

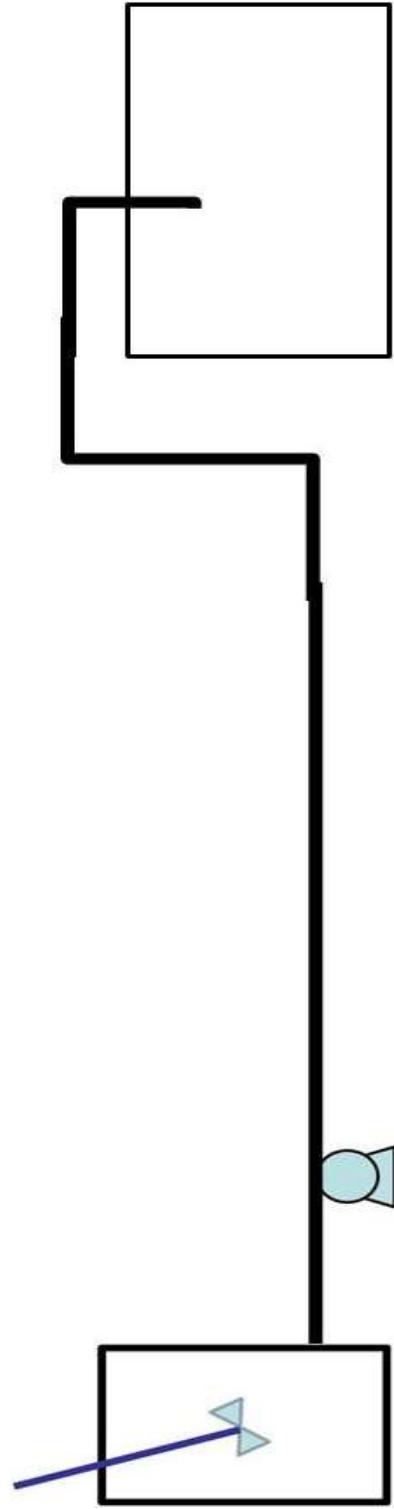


OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

1- Introdução: o baixo custo envolvido na utilização de tubulações para o transporte de sólidos em relação a outros meios de transporte, tem levado ao desenvolvimento desta técnica, tanto para o transporte dentro da propria indústria, com para longas distâncias. Deste modo, tem sido explorados depósitos quase inacessíveis a outros meios de transporte, dando origem aos minerodutos, onde escoam vários milhões de toneladas anuais de carvão, fosfato, minérios de ferro e cobre etc.

Os principais objetivos no estudo do transporte de partículas consistem na determinação da queda de pressão e da velocidade de escoamento, o que permite o cálculo de potência do sistema de bombeamento.



Esquema de Laboratório de um Transporte Hidráulico



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



No Brasil podem ser citados a unidade de transporte de concentrado de ferro da Samarco (ES) que tem um comprimento de 394,5 km e uma capacidade de transporte de 12 milhões de toneladas por ano. Ela teve sua operação iniciada em 1977. Um outro exemplo de aplicação de transporte hidráulico que merece destaque é a unidade de transporte de fosfato da Goiasfértil (GO) de 14,5 km de comprimento e uma capacidade de transporte de 0,9 milhões de toneladas por ano. É um exemplo regional é a unidade da Fosfértil do trecho Tapira/Uberaba com 114 km de comprimento e uma capacidade de 2,2 milhões de toneladas por ano.

Descrição Geral do Processo

Para que o transporte de misturas sólido-líquido através das tubulações seja tecnicamente praticável, as seguintes condições devem ser cumpridas:

1. O sólido deve misturar e separar facilmente;
2. Não deve haver riscos, como por exemplo, a obstrução da tubulação devido às interações entre partículas, trazendo como consequência aglomeração delas;
3. O sólido a ser transportado não deve reagir nem com o fluido transportante nem com a tubulação;
4. O desgaste e ruptura a que se submetem as partículas durante o transporte não devem ter efeitos adversos para o processo posterior;
5. A quantidade de fluido transportante deve ser adequada.

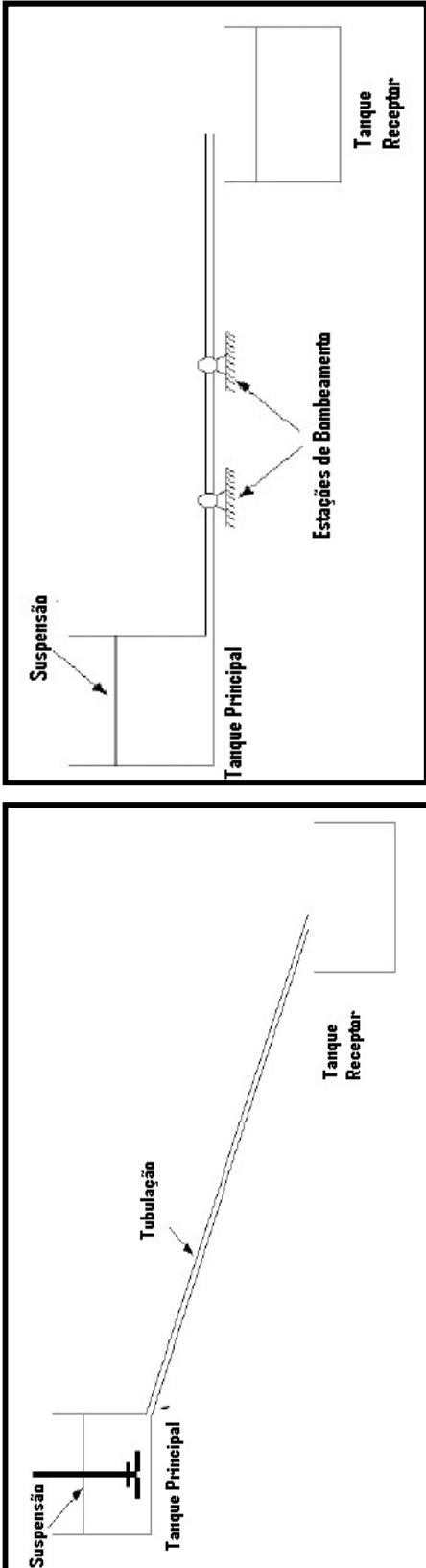


OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Dependendo da topografia, e especificamente do desnível entre o ponto da alimentação e da descarga da tubulação, dois tipos de força impulsora podem ser utilizadas para mover a mistura. Neste contexto, o transporte hidráulico de sólidos pelas tubulações classificam-se em transporte gravitacional e transporte por bombeamento. Estes dois tipos são mostrados nas Figuras a seguir.



Fonte: www.metalurgia.uda.cl/apuntes/ptapia/mecanica%20II/Transporte%20hidráulico.pdf



Exemplo de bombas de deslocamento positivo



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Variáveis do Sistema:

O fluxo de mistura sólido-líquido por tubulações depende de uma grande quantidade de variáveis e parâmetros, não estando ainda avaliada com exatidão a influência de algumas delas. Estas variáveis podem ser sintetizadas da seguinte forma:

Dependente do sólido a transportar:

1. Granulometria;
2. Densidade;
3. Forma;
4. Dureza.

Dependente da instalação:

1. Diâmetro interno da tubulação;
2. Comprimento;
3. Desnível;
4. Rugosidade interna;
5. Ângulos de inclinação da tubulação;
6. Singularidades – Assessórios etc.

Dependente do fluido transportante:

1. Densidade;
2. Viscosidade

Dependentes da mistura:

1. Concentração de sólidos em volume e peso;
2. Densidade da mistura.

Dependentes do sistema:

1. Toneladas de sólido a transportar;
2. Velocidade de fluxo;
3. Perda de Carga.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Regimes de fluxo:

A turbulência é um dos fatores mais importantes que contribuem para manutenção do regime de suspensão dos sólidos. Não obstante, em alguns casos é possível empregar este tipo de transporte operando em regime de fluxo laminar se a concentração de partículas sólidas for elevada (entre 70 e 80% em peso), nestes casos a viscosidade da polpa é alta.

Por outro lado é necessário classificar os fluxos das misturas bifásicas de acordo com a forma com que são arrastradas as partículas sólidas, aparecendo quatro formas de transporte claramente diferenciáveis.



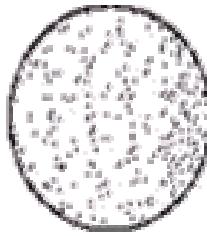
OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Regimes de fluxo:

Fluxo de sólidos em suspensão homogênea

Como seu nome indica, as partículas sólidas da mistura são transportadas em suspensão, sem apresentar gradientes, nem de concentração nem de granulometria, em um plano perpendicular ao fluxo e vertical. Além disso, as partículas sólidas não apresentam nenhum deslizamento com respeito ao líquido, quer dizer, tanto o sólido quanto o líquido tem a mesma velocidade de fluxo com o qual o comportamento hidráulico da mistura é muito similar a de um líquido puro, ou seja, perfil turbulento das velocidades de fluxo com simetria. Para que este regime do fluxo exista é necessário que as partículas sólidas sejam pequenas, a densidade relativa seja baixa e a velocidade de fluxo elevada.



Fluxo de sólidos em suspensão heterogênea

Neste caso os sólidos até se mantêm em suspensão, mas as partículas mais pesadas tendem a cair formando um gradiente vertical de concentrações e granulometrias, sem chocar com o fundo da tubulação.

No entanto, aos sólidos até podem atribuir-lhes a velocidade do líquido, mas com um pequeno grau de deslizamento nas vizinhanças das paredes.

Este regime do fluxo é bastante usual no transporte hidráulico dos relaves com alto grau de moer.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

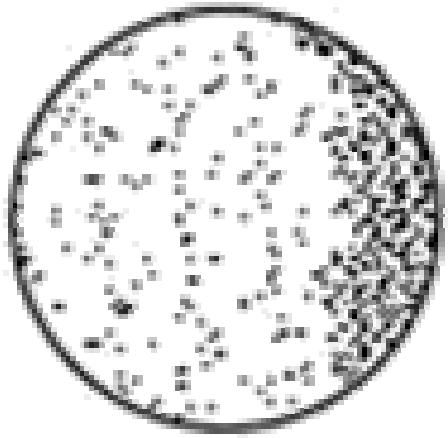
Regimes de fluxo:

Fluxo de sólidos com arraste de fundo

Quando a capacidade do fluido é relativamente baixa comparada ao peso relativo das partículas sólidas grosseiras, estas caem e são arrastadas pelo fundo da tubulação ou do canal, deslizando ou rolando, visto que as partículas mais finas do espectro granulométrico ainda mantêm sua suspensão.

Neste caso, o gradiente de concentrações e tamanhos das partículas torna-se mais elevado e se pode observar uma nuvem de partículas movendo-se a uma velocidade menor do que a do fluido pelo fundo da tubulação e outra nuvem de partículas mais finas suspensas e de igual velocidade ao fluido sobre ela.

Este regime de fluxo aparece em uma grande quantidade de instalações de transporte de sólidos, projetados com uma baixa velocidade para obter uma abrasão mínima, e tem como inconveniente o arraste do fundo de partículas grosseiras que provocam um desgaste muito elevado na tubulação.





OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Regimes de fluxo:

Fluxo de sólidos com depósito de fundo

Se o fluxo for fraco, as partículas mais pesadas da fase sólida depositam-se no fundo da tubulação ou do canal, seja na forma intermitente ou definitiva, apresentando um leito fixo de sólidos ou em dunas a baixa velocidade - ambas as situações ocorrem simultaneamente na parte inferior do duto e uma nuvem de partículas arrastada e/ou suspensa sobre estas.

O fluxo com depósito estável de fundo apresenta-se geralmente em condições de concentração e tamanho de sólidos relativamente baixos, entretanto, as dunas móveis são usuais em espectros granulométricos largos e concentrações altas.

O movimento das dunas nas tubulações ocorre no mesmo sentido que o fluxo da mistura (é possível notar que no fluxo das misturas por canais o sentido pode ser inverso e sua velocidade é muito baixa comparada com a velocidade média do fluxo).

O mecanismo de movimento destas dunas é o seguinte: as partículas situadas nas águas acima das dunas estão submetidas a uma velocidade de fluxo maior que a velocidade média (pela redução da área de fluxo) o que as impulsiona a subir a crista das dunas, onde sua energia cinética dissipase nos redemoinhos de fluxo de água abaixo da duna, e retornam para ser depositadas até que a duna passe completamente em cima delas.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

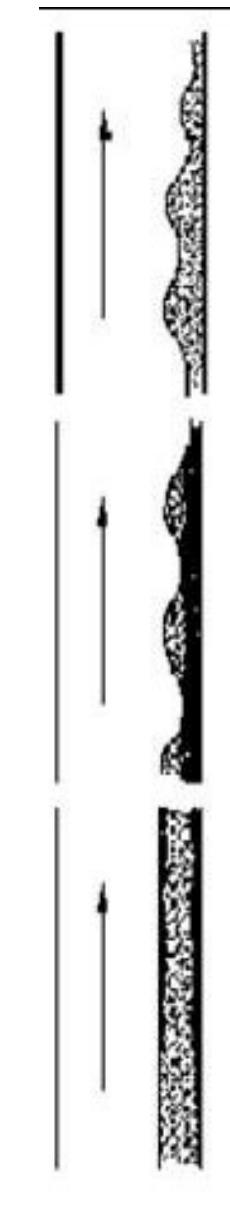
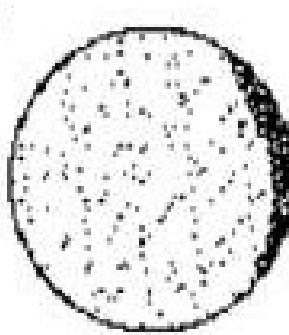
Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Regimes de fluxo:

Fluxo de sólidos com depósito de fundo

Como este processo de deposição dos sólidos causa uma diminuição da seção do fluxo, com o aumento consequente da velocidade média para manter a relação da continuidade, a capacidade do fluido é reforçada o que permite manter a fase sólida em movimento. Não obstante, como este processo de redução da área em conjunto com a formação de redemoinhos provocados por dunas incide em um forte aumento da dissipação de energia do sistema e se este não dispõe de energia suficiente necessária seja por bombeamento ou diferença de nível, o processo de deposição de sólidos acentuar-se-á causando em um curto período de tempo uma obstrução total da tubulação.

Ainda que a formação de um leito fixo estável no fundo de uma tubulação, com a menor espessura possível, seja desejável sob o ponto de vista de proteger a erosão do fundo da tubulação, há o risco de obstrução da mesma, junto com a impossibilidade de refluízar o depósito por meios hidráulicos, sendo pouco aconselhável trabalhar neste regime de fluxo.



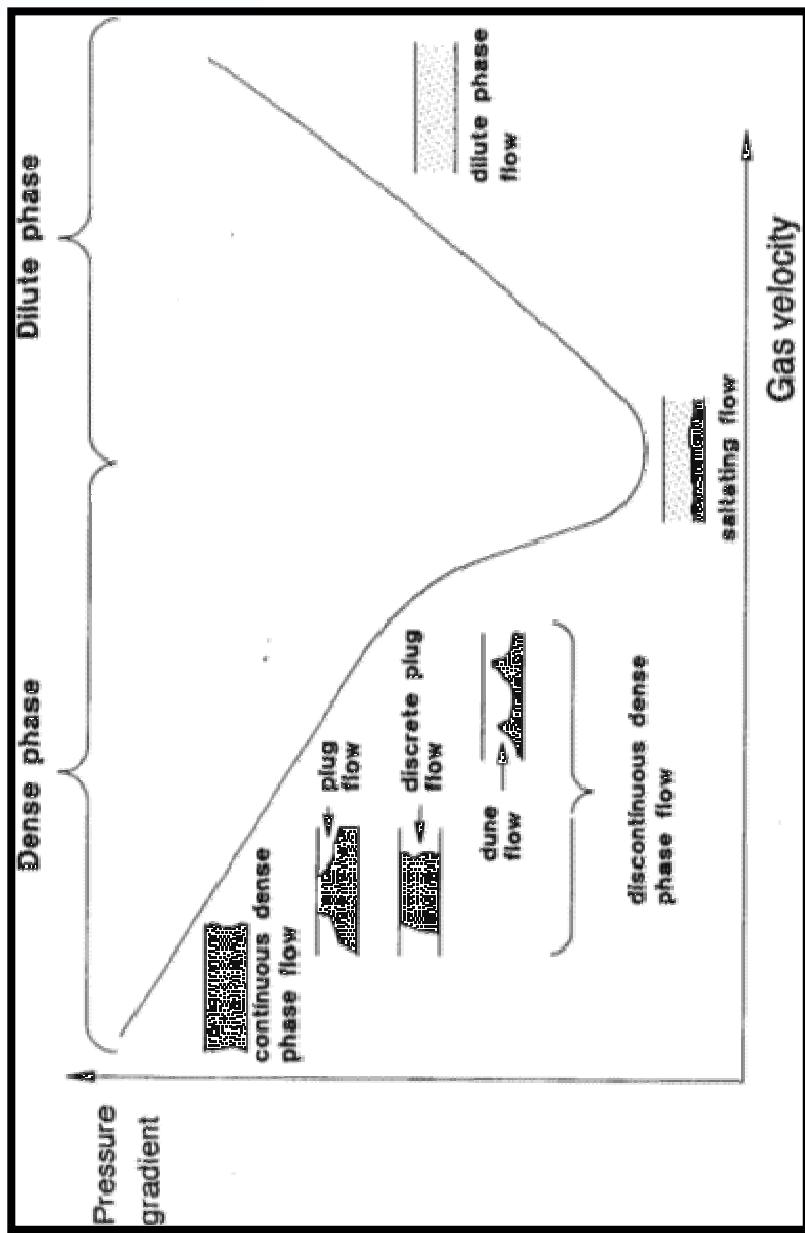
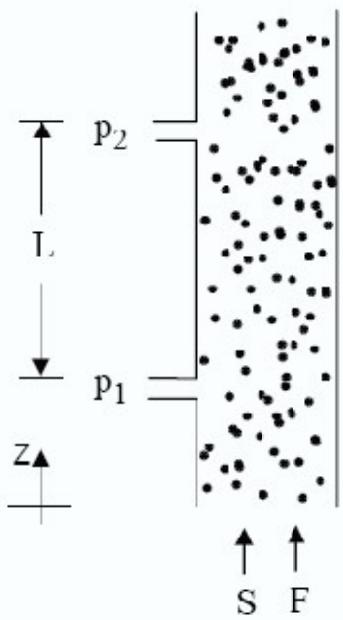


OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Escoamento de Suspensões Constituídas de Partículas Grandes. Transporte Hidráulico Horizontal - suspensão heterogênea





OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Estudos Empíricos do Transporte Hidráulico de Sólidos

De forma paralela ao desenvolvimento teórico, realizaram-se estudos experimentais que permitiram conhecer as características do funcionamento do transporte hidráulico de sólidos.

Devido à carência de uma teoria bem desenvolvida sobre o tema, as primeiras análises experimentais, voltadas para fluxo em tubulações à pressão, caracterizaram-se por sua aleatoriedade na fixação de suas variáveis de estudo.

E assim, algumas destas investigações deram maior importância à concentração da mistura, ao efeito do diâmetro da tubulação, influência da densidade do sólido etc.. Não obstante, a maioria destes estudos permitiram extrapolações de seus resultados, na obtenção de modelos matemáticos que permitiram a previsão do comportamento global de um sistema de transporte hidráulico de sólidos.

Como resultado disto, pode-se encontrar na bibliografia uma enorme quantidade de modelos empíricos para transporte hidráulico de sólidos. Entretanto, os resultados experimentais ainda são os mais confiáveis para algumas situações, principalmente em projetos de larga escala e que envolvem um montante de dinheiro muito elevado.

Os resultados centraram-se na análise de três parâmetros mais importantes no transporte hidráulico do ponto de vista industrial:

1. **Velocidade limite de depósito;**
2. **Perda de carga em misturas sólido-líquido;**
3. **Taxas de desgaste.**



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Velocidade Limite de Depósito (V_L)

Como o próprio nome indica, velocidade limite de depósito é a velocidade mínima de fluxo para que não exista risco de depósito e de entupimento da tubulação. A definição mais utilizada e de fácil determinação experimental é aquela que identifica em qual velocidade os sólidos grossos permanecem parados por maiores períodos de tempo no fundo da tubulação (formação de dunas móveis e/ou leitos fixos no fundo).

A **velocidade limite em transporte hidráulico de sólidos depende fundamentalmente das seguintes variáveis:**

1. **Granulometria das partículas sólidas;**
2. **Densidade relativa das partículas sólidas;**
3. **Diâmetro da tubulação ou altura de escorrimento em um canal;**
4. **Concentração de sólidos na mistura;**
5. **Inclinação da tubulação ou inclinação do canal;**
6. **Fator de forma das partículas sólidas;**
7. **Temperatura da mistura.**

Nesta disciplina iremos padronizar o uso da correlação de Costapinto Santana, 1979. Esta equação é uma das várias disponíveis na literatura, mas que possui uma boa aceitação.

$$V_L = 6,34 C_V \sqrt[3]{gD} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{0,46} \left(\frac{dp}{D} \right)^{0,077}$$

neste caso deve-se considerar que $V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A}$ → velocidade da mistura

sendo comercialmente aceito um valor de $\boxed{V_M = 1,2V_L}$ → sendo $C_V = \left(\frac{Q_s}{Q_f + Q_s} \right)$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Perda de Carga nas Tubulações

A resistência ao fluxo em uma mistura sólido-líquida que flui por uma tubulação pode ser consideravelmente maior que a resistência no caso de um líquido puro.

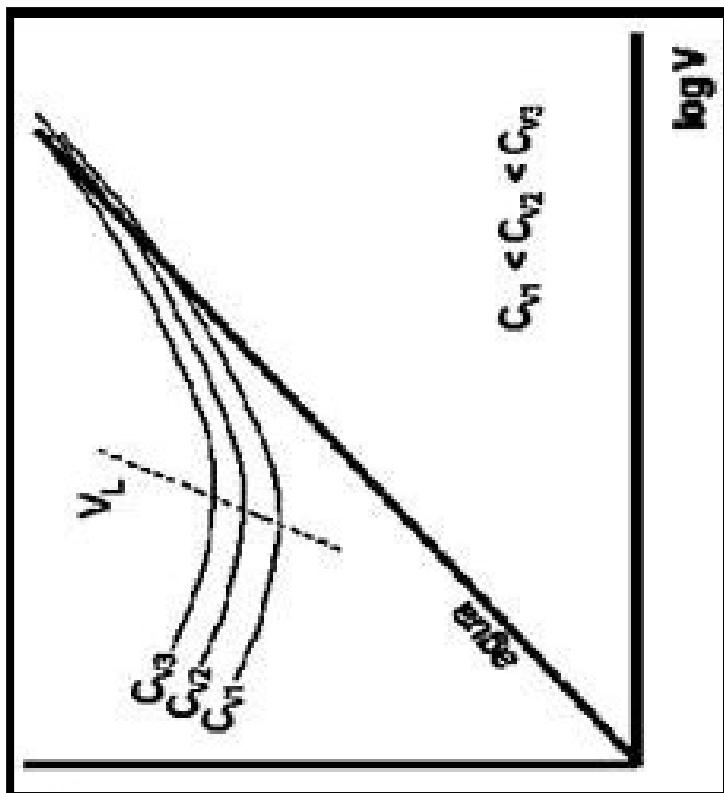
A experiência, tanto a nível laboratorial como industrial, indica que a perda de carga da polpa tem o comportamento mostrado na Figura a seguir.

Este comportamento pode ser explicado da seguinte maneira:

O aumento da concentração, para uma dada velocidade, implica em um aumento da energia gasta para manter as partículas sólidas em suspensão;

O aumento da velocidade homogeneiniza a suspensão e a mistura tende a comportar-se como um líquido puro;

Ao depositar-se, o choque das partículas contra a parede provoca uma dissipação muito forte de energia, e a perda de carga aumenta consideravelmente ainda que a velocidade de fluxo diminua.



Perda de carga



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Perda de Carga nas Tubulações

Assim como no caso da velocidade limite de transporte, para a perda de carga nas tubulações iremos padronizar o uso da correlação de Costapinto Santana, 1979 apresentada a seguir. Esta correlação é válida para o caso de transporte hidráulico horizontal de suspensões heterogêneas.

$$\frac{\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-H} - \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F}{C_v \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F} = 385 \left(\frac{V_M^2}{gD} \right)^{-0.23} \left(\frac{dp}{D} \right) \left(\frac{\rho_s - 1}{\rho} \right)^{1.38} \Rightarrow \text{faixa: } 0,009 < \frac{dp}{D} < 0,15 \quad 1,18 < \rho_s < 4,43$$

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-H}$ a queda de pressão total da mistura, cuidado válido para o trecho horizontal.

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F$ a queda de pressão do fluido escoando isoladamente a V_M (considerando o apenas o atrito fluido-tubulação)

Portanto:

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = \frac{f V_M^2 \rho}{2D} \Rightarrow f=f(Re, e/D) \Rightarrow \text{leitura no gráfico de Moody}$$

$$Re = \frac{DV_M \rho}{\mu}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Perda de Carga nas Tubulações

No caso de trechos verticais, a queda de pressão total é a soma de duas parcelas, uma relativa ao atrito do fluido na parede do tubo (usualmente calculado nos casos de transporte de fluidos puros) e a outra da interação sólido-fluido (sf). Desprezando, portanto, a interação entre as partículas sólidas e entre estas e o duto (o que é razoável, pois trabalha-se com sistemas diluídos).

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-V} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F + \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF}$$

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-V}$ a queda de pressão total da mistura, cuidado válido para o trecho vertical.

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F$ a queda de pressão do fluido escoando isoladamente a V_M (considerando o apenas o atrito fluido-tubulação)

Portanto:

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = \frac{f V_M^2 \rho}{2 D} \Rightarrow f=f(Re,e/D) \Rightarrow leitura no gráfico de Moody$$

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho) g \rightarrow$ típico da fluidização!!!

$$Re = \frac{DV_M \rho}{\mu}$$

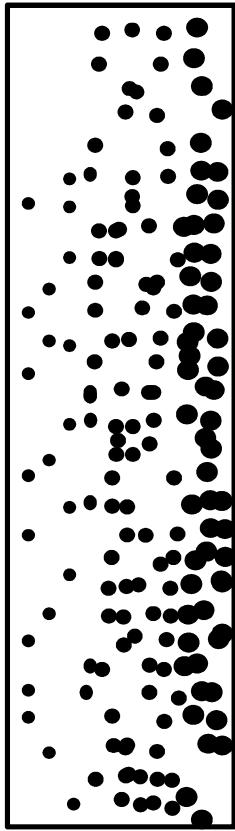
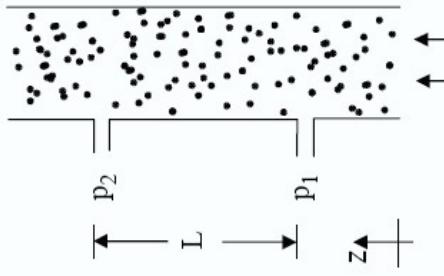


OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Conforme acabamos de ver: O transporte hidráulico de partículas pode se enquadrar em dois grupos:

- a) Transporte de partículas “pequenas e leves” → fluido homogêneo. As suspensões constituídas de partículas pequenas e leves apresentam o comportamento de fluido homogêneo com caráter não Newtoniano.
- b) Partículas Grandes:
 - 1. **Escoamento horizontal** – suspensão heterogênea (tratamento empírico)
 - 2. **Escoamento vertical** – suspensão homogênea (eq. já vista na fluidização)



Transporte hidráulico horizontal de partículas grandes - heterogêneo
Transporte hidráulico vertical de partículas grandes – Homogêneo



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



O transporte de partículas sólidas por arraste em fluido conduz, de um modo geral, à formação de um campo de porosidades heterogêneo na seção transversal de escoamento da mistura sólido-fluido. Em algumas situações, no entanto, dependendo da natureza do problema em estudo, a formulação para o transporte de partículas pode ser substancialmente simplificada considerando que a mistura comporta-se como um fluido homogêneo (Santana, 1982; Gidaspow, 1994):

- Transporte pneumático vertical em fase densa (fluidização incipiente) ou em fase diluída (porosidade superior a 95%); transporte hidráulico vertical sem restrições;
- Transporte hidráulico em qualquer configuração no caso em que as partículas são pequenas, verificando-se o critério empírico de Newitt (1955).

$$N_e = \frac{1800gDv_{t\infty}}{V_M^3} < 1$$

sendo: D - o diâmetro da tubulação

$v_{t\infty}$ - a velocidade terminal da partícula isolada no fluido condutor

$$V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A} \rightarrow \text{velocidade da mistura}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

2 - A diferença entre as formulações para os casos (a) e (b) reflete a dificuldade na medida das propriedades reológicas da suspensão constituída por partículas relativamente grandes (caso a) e pelo fato de que nesta situação o valor da velocidade relativa fluido-partícula no transporte pneumático pode ser significativamente maior que zero. Como consequência, o valor da porosidade no transporte depende da fluidodinâmica do sistema particulado.

Apesar destas considerações, há o consenso bem cristalizado na literatura de que o projeto e o estabelecimento das condições operacionais das linhas de transporte hidráulico e pneumático não podem prescindir de estudos conduzidos em unidade piloto bem instrumentada (Krauss, 1980; Wasp, 1983).

- a) Transporte pneumático vertical em fase densa (fluidização incipiente) ou em fase diluída (porosidade superior a 95%); transporte hidráulico vertical sem restrições;
- b) Transporte hidráulico em qualquer configuração no caso em que as partículas são pequenas, verificando-se o critério empírico de Newitt (1955).

**Não deixe de ler o material sobre reologia de suspensões
Veja link na Home-Page**

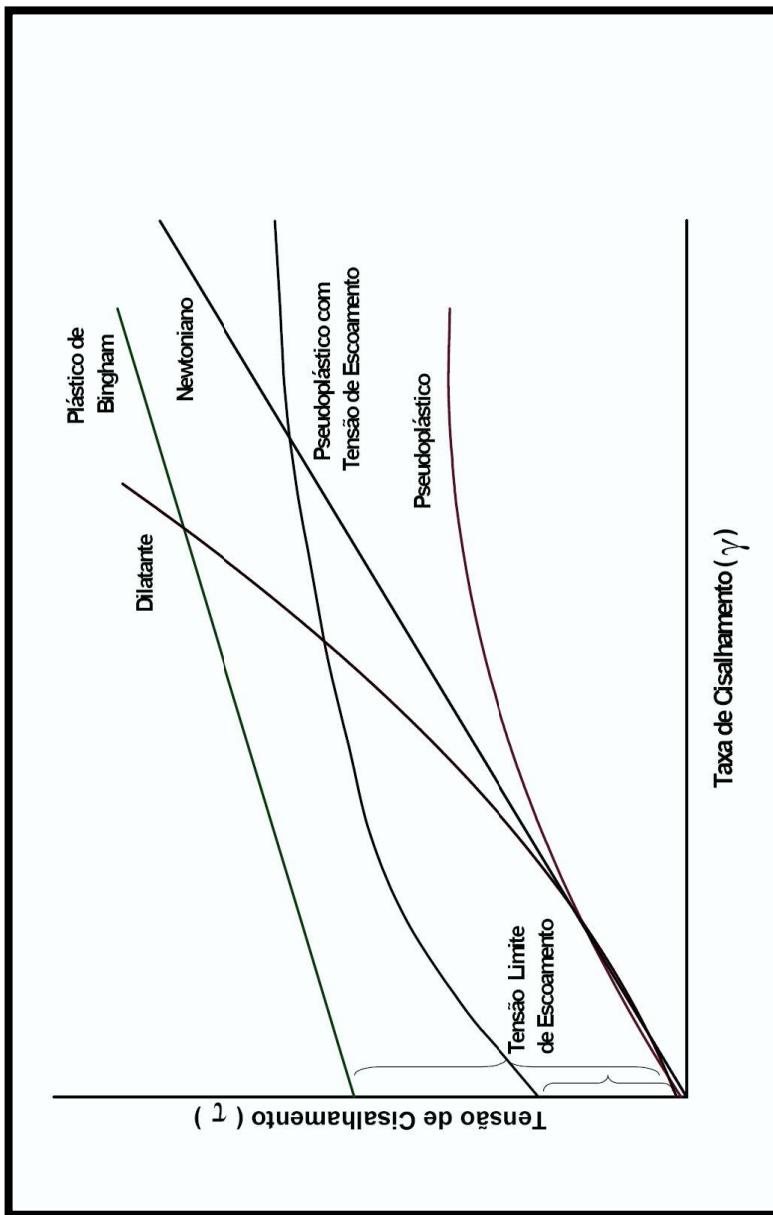


OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

2.1 - Reologia das Suspensões:

Lembrando os modelos mais utilizados:



Maiores detalhes em Mario Valente Possa Engº de Minas, D. Sc.
Link na home-page do professor.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

2.1 - Reologia das Suspensões:

Lembrando os modelos mais utilizados:

O comportamento reológico é descrito por equações empíricas pois os aspectos teóricos até hoje não foram bem estabelecidos.

Um modelo empírico muito empregado na caracterização do escoamento de um fluido é o de Ostwald de Waele, baseado na Lei da Potência, cuja equação é dada por:

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n$$

onde:

τ_0 = tensão limite de escoamento (Pa) sendo:

$\tau_0 = 0$ para fluidos Newtoniano, pseudoplástico e dilatante;

K = índice de consistência do fluido sendo:

$K = \mu$ para fluido Newtoniano; e

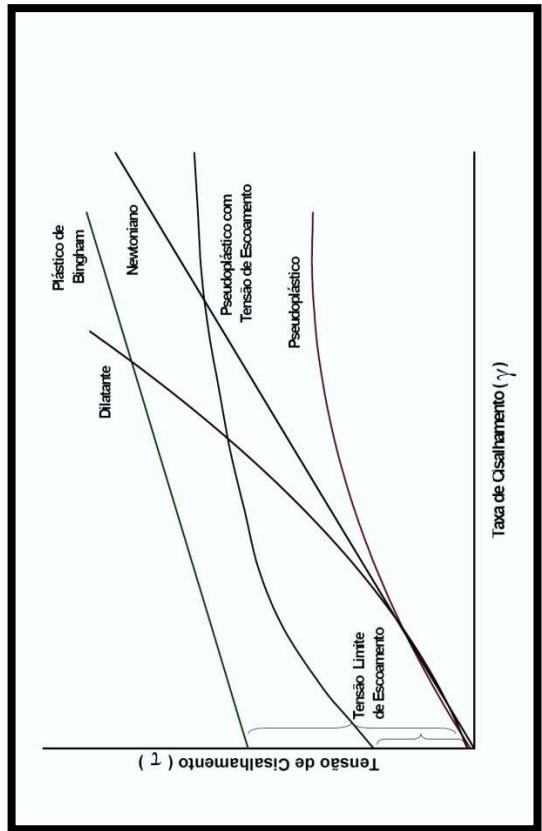
$K = \mu_{ap} / (\gamma)^{n-1}$ para fluido não-Newtoniano ($\mu_{ap} = \tau / \gamma = K (\gamma)^{n-1}$); e

n = índice do comportamento do fluido sendo:

$n = 1$ para fluido Newtoniano;

$n < 1$ para fluido pseudoplástico; e

$n > 1$ para fluido dilatante.



Maiores detalhes em Mario Valente Possa Engº de Minas, D. Sc.

Link na home-page do professor.

Nesta referência com link na homepage, você encontrará modelos típicos e equações ajustadas para suspensões de minérios.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Outro importante exemplo de suspensão com aplicação vinculada as suas características reológicas são as lamas de perfuração. (Adão Benvindo da Luz Engº. de Minas, D.Sc. , Carlos Adolpho Magalhães Baltar Engº. de Minas, D.Sc.)

A perfuração de poços é realizada desde tempos remotos com a finalidade de encontrar água. A busca intensiva por petróleo começou no Século 19 com a industrialização e, consequente, aumento da demanda mundial por derivados de petróleo. Inicialmente, os poços eram perfurados por métodos à percussão, em baixa profundidade e com o uso de água ou suspensões formadas com argilas locais, como fluidos de perfuração. Com o desenvolvimento tecnológico, os poços passaram a ser abertos por equipamentos rotativos, em profundidades extremamente elevadas e utilizando fluidos cada vez mais complexos.

O engenheiro francês Flauville, em 1833, ao encontrar um aquífero na perfuração de um poço, percebeu que a água, ao jorrar, poderia transportar para fora do poço os detritos resultantes da perfuração. Essa observação deu início ao uso da água como fluido de circulação na perfuração de poços (<http://www.slb.com>). A literatura registra que o uso de aditivos, como tentativa de controlar as propriedades de um fluido de perfuração, ocorreu pela primeira vez no ano de 1921. Na década de cinqüenta existiam cerca de meia dúzia de produtos para fluido de perfuração, hoje há em torno de 1400 (DARLEY e GRAY, 1988).

Os fluidos de perfuração foram ganhando importância à medida que os poços se tornavam mais profundos. Considera-se que, tanto do ponto de vista técnico como do econômico, o sucesso da perfuração de um poço depende fortemente da composição do fluido e dos cuidados para a manutenção de suas propriedades durante a perfuração.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



A composição desses fluidos inclui alguns minerais industriais cujo tipo e quantidade usada depende das características do poço. Dessa forma, os insumos minerais têm uma importância significativa na indústria do petróleo, onde além de entrarem na formulação do fluido de perfuração e completação de poços de petróleo e gás, são também utilizados na recuperação secundária e na etapa de refino do petróleo.

A utilização de um fluido é essencial na perfuração de um poço. O sucesso da operação depende da composição e das propriedades do fluido escolhido que pode exercer diversas funções [Darley e Gray, 1988]:

1. Carrear o material cortado pela broca e transportá-lo para a superfície através do espaço anular do poço;
2. Resfriar e limpar a broca;
3. Reduzir a fricção entre o colar da coluna de perfuração e as paredes do poço;
4. Manter a estabilidade da seção do poço não revestida;
5. Controlar a pressão para evitar a entrada de fluxos de óleo, gás ou água proveniente das rochas perfuradas;
6. Formar uma torta (reboco) pouco espessa, de baixa permeabilidade que sele os poros e outras aberturas na formação penetrada pela broca;
7. Ajudar na coleta e interpretação de informações disponíveis a partir de amostras de calha, testemunho de sondagem e perfis elétricos;
8. Promover o efeito de flutuação. A tubulação de um poço imerso no fluido tem seu peso reduzido devido ao empuxo reduzindo a tensão no mecanismo de perfuração.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Fonte: <http://www.seed.slb.com/pt/scictr/watch/joides/drilling2.htm#logging>
Acesso em 21/09/08.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

O fluido de perfuração é bombeado para dentro do poço através da tubulação central. Ao sair, sob pressão, no final do tubo, o fluido arrasta os detritos de rocha e retorna à superfície pelo espaço anular entre a tubulação e as paredes do poço. O fluido deve circular a uma velocidade maior do que a velocidade de sedimentação das partículas removidas, a fim de que os resíduos possam chegar à superfície.

Os fluidos usados atualmente na perfuração, completação e operações especiais nos poços de petróleo são misturas de diferentes produtos cuidadosamente selecionados para atender às condições específicas de cada poço.

A perfuração de petróleo é o segmento que usa a maior quantidade de minerais industriais, destacando-se seis funções básicas: modificador de densidade; promotor de viscosidade ("viscosifier"); agente anti-espessante ("thinner"); material contra perda de circulação; estabilizadores e lubrificantes.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

O Cálculo da Queda de Pressão do sistema (tubulações, acessórios etc.) e potência da bomba em um transporte de suspensão.

O procedimento empregado no tópico projeto de bombas é válido aqui, com uma pequena diferença, aqui não temos um fluido e sim uma suspensão. Porém, é possível aplicar o conceito de Bernoulli e apenas teremos que usar as propriedades da mistura e não do fluido. Sendo assim, consideraremos a densidade da mistura, a viscosidade da mistura, o número de Re da mistura. O principal diferencial se refere aos gráficos de Moody usados no caso de fluidos, aqui o diagrama é específico para o tipo de mistura (propriedade reológica), seja esta do tipo Bingham, Power Law etc. No cálculo do número de Reynolds iremos adotar a equação abaixo, que é válida para o modelo de Ostwald de Waele, sendo neste caso o termo independente nulo. Veja na próxima página o diagrama de Moody para fluido não Newtoniano.

$$\tau = \tau_0 + \kappa \gamma^n$$

onde:

τ_0 = tensão limite de escoamento (Pa) sendo:

$\tau_0 = 0$ para fluidos Newtoniano, pseudoplástico e dilatante;

κ = índice de consistência do fluido sendo:

$\kappa = \mu$ para fluido Newtoniano; e

$\kappa = \mu_{ap} / (\gamma)^{n-1}$ para fluido não-Newtoniano ($\mu_{ap} = \tau / \gamma = \kappa (\gamma)^{n-1}$); e

n = índice do comportamento do fluido sendo:

$n = 1$ para fluido Newtoniano;

$n < 1$ para fluido pseudoplástico; e

$n > 1$ para fluido dilatante.

Considerando um fluido de Ostwald de Waele teremos

o Reynold modificado escrito como:

$$R_{e\text{mod}} = \frac{V_M^{2-n} D^n \rho_M}{8 \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n}$$

Fator de atrito de Fanning para escoamento de fluidos não Newtonianos
(DODGE & METZNER, 1959). Citado por PERRY & GREEN (1999).

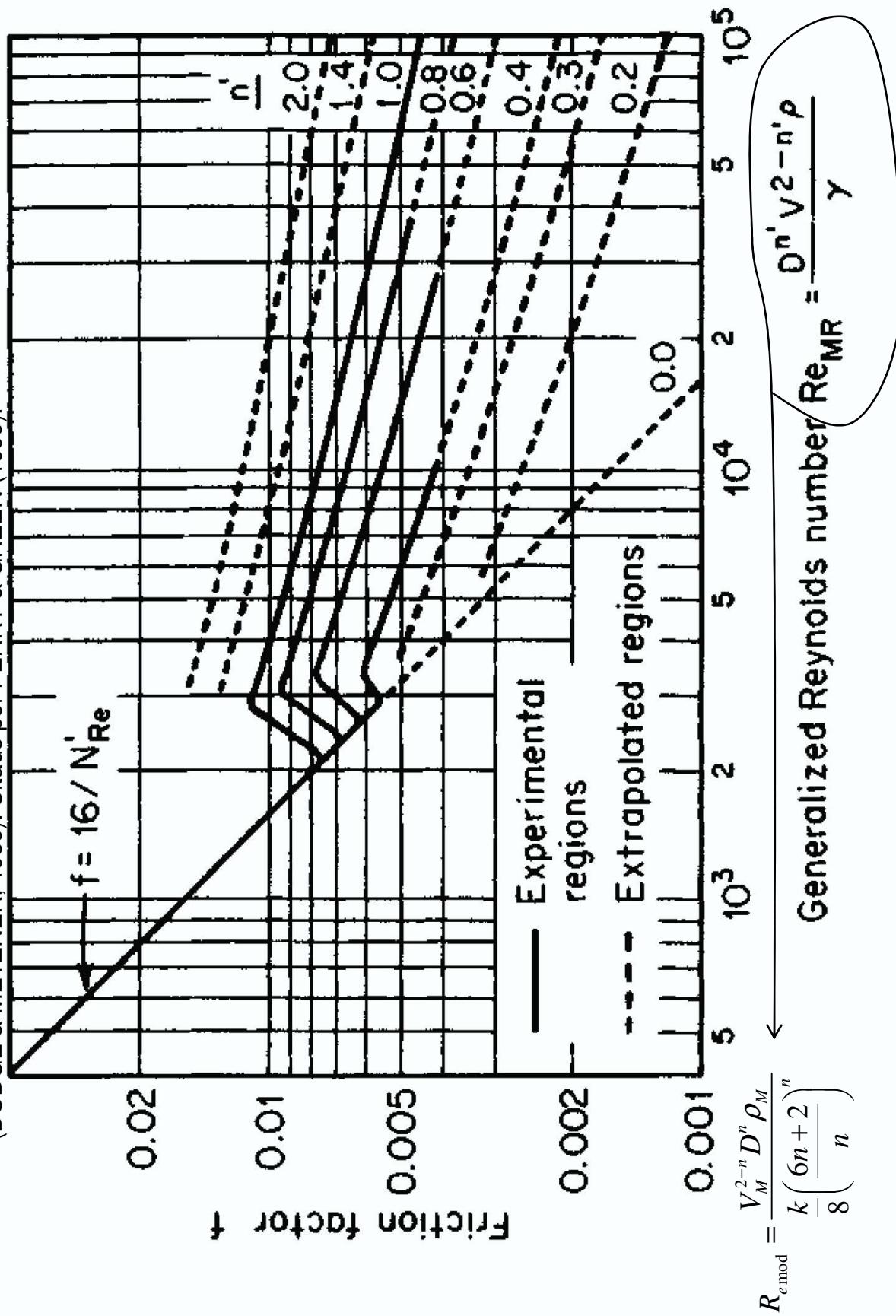


FIG. 6-11 Fanning friction factor for non-Newtonian flow. (From Dodge and Metzner, Am. Inst. Chem. Eng. J., 5, 189 [1959]).



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Assim como no caso de fluidos Newtonianos, para o caso dos fluidos Não-Newtonianos é possível estimar o valor do fator de atrito usando correlações.

O escoamento de fluidos que obedecem ao modelo de Ostwald de Waele em regime laminar, ao contrário do turbulento, pode ser considerado elucidado (KEMBLOSKI & KOLODZIEJSKI, 1973). Entretanto, o escoamento deste tipo de fluido em regime turbulento continua sendo motivo de inúmeras pesquisas. A maior parte das correlações propostas na literatura para predição do fator de atrito foram obtidas a partir de análises teóricas do modelo de Ostwald de Waele.

Importantes revisões foram feitas por KEMBLOSKI & KOLODZIEJSKI (1973) e COELHO (1981), nas quais são mostradas as três tendências seguidas pelos pesquisadores com intuito de correlacionar o fator de atrito no escoamento turbulento de fluidos não Newtonianos. Maiores detalhes a respeito deste tema você poderá encontrar no link Transporte de Fluidos Não-Newtonianos na home-page do professor, trata-se do trabalho de Adelson Belizário Leal 2005.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Nestas correlações, para o caso de suspensão, considere as propriedades físicas da mistura.

SHAYER & MERRILL (1959), trabalhando com escoamento turbulento de soluções aquosas diluídas de CMC, carbopol e polisobutileno em ciclohexano, correlacionaram com o modelo de Ostwaldde Waele o fator de atrito através de uma equação do tipo Blasius, dada por:

$$f = \frac{0,079}{n^5 (R_{eSM})^{2,63}} \quad \text{sendo } R_{eSM} \text{ o número de Reynolds de SHAYER \& MERRILL (1959), definido por:}$$

$$R_{eSM} = \frac{Dv\rho}{k \left(\frac{8v}{D} \right) \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n}$$

Cabe acrescentar que o desvio máximo encontrado pelos autores ficou entre +33% e 15% para $0,53 \leq n \leq 1$.

DODGE & METZNER (1959), através de um estudo teórico e experimental utilizando soluções de CMC, carbopol e argila correlacionaram o fator de atrito ao número de Reynolds generalizado definido por METZNER & REED (1955). Estes autores adotaram as hipóteses válidas para o escoamento de fluidos Newtonianos na descrição do escoamento de fluidos não Newtonianos (SKELLAND, 1967). A correlação obtida por DODGE & METZNER (1959), no caso especial de fluidos de Ostwald de Waele, é dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4,0}{n^{0,75}} \log \left[R_{eMR} f^{\left(\frac{1-n}{2} \right)} \right] - \frac{0,4}{n^{1,2}} \quad \text{sendo } R_{eMR} \text{ o número de Reynolds de METZNER \& REED, (1955), definido por:}$$

$$R_{eMR} = \frac{Dv\rho}{k \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n}$$

com um desvio médio de 1,9% para $0,4 \leq n \leq 1,0$.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Nestas correlações, para o caso de suspensão, considere as propriedades físicas da mistura.

A correlação de Szilas et al 1981, por se tratar de uma correlação que leva em consideração a rugosidade relativa é bastante aplicada. A correlação de Szilas et al 1981 é a seguinte:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{10^{-\beta/2}}{R_{eMR} f^{\left(\frac{2-n}{2n}\right)}} + 0,27 \frac{e}{D} \right]$$

$$R_{eMR} = \frac{D \nu \rho}{k \left(\frac{8 \nu}{D} \right)^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)}$$
$$\beta = 1,51 \frac{1}{n} \left(\frac{0,707}{n} + 2,12 \right) - \frac{4,015}{n} - 1,507$$



A equação que adotaremos é aquela citada em Massarani:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[0,27 \frac{e}{D} + \left(\frac{6,81}{Re_M} \right)^{0,9} \right]$$

$\frac{e}{D}$ é a rugosidade relativa do duto

A principal referência para busca de correlações de estimativa de fator de atrito é: Slurry handling design of solid-liquid system, os autores são: Nigel P. Brown, Nigel I. Heywood



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



Na referência mencionada você poderá encontrar várias outras correlações, mas lembre-se, uma boa revisão bibliográfica e o mais atualizada possível, deve sempre preceder os seus cálculos.

Exemplo: Mineroduto de SAMARCO: (assista ao vídeo com os dados reais da empresa e maiores detalhes a respeito do mineroduto).

- 400 km, o terminal encontra-se 1000 m abaixo da mina;
- dutos de aprox. 48cm de diâmetro interno ($e/D=10^{-4}$);
- $12 \cdot 10^6$ ton/ano de minério;
- suspensão constituída de 65% em peso de minério ($\rho_s = 4,9 \text{ g/cm}^3$);
- dados reológicos a 20°C
$$S = 0,060 \lambda^{0,91} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right)$$
- dias de operação/ano: 340



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS



400 km, o terminal encontra-se 1000 m abaixo da mina;
dutos de aprox. 48cm de diâmetro interno (e/D=10⁻⁴);
 12.10^6 ton/ano de minério;

O primeiro passo é calcular a velocidade da mistura:

$$V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A}$$

Sabemos que:

$$\begin{aligned} \rightarrow Q_s &= \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{densidade do sólido}} = \frac{12.10^6 \frac{\text{ton}}{\text{ano}}}{4,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ton}}{10^6 \text{kg}}} = 2,45.10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \\ 65\% \text{ sólidos} \rightarrow Q_f &= \frac{\text{massa de fluido}}{\text{densidade do fluido}} = \frac{0,35 \times 12.10^6 \frac{\text{ton}}{\text{ano}}}{1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ton}}{10^6 \text{kg}}} = 6,46.10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \end{aligned}$$

Sendo assim:

$$V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A} = \frac{2,45.10^6 + 6,46.10^6}{\frac{3,1415}{4} \cdot \left(\frac{48 \text{cm} \times 1 \text{m}}{10^2 \text{cm}} \right)^2} \times \frac{m}{\text{ano}} \times \frac{1 \text{ano}}{340 \text{dia}} \frac{1 \text{dia}}{24 \text{h}} \frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}} = 1,676 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exemplo: Mineroduto de SAMARCO:

Cálculo da densidade da mistura, como sempre, nestas situações adotamos uma base de cálculo.

Consideremos uma massa de 100 g:

$$\rho_M = \left(\frac{65}{4,9_{volume-sólido}} + \frac{35}{1,0_{volume-fluido}} \right) = 2,07 \frac{g}{cm^3}$$

Temos como obter a vazão volumétrica da mistura:

$$\rightarrow Q_M = V_M \times A = 1,676 \frac{m}{s} \times \frac{3,1415}{4} \cdot \left(48 \cancel{m} \times \frac{1m}{10^2 \cancel{m}} \right)^2$$

$$Q_M = 0,303 \frac{m^3}{s}$$

Novamente iremos adotar a equação de Bernoulli, o procedimento é identico ao adotado para o caso de fluidos Newtonianos, o que muda é a correlação usada no cálculo do fator de atrito.

$$\left(\frac{P_1^{P_1=P_2}}{\gamma} + \frac{V_1^2/V_1=V_2}{2g} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2^{P_2=P_1}}{\gamma} + \frac{V_2^2/V_1=V_2}{2g} + Z_2 \right) + h_{bomba} = h_f \text{ que pode ser perdida por atrito}$$

$$h_{bomba} = h_f \text{ que pode ser perdida por atrito} - Z_1 \Rightarrow h_{bomba} = h_f - 1000m$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exemplo: Mineroduto de SAMARCO:

Cálculo da perda de energia por atrito:

Pela equação de Darcy teremos (lógico que pelas informações fornecidas, iremos desprezar as perdas nos acessórios):

$$h_f = \frac{f L_{eq} V_M^2}{2 Dg} = \frac{f 400 \cancel{km} \frac{10^3 m}{\cancel{km}} 1,676^2}{2 \times 48 \cancel{m} \frac{1m}{10^2 \cancel{m}} \times 9,81} = 119301,51 f$$

O problema forneceu as informações a respeito da reologia da suspensão:

$$S = 0,060 \lambda^{0,91} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right) \Rightarrow \text{Concluímos que: } k=0,06 \text{ e que } n=0,91, \text{ cuidado com as unidades}$$

Agora podemos usar ou uma correlação ou o diagrama de Moody para fluido não Newtoniano válido para este tipo de fluido. O primeiro passo é calcular o número de Reynolds:

$$R_{e\text{mod}} = \frac{V_M^{2-n} D^n \rho_M}{k \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n} = \frac{167,6^{(2-0,91)} 48^{0,91} 2,07}{\frac{0,06}{8} \left(\frac{6 \times 0,91 + 2}{0,91} \right)^n} = 3,66 \cdot 10^5 \Rightarrow \text{Turbulento!!!!}$$

Para este valor de Reynolds teremos que adotar uma correlação, perceba que não é possível fazer a leitura no gráfico!!!!

400 km, o terminal encontra-se 1000 m abaixo da mina;
dutos de aprox. 48cm de diâmetro interno ($e/D=10^{-4}$);
 $12 \cdot 10^6$ ton/ano de minério;
suspensão constituída de 65% em peso de minério
($\rho_s=4,9 \text{ g/cm}^3$);
dias de operação/ano: 340

$$S = 0,060 \lambda^{0,91} \left(\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right)$$

Fator de atrito de Fanning para escoamento de fluidos não Newtonianos
(DODGE & METZNER, 1959). Citado por PERRY & GREEN (1999).

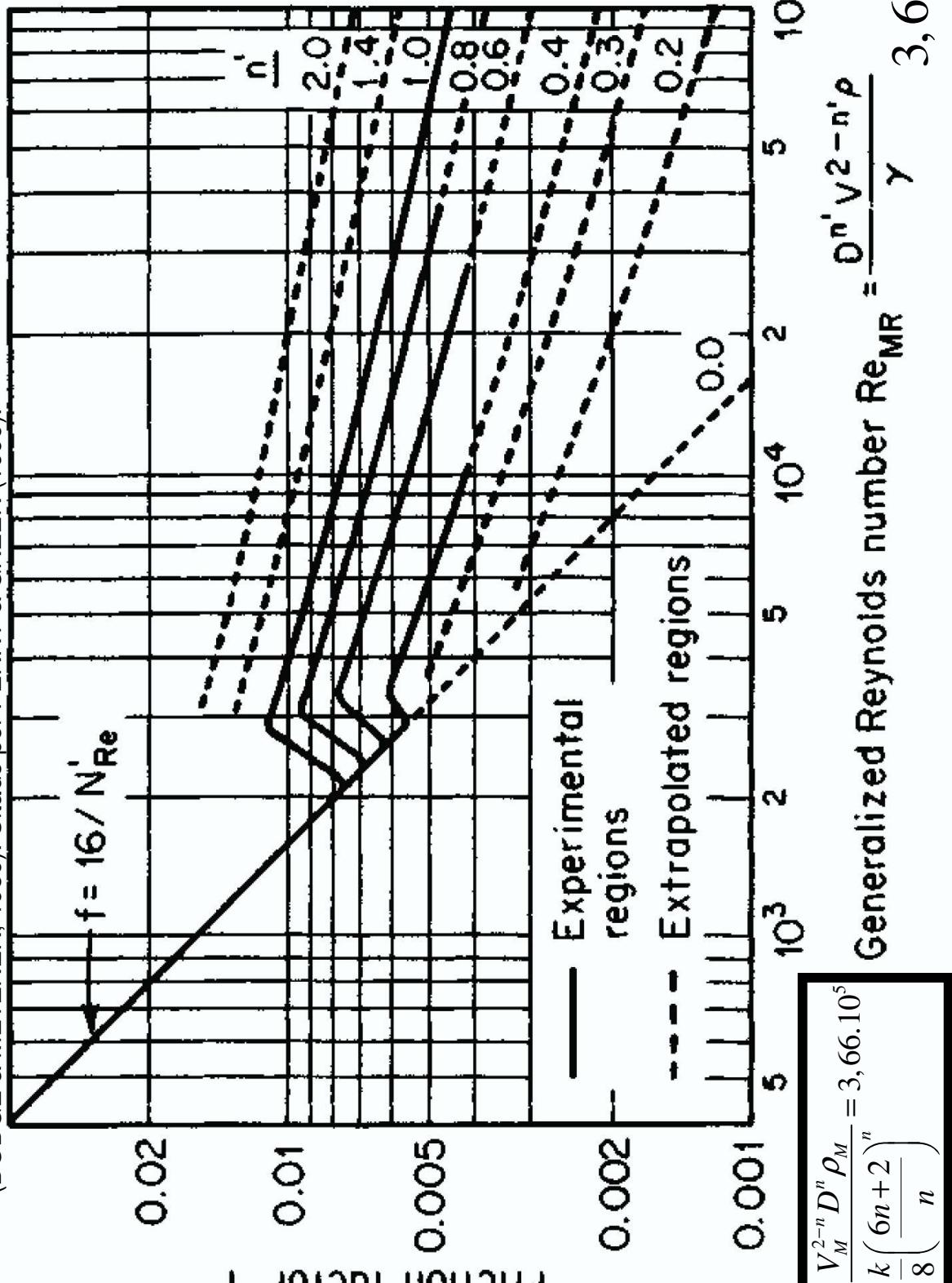


FIG. 6-11 Fanning friction factor for non-Newtonian flow. (From Dodge and Metzner, Am. Inst. Chem. Eng. J., 5, 189 [1959]).



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exemplo: Mineroduto de SAMARCO:

A equação que adotaremos é aquela citada em Massarani:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[0,27 \frac{e}{D} + \left(\frac{6,81}{Re_M} \right)^{0,9} \right]$$

$\frac{e}{D}$ é a rugosidade relativa do duto

sendo Re_M o número de Reynolds de METZNER & REED, (1955), definido por:

$$Re_M = \frac{D \nu \rho}{k \left(\frac{8v}{D} \right)^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} = 0,06 \left(\frac{8 \times 167,6}{48} \right)^{0,91-1} \left(\frac{3 \times 0,91+1}{4 \times 0,91} \right)^{0,91} = 3,66 \cdot 10^5$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[0,27 \frac{e}{D} + \left(\frac{6,81}{Re_M} \right)^{0,9} \right] = -2 \log \left[0,27 \times 1 \cdot 10^{-4} + \left(\frac{6,81}{3,66 \cdot 10^5} \right)^{0,9} \right]$$

$$\Rightarrow f = 1,50 \cdot 10^{-2}$$

Vimos que:

$$h_f = 119301,51f = 119301,51 \times 1,50 \cdot 10^{-2} = 1789,5264m$$

$$\left(\frac{P_1^{P_1=P_2}}{\gamma} + \frac{V_1^2/V_1=V_2}{\gamma g} + Z_1 \right) - \left(\frac{P_2^{P_1=P_2}}{\gamma} + \frac{V_2^2/V_1=V_2}{\gamma g} + Z_2 \right) + h_{bomba} = h_f \text{ que pode ser perdida por atrito}$$

$$h_{bomba} = h_f \text{ que pode ser perdida por atrito} \rightarrow Z_1 \Rightarrow h_{bomba} = 1789,5264m - 1000m = 789,52m$$

Sabemos que Potência é:

$$Pot = \frac{(\rho_M g h_{bomba})_{deltaP} \times Q_M}{eficiencia} = \frac{(2,07 \cdot 10^3 \times 9,81 \times 789,52)_{deltaP} \times 0,303}{0,75} = 6477148,50W$$

$$Pot = 8666hp$$

400 km, o terminal encontra-se 1000 m abaixo da mina;
dutos de aprox. 48cm de diâmetro interno ($e/D=10^{-4}$);
 12.10^6 ton/ano de minério;
suspensão constituída de 65% em peso de minério
($\rho_s=4,9g/cm^3$);
dias de operação/ano: 340

$$S = 0,060 \lambda^{0,91} \left(\frac{\text{dyn}}{cm^2} \right)$$

note que a expressão de cálculo de Re é equivalente!!!

Cuidado com as correlações, você encontra as mais variadas, cada uma tem uma melhor faixa de aplicação. Ao usar diferentes correlações você poderá encontrar valores totalmente distintos para f e é claro para a potência da bomba. Logo, para um projeto deste tipo, não é indicado confiar em correlações e sim realizar testes experimentais para estimativa dos dados ou validação de uma correlação.



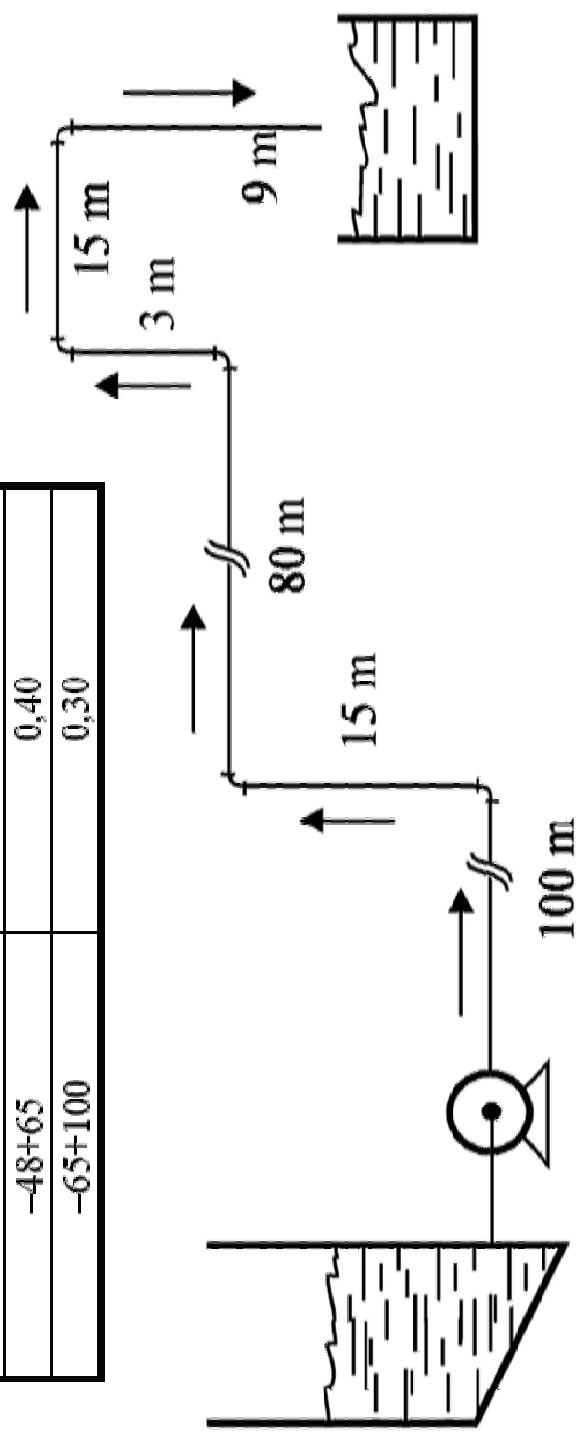
OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78.

Distribuição granulométrica da areia:

# Tyler	Fração Retida
-35+48	0,30
-48+65	0,40
-65+100	0,30





OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.

O primeiro passo é estimar o valor do diâmetro médio, mais uma vez, o ideal é usar o diâmetro médio de Sauter.

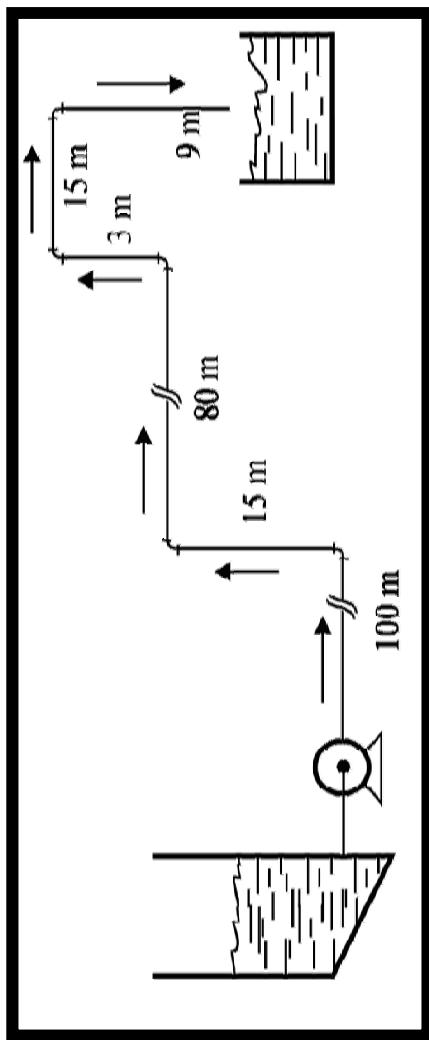
Equação usada no início do curso:

$$\overline{D} = \frac{1}{\sum_i \frac{(\Delta X)_i}{D_i}} \quad \text{diâmetro médio de cada faixa}$$

$$= \left(\frac{0,30}{\left(\frac{4,20 + 2,97}{2} \right)} \right) + \left(\frac{0,40}{\left(\frac{2,97 + 2,10}{2} \right)} \right) + \left(\frac{0,30}{\left(\frac{2,10 + 1,49}{2} \right)} \right)$$

$$dp = \overline{D} = 2,45 \cdot 10^{-4} m$$

Sistema Tyler (mesh)	Fração em massa retida (Δx)	Abertura da peneira d# (mm)
-35+48	0,30	0,297
-48+65	0,40	0,210
-65+100	0,30	0,149





OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.

O segundo passo é calcular a velocidade da mistura, sendo que o seu cálculo é feito levando-se em consideração a velocidade limite de transporte. Nesta caso, usaremos a correlação de Costapinto.

$$V_L = 6,34 C_V \sqrt[3]{gD} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{0,46} \left(\frac{dp}{D} \right)^{0,077}$$

neste caso deve-se considerar que

$$V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A} \rightarrow \text{velocidade da mistura}$$

sendo comercialmente aceita um valor de $V_M = 1,2V_L$ exatamente o sugerido no problema

$$\rightarrow \text{sendo } C_V = \left(\frac{Q_s}{Q_f + Q_s} \right) \Rightarrow V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A} = 1,2 \times 6,34 \left(\frac{Q_s}{Q_f + Q_s} \right)^{1/3} \sqrt{gD} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{0,46} \left(\frac{dp}{D} \right)^{0,077}$$

$$\begin{aligned} \text{O valor de } W_s \text{ foi fornecido e vale } W_s = 40 \frac{\cancel{kg}}{\cancel{h}} \times \frac{10^3 \cancel{kg}}{1,06 \cancel{ton}} \frac{1 \cancel{h}}{3600 \cancel{s}} = 11,11 \frac{kg}{s} \Rightarrow Q_s = \frac{W_s}{\rho_s} = \frac{11,11 \frac{kg}{s}}{2,6 \frac{\cancel{kg}}{\cancel{m}^3} \times 10^3 \frac{\cancel{kg}}{\cancel{m}^3}} = \frac{11,11 \frac{kg}{s}}{26 \frac{kg}{m^3}} \end{aligned}$$

$$\rightarrow Q_s = 4,27 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 - sólidos}{s}, \text{ o diâmetro do tubo é de 5 polegadas: } D = 5 \cancel{in} \times \frac{1m}{39,37 \cancel{in}} \Rightarrow D = 0,127m \rightarrow A = \frac{3,1415}{4} \times (0,127)^2$$

$$\rightarrow A = 1,27 \cdot 10^{-2} m^2$$

$$\frac{Q_f + 4,27 \cdot 10^{-3}}{1,27 \cdot 10^{-2}} = 1,2 \times 6,34 \left(\frac{4,27 \cdot 10^{-3}}{Q_f + 4,27} \right)^{1/3} \sqrt{9,81 \times 0,127} \left(\frac{2,6}{1,0} - 1 \right)^{0,46} \left(\frac{2,45 \cdot 10^{-4}}{0,127} \right)^{0,077}$$

$$(Q_f + 4,27 \cdot 10^{-3})^{1,33} = 0,0134 \Rightarrow Q_f = 3,94 \cdot 10^{-2} - 1,67 \cdot 10^{-2} \Rightarrow Q_f = 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{m^3 - fluido}{s}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.

$$\Rightarrow V_M = \frac{Q_f + Q_s}{A} = \frac{3,52 \cdot 10^{-2} \frac{m^3 - fluido}{s} + 4,27 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 - sólidos}{s}}{1,27 \cdot 10^{-2} m^2} \rightarrow \boxed{V_M = 3,11 \frac{m}{s}}$$

$$\rightarrow \text{sendo } C_v = \left(\frac{Q_s}{Q_f + Q_s} \right) = \left\{ \begin{array}{c} 4,27 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 - sólidos}{s} \\ \hline 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{m^3 - fluido}{s} + 4,27 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 - sólidos}{s} \end{array} \right\} \rightarrow \boxed{C_v = 10,82\%}$$

Agora já é possível calcular a queda de pressão, como visto teremos que decompor em duas etapas. A primeira iremos considerar a queda de pressão no trecho horizontal e depois no trecho vertical.

Para a horizontal temos a correlação de Costapinto:

$$\left(\frac{-\Delta P}{L} \right)_T - \left(\frac{-\Delta P}{L} \right)_F = 385 \left(\frac{V_M^2}{gD} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{dp}{D} \right)^{0,23} \left(\frac{\rho_s - 1}{\rho} \right)^{1,38} \Rightarrow \text{faixa: } \boxed{0,009 < \frac{dp}{D} < 0,15} \quad [1,18 < \rho_s < 4,43]$$

sendo: $\left(\frac{-\Delta P}{L} \right)_T$ a queda de pressão total da mistura

sendo: $\left(\frac{-\Delta P}{L} \right)_F$ a queda de pressão do fluido escorrendo isoladamente a V_M (considerando o apenas o atrito fluido-tubulação)

Portanto:

$$\boxed{\left(\frac{-\Delta P}{L} \right)_F = \frac{f V_M^2 \rho}{2D} \Rightarrow f=f(Re,D)}$$

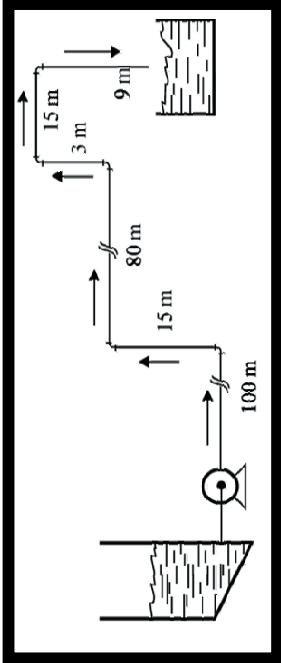
$$\boxed{Re = \frac{DV_M \rho}{\mu}}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.



$$\rightarrow V_m = 3,1 \frac{m}{s} \rightarrow C_v = 0,108 = 10,82\%$$

Para a horizontal temos a correlação de Costapinto:

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-H} - \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = 385 \left(\frac{V_m^2}{gD} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{dp}{D} \right)^{0,23} \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)^{1,38}$$

$$C_v \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F$$

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = \frac{f V_m^2 \rho}{2D} \Rightarrow \text{sendo: } Re = \frac{DV_m \rho}{\mu} = \frac{0,127 \times 3,11 \times 1000}{1,10^{-3}} = 3,95 \cdot 10^5$$

Aço comercial possui rugosidade relativa de e/D=0,00036

fazendo a leitura no gráfico de Moody encontraremos: → veja: f=0,017

$$\text{Portanto teremos: } \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = \frac{f V_m^2 \rho}{2D} = \frac{0,017 \times 3,11^2 \times 1000}{2 \times 0,127} \rightarrow \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_F = 647,34 \frac{N}{m^3}$$

$$\Rightarrow \frac{\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-H} - 647,34}{0,108 \times 647,34} = 385 \left(\frac{3,11^2}{9,81 \times 0,127} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{2,45 \cdot 10^{-4}}{0,127} \right)^{0,23} \left(\frac{2,6}{1,0} - 1 \right)^{1,38} \rightarrow \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-H} = 1212,62 \frac{N}{m^3}$$

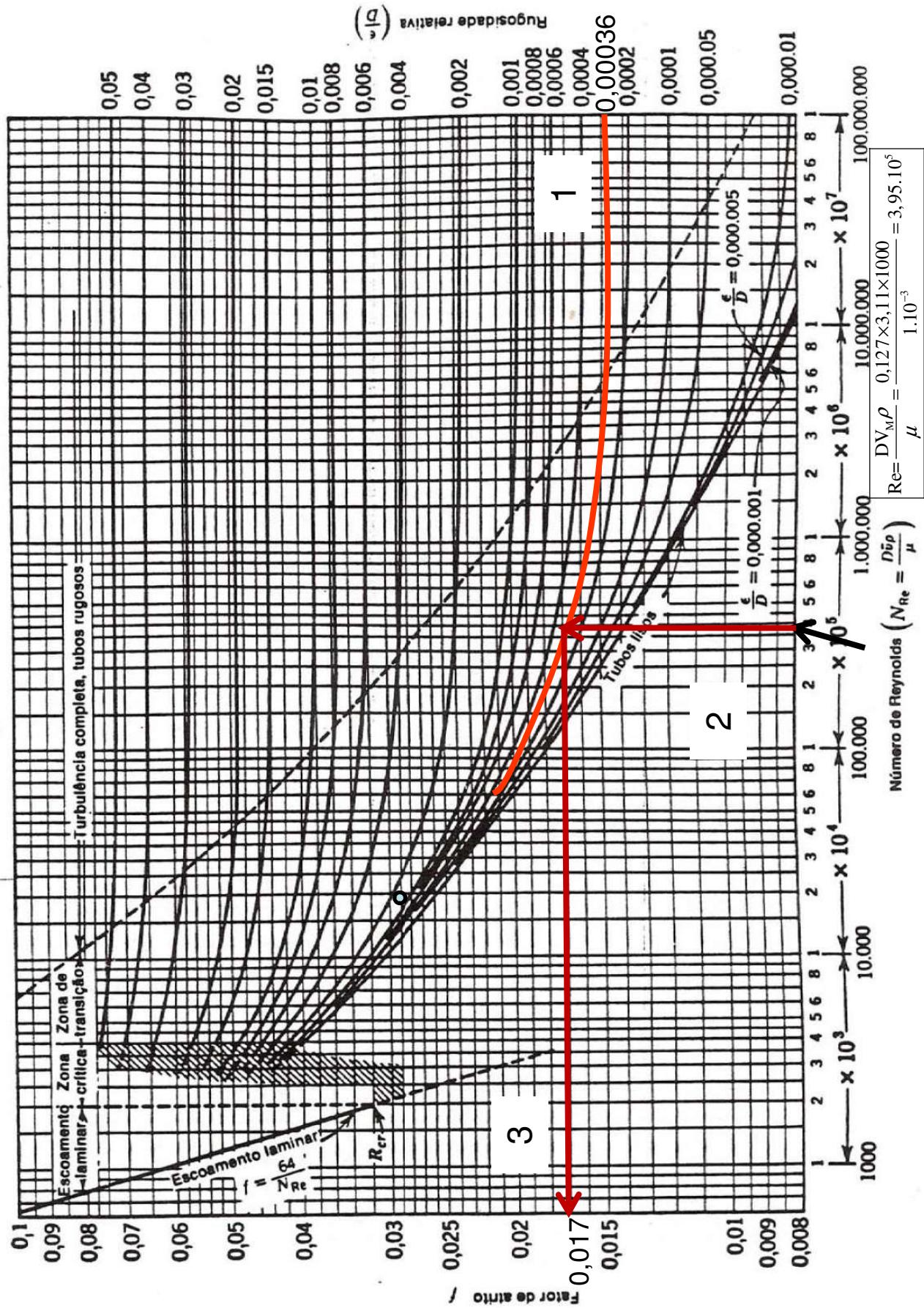
Portanto teremos a queda de pressão total para o trecho horizontal de 195m sendo:

$$\Rightarrow \left(-\frac{\Delta P}{195} \right)_{T-H} = 1212,62 \frac{N}{m} \Rightarrow [\Delta P]_{T-H} = 236460,94 Pa$$

O próximo passo é calcular a queda de pressão total válida para o trecho vertical.



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1





OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.

$$(\Delta P)_{T-H} = 236460,94 \text{ Pa}$$

O próximo passo é calcular a queda de pressão total válida para o trecho vertical.

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-V} = \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{F-V} + \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V}$$

Mostramos que:

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V} = 647,34 \frac{N}{m^3}$$

sendo: $\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho)g \rightarrow$ típico da fluidização!!!

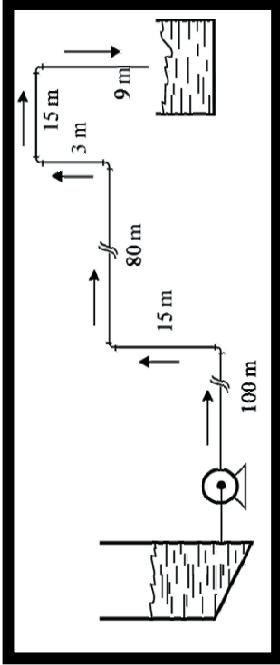
$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V} = (1-\varepsilon)(\rho_s - \rho)g \rightarrow Sabemos\ que\ c_v = (1-\varepsilon) = 0,108 \Rightarrow \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V} = 0,16(2,6-1,0) \times 9,81$$

$$\rightarrow \left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{SF-V} = 1,69 \frac{N}{m^3}$$

Portanto:

$$\left(-\frac{\Delta P}{L} \right)_{T-V} = 647,34 \frac{N}{m^3} + 1,69 \frac{N}{m^3} = 649,03 \frac{N}{m^3} \rightarrow \text{trecho vertical } 27\text{m}$$

$$\Rightarrow (\Delta P)_{T-V} = 17523,81 \text{ Pa}$$



A soma final nos leva a:

$$(\Delta P)_{T-V} + (\Delta P)_{T-H} = 17523,81 + 236460,94 = 253984,75 \text{ Pa}$$

Esta é a energia perdida por atrito durante o trajeto nos trechos retos, no caso dos acessórios, iremos usar a sugestão do enunciado:

$$(\Delta P)_{T-accessorios} = 0,25 \times 253984,75 \text{ Pa} = 63496,19 \text{ Pa}$$

$$(\Delta P)_{TOTAL_COMPLETA} = (\Delta P)_{T-V} + (\Delta P)_{T-H} + (\Delta P)_{T-accessorios}$$

$$(\Delta P)_{TOTAL_COMPLETA} = 317480,94 \text{ Pa}$$



OPERAÇÕES UNITÁRIAS-1

Capítulo XI – TRANSPORTE HIDRÁULICO DE PARTÍCULAS

Exercício: Calcular a vazão de água e a potência de bombeamento requeridas para o transporte hidráulico de 40 ton/h de areia na instalação abaixo esquematizada. Os dutos são de aço com diâmetro 5" e o sistema deve operar com uma velocidade de mistura 20% maior que a velocidade crítica de deposição. A perda de carga nos acidentes pode ser estimada em 25% daquela proporcionada pelos dutos. Temperatura no bombeamento: 30°C. Densidade e esfericidade da areia: 2,6 g/cm³ e 0,78. Considere uma eficiência de 60% para a bomba empregada no sistema.

Novamente iremos adotar a equação de Bernoulli, o procedimento é idêntico ao adotado para o caso de fluidos Newtonianos, o que muda é a correlação usada no cálculo do fator de atrito.

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2/2g}{\gamma} + Z_1^0 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2/2g}{\gamma} + Z_2 \right) + h_{bomba} = h_f \text{ perda por atrito}$$

$$\rho_M g h_f \text{ perda por atrito} = (\Delta P)_{TOTAL_COMPLETA} \rightarrow h_f \text{ perda por atrito} = \frac{(\Delta P)_{TOTAL_COMPLETA}}{\rho_M g} = \frac{317480,94 Pa}{1173 \times 9,81}$$

$$h_f \text{ perda por atrito} = 27,60 m$$

Consideremos uma massa de 100 g:

$$\rho_M = (1 - \varepsilon) \rho_s + \varepsilon \rho = 0,108 \times 2,6 + 0,892 \times 1,0 = 1,173 \frac{kg}{m^3} \times \frac{1kg}{10^3 g} \times \frac{10^6 g}{1m^3} = 1173 \frac{kg}{m^3}$$

$$h_{bomba} = h_f \text{ que pode ser perdida por atrito} + Z_2 \Rightarrow h_{bomba} = 27,60 + 9 = 36,60 m$$

Sabemos que Potência é:

$$sendo: Q_M = (Q_f + Q_s) = 3,52 \cdot 10^{-2} \frac{m^3 - fluido}{s} + 4,27 \cdot 10^{-3} \frac{m^3 - sólidos}{s} = 0,0395 \frac{m^3 - suspensão}{s}$$

$$Pot = \frac{(\rho_M g h_{bomba})_{deltaP} \times Q_M}{eficiencia} = \frac{(1,173 \cdot 10^3 \times 9,81 \times 36,60)_{deltaP} \times 0,0395}{0,6} = 27726,43,41 W$$

$$Pot = 37,18 hp \Rightarrow 38hp$$

