ ppm

Na mistura água-polímero-areia, $C_p = 600$ ppm, o desgaste abrasivo também foi maior nas 3 primeiras horas. Porém, a diminuição do desgaste à partir do período de 0 a 3 horas, estendeu-se até o final do ensaio, ao contrário das análises dos rotores anteriores que mostraram aumento do desgaste após 9 horas de ensaio devido o rotor ter perdido o formato hidrodinâmico. (Figura 3.10)

Conclui-se portanto que, com $C_p = 600$ ppm, o formato hidrodinâmico do rotor, resistirá mais tempo, retardando um posterior aumento do desgaste em pelo menos 25% do tempo total de ensaio, proporcionando assim aumento da vida útil do rotor.

3.2.2.5. Conclusões

De uma forma geral, o desgaste parcial é maior no início, diminuindo com o tempo, por causa do formato hidrodinâmico adquirido, até o ponto de mínimo desgaste. Após esse instante, o desgaste volta a aumentar devido ao início da perda do formato hidrodinâmico, até a inutilização por completo do rotor.

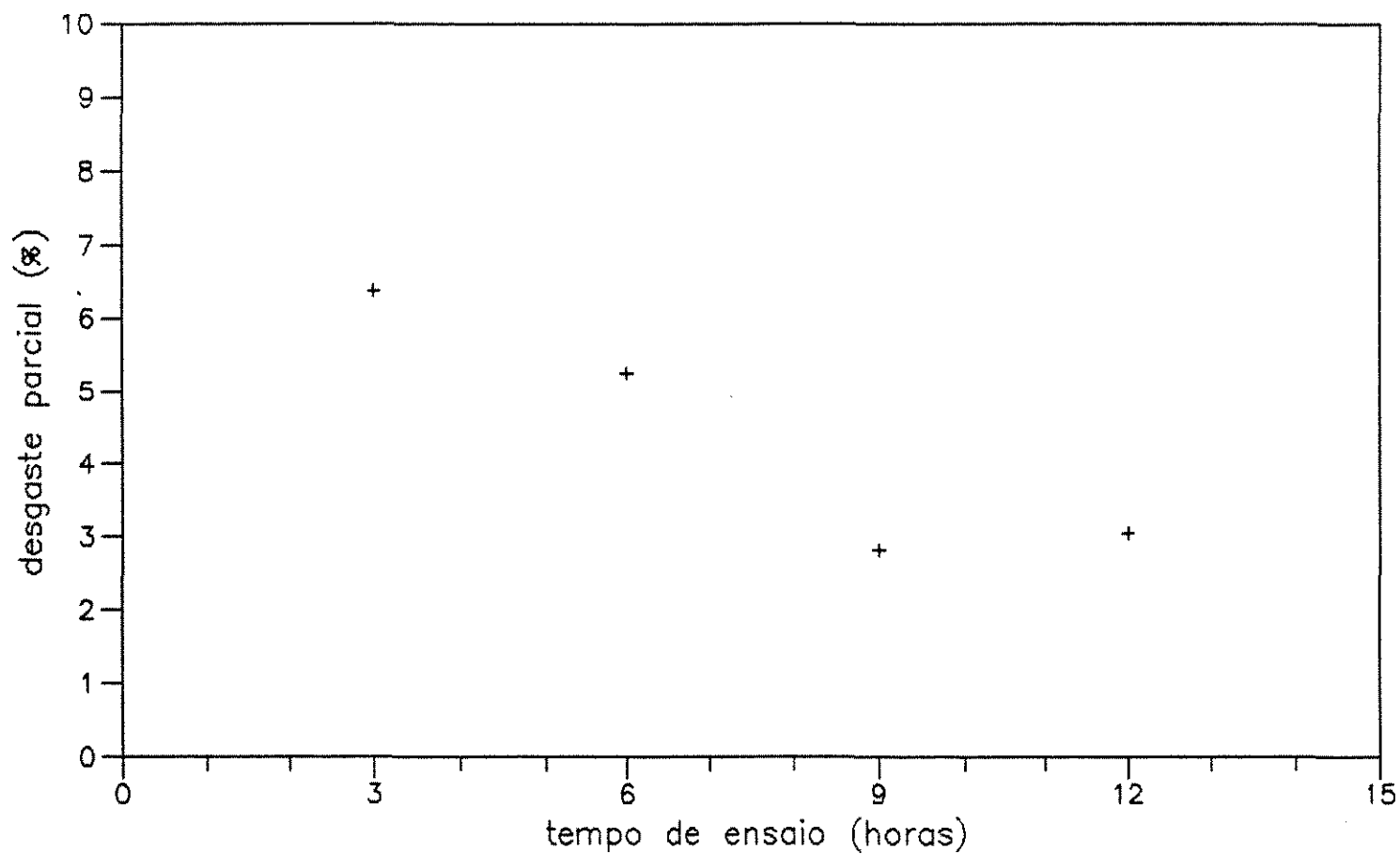


Figura 3.08. Desgaste parcial do rotor 2, com o tempo de ensaio.
($C_p = 200$ ppm)

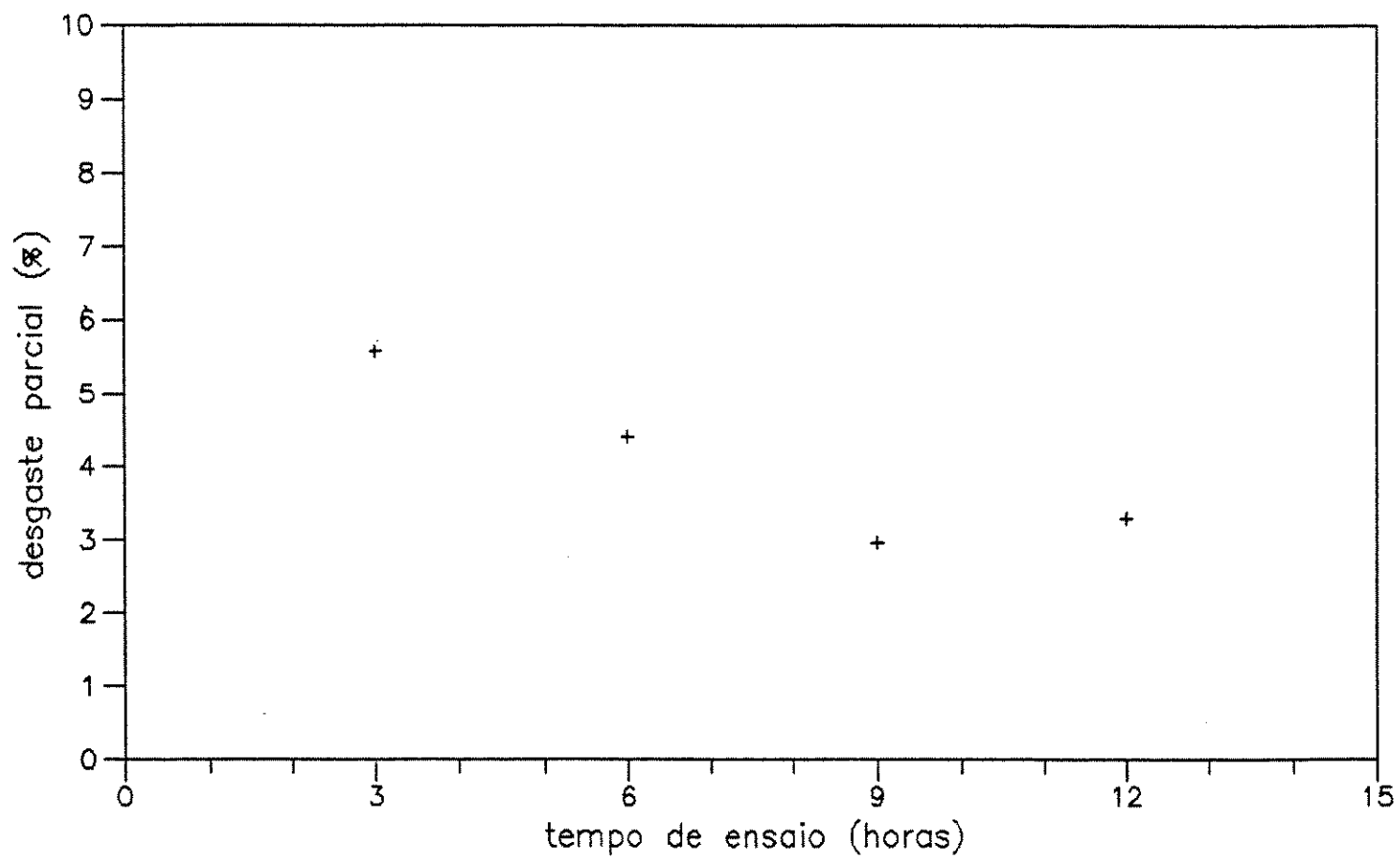


Figura 3.09. Desgaste parcial do rotor 3, com o tempo de ensaio.
($C_p = 400$ ppm)

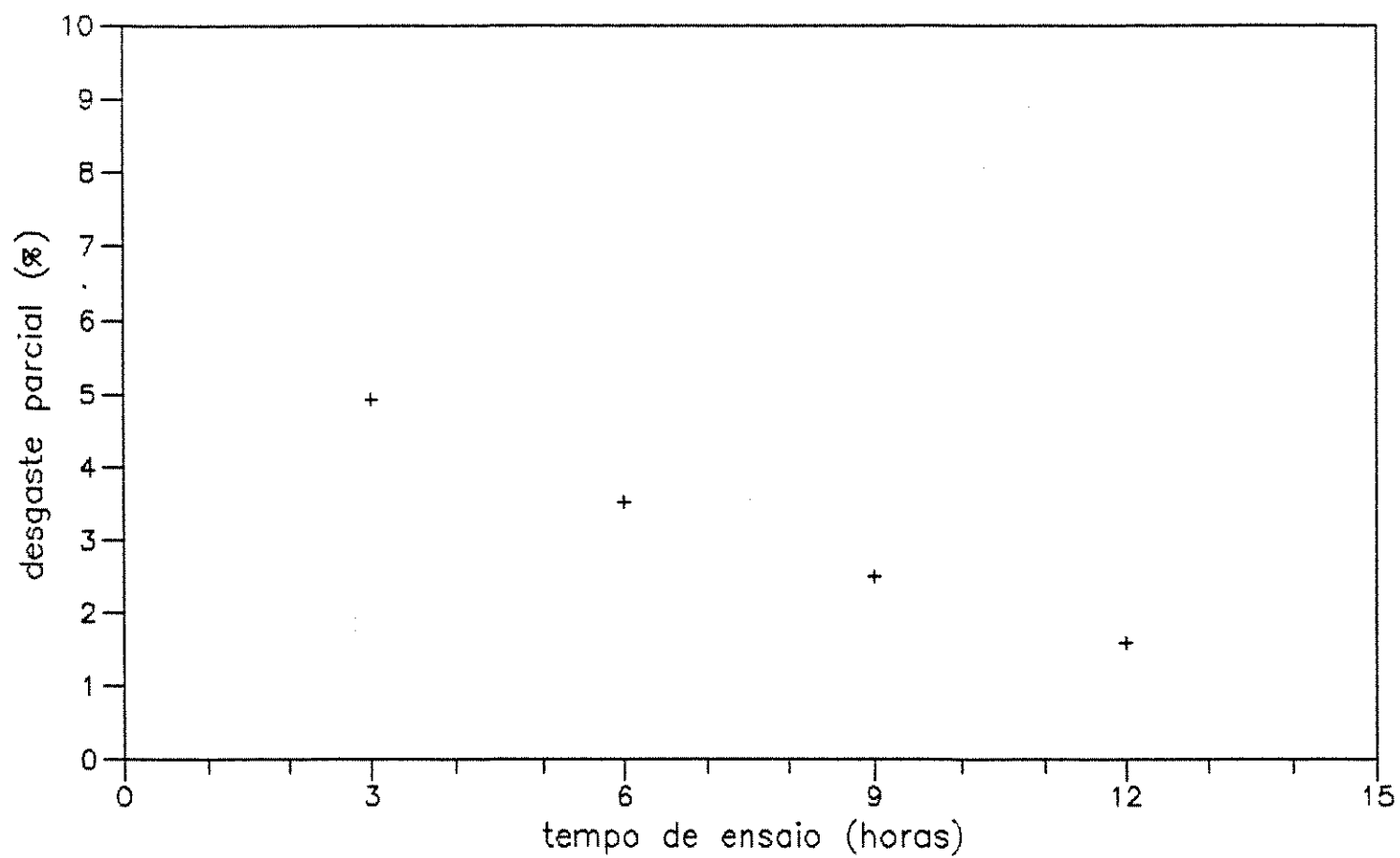


Figura 3.10. Desgaste parcial do rotor 4, com o tempo de ensaio.
($C_p = 600$ ppm)

3.3. Análise dos resultados da 2ª fase ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.)

3.3.1. Introdução

Foi utilizada somente uma concentração de polímero igual a 600 ppm, pois como o objetivo desta segunda fase foi verificar a influência do aumento da concentração de areia sobre os desgastes e a quantidade de polímero não alterou o processo de desgaste (Ver ítem 3.2.1.5), optou-se por escolher a concentração de polímero que provocou as maiores reduções do desgaste na primeira fase.

Os resultados da segunda fase com $C_p = 0$ e 600 ppm, foram concluídos com um tempo total igual a 6 horas, uma vez que os resultados obtidos até esse período mantiveram uma tendência igual aos resultados da primeira fase ($C_v 7,0\%$ V.M.). Um outro fator decisivo para o término desses ensaios foi a condição de funcionamento de vários componentes da bancada de ensaio que se mostraram totalmente avariados, necessitando imediata reposição, mas que infelizmente não foi possível porque os recursos financeiros para a pesquisa haviam terminado.

Mas mesmo com poucos dados da segunda fase, estes foram conclusivos para a pesquisa.

3.3.2. Desgaste acumulado do rotor - 2ª fase

Ao fixar-se a corrente elétrica que alimenta o motor da bomba principal em 26,2 A (Ver ítem 3.1.3), foi obtido para o rotor 5 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M. e $C_p = 0$), no período de 0 a 3 horas de ensaio, uma vazão média de $\sim 4,0$ l/s (Ver ensaio nº17 - Apêndice 2), contra uma vazão média de $\sim 6,0$ l/s do rotor 1 ($C_v \sim 7,0\%$ V.M. e $C_p = 0$) da primeira fase (Ver ensaio nº1 - Apêndice 1).

Essa redução deve-se à necessidade de aumentar a energia consumida para manter uma quantidade maior de partículas sólidas em movimento. Como a energia fornecida foi fixada, para compensar, houve diminuição da vazão.

O desgaste acumulado do rotor 5, após as 3 primeiras horas de ensaio foi de 6,5% (Tabela 3.03).

A fim de comparar os valores dos desgastes acumulados da primeira e segunda fases, fixou-se, ao invés da corrente elétrica do motor da bomba principal, o valor da vazão da mistura igual ao valor médio na primeira fase. Com isso, a corrente elétrica atingiu valores de até 34 A.

Nesse caso, o sistema de recalque foi operado em intervalos de no máximo uma hora, pois acima desse tempo o motor da bomba principal poderia sofrer aquecimentos excessivos, chegando a temperaturas superiores à especificada pelo fabricante.

A partir das considerações acima, os ensaios com o rotor 5 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M. e $C_p = 0$) terminaram após o período de 0 a 3 horas, e no seu lugar utilizou-se um novo rotor, de nº6, para os ensaios com $C_v \sim 13,0\%$ V.M. e $C_p = 0$.

O desgaste do rotor 6, 6,6% (Ver Tabela 3.03), após as 3 primeiras horas de ensaio, foi aproximadamente igual ao desgaste do rotor 5, 6,5% (Ver Tabela 3.03), indicando que o aumento da vazão de $\sim 4,0$ l/s para $\sim 6,0$ l/s não alterou o valor do desgaste acumulado. Acredita-se que a não alteração do desgaste ao aumentar a vazão de 4,0 para 6,0 l/s, mantida a mesma concentração de areia, deve-se, ou a não alteração significativa do regime de escoamento, ou ao intercâmbio entre as duas modalidades de desgaste, atrito e impacto, de forma que a soma dos efeitos mantém-se constante. Assim decidiu-se por manter a mesma vazão média da primeira fase na segunda fase, tanto para $C_p = 0$ como para $C_p = 600$ ppm, operando o sistema de recalque em intervalos de no máximo uma hora.

A partir da Tabela (3.03), com os valores dos pesos dos rotores após cada intervalo de 3 horas, foi analisado graficamente o desgaste acumulado.

A Figura (3.11) apresenta os desgastes acumulados dos rotores 1 ($C_v \sim 7,0\%$ V.M.) e 6 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.) com o tempo de ensaio, para uma concentração de polímero igual a 0 ppm.

A Figura (3.12) apresenta os desgastes acumulados dos rotores 4 ($C_v \sim 7,0\%$ V.M.) e 7 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.) com o tempo de ensaio, para $C_p = 600$ ppm.

Quando se aumentou a concentração de areia de cerca de $7,0\%$ V.M. (primeira fase) para cerca de $13,0\%$ V.M. (segunda fase), ocorreu uma redução do desgaste acumulado, como podemos verificar na Tabela (3.03) e Figuras (3.11) e (3.12).

Tal redução pode ser justificada devido a um decréscimo da turbulência no escoamento promovida pelo maior número de sólidos na mistura, reduzindo o impacto das partículas contra o rotor.

As reduções do desgaste acumulado devidas ao aumento da concentração de areia foram de $21,2\%$ após 3 horas de ensaio e $10,1\%$ após 6 horas, para $C_p = 0$ ppm.

Para $C_p = 600$ ppm, as reduções foram de $25,0\%$ após 3 horas de ensaio e $18,6\%$ após 6 horas.

A Tabela (3.05) resume essas porcentagens de redução.

Analisando a Tabela (3.05) observa-se um aumento da porcentagem de redução quando adicionou-se o polímero à 600 ppm. Isso deveu-se a um efeito conjunto da maior concentração de areia ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.) com o polímero à 600 ppm.

Somente o efeito do aumento da concentração de areia (rotor 1 para o rotor 6), provocou, no período de 0 a 3 horas, uma porcentagem de redução de $21,2\%$, enquanto que o efeito do aumento da concentração de areia mais polímero à 600 ppm (rotor 4 para o rotor 7), provocou uma redução de

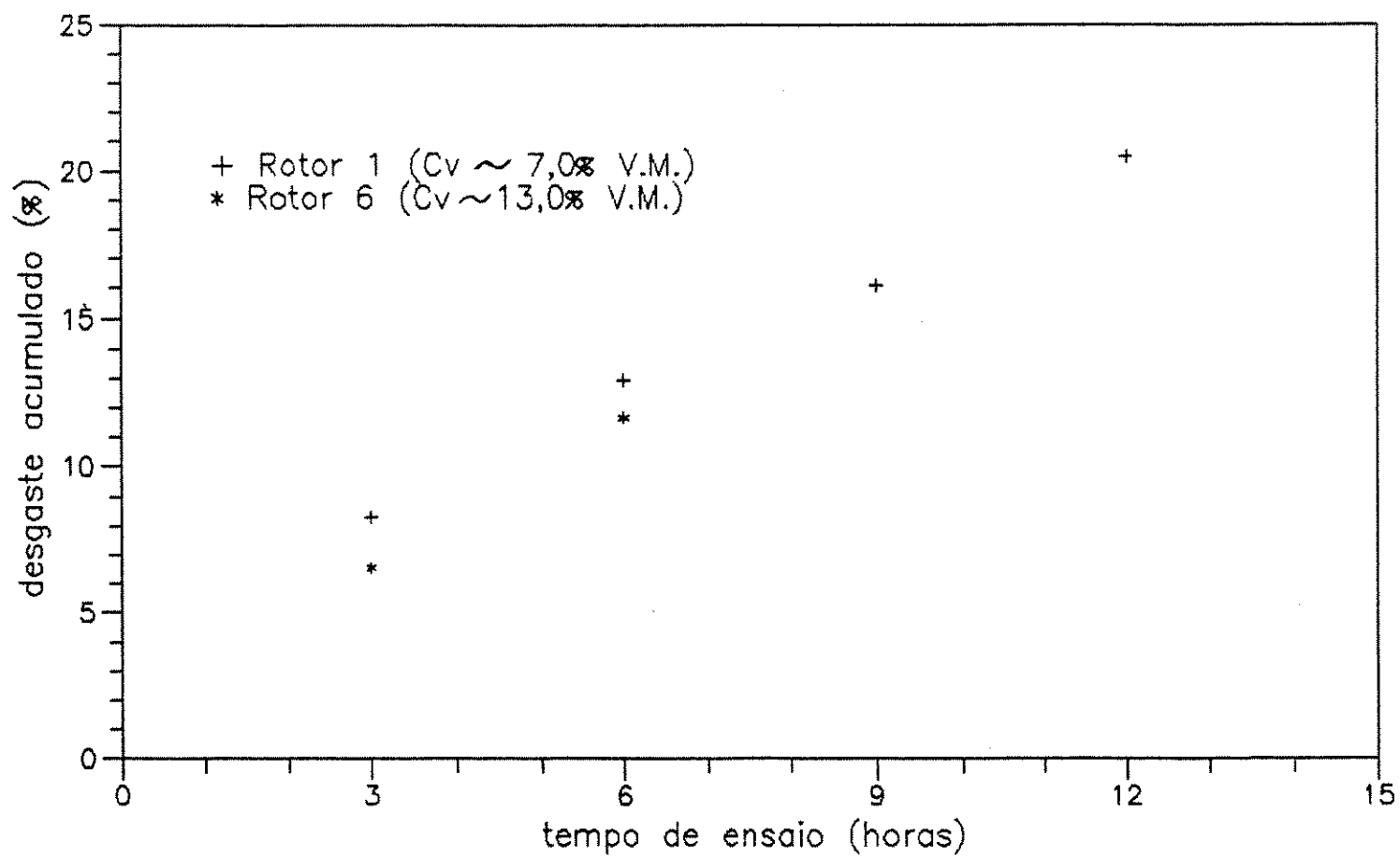


Figura 3.11. Desgastes acumulados dos rotores 1 e 6, com o tempo de ensaio. ($C_p = 0 \text{ ppm}$)

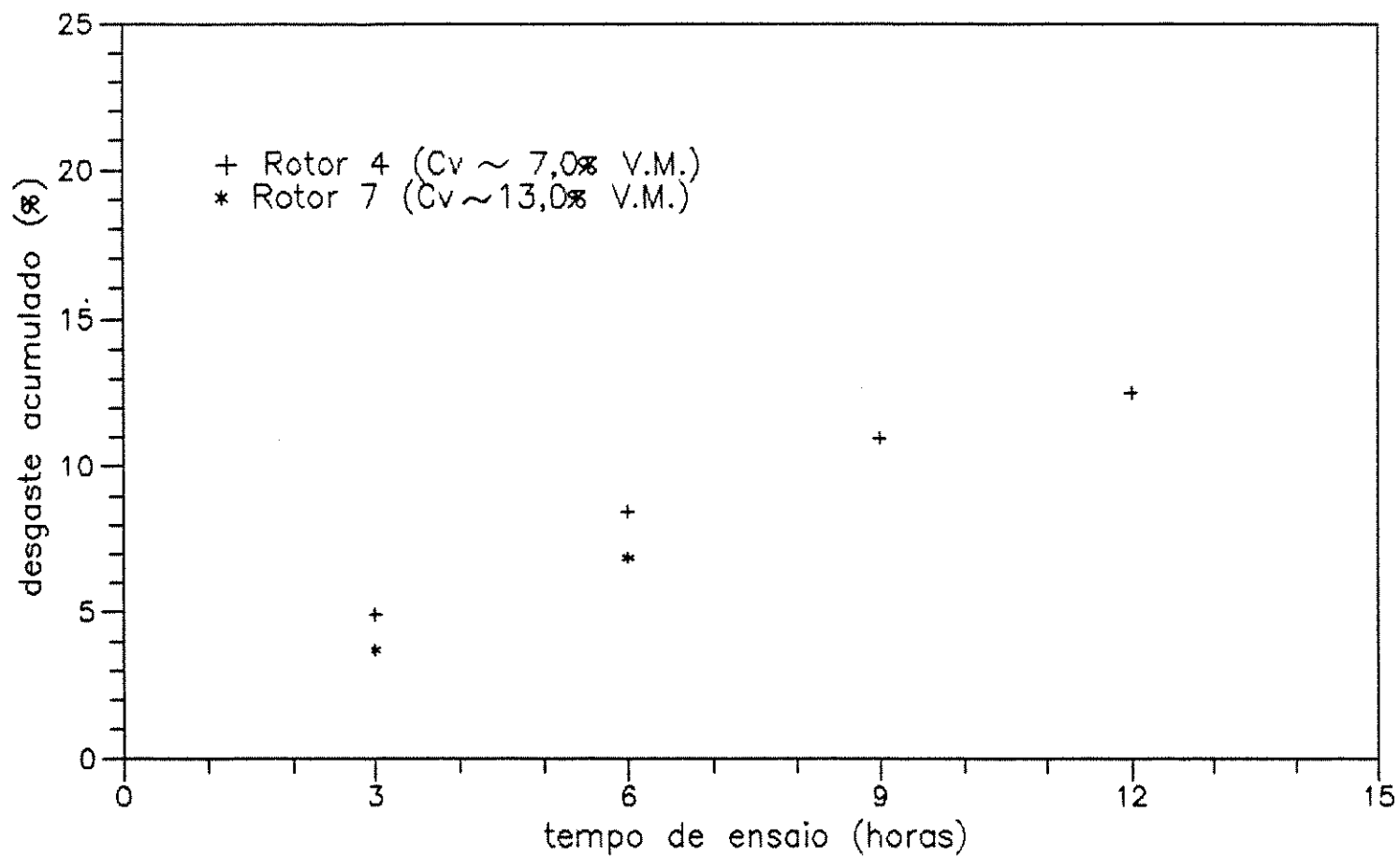


Figura 3.12. Desgastes acumulados dos rotores 4 e 7, com o tempo de ensaio. ($C_p = 600 \text{ ppm}$)

25,0% do desgaste acumulado. No período de 3 a 6 horas o fenômeno foi o mesmo, com o aumento da redução do desgaste acumulado de 10,1% para 18,6%.

A diminuição das porcentagens de redução com o tempo de ensaio está diretamente relacionada à redução do desgaste no mesmo período (formato hidrodinâmico do rotor).

Tabela 3.05. Porcentagem de redução do desgaste acumulado entre os rotores 1 e 6 ($C_p = 0$ ppm) e 4 e 7 ($C_p = 600$ ppm), devida ao aumento da concentração de areia de $\sim 7,0\%$ V.M. para $\sim 13,0\%$ V.M..

Período de ensaio (horas)	Rotores : Concentração de polímero	
	1 e 6 : $C_p = 0$ ppm	4 e 7 : $C_p = 600$ ppm
0 a 3	21,2	25,0
3 a 6	10,1	18,6

Com a adição do polímero à mistura, em concentração de 600 ppm, obteve-se:

* Para $C_v \sim 7,0\%$ V.M., rotor 4, da primeira fase, a redução do desgaste acumulado foi de 40,9% após as 3 primeiras horas de ensaio, e 34,9% após 6 horas de ensaio (Ver Tabela 3.06).

* Para $C_v \sim 13,0\%$ V.M., rotor 7, da segunda fase, a redução do desgaste acumulado foi de 43,8% após as 3 primeiras horas de ensaio, e 41,1% após 6 horas de ensaio (Tabela 3.06).

Tabela 3.06. Porcentagens de redução do desgaste acumulado entre os rotores 1 e 4 da primeira fase ($C_v \sim 7,0\%$ V.M.) e os rotores 6 e 7 da segunda fase ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.), devidas a adição de polímero a 600 ppm.

Período de ensaio (horas)	Rotores : Concentração de areia	
	1 e 4 : $C_v \sim 7,0\%$ V.M.	6 e 7 : $C_v \sim 13,0\%$ V.M.
0 a 3	40,9	43,8
3 a 6	34,9	41,1
6 a 9	31,9	—
9 a 12	38,9	—

Analisando a Tabela (3.06), onde somente foi verificado o efeito da adição do polímero à mistura água-areia, observa-se o aumento da porcentagem de redução do desgaste acumulado quando houve elevação de $C_v \sim 7,0\%$ V.M. para $C_v \sim 13,0\%$ V.M..

Novamente isso deve-se ao efeito conjunto da maior concentração de areia ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.) com o polímero à 600 ppm.

Conclui-se portanto, que com $C_v \sim 13,0\%$ V.M. e $C_p = 600$ ppm, obtém-se as maiores reduções do desgaste acumulado, em particular após as 3 primeiras horas de ensaio (maior desgaste).

3.3.3. Desgastes parciais do rotor - 2ª fase

O desgaste do rotor, em porcentagem, para intervalos de 3 horas, foi analisado à partir dos dados da Tabela (3.03).

A Figura (3.13) apresenta o gráfico do desgaste parcial com o tempo de ensaio para os rotores 1 e 6 ($C_p = 0$ ppm), e a Figura (3.14) para os rotores 4 e 7 ($C_p = 600$ ppm).

A Figura (3.13) mostra um maior desgaste após as 3 primeiras horas, tanto para o rotor 1 ($C_v \sim 7,0\%$ V.M. - Ver item 3.2.2.1.) como para o rotor 6 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.), diminuindo após esse período até 6 horas.

Já que foi verificado que os fenômenos de desgaste mantém o mesmo comportamento para as duas concentrações de areia, após 6 horas, a sua evolução no rotor 6 manter-se-á igual ao rotor 1, isto é, diminuindo até uma quantidade de horas e voltando a aumentar.

A Figura (3.14) mostra um maior desgaste após as 3 primeiras horas, tanto para o rotor 4 ($C_v \sim 7,0\%$ V.M. - Ver item 3.2.2.4.) como para o rotor 7 ($C_v \sim 13,0\%$ V.M.), diminuindo até uma certa quantidade de horas.

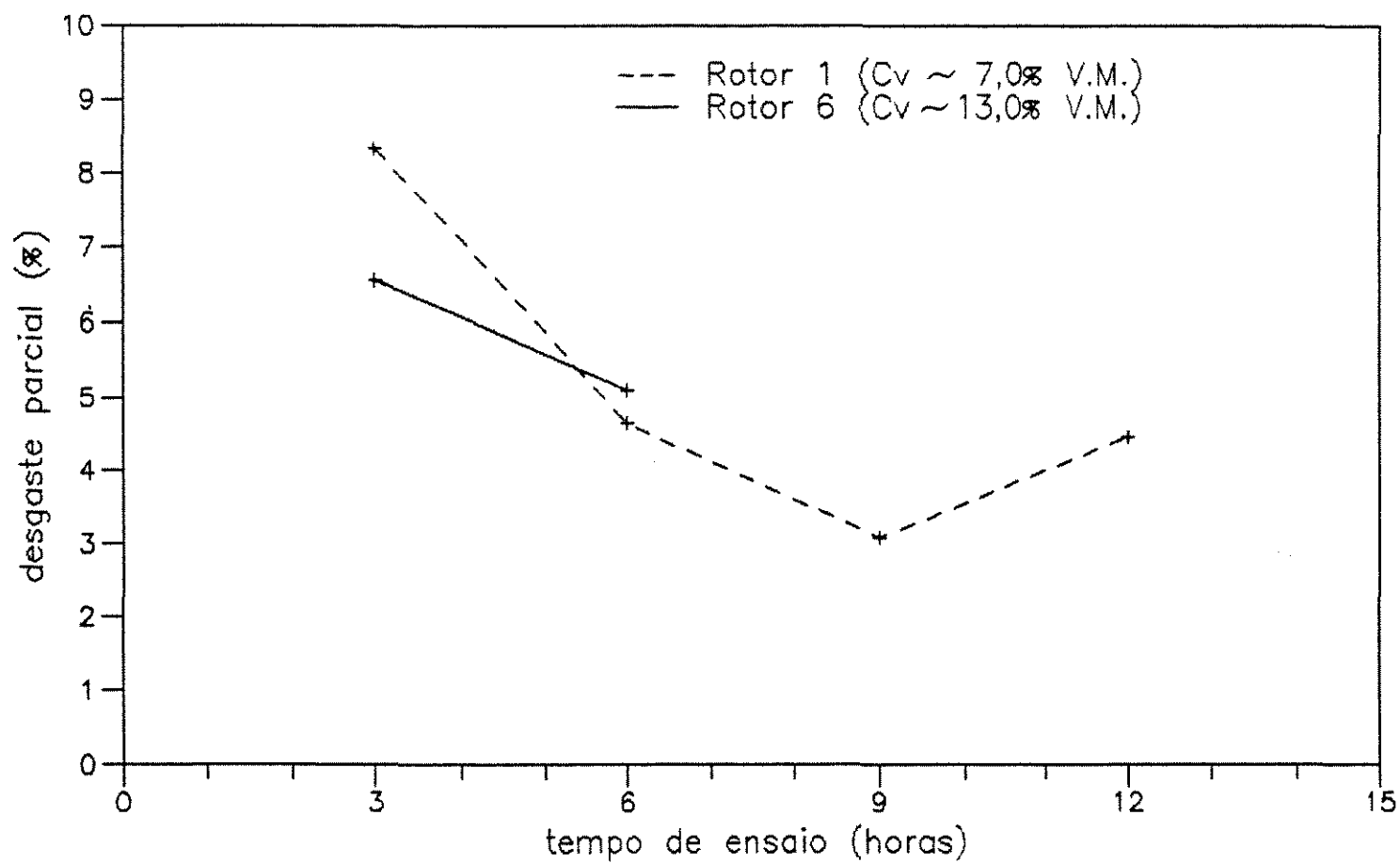


Figura 3.13. Desgastes parciais dos rotores 1 e 6, com o tempo de ensaio. ($C_p = 0$ ppm)

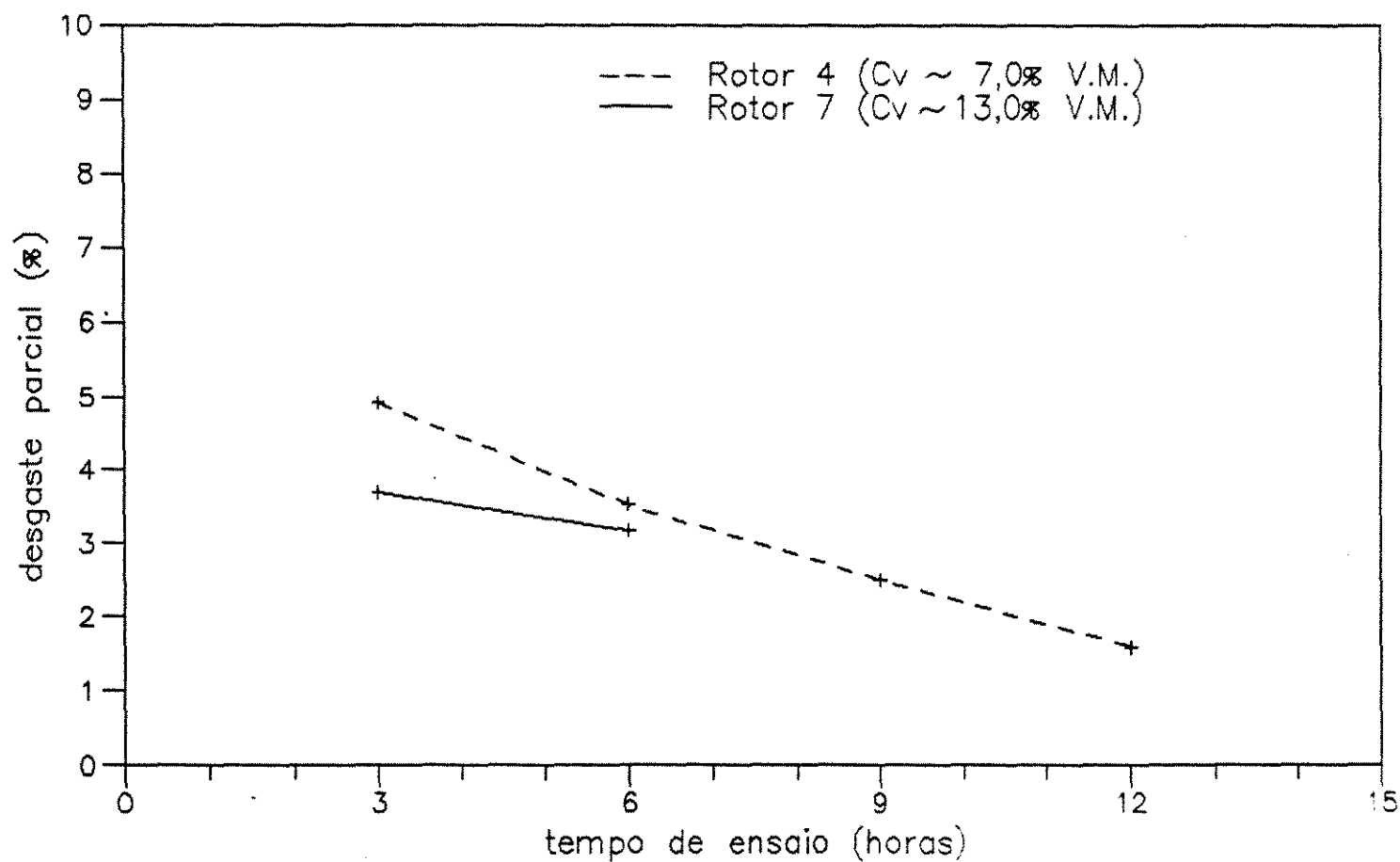


Figura 3.14. Desgastes parciais dos rotores 4 e 7, com o tempo de ensaio. ($C_p = 600$ ppm)

Partindo da mesma verificação sem polímero, após 6 horas, a evolução do desgaste do rotor 7 manter-se-á igual ao rotor 4, isto é, diminuindo até o final de 12 horas.

Porém, analisando o rotor 4 ($C_p = 600$ ppm, 1ª fase) e 7 ($C_p = 600$ ppm, 2ª fase), podemos concluir que o formato hidrodinâmico alcançado devido ao desgaste, deverá manter-se por mais tempo no rotor 7. Esse tempo deverá ser superior a 25% do tempo total de ensaio (Ver item 3.2.2.4), devido a redução do desgaste no rotor com o aumento da concentração de areia.

3.4. Ajustes matemáticos aos dados experimentais

O objetivo da realização desses ajustes é, além de obter uma curva que expresse matematicamente o comportamento do desgaste no intervalo de tempo adotado para a pesquisa, estimar uma tendência para esse desgaste após o período de ensaio.

3.4.1. Primeira fase

3.4.1.1. Desgaste acumulado do rotor

A partir das Figuras (3.02) a (3.05), foi escolhido, através do método dos mínimos quadrados (DORN & McCracken, 1978), uma curva que se ajustasse melhor aos pontos dos gráficos. O polinômio de grau 3, da equação (3.01), obtido para cada rotor ou concentração de polímero à partir da regressão polinomial, foi o que melhor se ajustou aos dados:

$$W_a = a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (3.01)$$

Foi considerado , para efeito do ajuste de curvas, que para um tempo de ensaio igual a zero, o desgaste é igual a zero. Portanto foram ajustados um total de 5 (cinco) pontos ao polinômio (Tabela 3.07):

Tabela 3.07. Valores do desgaste acumulado, com o tempo de ensaio (1ª fase)

	Tempo de ensaio t (horas)	Desgaste acumulado, Wa (%)			
		Cp=0 ppm	Cp=200 ppm	Cp=400 ppm	Cp=600 ppm
1	0	0	0	0	0
2	3	8,3	6,4	5,6	4,9
3	6	13,0	11,6	10,0	8,4
4	9	16,1	14,4	13,0	10,9
5	12	20,5	17,5	16,2	12,5

As figuras (3.15) a (3.18) apresentam os polinômios ajustados para cada uma das concentrações de polímero utilizadas; e a linha tracejada nos gráficos é a função extrapolada para valores superiores ao tempo total de ensaio, estimando uma tendência do desgaste acumulado.

Essa tendência parece refletir a realidade, pois os rotores, após 9 horas já voltavam a apresentar novamente o crescimento do desgaste com o início da perda do formato hidrodinâmico (Ver item 3.2.2.1.), caracterizado, na

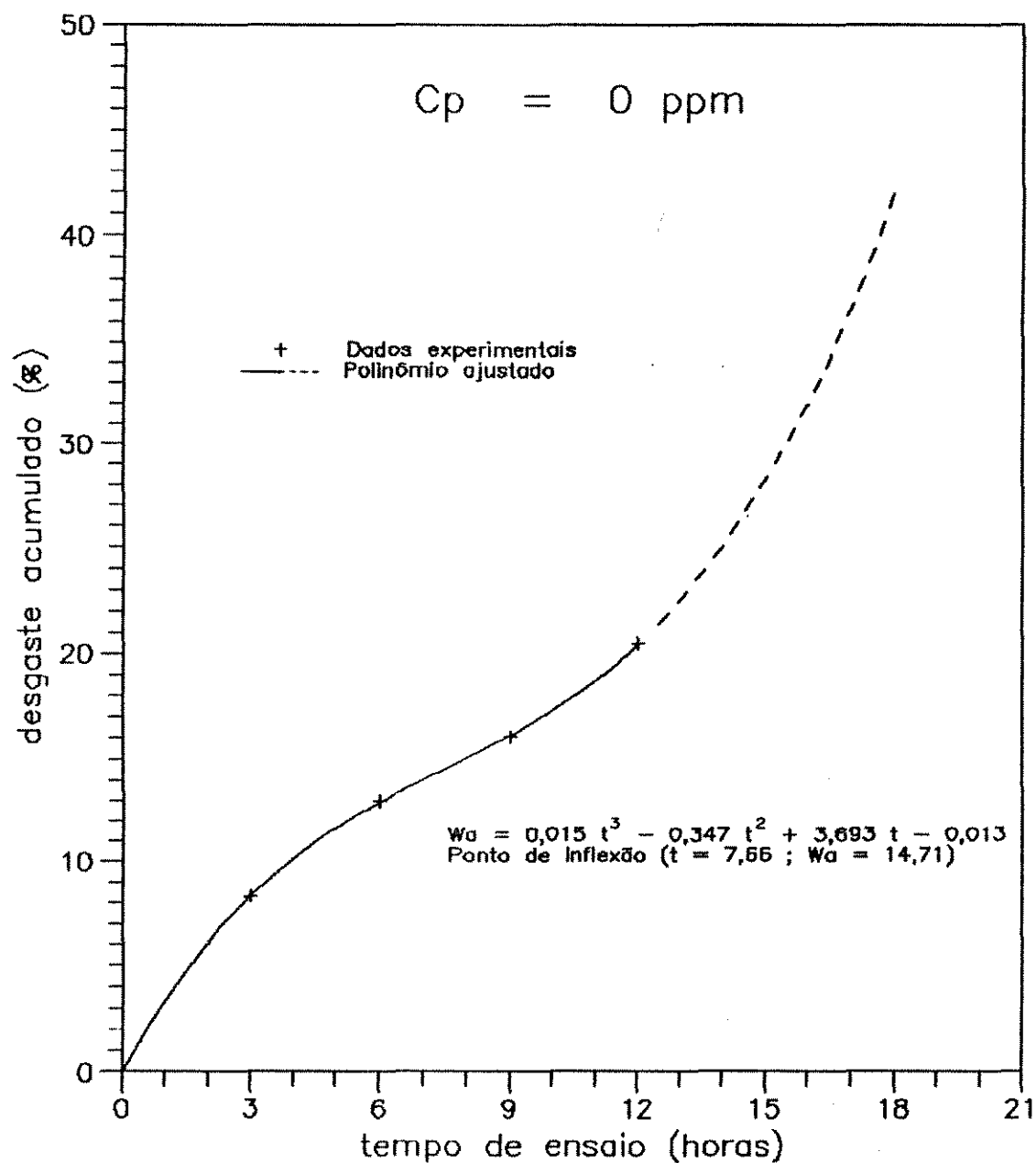


Figura 3.15. Desgaste acumulado do rotor 1 ($C_p = 0 \text{ ppm}$) da primeira fase, com o tempo de ensaio. Ajuste de curva aos dados experimentais.

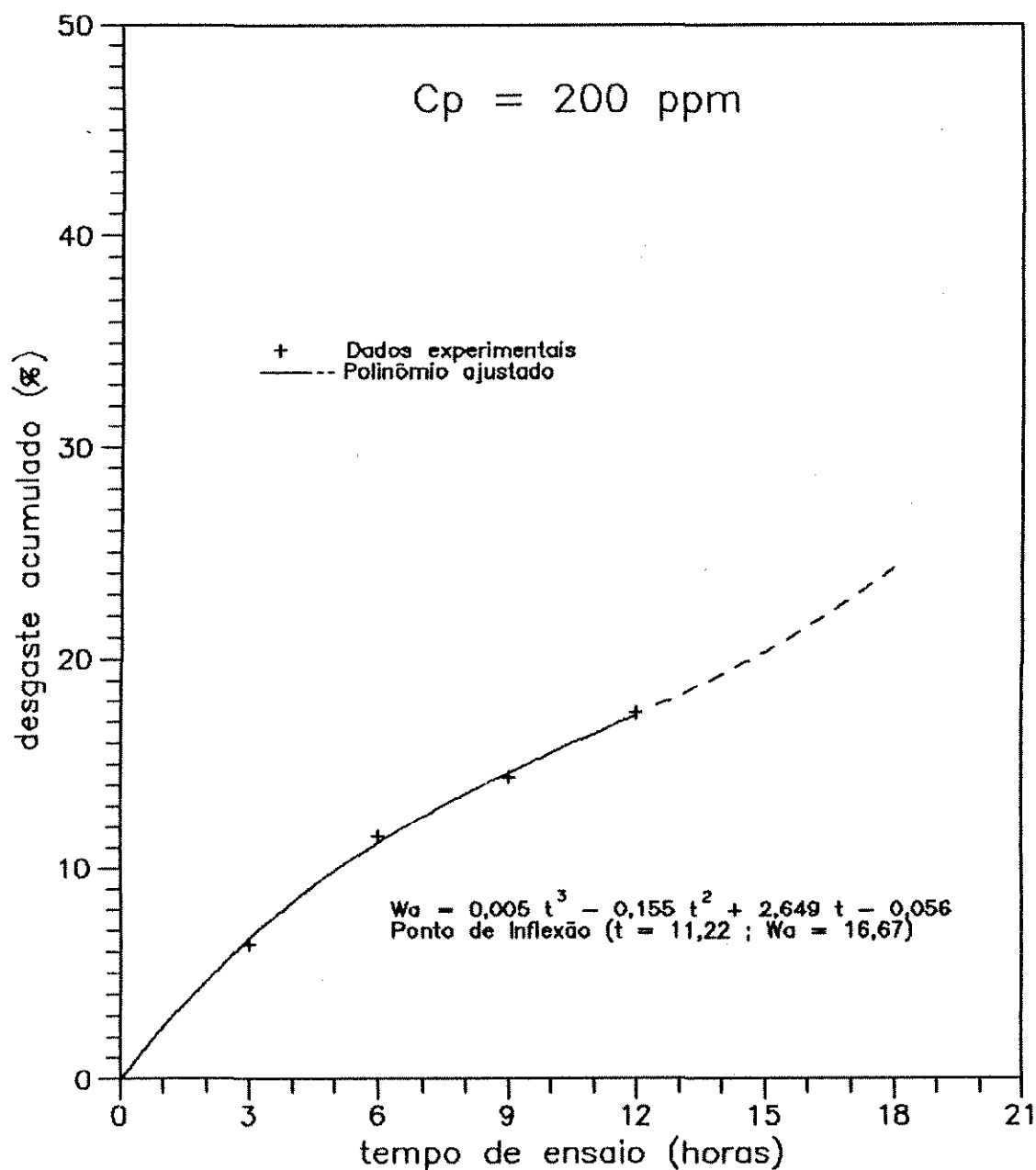


Figura 3.16. Desgaste acumulado do rotor 2 ($C_p = 200$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. Ajuste de curva aos dados experimentais.

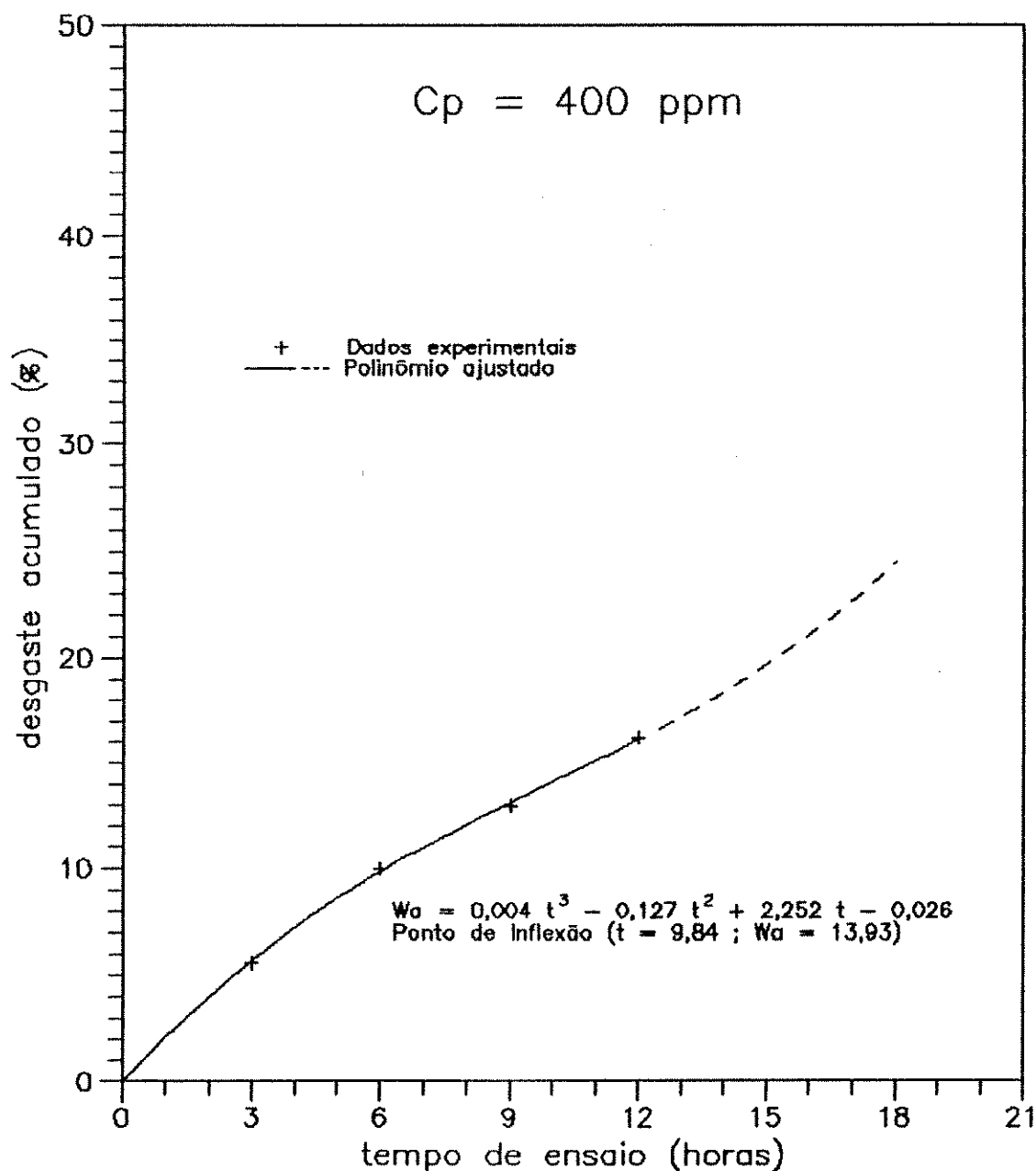


Figura 3.17. Desgaste acumulado do rotor 3 ($C_p = 400$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. Ajuste de curva aos dados experimentais.

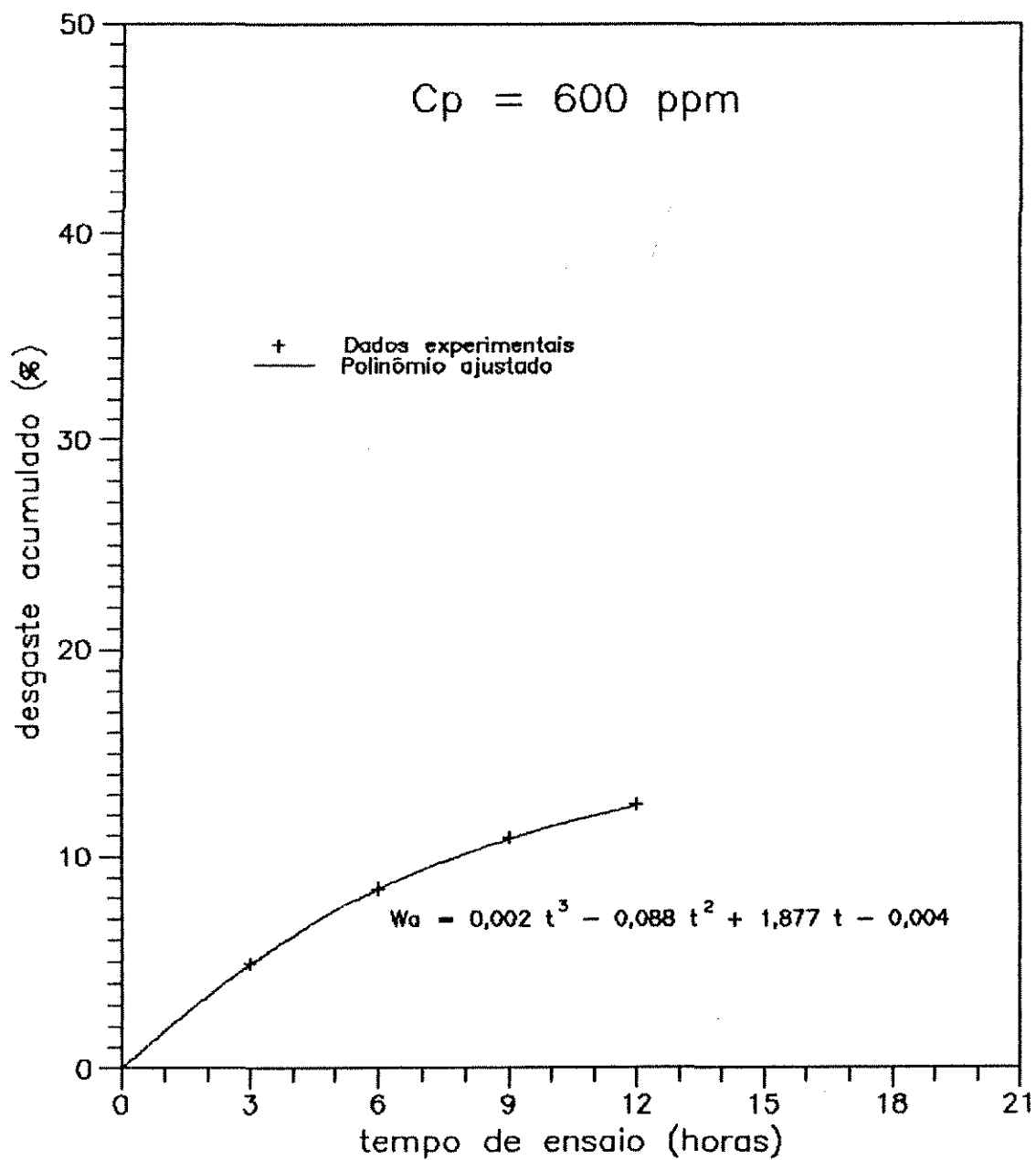


Figura 3.18. Desgaste acumulado do rotor 4 ($C_p = 600$ ppm) da primeira fase, com o tempo de ensaio. Ajuste de curva aos dados experimentais.

curva ajustada, pelo ponto de inflexão, com exceção da curva do rotor 4 ($C_p = 600$ ppm) que, embora devesse apresentar após um determinado período de tempo as mesmas características das curvas de menores concentrações de polímero, não apresentou o ponto de inflexão durante o tempo total de ensaio, que caracteriza o aumento do desgaste com o início da perda do formato hidrodinâmico.

Portanto, para $C_p = 600$ ppm, limitou-se em apresentar somente o polinômio ajustado aos pontos levantados experimentalmente, supondo apenas que a mesma tendência obtida para as concentrações inferiores irá se repetir para $C_p = 600$ ppm com um atraso de pelo menos 25% do tempo total de ensaio.

Os valores das abscissas (t) dos pontos de inflexão dos polinômios ajustados, foram obtidos à partir da segunda derivada do polinômio (Equação 3.01) igualada a zero, ou seja:

$$\frac{d^2 W a}{dt^2} = 6a_3 t + 2a_2 = 0 \quad (3.02)$$

Logo,

$$t = - \frac{2a_2}{6a_3} \quad (3.03)$$

Assim, as ordenadas dos pontos de inflexão podem ser obtidos substituindo os valores de (t) nas equações dos polinômios ajustados (Equação 3.01).

Os polinômios, assim como as coordenadas dos pontos de inflexão, estão indicados nas Figuras (3.15) a

(3.18) para cada concentração de polímero da primeira fase de ensaios.

Nota-se que com a presença do polímero na mistura é retardado o instante onde o rotor começa a perder o formato hidrodinâmico, isto é, o valor da abscissa do ponto de inflexão é maior.

A Figura (3.19) resume os desgastes acumulados dos rotores da primeira fase com o tempo de ensaio, e os polinômios ajustados aos pontos.

3.4.2.Segunda fase

Os ajustes matemáticos da segunda fase não foram realizados dada a quantidade pequena de dados coletados. Porém os ajustes da primeira fase já foram suficientes para análise, pois o processo de desgaste não se alterou com o aumento da concentração de areia.

3.5.Melhor concentração de polímero

Após os ensaios realizados durante a primeira e segunda fases, com tres concentrações de polímero na primeira fase (200, 400 e 600 ppm) e uma na segunda fase (600 ppm), pôde-se concluir que a melhor concentração de polímero utilizada foi de 600 ppm, pois além de proporcionar as maiores porcentagens de redução do desgaste acumulado (Ver Tabela 3.04), essa concentração retardou em pelo menos 25% do tempo total de ensaio o início da perda do formato hidrodinâmico, responsável pelo decréscimo do desgaste.

Para concentrações de polímero maiores que 600 ppm, torna-se necessário um estudo posterior para se verificar possíveis reduções do desgaste superiores às encontradas. Porém, maiores quantidades de polímero poderão ou não

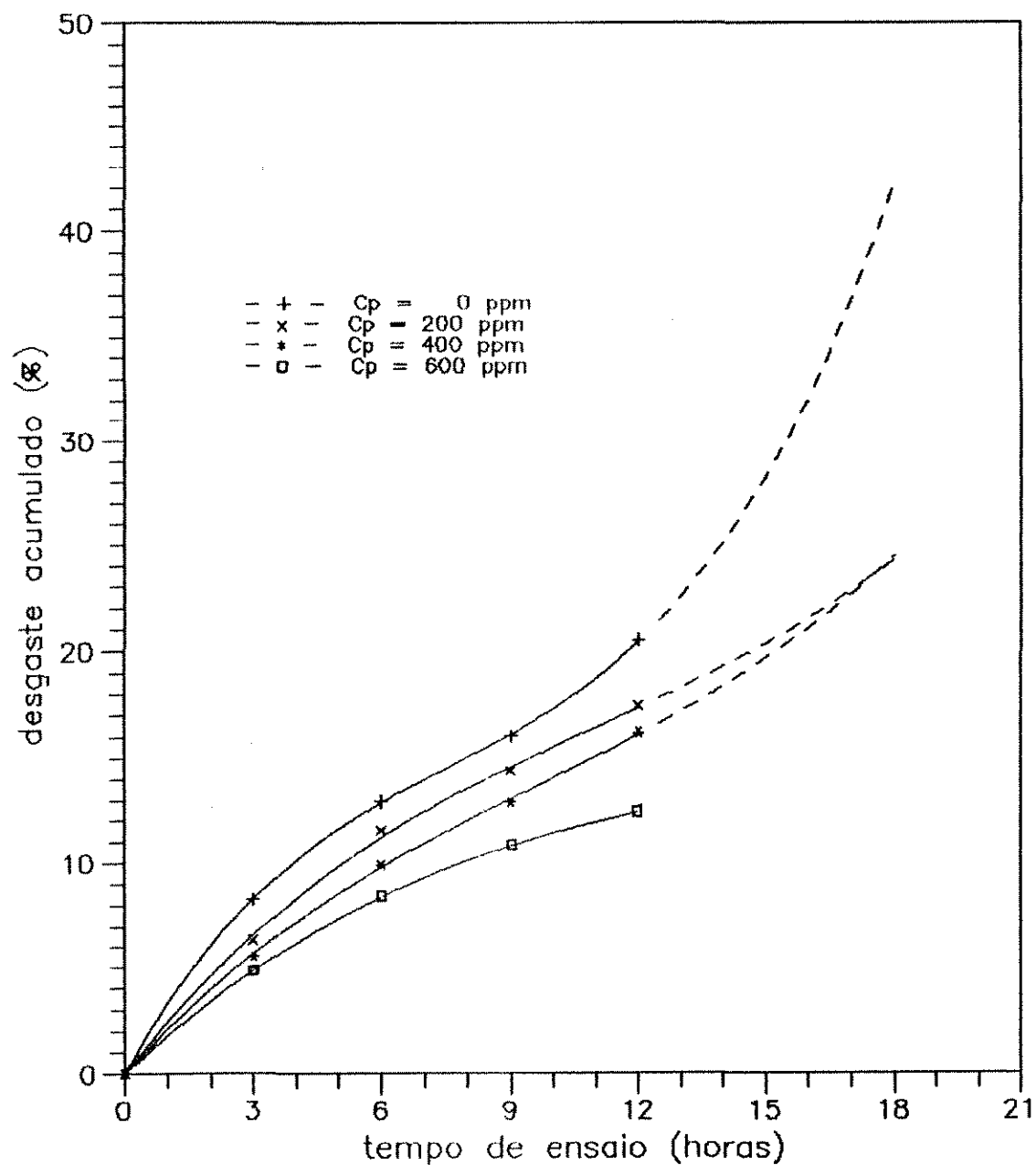


Figura 3.19. Desgastes acumulados dos rotores da primeira fase, com o tempo de ensaio, e os polinômios ajustados aos dados experimentais.

trazer sensíveis acréscimos na redução do desgaste abrasivo, e o custo do polímero poderá ser um fator limitante.

3.6. Melhor concentração de areia

Utilizando-se duas concentrações de areia, cerca de 7,0% V.M. na primeira fase e 13,0% V.M. na segunda fase, pôde-se também verificar que o desgaste diminuiu quando aumentou-se a concentração de areia (Ver ítem 3.3.).

Assim, em primeira análise, levando-se em conta somente o desgaste abrasivo, $C_v \sim 13,0\%$ V.M. é a melhor concentração a ser recalcada.

Sabe-se porém que para uma mesma vazão de mistura transportada, o aumento da concentração de sólidos elevará a perda de carga (maior energia para o escoamento).

4. DIFICULDADES SURGIDAS E SOLUÇÕES PRÁTICAS ENCONTRADAS REFERENTES AO DESGASTE ABRASIVO

4.1. Introdução

Neste trabalho, verificaram-se decorrer dos ensaios realizados, vários problemas devido ao desgaste abrasivo em diversos componentes da bancada de ensaio, o que muitas vezes paralisava o funcionamento da instalação de recalque.

Com a existência de tais dificuldades, tornou-se necessário a realização de muitos reparos e de adaptações de componentes da bancada de ensaio em vista da alta abrasividade das misturas de água-areia e água-areia-polímero bombeadas.

É bom lembrar que o excessivo número de dificuldades, surgidas em pequenos espaços de tempo de ensaio, ocorreu devido à escolha de uma areia de diâmetro médio de cerca de 0,94 mm, proporcionando desgastes sensíveis em um período de tempo curto. Porém foi necessário tal escolha, dada a necessidade de obtenção rápida de resultados.

Mesmo assim, o período de tempo suposto para coletar os dados foi inicialmente estimado em 3 meses. Mas devido a todas as dificuldades encontradas, o mesmo período estendeu-se por cerca de 8 meses.

Assim, neste capítulo, procurou-se mostrar soluções que não eliminavam o desgaste, mas que retardavam o maior tempo possível a inutilização de componentes da banca-

da de ensaio, tais como: registros, voluta ou carcaça da bomba principal e tubulação.

São apresentados também fotos que ilustram as soluções encontradas para os problemas do desgaste abrasivo.

4.2.Registros

Todos os registros da bancada de ensaio eram de gaveta, e do tipo com rosca, com exceção do registro de controle da vazão da mistura na saída da bomba principal que variou diversas vezes.

Os registros do tipo com rosca na bancada de ensaio, já utilizados anteriormente por COIADO (1989), apresentavam pouco desgaste, proporcionando ainda boa utilização, apesar de não mais fecharem totalmente.

Alguns desses registros com rosca foram substituídos no decorrer dos ensaios, porém uma única vez. Dos 6 registros com rosca da bancada de ensaio, 3 foram substituídos durante todo o trabalho.

4.2.1.Registro de controle da vazão da mistura

4.2.1.1.Primeira fase

Durante toda a primeira fase, utilizou-se como registro de controle da vazão da mistura, um registro de gaveta do tipo de flanges, em ferro fundido, como mostra a Foto (4.01).

Esses registros foram adquiridos em depósitos de ferro velho, porém com bom funcionamento para as necessidades deste trabalho.

Foram utilizados registros de 2", 2 1/2" e 3", sendo no entanto, mais frequente, o registro de 2 1/2".



Foto 4.01. Registro de gaveta com flanges utilizado para o controle da vazão da mistura durante a primeira fase de ensaios.

Ao utilizar esses registros no controle da vazão das misturas, notou-se que para a vazão correspondente à corrente nominal do motor elétrico da bomba principal (Ver item 3.1.3.), a abertura do êmbolo do registro era pequena, proporcionando um alto desgaste desse mesmo êmbolo e das paredes internas do registro. Isso fez com que o registro fusesse com duas horas de funcionamento contínuo do sistema. Assim foram necessários reparos constantes desses furos, onde utilizou-se massa DUREPOXI, e posteriormente, na colocação do registro, foi invertido o seu sentido, isto é, a entrada do registro passou a ser a saída.

A Figura (4.01) ilustra essa operação, que tornou-se uma rotina durante a primeira fase de ensaios.

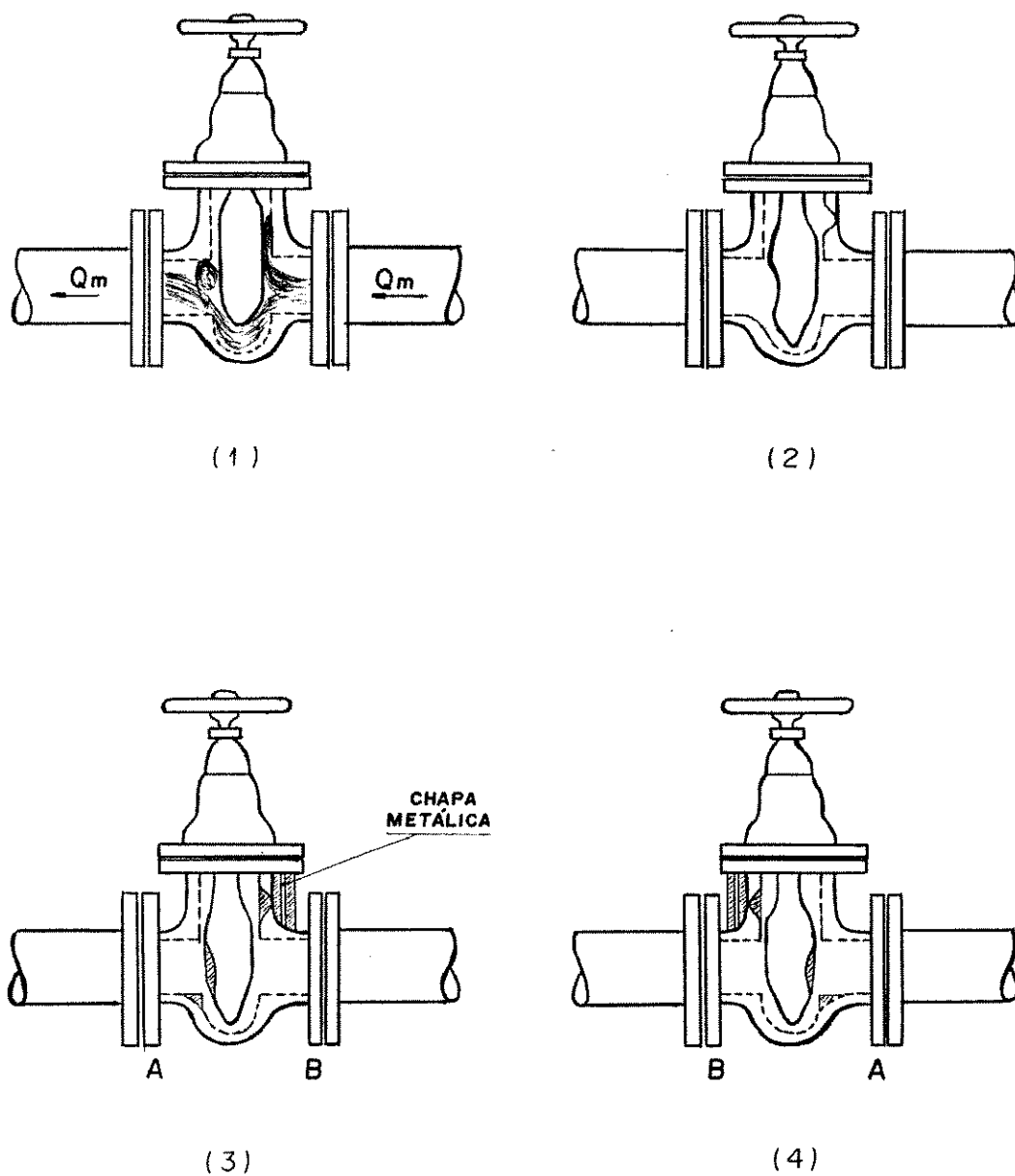
Foram utilizados, ao todo, durante a primeira fase, 6 registros de gaveta com flanges.

Ao final da primeira fase, ainda foram utilizados dois registros de gaveta com rosca, feitos em bronze. Mas estes se mostraram bastante inferiores aos registros com flanges pois furavam com cerca de uma hora e meia de funcionamento sem condições de reparo.

4.2.1.2.Segunda fase

Para a segunda fase procuramos utilizar registros com flanges, que demonstraram maior durabilidade frente ao desgaste. Porém não foi encontrado mais esse tipo de registro em ferro velho.

Em virtude disso, estudou-se uma solução que aumentasse a vida útil dos registros com rosca, únicos encontrados, e utilizados sem sucesso no final da primeira fase. Chegou-se a conclusão que um revestimento externo em concreto armado retardaria bastante a inutilização total dos registros. Assim concretaram-se 4 registros de gaveta (com rosca) para utilização na segunda fase. Além disso, conse-



▨ RECUPERAÇÃO COM MASSA DUREPOXI

Figura 4.01. Sequência do fenômeno de desgaste do registro com flanges (1ª fase) e operações de reparos dos danos causados.

gulu-se mais duas válvulas de pressão de 2", do tipo com esfera, em aço inoxidável (Foto 4.02), que foram utilizadas como registros, pois o que interessava era o controle da vazão, sem preocupação com aumentos da perda de carga.

A Foto (4.03) ilustra o registro de gaveta com rosca revestido em concreto armado na tubulação de recalque.

A aplicação do revestimento de concreto foi bem sucedida, porém o desgaste do êmbolo do registro inutilizou o seu funcionamento, pois embora fechado permitia a passagem de uma vazão bem superior à vazão de corrente nominal do motor elétrico.

A válvula de pressão, utilizada como registro, demonstrou ótima eficiência, pois sendo de aço inoxidável teve uma durabilidade maior em relação aos registros com rosca feitos em bronze.

4.3. Tubulação

Os desgastes na tubulação foram sensíveis junto à flange de entrada da bomba principal e à flange de saída do registro de gaveta da primeira fase.

A primeira situação foi solucionada com a substituição de parte do trecho da tubulação de sucção, em PVC. Este reparo ocorreu por duas vezes durante todo o período de ensaios.

A segunda foi resolvida periodicamente utilizando-se massa DUREPOXI quando ocorriam as trocas dos registros avariados da primeira fase.

4.4. Voluta ou carcaça da bomba principal

A voluta ou carcaça da bomba principal foi também alvo de elevado desgaste.



Foto 4.02. Válvula de pressão de 2" utilizada como "registro" de controle da vazão da mistura.



Foto 4.03. Registro com rosca revestido em concreto armado, utilizado na segunda fase de ensaios.

No início da primeira fase contava-se com uma bomba já utilizada por COIADO (1989), que funcionou sem problemas até um total de 9 horas de ensaio, quando furou. Houve reparos com solda e a carcaça durou mais 6 horas, e furou novamente, agora em lugar de difícil recuperação.

Trocou-se a primeira bomba por uma segunda, nova, que durou 24 horas, quando furou.

Não houve reparos e adquiriu-se uma terceira bomba que completou a primeira fase com mais 9 horas.

Na segunda fase a carcaça da terceira bomba furou com 5 horas de funcionamento. Houve reparos com solda e massa DUREPOXI. Novamente a carcaça voltou a furar com 6 horas.

Como faltavam ainda 6 horas de funcionamento da segunda fase, e a carcaça da terceira bomba estava sem condições de mais reparos, revestimos internamente a segunda bomba com fibra de vidro em espessura de 3 mm. Porém, tal solução não deu certo, pois a carcaça furou com apenas uma hora de funcionamento.

Faltando 5 horas para completar a segunda fase, resolvemos adotar a mesma solução encontrada para os registros, ou seja, revestir externamente a carcaça da bomba principal com concreto armado.

A Foto (4.04) ilustra a bomba principal nº 3 com a carcaça revestida em concreto armado, e a Foto (4.05) mostra uma vista geral da bomba principal e registro de controle da vazão da mistura revestidos externamente em concreto armado.

As Tabelas (4.01) e (4.02) resumem a primeira e segunda fases, respectivamente, quanto às dificuldades surgidas e soluções práticas encontradas referentes ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio.

4.5. Conclusões

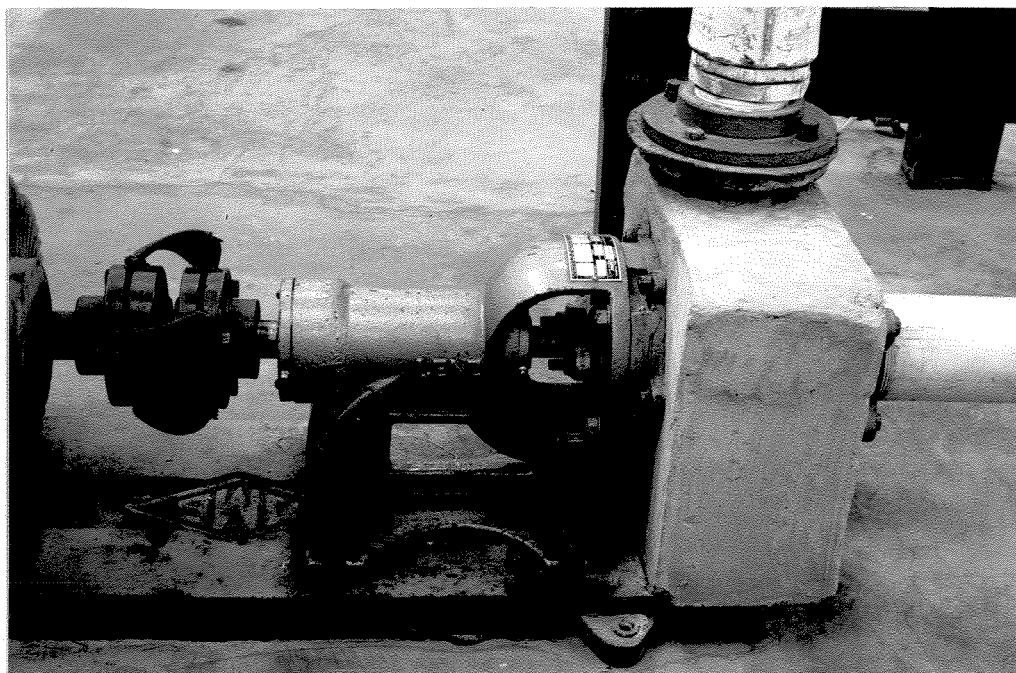


Foto 4.04. Bomba principal com a carcaça revestida em concreto armado (2ª fase de ensaios).

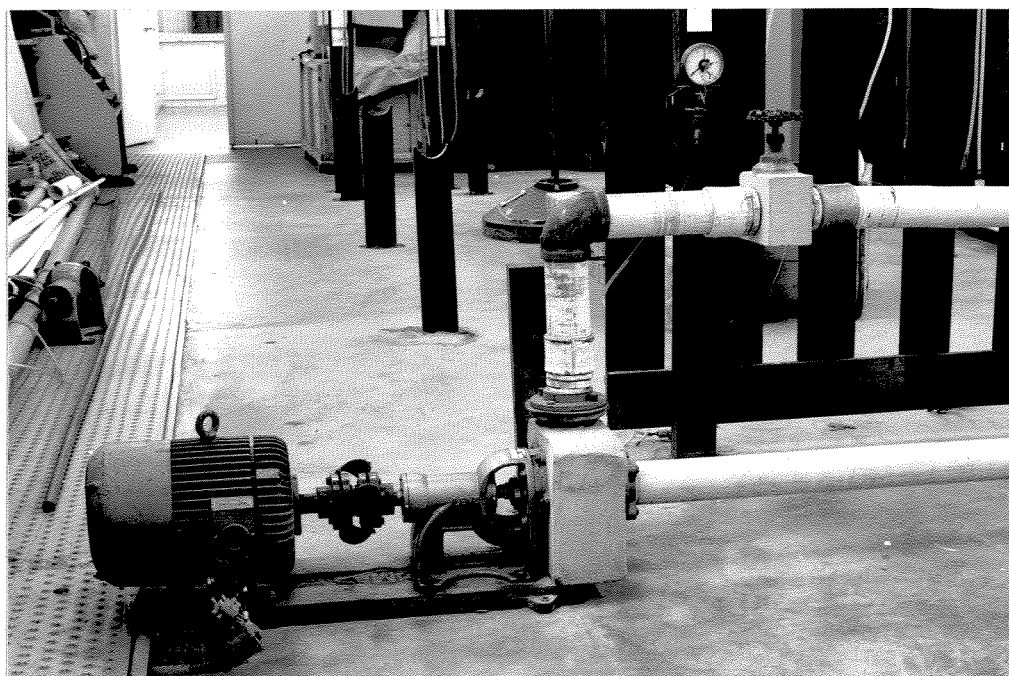


Foto 4.05. Vista geral da bomba principal e registro de controle da vazão da mistura, ambos revestidos em concreto armado.

Tabela 4.01. Dificuldades surgidas e soluções práticas encontradas referentes ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio (1ª FASE)

Fase	Tempo de ensaio (horas)	DIFICULDADES SURGIDAS	SOLUÇÕES PRÁTICAS ENCONTRADAS	Bomba Nº	Registro Nº
1	02h45	O registro nº1 de 3" furou	Recuperação com massa DUREPOXI e inversão do sentido do registro	1	1
1	03h45	O registro nº1 fechado permitia uma vazão superior a $i=26$ A	Troca do registro nº1(3") pelo registro nº2(2 1/2")	1	1
1	05h50	O registro nº2(2 1/2") furou	Recuperação com massa DUREPOXI e inversão do sentido do registro	1	2
1	08h40	A carcaça da bomba nº1 furou	Recuperação do furo com solda e massa DUREPOXI para cobrir imperfeições	1	2
1	09h00	Furo na tubulação de sucção (PVC - 3") junto à flange de sucção da bomba	Troca do trecho horizontal da tubulação de sucção, em PVC	1	2
1	11h00	O registro nº2 fechado permitia uma vazão superior a $i=26$ A	Troca do registro nº2(2 1/2") pelo registro nº3(2")	1	2
1	14h40	O registro nº3(2") furou	Recuperação com massa DUREPOXI	1	3
1	15h00	A carcaça da bomba nº1 furou novamente	Troca da bomba nº1 pela bomba nº2 nova	1	3
1	15h30	O registro nº3 fechado permitia uma vazão superior a $i=26$ A	Troca do registro nº3(2") pelo registro nº4 (2 1/2")	2	3
1	18h35	O registro nº4(2 1/2") furou	Troca do registro nº4(2 1/2") pelo registro nº5(2 1/2")	2	4
1	21h47	O registro nº5(2 1/2") furou	Recuperação com massa DUREPOXI e inversão do sentido do registro	2	5
1	25h55	O registro nº5 fechado permitia uma vazão superior a $i=26$ A	Troca do êmbolo do registro nº5 (2 1/2") pelo êmbolo do nº4(2 1/2")	2	5
1	33h00	A tubulação de recalque furou junto à flange de saída do registro nº5	Recuperação interna com massa DUREPOXI	2	5
1	37h20	O registro nº5(2 1/2") com o êmbolo do registro nº4(2 1/2") fechado permitia uma vazão superior a $i=30$ A	Troca do registro nº5(2 1/2") pelo registro nº6(2 1/2")	2	5
1	39h10	A carcaça da bomba nº2 furou	Troca da bomba nº2 pela bomba nº3 nova	2	6
1	42h00	O registro nº6(2 1/2") apresentava um furo iminente	Recuperação com massa DUREPOXI a cada uma hora	3	6
1	45h30	O registro nº6(2 1/2") furou	Sem condições de recuperação trocou-se o registro nº6(2 1/2") pelo registro nº7(2 1/2" - com rosca)	3	6
1	47h20	O registro nº7(2 1/2" - com rosca) furou	Troca do registro nº7 pelo registro nº8(2 1/2" - com rosca)	3	7

OBS: 1) Tempo total da 1ª fase: 48 horas.

2) Os registros de números 1 a 6 são registros de gaveta com flanges.

Tabela 4.02. Dificuldades surgidas e soluções práticas encontradas referentes ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio (2ª FASE)

Fase	Tempo de ensaio (horas)	DIFICULDADES SURGIDAS	SOLUÇÕES PRÁTICAS ENCONTRADAS	Bomba Nº	Registro Nº
2	00h27	O registro nº9(2 1/2" - rosca) furou	Recuperação externa com chapa de zinco e massa DUREPOXI	3	9
2	00h54	O registro nº9(2 1/2" - rosca) furou novamente	Concretagem externa dos registros 7, 8 e 9 (2 1/2" - com rosca) e 10(3" - com rosca)	3	9
2	02h00	O registro nº8 concretado (2 1/2" - rosca) fechado, permitia uma vazão superior a i=30 A	Troca do registro nº8 pelo registro nº10 concretado(3" - rosca)	3	8
2	02h55	O registro nº10 concretado(3"- rosca) fechado, permitia uma vazão superior a i=34 A	Troca do registro nº10 pelo registro nº9 concretado(2 1/2" - rosca)	3	10
2	03h15	O registro nº9 concretado(2 1/2" - rosca) fechado, permitia uma vazão superior a i=32 A	Troca do registro nº9 pelo registro nº11(Válvula de pressão de 2" - aço inoxidável)	3	9
2	03h45	A bomba nº3 furou junto à flange de sucção	Recuperação com solda e massa DURE - POXI para cobrir as imperfeições	3	11
2	04h30	A bomba nº3 furou na carcaça	Troca da bomba nº3 pela bomba nº1 com a carcaça revestida internamente em fibra de vidro (3 mm)	3	11
2	05h27	A bomba nº1 furou junto à flange de sucção	Recuperação externa com massa DURE - POXI	1	11
2	06h00	A carcaça da bomba nº1 estava na iminência de um novo furo junto à flange de sucção	Concretagem externa da carcaça da bomba nº3 e substituição da bomba nº1 pela bomba nº3 concretada	3	11
2	10h25	O registro nº11(2" - tipo válvula) furou	Troca do registro nº11 pelo registro nº 7 concretado(2 1/2" - com rosca)	3	11

OBS: 1) Tempo total da 2ª fase: 12 horas.
2) Não está incluído o tempo de ensaio de 3 horas do rotor 5.

As soluções práticas encontradas frente ao elevado desgaste dos componentes da bancada de ensaio refletem a necessidade de fabricação de peças mais resistentes, quando utilizadas em instalações de transporte de misturas sólido-líquidas.

Além das bombas especiais, fabricadas especialmente para esse fim, como foi o caso das bombas utilizadas neste trabalho, torna-se importante a existência de peças, tais como registros, que sejam específicos para misturas sólido-líquidas abrasivas, assim como já existem registros especiais para o transporte de misturas corrosivas.

5. CONCLUSÕES

As informações obtidas experimentalmente neste trabalho, referentes a adição de uma poliacrilamida aniônica, nos escoamentos turbulentos de misturas sólido-líquidas ao longo de um conduto forçado, e principalmente no interior de uma bomba centrífuga, mostram que o uso apropriado dessa substância, além de ser uma alternativa para a redução da energia necessária para os casos práticos de bombeamento é também uma alternativa para a redução do desgaste abrasivo dos componentes internos das bombas centrífugas.

Neste trabalho, onde fixamos nosso estudo na redução do desgaste abrasivo do rotor da bomba, as informações consideradas mais importantes são sintetizadas nas seguintes conclusões:

1) Primeira fase : $C_v \sim 7,0\%$ V.M.

- Para um período de ensaio de 12 horas, sem ou com polímero, o desgaste parcial foi maior nas 3 primeiras horas, diminuindo até 9 horas e voltando a aumentar no período de 9 a 12 horas, com exceção dos ensaios com $C_p = 600$ ppm.

- Após as 3 primeiras horas de ensaio, sem ou com polímero, o rotor adquiriu um formato hidrodinâmico, que foi responsável pelo decréscimo do desgaste até 9 horas de ensaio. Após esse período, até o final de 12 horas, o rotor foi perdendo esse formato hidrodinâmico, e o desgaste voltou a crescer, com exceção dos ensaios com $C_p = 600$ ppm.

- A perda do formato hidrodinâmico do rotor é retardada em pelo menos 25% do tempo total de ensaio, quando a concentração do polímero é 600 ppm, aumentando a sua vida útil.

- Com a adição do polímero em concentrações de 200, 400 e 600 ppm, verificou-se maiores reduções do valor do desgaste acumulado no período de 0 a 3 horas de ensaio, devido ao próprio desgaste ser maior nesse intervalo. A redução nesse período, para concentrações de polímero de 200, 400 e 600 ppm, foram, respectivamente 23,6%, 33,1% e 40,9% .

- As reduções do desgaste foram maiores para concentrações de polímero igual a 600 ppm, em todo o período de ensaio de 12 horas.

- As variações máximas das reduções do desgaste acumulado ocorreram para concentrações do polímero inferiores a 400 ppm no período de 0 a 6 horas, e para concentrações entre 400 e 600 ppm no período de 6 a 12 horas.

2) Segunda fase : $C_v \sim 13,0\%$ V.M.

- Com o aumento da concentração de areia, sem a adição do polímero, houve uma redução do desgaste, devida à diminuição da turbulência no escoamento, reduzindo o impacto das partículas contra o rotor.

- Com a adição do polímero à mistura água-areia em concentração de 600 ppm, ocorreu um aumento da porcentagem de redução do desgaste acumulado em relação à mesma concentração de polímero com $C_v \sim 7,0\%$ V.M. da primeira fase. Isso deveu-se a um efeito conjunto das reduções do desgaste devidas ao aumento da concentração de areia e ao polímero.

3) Considerações gerais

- A evolução do desgaste não depende da concentração de areia, isto é, tanto para $C_v \sim 7,0\%$ V.M. como para $C_v \sim 13,0\%$ V.M., o desgaste é maior no início, diminuindo com o tempo por causa do formato hidrodinâmico adquirido, até o ponto de mínimo desgaste. Após esse instante, o desgaste volta a aumentar devido ao início da perda do formato hidrodinâmico, até a inutilização completa do rotor.

- O ajuste matemático aos dados determinou um polinômio de grau 3 como a curva que melhor descreveu o fenômeno do desgaste acumulado, assim como estabeleceu uma tendência após o período de ensaio estudado.

- O ponto de inflexão das curvas ajustadas definiu, matematicamente, o ponto de mínimo desgaste.

- A melhor concentração de polímero para a mistura água-areia foi 600 ppm.

- A melhor concentração de areia, considerando-se somente o efeito do desgaste, foi $C_v \sim 13,0\%$ V.M..

- A solução água-polímero nas concentrações estudadas, antes da sua utilização nos ensaios, é pouco biodegradável.

- As dificuldades surgidas com relação ao desgaste dos componentes da bancada de ensaio durante o período estudado, definiram soluções práticas bastante eficientes, retardando a inutilização e reduzindo custos.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como o desgaste abrasivo está sempre presente em sistemas que transportam misturas sólido-líquidas sugere-se que mais estudos sobre formas de redução desse tipo de desgaste existam para minimizar ainda mais os custos de manutenção.

Algumas sugestões são dadas à seguir:

- Realizar um levantamento de vários polímeros aniônicos utilizados na redução do arraste, e classificá-los de acordo com a sua eficiência na redução do desgaste abrasivo.

- Estudar o formato hidrodinâmico ideal para os rotores, através do desgaste por abrasão, verificando sua influência nas curvas características de uma bomba centrífuga.

- Realizar estudos comparativos entre o custo do polímero e o custo de manutenção das instalações de recalque de misturas sólido-líquidas.

- Estudar o efeito da vazão sobre as formas do desgaste abrasivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. AILOR, W.H. Handbook on corrosion testing and evaluation. N.Y., John Wiley and Sons, 1971.
02. ALLINGER, N.L. et alii Polímeros especiais. In: ALLINGER, N.L. et alii. Química orgânica. 2.ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S.A., 1978. cap.24, p.610-20.
03. AUGUSTO, S.S. Ensaaios mecânicos de materiais metálicos. 4.ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 1974. p.85-87.
04. BARKER, M.L. & TRUSCOTT, G.F. The development and operation of a test facility for pipeline abrasive wear measurement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 3., 1974. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1974. Paper J3.
05. BREE, S.E.M. The abrasion behavior of materials for dredger components, due to sand/water mixtures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DREDGING TECHNOLOGY, 1., Canterbury, 1975. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1975. Paper G3, p.35-57.

06. BREE, S.E.M. et alii On the erosion resistance in water-sand mixtures of steels for application in slurry pipelines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 8., Johannesburg, 1982. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1982. Paper C3, p.161-80.
07. CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) - Método da Diluição (20°C, 5 dias), Normalização Técnica L5.120, 1ª ed., São Paulo, 1978.
08. CHANDLER, R.W. & LEWIS, W.R. Control of sewer overflows by polymer injection, Dallas Water Utilities-Bachman Creek Project. U.S. Environmental Protection Agency, Report: EPA-600/2-77-189, sept., 1977.
09. COIADO, E.M. Escoamento de misturas sólido-líquidas através de condutos forçados: Aplicação às instalações de recalque. São Paulo, 1985. 503 p. (Doutorado - Escola Politécnica da USP)
10. COIADO, E.M. Redução da energia consumida por uma instalação de recalque através da adição de polímeros. Campinas, 1989. 179 p. (Livre Docência - Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP)
11. DEBRECZENI, E. et alii Measurement methods in a experimental rig for hydraulic transport. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 5., Hannover, 1978. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1978. Paper G1, p.1-20.

12. DORN, W.S. & McCracken, D.D. Aproximações de mínimos quadrados. In: DORN, W.S. & McCracken, D.D.. Cálculo numérico com estudos de casos em fortran IV. Rio de Janeiro, Editora da Universidade de São Paulo, 1978. cap.7, p.401-59.
13. FADDICK, R.R. Pipeline wear from abrasive slurries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERNAL AND EXTERNAL PROTECTION OF PIPE, 1., Durham, 1975. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1975. Paper G3, 9p.
14. FORESTER, R.H. et alii Effects of polymer addition on friction in a 10-inch diameter pipe. Journal of Hydraulics, 3: 59-62, jan. 1969.
15. GUY, A.G. Ciência dos materiais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1980.
16. HEROD, J.E. & TIEDERMAN, W.G. Drag reduction in dredge-spoil pipe flow. Journal of the Hydraulic Division, 100 (12): 1863-66, dec. 1974.
17. HUGGETT, P.G. & WALKER, C.I. Development of a water test to simulate slurry erosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 11., Stratford-upon-Avon, 1988. Proceedings. Cranfield, BHRA The Fluid Engineering Centre, 1988. Paper K1, p.495-506.
18. HULL, D.H. Polymer helps "overflows" go down the drain. Water and Wastes Engineering, 55-66, may 1978.
19. IKEDA, Y. et alii Development and wear test of new polyurethane-lined linepipe for slurry transportation.

- In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 10., Innsbruck, 1986. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1986. Paper G4, p.247-58.
20. JACOBS, B.E.A. The measurement of wear rates in pipes carrying abrasive slurries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 8., Johannesburg, 1982. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1982. Paper C2, p.145-60.
21. JACOBS, B.E.A. & BOOTHROYDE, J. Pipe wear testing. Cranfield, U.K., BHRA Fluid Engineering, 1977. (Report PR, 1448)
22. JAMES, J.G. & BROAD, B.A. Wear in slurry pipelines: experiments with 38 mm diameter specimens in a closed-loop test rig. England, Department of the Environment Department of Transport, 1983. 34 p. (TRRL Supplementary Report, 77)
23. KAWASHIMA, T. et alii Wear of pipes for hydraulic transport of solids. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 5., Hannover, 1978. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1978. Paper E3, p.25-44.
24. KILLEN, J.M. & ALMO, J. Experimental study of the effects of dilute solutions of polymer additives on boundary layer characteristics. New York, Plenum Press, 1961. p.447-461.
25. KOLAR, V. et alii, Experiments with a drag reduction polymer in an ash-slag hydrotransport pipeline. Journal of Hydraulic Research, 26: 143-48, sept. 1988.

26. MANNESMANNROHREN-WERKE AG Pipeline transportation of solid-liquids. Dusseldorf, 1979. 11p.
27. McCOMB, W.D. & CHAN, K.T.J. Laser-Doppler anemometer measurements of turbulent structure in drag-reduction fibre suspensions. Journal of Fluid Mechanic, 152: 455-78, aug. 1984.
28. METCALF & EDDY, INC. Wastewater characteristics. In: METCALF & EDDY, INC.. Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse. 2nd ed. Boston, McGraw-Hill Book Company, 1979. cap.3, p.56-118.
29. METZNER, A.B. Polymer solution and fiber suspension rheology and their relationship to turbulent drag-reduction. Ph Fluids, 26: 145-49, 1977.
30. MURAKAMI, S. et alii Wear test of pipe linings for hydraulic transport of dam deposit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 7., Sendai, 1980. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1980. Paper H2, p.315-30.
31. NGUYEN, V.T. & SAEZ, F. Design of pipeline for a highly abrasive and corrosive slurry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 6., Canterbury, 1979. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1979. Paper H2, p.367-78.
32. POREH, M. et alii Drag reduction in hydraulic transport of solids. Journal of the Hydraulic Division, 96(4): 903-909, apr. 1970.
33. PROVENZA, F. Projeto de máquinas. São Paulo, Escola Pro-Tec, 1978. p.3-76.

34. SASIC, M. & MARJANOVIC, P. On the methods for calculation of hydraulic transport and their reliability in practice. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 5., 1978. Proceedings. Cranfield, BHRA Fluid Engineering, 1978. Paper A5, p.61-76.
35. SELLIN, R.H. & HOYT, J.T. The effect of drag reduction additives on fluid flows and their industrial applications. Part 1: Basics aspects. Journal of Hydraulic Research, 20(1): 29-68, 1982.
36. SELLIN, R.H.J. et alii The effect of drag reduction additives on fluid flows and their industrial applications. Part 2: Present applications and future proposals. Journal of Hydraulic Research, 20(3): 235-91, 1982.
37. SEYER, F.A. & METZNER, A.B. Turbulent phenomena in drag reduction systems. Journal of Chemical Engineering, 15(3): 426-34, 1969.
38. STEWARD, N.R. & HECKROODT, R.O. Polyurethane as a wear resistant material in slurry handling applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 11., Stratford, 1988. Proceedings. Cranfield, BHRA The Fluid Engineering Centre, 1988. Paper K3, p.523-30.
39. SWAN, J.D. et alii Corrosion control achieved on coal slurry pipeline. Materials protection, 2(9): 26-34, sept. 1963.
40. TRUSCOTT, G.E. A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery. Wear, (20): 29-50, 1972.

41. WIEDENROTH, W. Transportation problems of sand-water mixtures in pipelines and centrifugal pumps. World Dredging & Marine Construction, 21-29, oct. 1971.
42. WIEDENROTH, W. Wear of solids handling centrifugal pump impellers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SOLIDS IN PIPES, 11., Stratford, 1988. Proceedings. Cranfield, BHRA The Fluid Engineering Centre, 1988. Paper K2, p.507-22.
43. WILSON, G. Construction of solids handling pumps. New York, McGraw-Hill, 1976. p.251-59.

APENDICES

APÊNDICE 1

DADOS DA VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DA MISTURA AGUA-A-
REIA E AGUA-AREIA-POLÍMERO - PRIMEIRA FASE

ENSAIO Nº 01 | ROTOR Nº 01 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 12/02/90 | PERÍODO: 0 a 3 hs |

| XI ÁGUA E AREIA | | XI 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| | ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 0 ppm

Nº	X	t	T	γ_a	Pv	Pc	P	x	Qm	γ_m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	70,20	50,66	28,0	996,26	86,30	264,50	178,20	157,19	3,10	1133,66	8,14	24	
02	66,10	24,60	30,0	995,67	86,50	254,80	168,30	149,41	6,07	1126,43	7,56	26	
03	67,50	23,90	31,0	995,36	86,70	257,00	170,30	152,07	6,36	1119,88	7,56	26	
04	68,10	21,47	31,0	995,36	86,70	257,60	170,90	153,21	7,14	1115,46	6,98	30	
05	67,20	25,63	32,5	994,89	86,70	257,20	170,50	151,50	5,91	1125,41	7,56	26	
06	65,90	23,12	33,5	994,56	86,80	254,00	167,20	149,03	6,45	1121,90	7,56	26	
07	67,20	29,00	35,0	994,06	86,90	256,50	169,60	151,50	5,22	1119,47	7,51	26	
08	67,50	26,32	37,0	993,36	86,70	256,40	169,70	152,07	5,78	1115,93	6,94	28	
09	66,90	21,81	37,0	993,36	86,80	254,90	168,10	150,93	6,92	1113,76	6,94	26	
10	68,80	32,31	29,0	995,96	86,70	259,40	172,70	154,53	4,78	1117,58	7,10	24	230
11	66,40	24,41	30,0	995,67	86,80	254,80	168,00	149,98	6,14	1120,15	7,26	26	230
12	68,50	21,50	31,0	995,36	86,70	257,80	171,10	153,96	7,16	1111,33	6,76	28	230
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													

Qm = | 5,92 | Cv = | 7,32 |

ENSAIO N° 02 | ROTOR N° 01 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 28/03/90 | PERÍODO: 3 a 6 hs |

| XI ÁGUA E AREIA | | XI 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| | ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | | 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 0 ppm

N°	X	t	T	γ_a	Pv	Pc	P	x	Qm	γ_m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m³	%	A	V
01	71,30	28,40	26,0	996,81	86,50	262,50	176,00	159,28	5,61	1105,01	6,32	26	230
02	71,80	24,75	27,0	996,54	86,60	262,50	175,90	160,22	6,47	1097,84	5,91	26	230
03	73,20	24,28	28,5	996,11	86,60	266,60	180,00	162,88	6,71	1105,12	6,36	26	230
04	74,10	27,31	29,5	995,82	86,60	268,80	182,20	164,59	6,03	1107,03	6,49	26	230
05	73,30	27,47	30,5	995,52	86,70	267,80	181,10	163,07	5,94	1110,58	6,71	26	230
06	73,10	28,01	31,5	995,21	86,80	269,00	182,20	162,69	5,81	1119,93	7,27	26	230
07	73,00	27,50	32,5	994,89	86,90	268,10	181,20	162,50	5,91	1115,08	7,01	26	230
08	74,00	25,72	33,5	994,57	86,90	270,10	183,20	164,40	6,39	1114,39	6,98	26	230
09	74,60	27,87	34,5	994,23	86,90	272,50	185,60	165,53	5,94	1121,23	7,40	26	230
10	73,50	26,71	35,5	993,89	87,00	270,00	183,00	163,45	6,12	1119,63	7,33	26	230
11	73,80	28,31	36,5	993,54	86,70	269,10	182,40	164,02	5,79	1112,09	6,91	26	230
12	71,20	27,65	27,5	996,40	86,70	264,80	178,10	159,09	5,75	1119,53	7,19	26	230
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													

$\bar{Q}_m = 1 \quad 6,04 \quad | \quad \bar{C}_v = 1 \quad 6,82 \quad |$

ENSAIO Nº 05		I ROTOR Nº 02		RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS									
DATA: 20/02/90		I PERÍODO: 0 a 3 hs											
I I ÁGUA E AREIA		I I XI 1ª Fase		Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³									
I XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO		I I 2ª Fase		Concentração de polímero (Cp): 200 ppm									
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	64,30	19,19	29,0	995,96	86,50	250,70	164,20	146,00	7,61	1124,67	7,51	26	230
02	68,80	19,72	30,0	995,67	86,50	257,80	171,30	154,53	7,84	1108,49	6,58	28	230
03	68,20	23,22	30,0	995,67	86,50	262,50	176,00	153,40	6,61	1147,36	8,85	26	230
04	67,40	25,75	29,0	995,96	86,50	259,50	173,00	151,88	5,90	1139,06	8,35	24	230
05	67,90	22,85	30,0	995,67	86,50	257,70	171,20	152,83	6,69	1120,22	7,27	26	230
06	68,80	20,66	30,0	995,67	86,80	258,70	171,90	154,53	7,48	1112,37	6,81	26	230
07	68,70	20,53	31,0	995,36	86,80	260,00	173,20	154,34	7,52	1122,17	7,40	26	230
08	70,00	25,16	32,0	995,05	86,80	260,40	173,60	156,81	6,23	1107,08	6,53	26	230
09	69,90	26,40	33,0	994,73	86,90	262,00	175,10	156,62	5,93	1117,99	7,19	26	230
10	68,80	26,00	33,0	994,73	86,90	260,00	173,10	154,53	5,94	1120,14	7,31	26	230
11	68,20	25,18	29,0	995,96	86,90	263,50	176,60	153,40	6,09	1151,27	9,06	26	230
12	69,50	24,44	30,0	995,67	87,50	265,50	178,00	155,86	6,38	1142,05	8,54	26	230
13	68,80	23,00	30,0	995,67	87,50	263,00	175,50	154,53	6,72	1135,70	8,17	26	230
14	69,10	25,00	31,0	995,36	86,90	261,80	174,90	155,10	6,20	1127,66	7,72	26	230
15	68,20	27,12	32,0	995,05	87,00	258,80	171,80	153,40	5,66	1119,98	7,28	26	230
16	68,50	31,91	33,0	994,73	87,00	260,00	173,00	153,97	4,83	1123,63	7,51	24	230
17													
18													
19													
20													
Q _m = 6,48										Cv = 7,63			

ENSAIO Nº 08				ROTOR Nº 02									
DATA: 28/05/90				PERÍODO: 9 a 12 hs									
ÁGUA E AREIA				XI 1ª Fase				Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³					
XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO				2ª Fase				Concentração de polímero (Cp): 200 ppm					
Nº	X	t	T	Y _d	Pv	Pc	P	x	Qm	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	73,50	21,63	21,0	998,02	86,40	271,60	185,20	163,45	7,56	1133,09	7,89	26	230
02	72,80	20,98	22,0	997,80	86,40	267,90	181,50	162,12	7,73	1119,54	7,11	26	230
03	73,80	19,36	23,0	997,56	86,50	271,10	184,60	164,02	8,47	1125,50	7,47	26	230
04	74,60	19,12	23,5	997,44	86,70	270,70	184,00	165,53	8,66	1111,56	6,66	26	230
05	74,50	20,88	24,5	997,20	86,80	270,90	184,10	165,34	7,92	1113,44	6,79	26	230
06	74,10	19,71	25,0	997,07	86,90	269,50	182,60	164,59	8,35	1109,46	6,56	26	230
07	73,30	19,91	21,5	997,91	86,30	271,50	185,20	163,07	8,19	1135,72	8,05	26	230
08	73,50	19,62	22,0	997,80	86,60	269,60	183,00	163,45	8,33	1119,63	7,12	26	230
09	74,40	19,02	23,0	997,56	86,70	272,30	185,60	165,15	8,68	1123,80	7,37	26	230
10	74,50	18,90	24,0	997,32	87,00	270,90	183,90	165,34	8,75	1112,23	6,71	26	230
11	73,50	20,20	25,0	997,07	87,00	268,50	181,50	163,45	8,09	1110,45	6,62	26	230
12	72,70	17,89	26,0	996,81	87,00	267,00	180,00	161,93	9,05	1111,59	6,70	26	230
13	72,20	19,46	22,0	997,80	86,40	269,80	183,40	160,98	8,27	1139,26	8,26	26	230
14	73,30	19,34	22,5	997,68	86,50	269,20	182,70	163,07	8,43	1120,39	7,17	26	230
15	73,30	19,29	23,5	997,44	86,80	269,70	182,90	163,07	8,45	1121,62	7,25	26	230
16	73,10	17,25	24,0	997,32	86,60	268,90	182,30	162,69	9,43	1120,54	7,19	26	230
17	72,50	16,80	25,0	997,07	86,90	265,40	178,50	161,55	9,62	1104,91	6,30	26	230
18	71,20	15,88	26,0	996,81	87,00	262,50	175,50	159,09	10,02	1103,18	6,21	26	230
19													
20													
Q _m = 8,56										Cv = 7,08			

ENSAIO Nº 09		I ROTOR Nº 03		RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS									
DATA: 22/02/90		I PERÍODO: 0 a 3 hs											
I ÁGUA E AREIA		I XI 1ª Fase		Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³									
I XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO		I 2ª Fase		Concentração de polímero (Cp): 400 ppm									
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	65,40	22,40	29,0	995,96	86,50	255,80	169,30	148,09	6,61	1143,25	8,59	26	230
02	66,40	22,69	30,0	995,67	86,50	257,40	170,90	149,98	6,61	1139,47	8,39	26	230
03	68,50	29,84	30,0	995,67	86,60	262,00	175,40	153,97	5,16	1139,22	8,37	24	230
04	68,10	24,81	31,0	995,36	86,80	260,50	173,70	153,21	6,18	1133,77	8,07	26	230
05	68,10	23,47	31,0	995,36	87,00	260,40	173,40	153,21	6,53	1131,81	7,96	26	230
06	67,00	23,50	32,0	995,05	86,90	257,70	170,80	151,12	6,43	1130,23	7,88	26	230
07	68,40	26,56	30,0	995,67	86,90	261,10	174,20	153,78	5,79	1132,82	8,00	26	230
08	68,20	25,69	31,0	995,36	87,00	261,40	174,40	153,40	5,97	1136,93	8,26	26	230
09	69,30	24,94	31,0	995,36	87,20	263,40	176,20	155,48	6,23	1133,25	8,04	26	230
10	67,70	23,47	32,0	995,05	87,00	258,60	171,60	152,45	6,50	1125,63	7,61	26	230
11	68,60	23,19	32,0	995,05	87,10	259,20	172,10	154,15	6,65	1116,41	7,08	26	230
12	68,30	26,31	33,0	994,73	87,10	258,50	171,40	153,59	5,84	1115,99	7,07	26	230
13	66,90	27,43	30,0	995,67	86,80	256,20	169,40	150,93	5,50	1122,37	7,39	26	230
14	67,80	27,07	31,0	995,36	87,10	257,40	170,30	152,64	5,64	1115,72	7,02	26	230
15	68,80	24,54	32,0	995,05	87,00	260,00	173,00	154,53	6,30	1119,50	7,26	26	230
16	69,10	24,06	32,0	995,05	87,00	260,10	173,10	155,10	6,45	1116,04	7,06	26	230
17	65,00	23,03	29,0	995,96	86,40	250,70	164,30	147,33	6,40	1115,21	6,96	26	230
18	67,80	23,66	29,0	995,96	86,70	256,70	170,00	152,64	6,45	1113,75	6,87	26	230
19	67,20	22,69	30,0	995,67	86,70	255,70	169,00	151,50	6,68	1115,52	6,99	26	230
20													
										Q _m = 6,20			
										Cv = 7,62			

ENSAIO Nº 11 | ROTOR Nº 03 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 09/05/90 | PERÍODO: 6 a 9 hs |

| | ÁGUA E AREIA | | XI 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| | XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | I 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 400 ppm

Nº	X	t	T	γ_d	Pv	Pc	P	x	Qm	γ_m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	z	A	V
01	71,50	22,99	25,0	997,07	86,80	267,20	180,40	159,65	6,95	1129,94	7,76	26	230
02	72,30	23,37	25,5	996,94	87,00	269,70	182,70	161,17	6,90	1133,58	7,98	26	230
03	72,00	22,70	26,0	996,81	86,90	267,20	180,30	160,60	7,08	1122,65	7,35	26	230
04	71,50	23,15	27,0	996,54	86,90	265,90	179,00	159,65	6,90	1121,17	7,27	26	230
05	72,10	22,94	28,0	996,26	87,00	265,80	178,80	160,79	7,01	1112,00	6,75	26	230
06	72,40	22,75	28,5	996,11	86,80	266,60	179,80	161,36	7,09	1114,27	6,89	26	230
07	71,20	19,21	25,0	997,07	86,50	264,90	178,40	159,09	8,28	1121,41	7,26	26	230
08	72,40	20,72	26,0	996,81	86,60	270,30	183,70	161,36	7,79	1138,44	8,27	26	230
09	73,10	19,33	26,5	996,68	86,70	269,70	183,00	162,69	8,42	1124,85	7,48	26	230
10	72,40	20,21	27,0	996,54	86,90	266,70	179,80	161,36	7,98	1114,27	6,87	26	230
11	71,80	19,04	28,0	996,26	87,00	265,10	178,10	160,22	8,42	1111,58	6,73	28	230
12	72,10	19,55	29,0	995,96	86,80	263,50	176,70	160,79	8,23	1098,94	6,01	28	230
13	72,50	20,39	23,5	997,44	86,40	267,90	181,50	161,55	7,92	1123,48	7,36	26	230
14	70,80	22,07	24,5	997,20	86,50	265,20	178,70	158,33	7,17	1128,68	7,68	26	230
15	73,90	21,94	25,0	997,07	86,70	270,30	183,60	164,21	7,48	1118,11	7,07	26	230
16	72,90	20,95	26,0	996,81	86,40	264,90	178,50	162,31	7,75	1099,75	6,01	26	230
17	71,30	21,23	26,0	996,81	86,80	262,80	176,00	159,28	7,50	1105,01	6,32	26	230
18	73,50	21,34	27,0	996,54	86,70	268,10	181,40	163,45	7,66	1109,84	6,61	26	230
19	72,70	20,17	28,0	996,26	86,90	265,30	178,40	161,93	8,03	1101,71	6,15	26	230
20													

$\bar{Q}_m = 7,61$ | $\bar{C}_v = 7,04$ |

ENSAIO Nº 14 | ROTOR Nº 04 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 02/05/90 | PERÍODO: 3 a 6 hs |

| | ÁGUA E AREIA | | XI 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 600ppm

Nº	X	t	T	γ_a	Pv	Pc	P	x	Qm	γ_m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	71,00	23,12	25,5	996,94	86,90	263,30	176,40	158,71	6,86	1111,49	6,71	26	230
02	71,10	21,48	26,0	996,81	86,80	266,20	179,40	158,90	7,40	1129,04	7,72	26	230
03	71,70	20,35	27,0	996,54	86,80	270,20	183,40	160,03	7,86	1146,01	8,72	26	230
04	72,50	22,99	28,0	996,26	86,90	269,90	183,00	161,55	7,03	1132,77	7,97	26	230
05	72,30	21,94	28,0	996,26	87,00	269,50	182,50	161,17	7,35	1132,34	7,94	26	230
06	71,40	22,75	25,5	996,94	86,60	267,00	180,40	159,47	7,01	1131,28	7,84	26	230
07	71,30	21,66	26,0	996,81	86,80	268,00	181,20	159,28	7,35	1137,66	8,22	26	230
08	71,20	21,13	26,5	996,68	86,60	269,30	182,70	159,09	7,53	1148,44	8,85	26	230
09	70,40	22,55	27,0	996,54	86,90	266,10	179,20	157,57	6,99	1137,29	8,21	26	230
10	71,30	20,77	28,0	996,26	86,90	266,40	179,50	159,28	7,67	1126,98	7,63	26	230
11	71,20	22,39	29,0	995,96	86,90	266,30	179,40	159,09	7,11	1127,70	7,69	26	230
12	72,80	21,83	29,5	995,82	87,10	269,60	182,50	162,12	7,43	1125,71	7,58	26	230
13	71,60	22,26	24,0	997,32	86,40	266,90	180,50	159,84	7,18	1129,23	7,70	26	230
14	72,50	22,79	24,5	997,20	86,60	270,10	183,50	161,55	7,09	1135,86	8,10	26	230
15	71,20	22,01	25,5	996,94	86,80	267,00	180,20	159,09	7,23	1132,73	7,93	26	230
16	71,80	21,64	26,0	996,81	86,60	266,70	180,10	160,22	7,40	1124,06	7,43	26	230
17	70,80	21,04	27,0	996,54	86,60	264,90	178,30	158,33	7,53	1126,15	7,56	26	230
18	71,60	22,53	28,0	996,26	86,90	265,90	179,00	159,84	7,10	1119,84	7,21	26	230
19	72,10	22,48	28,5	996,11	86,90	267,40	180,50	160,79	7,15	1122,57	7,38	26	230

20

$\bar{Q}_m = | 7,28 |$ $\bar{C}_v = | 7,81 |$

ENSAIO Nº 15

| ROTOR Nº 04 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 16/07/90

| PERÍODO: 6 a 9 hs |

| | ÁGUA E AREIA

| | XI 1ª Fase

| Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO

| | 2ª Fase

| Concentração de polímero (Cp): 600 ppm

Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	75,20	20,84	20,0	998,23	86,10	278,20	192,10	166,67	8,00	1152,57	9,02	26	230
02	74,00	19,83	21,0	998,02	86,30	278,20	191,90	164,40	8,29	1167,31	9,89	26	230
03	73,30	20,15	22,0	997,80	86,60	277,50	190,90	163,07	8,09	1170,68	10,10	26	230
04	72,10	20,04	22,5	997,68	86,70	273,50	186,80	160,79	8,02	1161,75	9,58	26	230
05	73,80	21,15	23,5	997,44	86,50	275,00	188,50	164,02	7,76	1149,28	8,87	26	230
06	73,40	21,60	24,0	997,32	86,70	273,20	186,50	163,26	7,56	1142,36	8,47	26	230
07	75,90	22,32	20,0	998,23	86,40	277,00	190,60	168,00	7,53	1134,53	7,96	26	230
08	74,50	21,53	21,0	998,02	86,30	276,10	189,80	165,34	7,68	1147,91	8,76	26	230
09	74,30	21,59	22,0	997,80	86,60	272,60	186,00	164,96	7,64	1127,52	7,58	26	230
10	73,30	19,68	22,5	997,68	86,40	271,10	184,70	163,07	8,29	1132,66	7,88	26	230
11	73,70	18,66	23,0	997,56	86,70	271,10	184,40	163,83	8,78	1125,58	7,48	28	230
12	74,20	22,19	24,0	997,32	86,70	271,50	184,80	164,78	7,43	1121,53	7,25	26	230
13	75,50	20,08	21,0	998,02	86,60	273,50	186,90	167,24	8,33	1117,56	6,98	26	230
14	75,10	20,31	21,5	997,91	86,70	275,60	188,90	166,48	8,20	1134,66	7,99	26	230
15	72,60	17,45	22,5	997,68	87,00	265,50	178,50	161,74	9,27	1103,62	6,19	28	230
16	73,50	17,66	23,5	997,44	86,80	267,80	181,00	163,45	9,26	1107,39	6,42	28	230
17	72,70	18,60	24,0	997,32	86,50	265,70	179,20	161,93	8,71	1106,65	6,38	26	230
18	73,40	18,55	25,0	997,07	86,50	267,00	180,50	163,26	8,80	1105,61	6,34	26	230
19													
20													

Q_m = | 8,20 | Cv = | 7,95 |

ENSAIO Nº 16				ROTOR Nº 04				RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS					
DATA: 19/07/90				PERÍODO: 9 a 12 hs									
ÁGUA E AREIA				XI 1ª Fase				Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³					
XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO				2ª Fase				Concentração de polímero (Cp): 600 ppm					
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	74,50	19,29	21,0	998,02	86,50	269,40	182,90	165,34	8,57	1106,18	6,32	26	230
02	73,80	18,26	22,0	997,80	86,70	271,10	184,40	164,02	8,98	1124,28	7,39	26	230
03	74,10	18,20	23,0	997,56	86,80	271,60	184,80	164,59	9,04	1122,82	7,31	26	230
04	75,00	20,08	21,0	998,02	86,40	269,50	183,10	166,29	8,28	1101,08	6,02	26	230
05	74,20	19,01	21,5	997,91	86,80	272,00	185,20	164,78	8,67	1123,96	7,36	26	230
06	74,00	18,24	22,0	997,80	86,70	270,50	183,80	164,40	9,01	1118,04	7,02	26	230
07	72,60	17,41	22,5	997,68	86,50	268,80	182,30	161,74	9,29	1127,12	7,56	26	230
08	74,70	17,00	23,5	997,44	86,90	273,90	187,00	165,72	9,75	1128,39	7,65	26	230
09	73,10	16,26	24,5	997,20	87,20	269,10	181,90	162,69	10,01	1118,08	7,06	26	230
10	72,50	16,13	25,0	997,07	87,00	267,50	180,50	161,55	10,02	1117,29	7,02	26	230
11	72,20	17,29	26,0	996,81	87,10	266,90	179,80	160,98	9,31	1116,90	7,01	26	230
12	75,10	17,32	21,5	997,91	87,20	272,70	185,50	166,48	9,61	1114,23	6,79	26	230
13	74,20	17,24	22,5	997,68	87,20	271,90	184,70	164,78	9,56	1120,92	7,20	26	230
14	73,90	17,08	23,5	997,44	87,10	271,50	184,40	164,21	9,61	1122,98	7,33	26	230
15	75,30	19,07	19,0	998,43	86,40	273,20	186,80	166,86	8,75	1119,49	7,07	26	230
16	74,60	18,07	20,0	998,23	86,50	271,70	185,20	165,53	9,16	1118,81	7,04	26	230
17	75,00	17,43	20,5	998,13	86,80	273,30	186,50	166,29	9,54	1121,52	7,21	26	230
18	73,40	16,58	21,5	997,91	86,60	269,00	182,40	163,26	9,85	1117,25	6,97	26	230
19													
20													
Q _m = 1 9,28										Cv = 1 7,07			

APÊNDICE 2

DADOS DA VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS DA MISTURA AGUA-A-
REIA E AGUA-AREIA-POLÍMERO - SEGUNDA FASE

ENSAIO Nº 17		I ROTOR Nº 05											
DATA: 06/08/90		I PERÍODO: 0 a 3 hs		RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS									
I XI ÁGUA E AREIA		I I 1ª Fase		Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³									
I I ÁGUA-AREIA-POLÍMERO		I XI 2ª Fase		Concentração de polímero (Cp): 0 ppm									
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	75,10	38,51	19,0	998,43	86,30	292,50	206,20	166,48	4,32	1238,57	14,03	26	230
02	74,80	37,12	20,0	998,23	86,40	289,40	203,00	165,91	4,47	1223,53	13,16	26	230
03	75,80	36,84	21,5	997,91	86,40	288,30	201,90	167,81	4,56	1203,15	11,99	26	230
04	75,20	43,05	20,5	998,13	86,50	291,70	205,20	166,67	3,87	1231,17	13,61	26	230
05	74,80	41,74	21,0	998,02	86,50	290,70	204,20	165,91	3,98	1230,77	13,60	26	230
06	76,10	40,63	23,0	997,56	86,50	292,30	205,80	168,38	4,14	1222,25	13,12	26	230
07	75,50	38,88	24,0	997,32	86,60	290,10	203,50	167,24	4,30	1216,81	12,82	26	230
08	74,80	37,17	25,5	996,94	86,50	287,80	201,30	165,91	4,46	1213,29	12,63	26	230
09	74,70	36,02	26,5	996,68	86,80	287,00	200,20	165,72	4,60	1208,04	12,34	26	230
10	74,90	36,46	27,5	996,40	87,00	287,70	200,70	166,10	4,56	1208,29	12,37	26	230
11	75,70	37,34	28,5	996,11	87,00	288,80	201,80	167,62	4,49	1203,91	12,12	26	230
12	75,50	35,59	29,5	995,82	86,80	287,70	200,90	167,24	4,70	1201,27	11,99	26	230
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
Q _m = 4,37										Cv = 12,81			

ENSAIO Nº 18		ROTOR Nº 06											
DATA: 20/08/90		PERÍODO: 0 a 3 hs		RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS									
XI ÁGUA E AREIA		1ª Fase		Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³									
ÁGUA-AREIA-POLÍMERO		XI 2ª Fase		Concentração de polímero (Cp): 0 ppm									
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Qm	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	75,30	28,70	22,0	997,80	86,80	294,40	207,60	166,86	5,81	1244,15	14,39	30	225
02	74,00	31,18	23,0	997,56	87,10	292,80	205,70	164,40	5,27	1251,25	14,81	30	225
03	75,20	26,69	24,0	997,32	87,00	294,80	207,80	166,67	6,25	1246,77	14,56	30	225
04	74,70	26,36	22,0	997,80	86,50	290,90	204,40	165,72	6,29	1233,38	13,76	30	225
05	75,40	26,21	23,0	997,56	86,70	291,00	204,30	167,05	6,37	1222,98	13,16	30	225
06	75,90	38,93	22,0	997,80	86,50	295,50	209,00	168,00	4,32	1244,06	14,38	28	230
07	73,70	31,52	23,0	997,56	86,80	293,20	206,40	163,83	5,20	1259,87	15,32	30	225
08	74,50	30,80	24,0	997,32	86,80	292,10	205,30	165,34	5,37	1241,65	14,27	30	225
09	73,50	34,83	25,5	996,94	86,80	290,60	203,80	163,45	4,69	1246,89	14,59	30	225
10	75,30	27,12	27,0	996,54	86,90	294,00	207,10	166,86	6,15	1241,15	14,28	30	225
11	75,30	33,66	21,0	998,02	86,90	292,70	205,80	166,86	4,96	1233,36	13,75	30	225
12	74,20	28,47	22,0	997,80	86,90	293,00	206,10	164,78	5,79	1250,80	14,78	32	225
13	75,00	27,54	23,5	997,44	87,10	294,60	207,50	166,29	6,04	1247,81	14,62	30	225
14	72,90	22,00	25,0	997,07	87,20	290,00	202,80	162,31	7,38	1249,47	14,73	34	225
15													
16													
17													
18													
19													
20													
Qm = 5,71										Cv = 14,39			

ENSAIO Nº 19			ROTOR Nº 06			RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS							
DATA: 29/08/90			PERÍODO: 3 a 6 hs										
XI ÁGUA E AREIA			1ª Fase			Peso específico real da areia: 2710 kgf/m ³							
XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO			2ª Fase			Concentração de polímero (Cp): 0 ppm							
Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Qm	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf		l/s	Kgf/m ³	Z	A	V
01	75,30	27,66	20,5	998,13	87,00	292,10	205,10	166,86	6,03	1229,17	13,50	30	225
02	75,90	25,13	22,0	997,80	87,00	292,80	205,80	168,00	6,69	1225,01	13,27	32	225
03	75,70	37,74	20,0	998,23	87,00	292,50	205,50	167,62	4,44	1225,99	13,31	30	225
04	74,20	33,90	21,0	998,02	87,00	287,40	200,40	164,78	4,86	1216,20	12,74	28	230
05	73,80	28,10	22,0	997,80	87,00	289,50	202,50	164,02	5,84	1234,64	13,83	30	225
06	75,80	39,32	21,0	998,02	86,80	290,70	203,90	167,81	4,27	1215,07	12,68	30	225
07	74,10	31,89	22,0	997,80	86,80	287,40	200,60	164,59	5,16	1218,82	12,91	32	225
08	74,30	33,95	23,5	997,44	86,80	288,50	201,70	164,96	4,86	1222,69	13,15	30	225
09	74,20	32,90	24,5	997,20	87,00	289,80	202,80	164,78	5,01	1230,77	13,64	30	225
10	76,60	43,75	23,0	997,56	86,40	288,70	202,30	169,33	3,87	1194,74	11,51	24	230
11	74,00	27,58	23,5	997,44	86,80	288,40	201,60	164,40	5,96	1226,31	13,36	30	225
12	71,90	27,72	24,5	997,20	86,90	281,10	194,20	160,41	5,79	1210,63	12,46	30	225
13	72,60	27,97	25,5	996,94	86,90	284,50	197,60	161,74	5,78	1221,71	13,12	30	225
14	74,10	35,66	26,5	996,68	87,10	287,90	200,80	164,59	4,62	1220,04	13,04	30	225
15	73,80	35,30	27,0	996,54	86,50	285,50	199,00	164,02	4,65	1213,30	12,65	30	225
16	75,90	32,80	23,0	997,56	86,90	288,20	201,30	168,00	5,12	1198,22	11,72	32	225
17	74,40	37,09	24,0	997,32	87,00	286,80	199,80	165,15	4,45	1209,78	12,41	30	225
18	73,70	30,17	25,0	997,07	87,00	286,60	199,60	163,83	5,43	1218,36	12,92	32	225
19													
20													
Qm = 5,16										Cv = 12,90			

ENSAIO Nº 20 | ROTOR Nº 07 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 13/09/90 | PERÍODO: 0 a 3 hs |

| | ÁGUA E AREIA | | 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | XI 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 600 ppm

Nº	X	t	T	Y _a	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m ³	Kgf	Kgf	Kgf		l/s	Kgf/m ³	%	A	V
01	75,20	31,36	23,5	997,44	86,90	285,00	198,10	166,67	5,32	1188,57	11,16	28	230
02	73,00	25,19	24,0	997,32	87,00	277,30	190,30	162,50	6,45	1171,08	10,15	30	225
03	72,90	21,85	24,5	997,20	87,00	274,80	187,80	162,31	7,43	1157,05	9,33	30	225
04	73,20	20,15	25,0	997,07	87,00	276,00	189,00	162,88	8,08	1160,38	9,53	30	225
05	75,70	25,11	21,0	998,02	86,80	292,80	206,00	167,62	6,68	1228,97	13,49	30	225
06	73,90	24,69	22,0	997,80	87,30	286,90	199,60	164,21	6,65	1215,55	12,72	30	225
07	73,80	24,64	23,0	997,56	87,40	285,40	198,00	164,02	6,66	1207,20	12,24	30	225
08	73,60	24,43	23,5	997,44	87,30	284,10	196,80	163,64	6,70	1202,66	11,98	30	225
09	74,10	24,07	24,5	997,20	87,50	284,70	197,20	164,59	6,84	1198,17	11,73	30	225
10	73,50	23,77	25,0	997,07	87,60	280,50	192,90	163,45	6,88	1180,20	10,69	30	225
11	74,80	21,63	26,0	996,81	87,50	280,50	193,00	165,91	7,67	1163,26	9,72	30	225
12	73,60	21,43	26,5	996,68	87,50	279,60	192,10	163,64	7,64	1173,94	10,35	30	225
13	74,60	23,32	22,0	997,80	87,40	289,60	202,20	165,53	7,10	1221,51	13,07	30	225
14	73,10	22,95	23,0	997,56	87,40	282,40	195,00	162,69	7,09	1198,61	11,74	30	225
15	73,20	22,91	23,5	997,44	87,40	284,00	196,60	162,88	7,11	1207,04	12,24	30	225
16	72,80	22,92	24,5	997,20	87,70	283,50	195,80	162,12	7,07	1207,75	12,29	30	225
17	73,30	22,75	25,0	997,07	87,60	282,50	194,90	163,07	7,17	1195,21	11,57	30	225
18													
19													
20													

Q_m = | 6,97 | Cv = | 11,41 |

ENSAIO Nº 21 | ROTOR Nº 07 |

RECALQUE DE MISTURAS SÓLIDO-LÍQUIDAS

DATA: 18/09/90 | PERÍODO: 3 a 6 hs |

| | ÁGUA E AREIA | | 1ª Fase | Peso específico real da areia: 2710 kgf/m³

| | XI ÁGUA-AREIA-POLÍMERO | | XI 2ª Fase | Concentração de polímero (Cp): 600 ppm

Nº	X	t	T	Y _o	Pv	Pc	P	x	Q _m	Y _m	Cv	i	U
	cm	s	°C	Kgf/m³	Kgf	Kgf	Kgf	l	l/s	Kgf/m³	%	A	V
01	74,00	24,94	21,0	998,02	87,00	289,00	202,00	164,40	6,59	1228,75	13,48	30	225
02	73,20	28,09	21,5	997,91	87,40	283,60	196,20	162,88	5,80	1204,58	12,07	28	230
03	73,60	21,01	22,0	997,80	87,20	284,70	197,50	163,64	7,79	1206,94	12,21	30	225
04	74,30	25,66	23,5	997,44	87,20	283,00	196,60	164,96	6,43	1191,78	11,35	30	225
05	74,40	23,69	24,0	997,32	87,20	284,40	197,20	165,15	6,97	1194,04	11,49	30	225
06	74,70	22,98	26,0	996,81	87,80	280,00	192,20	165,72	7,21	1159,77	9,51	30	225
07	73,80	19,34	26,5	996,68	87,30	280,50	193,20	164,02	8,48	1177,93	10,58	30	225
08	74,50	24,10	27,0	996,54	87,30	277,90	190,60	165,34	6,86	1152,75	9,12	30	225
09	72,90	29,19	22,0	997,80	87,00	286,20	199,20	162,31	5,56	1227,29	13,40	28	230
10	73,60	22,24	23,0	997,56	87,50	283,40	195,90	163,64	7,36	1197,16	11,66	30	225
11	73,00	20,37	24,0	997,32	87,20	281,10	193,90	162,50	7,98	1193,24	11,44	30	225
12	73,50	24,38	24,5	997,20	87,10	285,30	198,20	163,45	6,70	1212,63	12,58	30	225
13	74,20	24,26	25,5	996,94	87,20	287,30	200,10	164,78	6,79	1214,38	12,69	30	225
14	74,00	25,47	26,0	996,81	87,10	282,70	195,60	164,40	6,45	1189,82	11,27	30	225
15	74,00	24,50	27,5	996,40	87,00	283,00	196,00	164,49	6,71	1192,25	11,43	30	225
16	73,00	24,98	28,0	996,26	87,50	278,20	190,70	162,50	6,51	1173,55	10,34	30	225
17	73,00	31,71	29,0	995,96	86,80	277,90	191,10	162,50	5,13	1176,01	10,50	28	230
18													
19													
20													

Q_m = | 6,78 | Cv = | 11,48 |