

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

MARTINS

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO AXIAL ANULAR  
DE MISTURA SÓLIDO-FLUIDO NÃO-NEWTONIANO  
EM DUTOS HORIZONTAIS E INCLINADOS

*Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida  
pelo Engenheiro André Leibsohn Martins e aprovada  
pela Comissão Julgadora em 08/11/90*

*César Costapinto*  
*César Costapinto Santana*

AUTOR : ANDRÉ LEIBSOHN MARTINS *ALM*  
ORIENTADOR : CÉSAR COSTAPINTO SANTANA *CS*  
37/90

NOVEMBRO, 1990

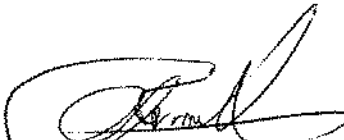
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

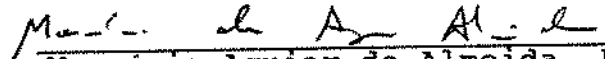
A DISSERTAÇÃO "MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO AXIAL ANULAR DE MISTURA SÓLIDO-FLUIDO NÃO-NEWTONIANO EM DUTOS HORIZONTAIS E INCLINADOS", ELABORADA POR ANDRÉ LEIBSOHN MARTINS E APROVADA POR TODOS OS MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA FOI ACEITA PELA SUB-COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO

CAMPINAS, 8 DE NOVEMBRO DE 1990

BANCA EXAMINADORA

  
César Costapinto Santana, Ph. D.

  
Antônio Carlos Bannwart, Ph. D.

  
Maurício Aguiar de Almeida, Ph. D.

À memória do meu avô  
Martins, por sua  
bondade.

## AGRADECIMENTOS

A todos os alunos, funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Petróleo e da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, por terem de alguma forma colaborado com este trabalho.

Aos meus pais e a toda a minha família pelo amor e compreensão.

Ao prof. Ph.D. César Costapinto Santana pela orientação deste trabalho.

Ao amigo Carlos Henrique Marques de Sá pela troca de idéias durante a gestação do trabalho.

Aos companheiros do Setor de Tecnologia de Perfuração de Centro de Pesquisas da Petrobrás pela amizade e incentivo.

À engenheira MSc. Maria das Graças Pena Silva pelo estímulo ao meu aprimoramento profissional.

Ao engenheiro Romeu de Almeida Neves e à Petrobrás por terem me dado a oportunidade de realizar o curso de mestrado em Engenharia de Petróleo.

Ao prof. Ph.D. Antonio Carlos Bannwart pelos esclarecimentos prestados.

A Rogério Ferreira de Paiva pela ajuda na edição do trabalho.

À Marcinha pela luz dos seus olhos.

A Lorca e Cazuza pela luz das estrelas.

## SUMÁRIO

	PÁG.
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
NOMENCLATURA	x
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO	
I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE ESCOAMENTOS SÓLIDO - LÍQUIDO	
1.2 - O CARREAMENTO DE CASCALHOS RESULTANTES DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO	
1.3 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DO PROBLEMA	
1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO	
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
II.1 - MODELOS PARA ANÁLISE DO CARREAMENTO DE CASCALHOS EM POÇOS INCLINADOS E HORIZONTAIS	
II.2 - OUTROS MODELOS PARA A DESCRIÇÃO DO ESCOAMENTO SÓLIDO - LÍQUIDO	
II.3 - VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS FLUIDOS NÃO - NEWTONIANOS	
II.4 - PADRÕES DE ESCOAMENTO SÓLIDO - LÍQUIDO	
II.5 - ANÁLISE DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ESTRATIFICADOS	

III - O MODELO PROPOSTO	14
III.1 - VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO PROBLEMA	
III.2 - DESCRIÇÃO QUALITATIVA	
III.3 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	
III.3.1 - LEIS DE CONSERVAÇÃO	
III.3.2 - CÁLCULO DE TENSÕES CISALHANTES	
III.3.3 - FORÇA ESTÁTICA SÓLIDO - SÓLIDO	
III.3.4 - EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TURBULENTA	
III.3.5 - FORMULAÇÃO FINAL	
III.3.6 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOMENTO LINEAR	
IV - SOLUÇÃO DO MODELO	34
IV.1 - METODOLOGIA ADOTADA	
IV.2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL	
V - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	37
V.1 - ESCOAMENTO EM DUTOS CIRCULARES	
V.2 - ESCOAMENTO EM DUTOS ANULARES	
V.2.1 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO A PARÂMETROS INCORPORADOS	
V.2.2 - AVALIAÇÃO DA LIMPEZA DE POÇOS	
V.2.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A PARÂMETROS OPERACIONAIS	
V.2.4 - DIAGRAMAS ADIMENSIONAIS	
V.2.5 - MUDANÇAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO	
V.2.6 - PERDAS DE CARGA	
V.2.7 - COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS	

VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
VI.1 - CONCLUSÕES	
VI.2 - RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO	
VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE 1 - DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES GERAIS PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS	85
APÊNDICE 2 - EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	93
APÊNDICE 3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS EMPÍRICOS DO MODELO A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS	100



## LISTA DE FIGURAS

1 - O Carreamento de Cascalhos em Poços Inclinados	2
2 - Mapa de Padrões para o Escoamento Horizontal Sólido-Líquido, segundo Iyoho (1980)	12
3 - O Modelo de Duas Camadas	16
4 - Influência da Concentração de Alimentação na Perda de Carga em Tubos	38
5 - Influência do Diâmetro do Tubo na Concentração de Sólidos	40
6 - Influência da Reologia do Fluido e da Concentração de Alimentação na Perda de Carga em Tubos	40
7 - Influência da Reologia do Fluido e do Regime de Escoamento da Camada Superior na Altura do Leito de Sólidos	42
8 - Previsão da Concentração Volumétrica de Sólidos em um Escoamento Anular Calculada pelas Quatro Etapas do Modelo	44
9 - Previsão da Altura do Leito em um Escoamento Anular Calculada pelas Quatro Etapas do Modelo	45

10 - Influência da Inclinação do Poço na Concentração de Sólidos em um escoamento Anular	46
11 - Influência da Inclinação do Poço na Altura do Leito em um escoamento Anular	47
12 - Influência da Excentricidade do Anular na Concentração de Sólidos	48
13 - Influência da Excentricidade do Anular na Altura do Leito	48
14 - Influência das Dimensões do Espaço Anular na Concentração de Sólidos	49
15 - Influência das Propriedades Reológicas do Fluido na Concentração de Sólidos em um escoamento Anular	50
16 - Influência das Propriedades Reológicas do Fluido na Altura do Leito em um escoamento Anular	51
17 - Influência da Massa Específica do Fluido na Concentração de Sólidos	52
18 - Influência da Massa Específica do Fluido na Altura do Leito em um escoamento Anular	52

19 - Influência da Vazão de Sólidos na Alimentação na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular	53
20 - Influência da Vazão de Sólidos na Alimentação na Altura do Leito em um Escoamento Anular	54
21 - Influência do Tamanho das Partículas na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular	55
22 - Influência da Forma das Partículas na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular	56
23 - Análise de Sensibilidade da Altura do Leito em Relação a Diversos Parâmetros Operacionais no Trecho Horizontal do Poço 9-FZB-446D-CE	59
24 - Análise de Sensibilidade da Concentração de Sólidos em Relação a Diversos Parâmetros Operacionais no Trecho Horizontal do poço 9-FZB-446D-446D-CE	60
25 - Influência da Vazão de Fluido na Altura do Leito para os Dados do Poço 9-FZB-446D-CE	62
26 - Variação da Concentração de Sólidos com o Parâmetro X' para Quatro Fluidos Distintos	64

27 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro $X'$ para Quatro Fluidos Distintos	64
28 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro $X'$ para Duas Excentricidades	65
29 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro $X'$ para Duas Inclinações	66
30 - Influência da Inclinação, Reologia do Fluido e Excentricidade na Vazão Crítica para Não Formação de Leito	68
31 - Influência da Vazão de Bombeio na Perda de Carga Anular para um Fluido Puro e com Cascalhos	70
32 - Comparação Entre o Modelo Apresentado e os Existentes na Literatura	71
33 - Procedimento Geral para Obtenção de Equações Médias	86
34 - Volume de Controle Bifásico	87
35 - Seção Transversal do Duto	90
36 - Tubo com Depósito	94

37 - Anular Concêntrico com Depósito	95
38 - Definição dos Ângulos no Anular Concêntrico - Região II	96
39 - Anular Excêntrico com Depósito	99

## LISTA DE TABELAS

1 - Influência dos Parâmetros Simulados Experimentalmente por Iyoho (1980) na Eficiência de Limpeza do Anular	7
2 - Parâmetros Reológicos dos Fluidos Utilizados nas Simulações	39
3 - Resultados do Escoamento Sólido-Líquido em Tubos	41
4 - Dados Relativos ao Poço 9-FZB-446D-CE	57
5 - Comparação de Previsões de Mudança de Padrão	69
6 - Grandezas Características das Equações de Balanço	88
7 - Ajuste dos Parâmetros Empíricos Para o Escoamento em Tubos	101
8 - Ajuste dos Parâmetros Empíricos para o Escoamento em Dutos Anulares	102

## NOMENCLATURA

### Alfabeto Romano

- A - Área,  $m^2$
- A - Superfície relativa ao volume de controle bifásico
- C - Concentração volumétrica de sólidos
- $C_{SOL}$  - Concentração volumétrica de sólidos no equilíbrio
- C - Contorno relativo à superfície A
- D - Diâmetro hidráulico, m
- $D_e$  - Diâmetro do tubo externo, m
- $D_h$  - Diâmetro hidráulico do anular, m
- $d_p$  - Diâmetro da partícula, m
- e - Energia interna por unidade de massa, J/Kg
- F - Força estática, N
- $F_{MAX}$  - Força estática máxima, N
- $F_N$  - Força normal, N
- f - Aceleração imposta por uma força de campo,  $m/s^2$
- f - Coeficiente de atrito de Fanning
- g - Aceleração da gravidade,  $m/s^2$
- h - Altura do leito, m
- J - Termo de fluxo na equação de balanço
- K - Índice de consistência de um fluido,  $N \cdot s^n/m^2$
- k - Constante geométrica do anular
- L - Distância entre os centros dos círculos que compõem uma seção anular, m
- m - Taxa de transferência de massa por unidade de área por unidade de tempo,  $Kg/(m^2 \cdot s)$

- $\vec{N}$  - Vetor unitário normal à interface do volume de controle bifásico  
 $n$  - índice de comportamento de um fluido  
 $\vec{n}_1$  - Vetor unitário normal à superfície externa da fase 1 no volume de controle bifásico  
 $\vec{n}_{kC}$  - Vetor unitário normal a C, localizado no plano transversal na direção da fase k  
 $\vec{n}_2$  - Vetor unitário normal à superfície externa da fase 2 no volume de controle bifásico  
P - Pressão, Pa  
q - Fluxo de calor, J/(Kg.m<sup>2</sup>)  
r - Raio, m  
Re - número de Reynolds  
Re<sub>c</sub> - número de Reynolds crítico  
Re<sub>w</sub> - número de Reynolds da partícula  
S - Perímetro, m  
T - Tensor das tensões, Pa  
t - Tempo, s  
U - Velocidade média na seção e no tempo, m/s  
V - Velocidade superficial média na seção e no tempo, m/s  
V - Volume de controle bifásico  
X' - Parâmetro de Lockhart-Martinelli modificado  
y - coordenada que define a altura de uma seção em um duto, m  
z - coordenada axial de um eixo, m



## Alfabeto Grego

- $\alpha$  - Coeficientes para cálculo do fator de atrito de Fanning
- $\beta$  - Coeficientes para cálculo do fator de atrito de Fanning
- $\gamma$  - Coeficientes para cálculo do fator de atrito de Fanning
- $\dot{\gamma}$  - Taxa de deformação,  $s^{-1}$
- $\epsilon$  - Coeficiente de difusão médio
- $\epsilon'$  - Coeficiente de difusão local
- $\eta$  - Coeficiente de escorregamento
- $\theta$  - Ângulo de inclinação do poço, graus
- $\theta_b$  - Ângulo que caracteriza a deposição de sólidos em um duto, radianos
- $\theta_b^*$  - Ângulo que caracteriza a deposição de sólidos na região II de um duto anular, radianos
- $\Pi_1$  - Grupamento adimensional
- $\Pi_2$  - Grupamento adimensional
- $\Pi_3$  - Grupamento adimensional
- $\rho$  - Massa específica,  $Kg/m^3$
- $\tau$  - Tensão cisalhante, Pa
- $\Phi$  - Termo de fonte nas equações de balanço
- $\phi$  - Ângulo de atrito interno
- $\phi'$  - esfericidade
- $\Psi$  - Quantidade específica nas equações de balanço
- $\omega$  - Velocidade média de sedimentação de um conjunto de partículas sólidas em um fluido, m/s
- $\omega'$  - Velocidade local de sedimentação, m/s
- $\omega_o$  - Velocidade terminal de uma partícula, m/s

## Subscritos

f - Fluido

M - Mistura

P - Partícula

i - Interface

k - Fase k

L - Leito

s - Suspensão

$\gamma$  - Total

1 - Fase 1

2 - Fase 2

## RESUMO

É apresentado um modelo matemático de caráter mecanicista para descrever o escoamento permanente de misturas sólido-fluido não-newtoniano em dutos anulares excêntricos inclinados e horizontais. Considerou-se um modelo de duas camadas estratificadas sendo a superior uma suspensão heterogênea e a inferior um leito compacto de sólidos. Foram formuladas para o sistema, as leis de conservação da massa e do momento linear, bem como equações constitutivas. Além disso, foi adotado o mecanismo da difusão turbulenta para descrever a dispersão de partículas sólidas na camada suspensa. Tal formulação permite a solução do problema para os diversos padrões que caracterizam o escoamento em questão.

A elaboração de um programa simulador permitiu a aplicação do modelo ao carreamento de cascalhos resultantes da perfuração de poços de petróleo inclinados e horizontais. Foram obtidas curvas para previsão da concentração de sólidos e de perdas de carga em função de diversas variáveis operacionais. O programa simulador permite então a quantificação do efeito das variáveis na eficiência de limpeza de poços e pode ser uma ferramenta útil na programação de parâmetros hidráulicos de perfuração.

## ABSTRACT

A mechanistic model was developed to describe the steady-state flow of solid - non newtonian fluid mixtures in inclined or horizontal eccentric annulus. The model consists of a two-layer configuration, the top layer being a heterogeneous suspension and the botton one a compact bed of solids. Conservation laws of mass and linear momentum were formulated for the system, as well as, interaction laws between mixture and walls and for the interface of the two layers. Besides, a turbulent difusion process was used to characterize the mechanism of dispersion of particles in the upper layer. The system developed was solved for the several patterns which characterize the solid-liquid two phase flow, using itterative methods.

The elaboration of a computer program allowed the application of the model in the analysis of the drilled cuttings transport in directional and horizontal oilwells. Curves for prediction of solids concentration, bed height, friction losses and critical flow rate in funciton of several independent variables were obtained. The computer simulator may be an effective tool in the programming of drilling hydraulics.

## I - INTRODUÇÃO

### 1.1 - IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE ESCOAMENTOS SÓLIDO-LÍQUIDO

O estudo de escoamentos bifásicos sólido-líquido é de amplo interesse na engenharia, tendo aplicações diversas nas indústrias químicas, metalúrgicas, alimentícias, etc, bem como nas operações de transporte hidráulico de minérios.

Na indústria do petróleo, o tema é de especial importância nas áreas de perfuração e estimulação de poços. Nestas operações é frequente o uso de fluidos não-newtonianos como agentes carreadores de partículas sólidas. Como exemplos podemos citar as operações de fraturamento hidráulico e o transporte de cascalhos resultantes da perfuração de poços. A análise deste último item é o objetivo tecnológico principal deste trabalho.

### 1.2 O CARREAMENTO DE CASCALHOS RESULTANTES DA PERFURAÇÃO DE POÇOS

Dentre os custos considerados na exploração comercial de um campo de petróleo, os de perfuração constituem parcela significativa do total. Deste modo, as grandes empresas de petróleo empenham-se na busca de novas tecnologias para perfuração de poços que permitam tornar seus investimentos mais atrativos. Contudo, a adoção de novas técnicas traz consigo, frequentemente, novos problemas operacionais a serem resolvidos.

Um bom exemplo é o recente desenvolvimento de técnicas para perfuração de poços de elevada inclinação e até horizontais, que

permitem a otimização do aproveitamento de um reservatório com um mínimo de poços perfurados.

Durante a perfuração desses poços, passou-se a observar, eventualmente, problemas operacionais tais como torque excessivo na coluna de perfuração ou a prisão desta em caso de interrupção da circulação de fluido. Uma das razões principais para a ocorrência de tais fatos é a remoção ineficiente dos cascalhos cortados pela broca até a superfície. Nos trechos horizontais ou de elevada inclinação existe tendência à segregação das partículas na parte inferior da região anular poço-coluna, devido à ação de forças gravitacionais.

Assim, o problema do carreamento de cascalhos, relativamente solucionado para poços verticais e pouco inclinados, voltou a despertar interesse entre os pesquisadores da área. O novo cenário tecnológico tem motivado a realização de diversos estudos visando compreender melhor os fenômenos físicos envolvidos no transporte de partículas sólidas por fluidos de características notadamente não-newtonianas. A figura 1 mostra esquematicamente o problema em questão.

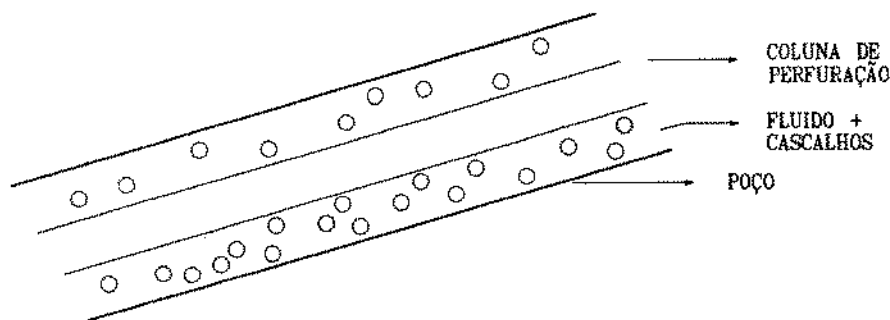


Fig. 1 - O Carreamento de Cascalhos em Poços Inclinados

### 1.3 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DO PROBLEMA

Essencialmente, existem duas técnicas distintas para desenvolvimento de pesquisas em escoamentos bifásicos:

A primeira consiste na obtenção de correlações empíricas ou semi-empíricas a partir de observações experimentais, feitas em equipamentos de escala piloto que procurem simular, na medida do possível, situações reais. Daí, as correlações são levantadas a partir de um tratamento estatístico dos dados obtidos. Podem ainda ser empregadas técnicas de análise dimensional que possibilitam o agrupamento de variáveis de forma mais racional. Contudo, o grande número de variáveis envolvidas, algumas de difícil simulação em laboratório, antecipa restrições ao uso de tais métodos, em especial em regiões afastadas das faixas de variáveis nas quais as correlações foram obtidas.

A segunda técnica consiste no desenvolvimento de modelos teóricos mecanicistas que permitam descrever o fenômeno em questão. Tais modelos são baseados em leis de conservação e equações constitutivas que caracterizem o sistema bifásico. Muitas vezes a formulação adequada de tais leis é bastante complexa, o que faz com que muito esforço ainda deva ser despendido nesta área. Um número bastante pequeno de trabalhos foi publicado a respeito da modelagem do escoamento axial anular sólido-líquido.

---

#### 1.4 - OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste trabalho é apresentado e discutido um modelo teórico para descrever o escoamento axial-anular de misturas sólido-fluido não-newtoniano em dutos horizontais e inclinados em regime permanente. O modelo tem caráter geral e é aplicável às diversas configurações que as fases podem assumir no interior do duto anular.

A partir daí foi elaborado um programa de computador para solução do modelo que permite simular o problema do carreamento de cascalhos para diversas situações típicas de campo. Finalmente são apresentados diagramas que ilustram e quantificam a relação entre as variáveis dependentes e independentes do problema.

Acredita-se que o trabalho aqui descrito seja uma etapa a mais na compreensão do complexo fenômeno em questão, bem como uma ferramenta potencial para orientar projetos hidráulicos de perfuração de poços visando redução de custos, minimização do desgaste de equipamentos e segurança operacional.

---



## II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item, é apresentado um levantamento geral sobre os diversos modelos, empíricos e teóricos, apresentados na literatura para descrever o problema do carreamento de cascalhos em poços inclinados. Muitos deles são provenientes de um projeto de pesquisas na área, de caráter predominantemente experimental, desenvolvido na Universidade de Tulsa, nos Estados Unidos.

Lomba & Martins (1989) apresentaram uma compilação de todos os trabalhos relativos ao carreamento de cascalhos até então desenvolvidos por este projeto.

Além disto, são citados trabalhos desenvolvidos em outras áreas tecnológicas que são utilizados como base na formulação matemática desenvolvida. Aqui, não houve preocupação em listar todos os estudos existentes, mas apenas os julgados pertinentes para aplicação no trabalho desenvolvido.

### II.1 - MODELOS PARA ANÁLISE DO CARREAMENTO DE CASCALHOS EM POÇOS INCLINADOS E HORIZONTAIS

A partir de 1979, foram desenvolvidos, na Universidade de Tulsa, trabalhos experimentais objetivando estudar o problema do carreamento de cascalhos em poços inclinados. Muitos destes trabalhos são qualitativos e visam analisar efeitos de variáveis operacionais na eficiência de limpeza do poço.

Iyoho (1980) apresentou correlações semi-empíricas para avaliar o problema. Dentre as principais contribuições de seu trabalho, está a introdução da razão de transporte generalizada como parâmetro de avaliação de limpeza. Este conceito prevê a formação de um leito estacionário de sólidos restringindo a área aberta ao escoamento. A tabela 1 apresenta as conclusões de Iyoho a respeito da influência das variáveis operacionais pertinentes. As quatro correlações desenvolvidas permitem prever a razão de transporte generalizada e têm como principais parâmetros o regime de escoamento e a inclinação do poço.

Becker (1987) desenvolveu um conjunto de correlações para avaliar a limpeza do poço a partir do banco de dados resultante de todos os trabalhos sobre carreamento de cascalhos realizados na Universidade de Tulsa. O autor julgou que o parâmetro mais adequado para correlação era a concentração volumétrica total de sólidos, uma vez que a razão de transporte generalizada não contempla a possibilidade de movimento do leito de cascalhos. As correlações para predição da concentração volumétrica são função de diversos parâmetros, dentre os quais o ângulo de inclinação, a velocidade do fluido, a reologia e a geometria do anular.

Bin-Haddah (1988) desenvolveu dois modelos, um mecanicista e um semi-empírico para estudar o problema. O modelo mecanicista baseou-se num balanço de forças atuantes em uma partícula sólida para descrever o escoamento por saltos das partículas que se encontram depositadas na parte inferior do anular. O modelo semi-empírico adota um valor experimental, encontrado por Zandi

---

& Govatos (1967), para velocidade crítica de deposição de sólidos em tubos. Foram apresentadas expressões para previsão de concentração volumétrica de sólidos e vazão crítica. O modelo mecanicista, contudo, mostrou-se extremamente sensível à reologia, fato não comprovado experimentalmente.

Influência → Parâmetro	Grande	Moderada	Pequena
1. Vazão de fluido	X		
2. Inclinação do poço	X		
3. Propriedades Reológicas do fluido	X (escoamento laminar)	X (escoamento turbulento)	
4. Vazão de sólidos alimentados		X	
5. Concentração de sólidos alimentados		X	
6. Excentricidade		X	
7. Regime de escoamento		X	
8. Perfil de velocidade		X	
9. Rotação do tubo interno		X (em poços verticais regime laminar)	X (em poços inclinados)
10. Distribuição de partículas			X (estudos precários)

Tabela 1 - Influência dos Parâmetros Simulados Experimentalmente por Iyoho (1980) na Eficiência de Limpeza do Anular

Além dos trabalhos da Universidade de Tulsa, dois outros modelos a respeito do tema foram publicados:

Gavignet & Sobey (1986) apresentaram um modelo estratificado, de duas camadas, para descrever a formação de um leito móvel de cascalhos na parte inferior do anular excêntrico. O leito se movimentaria por um mecanismo de deslizamento, não sendo contemplado o movimento por saltos. A camada superior conteria apenas o fluido carreador, sem qualquer partícula em suspensão. Os autores apresentaram curvas para previsão de concentração volumétrica de sólidos e vazão crítica de deposição em função de diversas variáveis operacionais.

Martin (1989) desenvolveu, a partir de dados experimentais e de algumas considerações teóricas, uma série de expressões para a previsão da vazão crítica de deposição como função de diversos parâmetros. Como crítica a este trabalho, pode-se destacar que os dados experimentais foram obtidos em um trecho anular relativamente pequeno, o que talvez não garanta a ocorrência do regime permanente. Todos os trabalhos até aqui descritos consideram o escoamento com fluidos não-newtonianos.

## 11.2 - OUTROS MODELOS PARA A DESCRIÇÃO DO ESCOAMENTO SÓLIDO-LÍQUIDO

Um número bastante grande de trabalhos foi desenvolvido para modelar teoricamente o escoamento sólido-líquido, em especial em tubos circulares. Dentre eles iremos citar alguns que serviram de base para modelos de escoamento em dutos

---

anulares, ou que acrescentam algum aspecto novo.

Wicks (1971) desenvolveu um modelo para descrever o escoamento por saltos de partículas sólidas em uma mistura sólido-líquido no interior de uma tubulação. Bin-Haddah (1988) aplicou tais conceitos para o escoamento anular.

Wilson (1976) desenvolveu um modelo estratificado para descrever o deslizamento de um leito de sólidos depositado no interior de um tubo onde escoava uma mistura sólido-líquido. Gavignet & Sobey (1986) aplicaram este modelo para o escoamento anular.

Carstens (1969) introduziu o mecanismo da difusão turbulenta para propor um perfil de concentrações de sólidos escoando com água na camada superior de um tubo onde há formação de leito estacionário na parte inferior.

Doron et al. (1987) acoplaram as proposições de Carstens e Wilson sugerindo um modelo genérico adequado a diversos padrões de escoamento sólido-fluido.

### II.3 - VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS EM FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

Foram realizados diversos trabalhos experimentais visando a obtenção de correlações para a velocidade de sedimentação de sólidos em fluidos não-newtonianos. Bourgoyne et al. (1986) apresentam uma descrição detalhada das correlações mais conhecidas.

---

Recentemente, na Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, vêm sendo desenvolvidos trabalhos experimentais utilizando a técnica de fluidização para determinar a velocidade de sedimentação de partículas em fluidos não-newtonianos considerando-se o efeito da população de partículas. Laruccia (1990) levantou correlações aplicáveis a qualquer modelo reológico de fluido, para cálculo da velocidade de sedimentação de partículas não esféricas.

Sá (1990) obteve novas correlações onde foram incorporados efeitos de parede, a partir de testes experimentais em seções anulares.

#### 11.4 - PADRÕES DE ESCOAMENTO SÓLIDO-LÍQUIDO

Diversos autores estudaram experimentalmente as configurações que o sistema sólido-líquido assume no interior de tubos. A estas configurações dá-se o nome de padrões de escoamento. Normalmente, são levantados mapas para designar a ocorrência de tais padrões em função de variáveis operacionais, com sensibilidade compatível com a verificada experimentalmente.

A classificação mais usual para os padrões de escoamento sólido-líquido é a apresentada, dentre outros, por Goedde (1978) que inclui os seguintes tipos de configuração:

- leito estacionário;
  - leito móvel;
  - suspensão heterogênea;
  - suspensão homogênea.
-

Os dois primeiros padrões se caracterizam pela deposição, estacionária ou não, de partículas sólidas na parte inferior do duto. Já nos dois últimos, o sistema encontra-se totalmente em suspensão, e a fase sólida apresenta um perfil de concentrações ao longo da seção transversal (heterogênea) ou está uniformemente dispersa ao longo dela (pseudo-homogênea).

Iyoho (1980) levantou um mapa qualitativo de padrões para o escoamento anular horizontal sólido-fluido não-newtoniano de acordo com a classificação de Goedde. O mapa está ilustrado na figura 2. Infelizmente, faltam informações que possibilitem o uso do mapa para validação dos mecanismos de mudança de padrão propostos no trabalho aqui desenvolvido.

Ford et al. (1990) apresentaram uma classificação mais detalhada dos padrões de escoamento observados experimentalmente, bem como velocidades críticas para movimento do leito e para suspensão total da mistura. Tais dados foram obtidos para o escoamento anular concêntrico de misturas sólido-fluido não-newtoniano em diversas inclinações. Mais uma vez, a falta de informações impossibilita a utilização destes dados no presente trabalho.

---

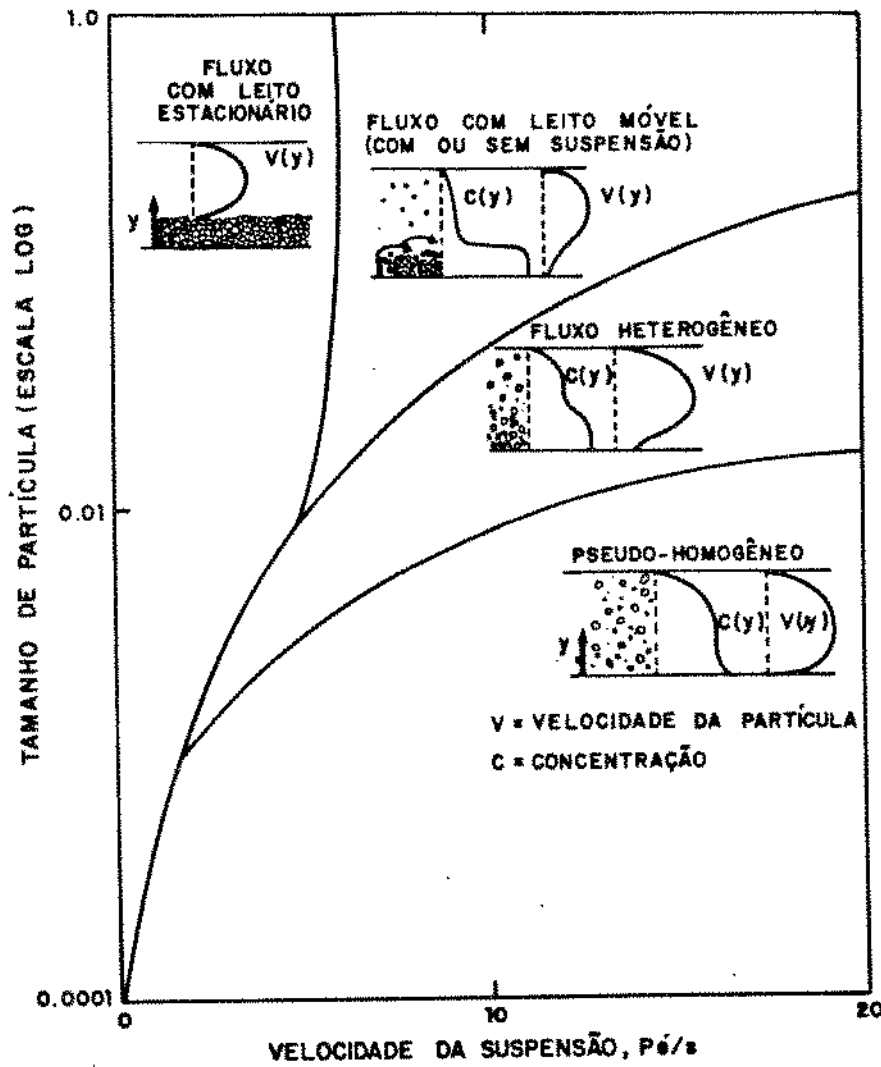


Fig. 2 - Mapa de Padrões para o Escoamento Horizontal Sólido-Líquido, segundo Iyoho (1980)



## II.5 - ANÁLISE DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ESTRATIFICADOS

Taitel & Dukler (1976) apresentam um procedimento para correlacionar a perda de carga em um escoamento estratificado gás-líquido com o parâmetro de Lockhart & Martinelli (1949) que consiste na relação entre as perdas de carga do líquido e do gás se estivessem escoando separadamente no duto em questão. Tal procedimento consiste na adimensionalização das equações de conservação do momento linear e pode ser uma ferramenta útil na análise de escoamentos estratificados em geral.

---

### III - O MODELO PROPOSTO

#### III.1 - VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NO PROBLEMA

Ao contrário de operações de transporte hidráulico de minério, onde o objetivo é a minimização das perdas de carga durante o bombeio, o importante aqui é a avaliação da remoção de sólidos no trecho anular.

Em poços verticais ou pouco inclinados, tal avaliação é feita através da razão entre a velocidade de ascensão do sólido e a velocidade do fluido, chamada razão de transporte. Em poços de elevada inclinação, esse conceito não é adequado para avaliar a limpeza, pois ocorre segregação de partículas devido à ação de forças gravitacionais e a consequente formação de um leito. Iyoho (1980) definiu a razão de transporte generalizada que expressa a concentração de sólidos na área aberta ao escoamento. Tal definição, contudo, não contempla a possibilidade de ocorrência de um leito móvel.

Trabalhos mais recentes consideram a concentração volumétrica total de sólidos como o parâmetro mais adequado para avaliação, o que será adotado neste estudo. Perdas de carga por fricção são também consideradas importantes para o programa hidráulico do poço. As variáveis independentes consideradas no modelo são:

- dimensões do trecho anular;
- excentricidade do trecho anular;
- inclinação em relação à vertical;
- vazão de fluido;

- vazão de sólidos;
- propriedades físicas do sistema sólido-fluido.

### III.2 - DESCRIÇÃO QUALITATIVA

A formulação aqui desenvolvida visa propor mecanismos que descrevam o escoamento axial anular excêntrico inclinado de uma mistura sólido-fluido não-newtoniano em regime permanente. Dentre os padrões de escoamento mencionados por Iyoho (1980), sem dúvida os estratificados, que apresentam formação de leito, são os de modelagem mais complexa. A proposição de um modelo para o sistema em questão deve contemplar os mecanismos que expliquem o movimento dos sólidos na camada inferior. Tal movimento pode ocorrer por duas formas distintas: a primeira através de pequenos saltos provocados pelo desequilíbrio entre a força de arraste exercida pelo líquido e a força gravitacional. A segunda, quando as forças viscosas exercidas pelo líquido sobre o leito são suficientes para vencer a fricção entre o leito e a parede externa do anular, provocando assim seu deslizamento como um todo. Os dois mecanismos ocorrem simultaneamente, mas sua modelagem conjunta é complexa, devido à dificuldade na definição da influência de cada um deles no movimento global das partículas.

Assim, os modelos desenvolvidos para o escoamento em questão costumam descrever o fenômeno através de um dos dois mecanismos.

No presente trabalho, é utilizado um modelo estratificado de duas camadas, que representa essencialmente o mecanismo de

---

deslizamento do leito. Este modelo permite, com uma formulação única, caracterizar o sistema nos quatro padrões propostos por Iyoho (1980). A figura 3 ilustra esquematicamente a proposta.

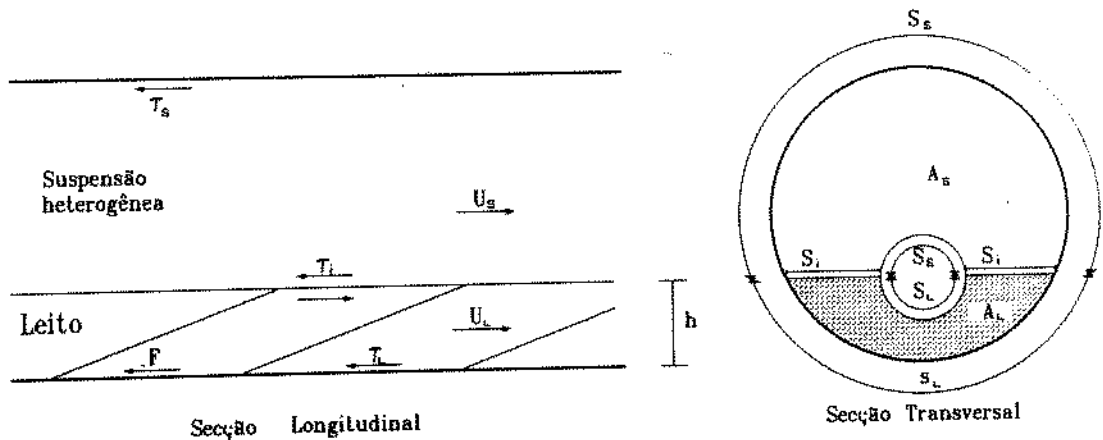


Fig. 3 - O Modelo de Duas Camadas

A camada inferior representa o leito de sólidos que se deposita na seção anular devido à ação de forças gravitacionais. Aqui, assume-se que as partículas sólidas estão em seu grau de compactação máxima, ou seja, a concentração volumétrica média de sólidos é de 52%. Este valor representa a relação entre os volumes de uma esfera de raio  $r$  e de um cubo de lado  $2r$ .

A camada superior contém predominantemente o fluido carreador além das partículas nele suspensas devido à ação de forças turbulentas.

A modelagem do regime permanente significa que a altura do leito é constante com o tempo, ou seja, que a velocidade superior é suficiente para manter em suspensão as partículas sólidas presentes.

A altura da interface entre as duas camadas é constante ao longo do trecho anular em estudo e, conseqüentemente, assume-se uma distribuição hidrostática de pressões ao longo de uma seção transversal. Esta hipótese parece bastante razoável para análise de escoamentos horizontais ou altamente inclinados, mas deve ser questionada para trechos anulares próximos à vertical.

Os sólidos são caracterizados por um diâmetro médio e uma esfericidade. O fluido tem caráter pseudo-plástico e pode ter seu comportamento reológico representado pelo modelo de Ostwald-de-Waele (Lei da Potência). Este modelo estabelece que a tensão cisalhante é proporcional à taxa de deformação imposta ao fluido, elevada a uma potência característica, de acordo com a equação (1). Os parâmetros do modelo são exatamente a constante de proporcionalidade (índice de consistência) e o fator de potência (índice de comportamento) :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1)$$

O sistema sólido-líquido é considerado incompressível e de parâmetros reológicos constantes e iguais aos do fluido, uma vez que as partículas sólidas são de tamanho maior que a subcamada viscosa em questão. São desconsiderados efeitos de tensão superficial e de transferência de massa entre as fases sólida e

---

líquida.

Não é considerado o escorregamento entre as fases líquida e sólida em cada uma das camadas. Dessa forma, o sistema pode ser caracterizado pela velocidade da camada superior (suspensão heterogênea) e a da camada inferior (leito).

A formulação a seguir apresentada é análoga à proposta por Doron et al. (1987) para descrever o transporte horizontal de partículas, por água, em dutos circulares. No presente trabalho foram introduzidas modificações e considerações pertinentes ao problema em questão, tais como as relativas ao uso de fluido não-newtoniano e geometria anular excêntrica e inclinada.

As equações propostas representam formas simplificadas das leis de conservação, descritas no apêndice 1, onde são tomadas propriedades médias (velocidades e concentrações) numa seção transversal do trecho anular. São apresentadas duas equações de conservação de massa, sendo uma para cada fase e apenas duas equações de conservação do momento linear, uma para cada camada, já que foi suposta a não existência de escorregamento entre as fases dentro de uma camada. Além das leis de conservação, é considerada a proposição de Carstens (1969) para o mecanismo da difusão turbulenta das partículas sólidas na camada superior, de modo a obter uma equação para a concentração média de sólidos nesta.

### III.3 - FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

#### III.3.1 - LEIS DE CONSERVAÇÃO

As equações aqui apresentadas são obtidas a partir das

---

equações básicas para escoamentos bifásicos apresentadas no apêndice 1, já tendo sofrido as simplificações cabíveis ao problema em questão.

Conservação da Massa :

Seja a equação (72) apresentada no apêndice 1 :

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{A_k \langle \rho_k \rangle_2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k) \rangle_2} = - \int_{C(z,t)} (\dot{m}_k) \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (2)$$

Como o escoamento é permanente, não há variação de qualquer propriedade no tempo, daí:

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{A_k \langle \rho_k \rangle_2} = 0 \quad (3)$$

A mesma observação é válida para o termo análogo da equação do momento linear, a ser desenvolvida posteriormente.

O termo do lado direito da equação (2) é também nulo é assumida a não transferência de massa entre a fase líquida e a fase sólida.

Assim, a equação (2) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial z} \overline{A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k) \rangle_2} = 0 \quad (4)$$

ou :

$$\langle \rho_k U_k \rangle_2 A_k = C \quad (5)$$

onde  $C$  é uma constante de integração

Abrindo mão das notações utilizadas para representar as variáveis médias espaciais e temporais, podemos escrever as equações para as fases sólida e líquida, relacionando propriedades da mistura, na alimentação e em cada camada, após atingido o regime permanente.

fase sólida:

$$\rho_p U_L A_L C_L + \rho_p U_S A_S C_S = \rho_p U_M A_T C_M \quad (6)$$

dividindo os dois lados da equação (6) por  $\rho_p$  :

$$U_L A_L C_L + U_S A_S C_S = U_M A_T C_M \quad (7)$$

fase líquida:

$$\rho_f U_L A_L (1 - C_L) + \rho_f U_S A_S (1 - C_S) = \rho_f U_M A_T (1 - C_M) \quad (8)$$

dividindo os dois lados da equação (8) por  $\rho_f$  :

$$U_L A_L (1 - C_L) + U_S A_S (1 - C_S) = U_M A_T (1 - C_M) \quad (9)$$

Conservação da Quantidade de Movimento :

Seja a equação geral (73) do apêndice 1 :



$$\frac{\partial}{\partial t} A_k \langle \rho_k \vec{U}_k \rangle_2 + \frac{\partial}{\partial z} A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k \vec{U}_k) \rangle_2 + \frac{\partial}{\partial z} A_k \langle \vec{n}_z \cdot \vec{T}_k \rangle_2 +$$

$$- A_k \langle \rho_k \vec{f} \rangle_2 = - \int_{C(z,t)} (\dot{m}_k \vec{U}_k + \vec{n}_k \cdot \vec{T}_k) \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} - \int_{C_k(z,t)} \vec{n}_k \cdot \vec{T}_k \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (10)$$

Analisando cada termo da equação, e considerando somente sua componente axial :

$$\frac{\partial}{\partial t} A_k \langle \rho_k \vec{U}_k \rangle_2 = 0 \quad , \text{ escoamento permanente} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k \vec{U}_k) \rangle_2 = \rho_k A_k \frac{\partial \langle U_k^2 \rangle}{\partial z} \quad (12)$$

Considerando  $\langle U_k^2 \rangle = \langle U_k \rangle^2$  e  $\langle U_k \rangle^2 = \langle U_k \rangle \langle U_k \rangle$ , temos:

$$\frac{\partial}{\partial z} A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k U_k^2) \rangle_2 = 2 \rho_k A_k \langle U_k \rangle \frac{\partial \langle U_k \rangle}{\partial z} = 0 \quad , \quad (13)$$

pelo balanço de massa.

$$A_k \langle \rho_k \vec{f} \rangle_2 = A_k \rho_k g \cos \theta \quad , \quad (14)$$

uma vez que a força gravitacional é a única força de campo atuante. Estão incorporados efeitos de inclinação do poço.

$$\overline{\langle \vec{n}_z \cdot \vec{T}_k \rangle_2} = - \frac{\partial}{\partial z} A_k \overline{\langle P \rangle_2} + \frac{\partial}{\partial z} A_k \overline{\langle \vec{n}_z \cdot \vec{\tau}_k \rangle_2} = - A_k \frac{\partial P}{\partial z} \tag{15}$$

O segundo termo do lado direito da equação (15) é nulo pois estão sendo desprezadas as tensões viscosas ao longo de uma seção bem como a potência mecânica das mesmas.

$$\int_{C(z,t)} (\vec{m}_k \cdot \vec{U}_k + \vec{n}_k \cdot \vec{T}_k) \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} = \tau_i S_i \tag{16}$$

$$\int_{C_k(z,t)} \vec{n}_k \cdot \vec{T}_k \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} = - \tau_k S_k \tag{17}$$

Para o leito deve ser incorporado, no lado esquerdo da equação (17), um termo de atrito estático F.

Serão escritas duas equações de conservação do momento linear, uma para cada camada, uma vez que não há escorregamento entre as fases.

Suspensão :

$$- A_s \frac{dP}{dz} + A_s \rho_s g \cos \theta = - \tau_s S_s - \tau_i S_i \tag{18}$$

Para inclinações elevadas, será desprezado o termo gravitacional na equação (18), que pode ser reescrita da seguinte forma :

$$- A_s \frac{dP}{dz} = - \tau_s S_s - \tau_i S_i \quad (19)$$

Leito :

$$- A_L \frac{dP}{dz} + A_L \rho_L g \cos \theta = - F - \tau_L S_L + \tau_i S_i \quad (20)$$

Desprezando-se o termo gravitacional na equação (20), obtem-se:

$$- A_L \frac{dP}{dz} = - F - \tau_L S_L + \tau_i S_i \quad (21)$$

### III.3.2 - CÁLCULO DE TENSÕES CISALHANTES

As tensões cisalhantes nas paredes do duto anular podem ser expressas como função do coeficiente de atrito de Fanning por:

$$\tau_s = 1/2 f_s \rho_s U_s^2 \quad (22)$$

$$\tau_L = 1/2 f_L \rho_L U_L^2 \quad (23)$$

Os coeficientes de atrito são, por sua vez, função do regime de escoamento.

Para os fluidos que seguem o modelo de Ostwald-de-Waele, a transição laminar-turbulento pode ser calculada através do critério do número de Reynolds crítico proposto por Ryan & Johnson (1959):

$$Re_c = \frac{6464 n}{(1+3n)^2 (2+n)^{\frac{2+n}{1+n}}} \quad (24)$$

O número de Reynolds em cada camada do escoamento pode ser avaliado pela definição de Metzener & Reed (1955):

$$Re = \frac{\rho U^{2-n} D^n}{8^{n-1} K} \quad (25)$$

Caso o escoamento seja laminar, o coeficiente de atrito é deduzido analiticamente e pode ser expresso por:

$$f = 16/Re \quad (26)$$

Já no regime turbulento, Silva & Martins (1987) avaliaram diversas correlações da literatura, através de dados experimentais de fluidos não-newtonianos em seções anulares e sugerem a seguinte expressão, proposta por Gomes (1987):

$$f = 0,060 \cdot Re^{-0,223} \cdot n^{0,462} \quad (27)$$

A tensão cisalhante na interface entre as duas camadas é dada por:

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_s (U_s - U_L)^2 \quad (28)$$

As informações sobre o cálculo do coeficiente de atrito interfacial em misturas sólido-líquido são bastante restritas e será adotada aqui a expressão proposta por Televantos et al. (1979). Esta expressão, na verdade, é uma adaptação da equação de Colebrook (1939), onde o termo da rugosidade absoluta é substituído pelo diâmetro da partícula e o coeficiente de atrito é multiplicado por dois:

$$\frac{1}{\sqrt{2 f_i}} = -0,86 \ln \left( \frac{\frac{d_p}{D_s} + 2,51}{3,7 \operatorname{Re}_s \sqrt{2 f_i}} \right) \quad (29)$$

Finalmente, os diâmetros hidráulicos e massas específicas em cada camada são dados por:

$$D_s = \frac{4 A_s}{S_s + S_i} \quad (30)$$

$$D_L = \frac{4 A_L}{S_L + S_i} \quad (31)$$

$$\rho_s = \rho_p C_s + \rho_f (1 - C_s) \quad (32)$$

$$\rho_L = \rho_p C_L + \rho_f (1 - C_L) \quad (33)$$

As expressões para cálculo dos parâmetros geométricos em tubos, anulares concêntricos e excêntricos estão descritas no apêndice 2.

### III.3.3 - FORÇA ESTÁTICA SÓLIDO-SÓLIDO

A força estática  $F$ , presente na equação (21), é decorrente do contato entre as partículas do leito e as paredes do anular. Sua estimativa é por vezes complexa, pois depende de valores de coeficientes de interação específicos entre os materiais sólidos envolvidos. Seu valor máximo, quando o leito estiver na iminência de entrar em movimento, é proporcional ao somatório das forças normais exercidas pelo leito sobre as paredes do anular:

$$F_{MAX} = \eta F_N \quad (34)$$

onde a constante de proporcionalidade  $\eta$  é chamada coeficiente de escorregamento.

As forças normais são, por sua vez, de duas naturezas distintas. A primeira é devida ao peso submerso das partículas sólidas, e pode ser calculada para uma seção inclinada, através da integração do perfil hidrostático de pressões ao longo do perímetro do leito, de acordo com a expressão:

$$F_1 = (\rho_p - \rho_f) g C_L \text{ sen } \theta A_L \quad (35)$$

A segunda é devida à transmissão de tensões normais provenientes do cisalhamento na interface, e pode ser expressa, segundo Bagnold (1954), por:

---

$$F_2 = \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \quad (36)$$

onde  $\phi$  é o ângulo de atrito interno e varia de 0,35 a 0,75 , de acordo com o material.

Substituindo as equações (35) e (36) na equação (34), a força estática máxima pode ser calculada por :

$$F_{\text{MÁX}} = \eta \left[ (\rho_p - \rho_f) g C_L \text{sen } \theta A_L + \frac{\tau_i S_i}{\tan \phi} \right] \quad (37)$$

### III.3.4 - EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TURBULENTA

Aqui propõe-se o mecanismo da difusão turbulenta para descrever a distribuição das partículas sólidas na camada superior do escoamento. Este mecanismo é governado pela equação da difusão:

$$\epsilon' \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \omega' \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (38)$$

Gandhi (1976) apresenta, como solução da equação (38), o seguinte perfil de concentrações para a camada superior do escoamento, considerando-se um duto inclinado, coeficientes de difusão médios e o conceito de velocidade terminal de deposição das partículas:

$$C_s(y) = C_L \exp \left[ -\frac{\omega}{\epsilon} (y-h) \text{sen } \theta \right] \quad (39)$$

onde  $y$  e  $h$  são medidos em relação à parede inferior do duto.

Assumindo que os valores dos coeficientes de transferência de massa e momento linear são próximos, o coeficiente de difusão médio pode ser calculado, segundo Taylor (1954), por:

$$\varepsilon = 0,013 U_s \sqrt{F_i/2} \cdot D_s \quad (40)$$

A velocidade terminal de partículas não esféricas em fluidos não-newtonianos pode ser calculada pela metodologia proposta por Laruccia (1990):

$$\omega_o = \left\{ \left[ \frac{4 g d_p (\rho_p - \rho_f)}{3 \rho_f X(\phi')} \right]^m \cdot \left[ \frac{24 \tau(\dot{\gamma}) \alpha(\phi')}{\rho_f} \right]^m \right\}^{1/2m} \quad (41)$$

$$\text{onde} \quad X(\phi') = 108,7 \exp(5,53 \phi') \quad (42)$$

$$m(\phi') = 2,29 - 0,83 \phi' \quad (43)$$

$$\alpha(\phi') = \frac{(0,656 \phi' - 1,65) \cdot \exp(5,53 \phi')}{(3,45 \phi'^2 - 5,25 \phi' + 1,41) \cdot 108,7} \quad (44)$$

O efeito de população pode ser considerado utilizando-se a correlação de Richardson & Zaki (1954):

$$\frac{\omega}{\omega_o} = (1 - C_s)^m \quad (45)$$



$$\text{onde } m = 4,45 \operatorname{Re}_w^{-0,1} \quad \text{para } \operatorname{Re}_w < 500 \quad (46)$$

$$m = 2,39 \quad \text{para } \operatorname{Re}_w > 500 \quad (47)$$

Finalmente, a integração da equação (39) na camada superior da seção anular, considerando o elemento de área horizontal desenvolvido no apêndice 2, fornece:

$$C_s = \frac{C_L D_e^2 I}{2 A_s} \quad (48)$$

onde

$$I = \int_{\theta_b}^{\pi/2} M \exp \left( \frac{-\omega D_e (\operatorname{sen} \gamma - \operatorname{sen} \theta_b) \operatorname{sen} \theta}{2 \varepsilon} \right) \cos^2 \gamma \, d\gamma \quad (49)$$

e  $M = 1$  para as regiões I e III do anular

$M = (1 - k^2)$  para a região II do anular, conforme descrito no apêndice 2.

$\theta_b$  é o ângulo descrito na figura 39 do apêndice 2.

A Concentração total de sólidos no anular pode então ser calculada por :

$$C_{\text{SOL}} = A_L C_L + A_S C_S \quad (50)$$

## IV.3.5 - FORMULAÇÃO FINAL

As cinco equações que regem o problema são :

$$U_s A_s C_s + U_L A_L C_L = U_M A_T C_M \quad (7)$$

$$U_s A_s (1 - C_s) + U_L A_L (1 - C_L) = U_M A_T (1 - C_M) \quad (9)$$

$$- A_s \frac{dP}{dz} = - \tau_s S_s - \tau_i S_i \quad (19)$$

$$- A_L \frac{dP}{dz} = - F - \tau_L S_L + \tau_i S_i \quad (21)$$

$$\frac{C_s}{C_L} = \frac{D_e^2}{2A_s} \int_{\theta_b}^{\pi/2} M \exp \left[ \frac{-\omega D_e (\text{sen}\gamma - \text{sen}\theta_b) \text{sen}\theta}{2\varepsilon} \right] \cos^2 \gamma \, d\gamma \quad (48)$$

As incógnitas do modelo são a velocidade média das duas camadas,  $U_s$  e  $U_L$ , a concentração média de sólidos na camada superior,  $C_s$ , a perda de carga,  $dP/dz$ , e a altura do leito,  $h$ , que está implícita nos parâmetros geométricos (áreas e perímetros)

A concentração do leito,  $C_L$ , é considerada uma constante no modelo e as variáveis  $U_M$ ,  $C_M$  e  $A_T$  são facilmente obtidas através dos dados requeridos pelo modelo, listados a seguir :

- Diâmetro externo do anular;
- Diâmetro interno do anular;
- Excentricidade do anular;
- Inclinação do anular em relação à vertical;

- Vazão de fluido;
- Vazão de sólidos;
- Massa específica do fluido;
- índice de consistência do fluido;
- índice de comportamento do fluido;
- Massa específica das partículas sólidas;
- Diâmetro das partículas sólidas.

### III.3.6 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DO MOMENTO LINEAR

Igualando o termo  $dP/dz$  nas equações (19) e (21) obtemos uma relação entre as tensões e os parâmetros geométricos:

$$\frac{-\tau_s S_s - \tau_i S_i}{A_s} = \frac{-F - \tau_L S_L + \tau_i S_i}{A_L} \quad (51)$$

Rearranjando a equação (51), temos:

$$-A_L \tau_s S_s - A_T \tau_i S_i + A_s (F + \tau_L S_L) = 0 \quad (52)$$

Dividindo-se os dois lados da equação (52) por  $A_T \cdot (\tau_s S_s)$ , obtem-se:

$$-\frac{A_L}{A_T} - \frac{\tau_i S_i}{\tau_s S_s} + \frac{A_s}{A_T} \left( \frac{F + \tau_L S_L}{\tau_s S_s} \right) = 0 \quad (53)$$

onde os coeficientes de atrito de Fanning podem ser descritos pela forma :

$$f_k = \alpha_k \operatorname{Re}_k^{\beta_k} n^{\gamma_k} \quad (54)$$

Explicitando as relações entre tensões da equação (53) :

$$\frac{\tau_L}{\tau_s} = \frac{\alpha_L \left( \frac{D_h^n \cdot V_L^{2-n} \cdot \rho_L}{K \cdot 8^{n-1}} \right)^{\beta_L} \cdot n^{\gamma_L} \cdot \frac{\rho_L V_L^2}{2} \left( \bar{D}_L^n \cdot \bar{U}_L^{2-n} \right)^{\beta_L} \left( \frac{\bar{U}_L}{\bar{U}_s} \right)^2}{\alpha_s \left( \frac{D_h^n \cdot V_s^{2-n} \cdot \rho_s}{K \cdot 8^{n-1}} \right)^{\beta_s} \cdot n^{\gamma_s} \cdot \frac{\rho_s V_s^2}{2} \left( \bar{D}_s^n \cdot \bar{U}_s^{2-n} \right)^{\beta_s} \left( \frac{\bar{U}_s}{\bar{U}_s} \right)^2} \quad (55)$$

$$\frac{\tau_i}{\tau_s} = \frac{f_i \rho_s (U_s - U_L)^2 / 2}{f_s \rho_s U_s^2 / 2} = \frac{f_i}{f_s} \frac{(U_s - U_L)^2}{U_s^2} \sim \frac{f_i}{f_s} \quad (56)$$

Finalmente, a equação (53) pode ser reescrita da seguinte forma :

$$-\frac{A_L}{A_T} \cdot \Pi_2 \frac{S_i}{S_s} + \frac{A_s}{A_T} \left( \Pi_1 + X'^2 \cdot \frac{\bar{D}_L^{n\beta_L}}{\bar{D}_s^{n\beta_s}} \cdot \Pi_3 \cdot \frac{S_L}{S_s} \right) = 0 \quad (57)$$

onde :

$$X'^2 = \frac{\alpha_L \left( \frac{D_h^n \cdot V_L^{2-n} \cdot \rho_L}{K \cdot 8^{n-1}} \right)^{\beta_L} \cdot n^{\gamma_L} \cdot \frac{\rho_L V_L^2}{2}}{\alpha_s \left( \frac{D_h^n \cdot V_s^{2-n} \cdot \rho_s}{K \cdot 8^{n-1}} \right)^{\beta_s} \cdot n^{\gamma_s} \cdot \frac{\rho_s V_s^2}{2}} \quad (58)$$

$$\Pi_1 = \frac{F}{\tau_s S_s} \quad (59)$$

$$\Pi_2 = \frac{f_i}{f_s} \quad (60)$$

$$\Pi_3 = \frac{\tilde{U}_L^{2+\beta_L(2-n)}}{\tilde{U}_s^{2+\beta_s(2-n)}} \quad (61)$$

$$\tilde{D}_L = \frac{D_L}{D_h} \quad (62)$$

$$\tilde{D}_s = \frac{D_s}{D_h} \quad (63)$$

$$\tilde{U}_L = \frac{U_L}{V_L} \quad (64)$$

$$\tilde{U}_s = \frac{U_s}{V_s} \quad (65)$$

Dai, podemos dizer que a altura do leito é função dos parâmetros adimensionais:  $X'$ ,  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  e  $\Pi_3$  bem como do regime de escoamento das camadas.  $X'$  é o parâmetro de Lockhart-Martinelli modificado para o sistema em questão.

## IV - SOLUÇÃO DO MODELO

### IV.1 - METODOLOGIA ADOTADA:

A altura do leito, as velocidades médias das camadas, a concentração média da camada superior e a perda de carga por unidade de comprimento, incógnitas do problema, podem ser obtidas através da solução do sistema das equações (7), (9), (19), (21) e (48). A forma de resolução do sistema irá depender do padrão de escoamento. Como não são disponíveis mapas indicando as faixas de ocorrência de cada padrão, são necessárias a solução sucessiva para os diversos padrões e a definição de mecanismos ou critérios para as linhas de transição entre os mesmos. O procedimento adotado foi o seguinte:

- **Leito Estacionário** → Neste caso,  $U_L$  é zero e a solução direta das equações (7) e (9) fornece valores de  $U_s$  e  $C_s$ . A solução iterativa da equação (48) fornece valores de  $h$ . A perda de carga é então calculada diretamente pela equação (19).

- **Transição Estacionário - Móvel** → A força  $F$  é calculada pela equação (21), não utilizada no item anterior. Se este valor for inferior ao de  $F_{MAX}$ , calculado pela equação (37), a resolução do sistema é considerada coerente, caso contrário o padrão estacionário não atende ao conjunto de variáveis de entrada.

• **Leito Móvel** → Aqui  $F = F_{MAX}$  e as cinco equações do sistema devem ser resolvidas simultaneamente por métodos iterativos.

• **Transição Leito Móvel - Padrões Suspensos** → Caso não seja encontrada solução para o padrão leito móvel, ou se o valor de  $h$  encontrado for próximo de zero ou ainda se as velocidades das camadas forem muito próximas, deve-se partir para a resolução dos padrões totalmente suspensos.

• **Padrões Totalmente Suspensos** → Aqui,  $h = 0$ ,  $U_L = 0$ ,  $U_S = U_M$ ,  $C_S = C_M$  e a perda de carga pode ser calculada como para escoamento monofásicos, uma vez considerada a massa específica da mistura.

• **Transição Heterogêneo - Pseudo Homogêneo** → Aqui deve-se adotar um critério. Por exemplo, se a concentração local a 80% do diâmetro externo for maior ou igual a 95% da concentração a 20% do diâmetro externo, diz-se que o padrão é pseudo-homogêneo, caso contrário é heterogêneo.

#### IV.2 - PROGRAMA COMPUTACIONAL

Foi desenvolvido um programa de computador em linguagem Pascal para solução do modelo. A utilização de uma linguagem estruturada permitiu a elaboração de um programa auto-explicativo que pode, facilmente, sofrer intervenções por parte de algum usuário.

---

A solução do sistema não linear de equações foi feita por métodos iterativos específicos para cada padrão e para a solução da equação integral foi utilizado o método de Simpson.

O programa foi desenvolvido em diversas etapas até atingir seu objetivo final, ou seja, a simulação de escoamentos sólido-fluido não-newtoniano em seções anulares excêntricas e inclinadas. Tais etapas podem ser caracterizadas da seguinte forma:

- I - Escoamento em dutos circulares horizontais
- II - Escoamento em dutos anulares concêntricos horizontais
- III - Escoamento em dutos anulares excêntricos horizontais
- IV - Escoamento em dutos anulares excêntricos inclinados



## V - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### V.1 - ESCOAMENTO EM DUTOS CIRCULARES

A primeira etapa do programa desenvolvido visa descrever o escoamento horizontal sólido-fluido não-newtoniano em dutos circulares. Para tal, são utilizadas as relações geométricas desenvolvidas no apêndice 2. Este tipo de escoamento tem sua principal aplicação no transporte hidráulico de minério, onde procura-se minimizar as perdas de carga durante o bombeio.

Para calibração dos parâmetros empíricos do modelo, foram utilizados dados experimentais de perda de carga obtidos por Liou & Torrest (1987) para o escoamento bifásico de partículas de areia e uma solução polimérica. Os valores dos parâmetros empíricos foram variados dentro do intervalo usual, segundo Bagnold (1954). Os valores de 0,30 para o coeficiente de escorregamento e 0,60 para a tangente do ângulo de atrito forneceram melhor correlação com os dados experimentais. Estes cálculos estão detalhados no apêndice 3.

A figura 4 mostra a variação da perda de carga com a vazão volumétrica total para um escoamento água-sólidos, para duas concentrações de alimentação. Os resultados são comparados com os dados experimentais de Doron (1987), mostrando correlação relativamente boa, em especial para o sistema menos concentrado.

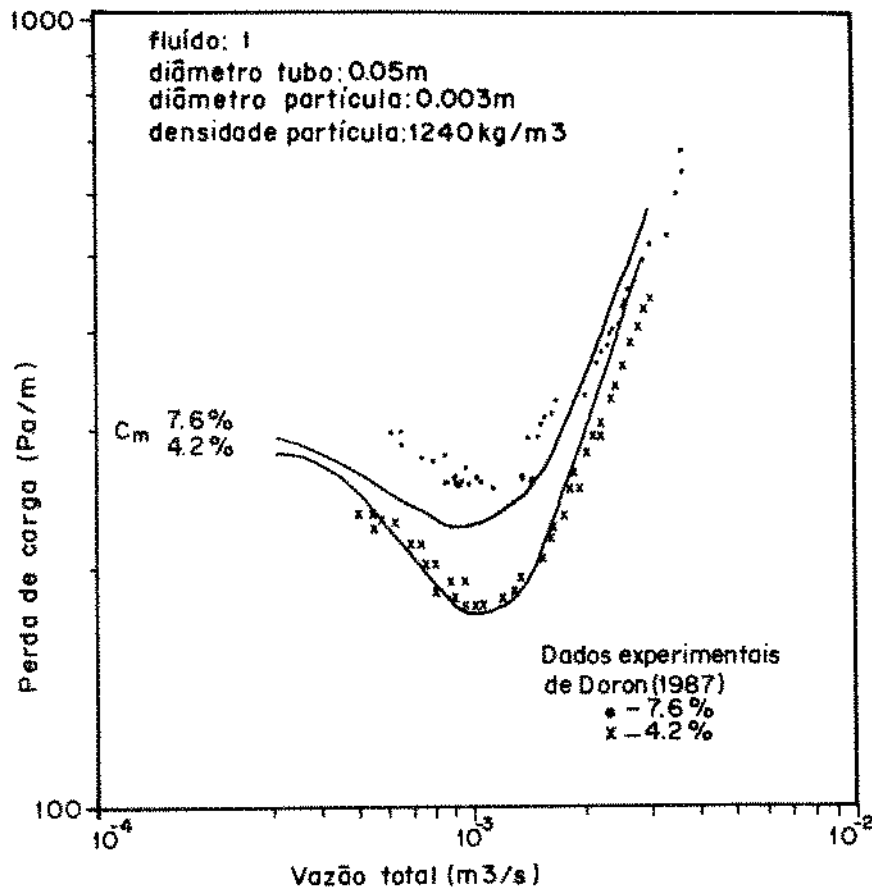


Fig. 4 - Influência da Concentração de Alimentação na Perda de Carga em Tubos

Como o escoamento em dutos circulares não é o objetivo central deste trabalho, serão mostrados a seguir apenas alguns exemplos da potencialidade do modelo e do programa simulador na análise do tema. As propriedades reológicas de todos os fluidos utilizados neste trabalho estão listadas na tabela 2.

fluido nº	K (N s <sup>n</sup> /m <sup>2</sup> )	n	natureza do fluido
1	0,001	1	água
2	0,2712	0,64	solução de carbopol
3	0,437	0,61	bentonita de alta viscosidade
4	0,837	0,578	solução de hidróxi- etil-celulose a 0,5%
5	0,0034	0,416	-
6	0,039	0,68	bentonita de baixa viscosidade

Tabela 2 - Parâmetros Reológicos dos Fluidos Utilizados nas Simulações

A figura 5 ilustra a variação da concentração volumétrica média de sólidos em função da vazão de bombeio numa seção transversal para dois tubos de diâmetros diferentes. Diagramas análogos podem ser obtidos para perdas de carga e altura do leito.

A figura 6 mostra a simulação teórica de curvas de perda de carga em função da vazão total para três concentrações distintas de alimentação e dois fluidos diferentes. Observa-se que as curvas com o sistema água-sólidos são sempre inferiores às do sistema solução polimérica-sólidos.

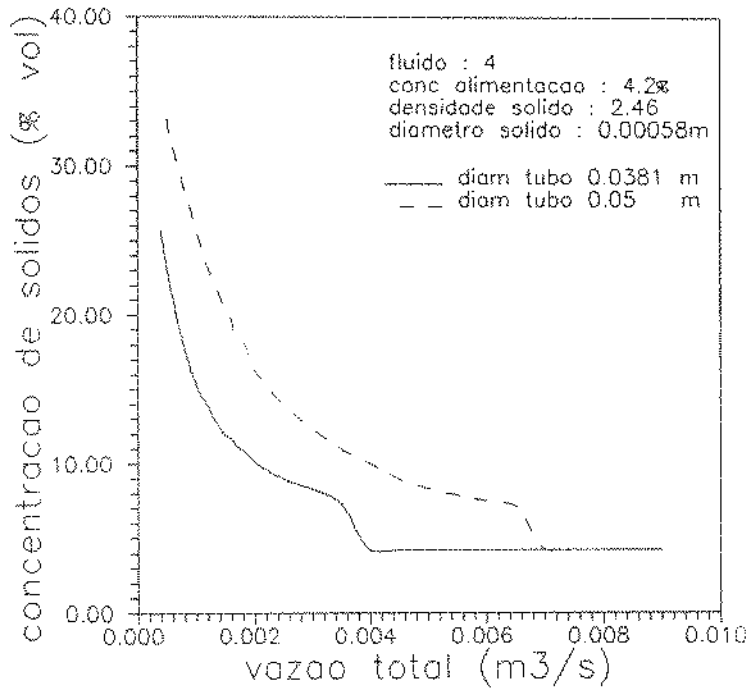


Fig. 5 - Influência do Diâmetro do Tubo na Concentração de Sólidos

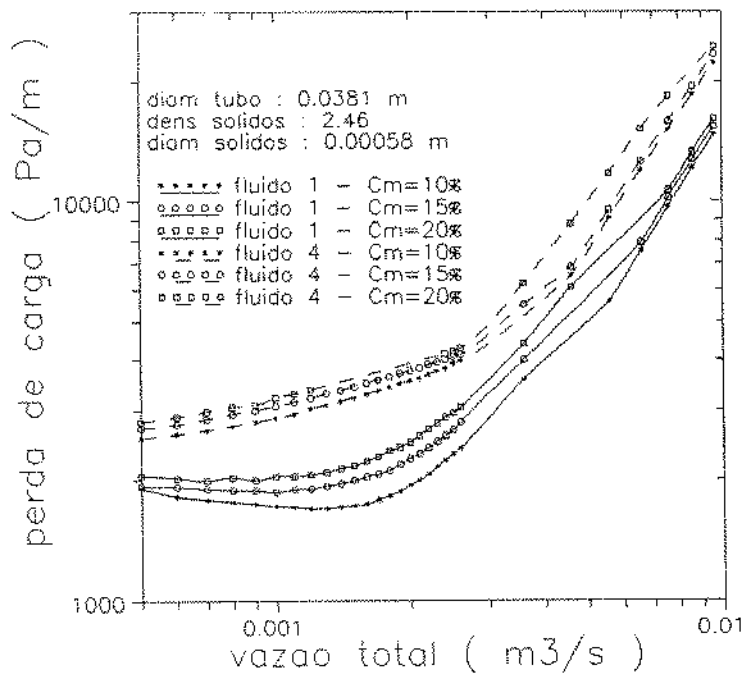


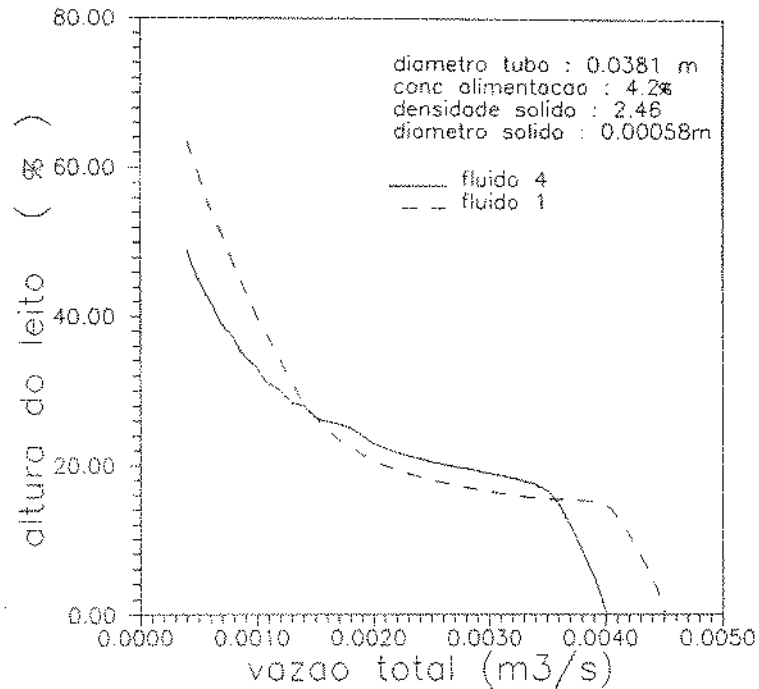
Fig. 6 - Influência da Reologia do Fluido e da Concentração de Alimentação na Perda de Carga em Tubos

A figura 7 mostra a variação da altura do leito com a vazão total para dois fluidos distintos numa mesma concentração de alimentação. Aqui dois aspectos estão envolvidos: as propriedades físicas do fluido e o regime de escoamento. Observa-se que a solução polimérica (fluido 4) transporta sólidos mais eficientemente que a água (fluido 1) nas vazões baixas onde ambos escoam em regime laminar. Com o aumento da vazão, o sistema água-sólidos entra em turbulência e a altura do leito passa a ser inferior à do sistema solução polimérica-sólidos. Finalmente, a vazão crítica para não deposição de sólidos é menor para o sistema sólidos-solução polimérica.

A tabela 3 apresenta os valores de vazão crítica para os sistemas indicados na figura 9 bem como a perda de carga durante o bombeio destes na vazão crítica.

fluido	Fluido 4			Fluido 1		
$C_M$ (%)	10	15	20	10	15	20
Vazão Crítica ( $m^3/s$ )	$3,6 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{-3}$
Perda de Carga (Pa/m)	4332	6847	18930	3974	7924	10645

Tabela 3 - Resultados do Escoamento Sólido-Líquido em Tubos



**Fig. 7 - Influência da Reologia do Fluido e do Regime de Escoamento da Camada Superior na Altura do Leito de Sólidos**

Assim, o programa desenvolvido pode ser utilizado como uma ferramenta adicional em projetos de minerodutos. Pode-se analisar a viabilidade econômica do uso de soluções poliméricas para o transporte hidráulico de minérios. Sugere-se o estudo de fluidos que apresentam o mínimo de perda de carga em vazões inferiores às da água, como o descrito na figura 6.

## V.2 - ESCOAMENTO EM DUTOS ANULARES

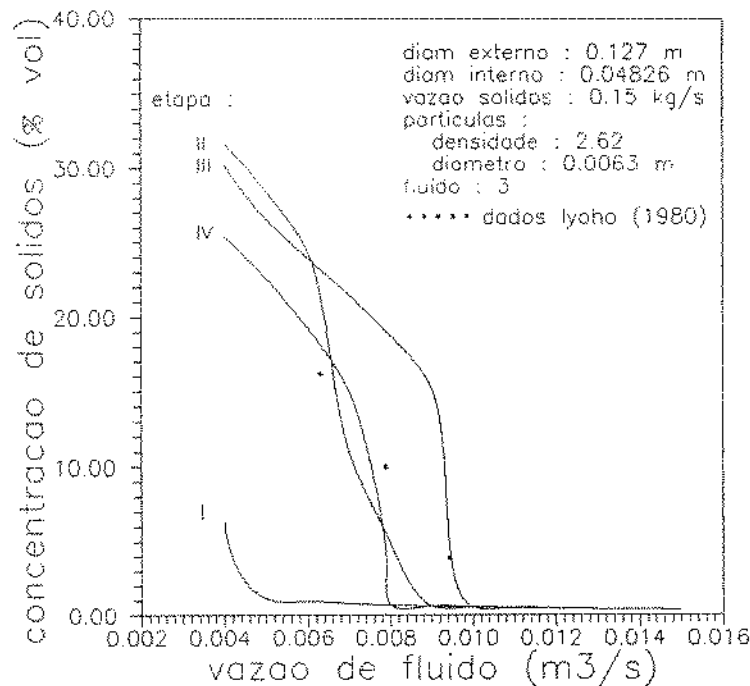
### V.2.1 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO A PARÂMETROS INCORPORADOS

Com o objetivo de verificar a sensibilidade do modelo aos parâmetros incorporados nas quatro etapas descritas no item IV.2, foram rodados os programas referentes a cada fase, de modo a simular o escoamento de uma solução polimérica e partículas sólidas em um duto anular de diâmetros 0,127 m x 0,0482 m (5 x 1,9 pol), inclinado a 70° em relação à vertical.

Para a etapa I, foi considerado que o anular pode ser representado por um tubo de diâmetro equivalente 0,0788 m (3,1 pol), segundo o critério do diâmetro hidráulico. Já nas etapas III e IV, supõe-se que a excentricidade do tubo externo é de 0,5.

As figuras 8 e 9 mostram respectivamente a variação da concentração de sólidos e da altura do leito com a vazão de fluido para as quatro etapas, bem como dados experimentais de Iyoho (1980). Tais figuras indicam que a passagem de uma etapa para outra representa mudanças altamente significativas nos resultados. A concordância razoável da etapa IV com os dados experimentais indica que a modelagem evoluiu por caminhos coerentes. Deve-se ressaltar que os dados experimentais são em pequeno número e foram obtidos em condições bastante distintas às das hipóteses do modelo, tais como escoamento em um tubo externo de acrílico liso e um tubo interno submetido à rotação. Assim, tais dados foram utilizados como comparação de tendências e não como restrições ao aprimoramento do modelo por

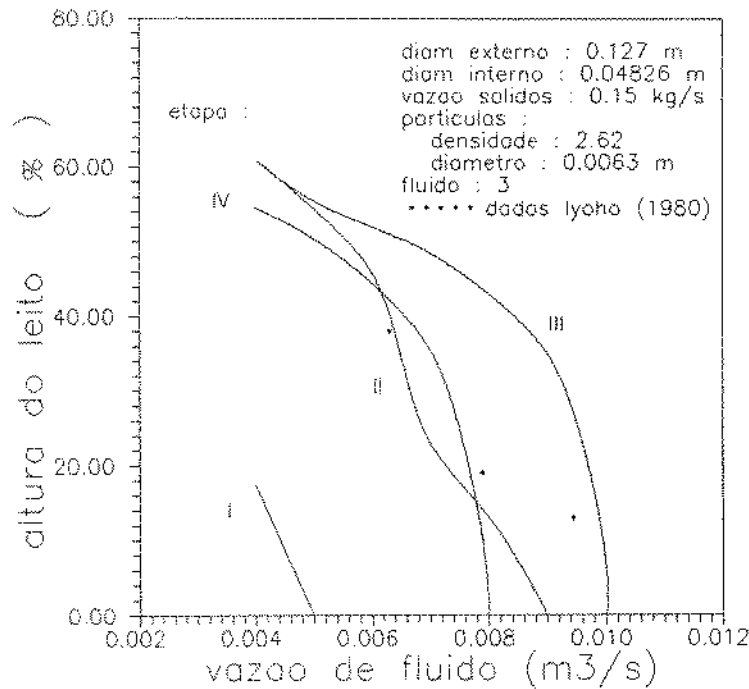
hipóteses fisicamente bem fundamentadas.



**Fig. 8 - Previsão da Concentração Volumétrica de Sólidos em um Escoamento Anular Calculada pelas Quatro Etapas do Modelo**

A calibração dos parâmetros empíricos do modelo, a partir de dados de concentração volumétrica de Iyoho (1980) e Tomrem (1979) forneceu os valores de 0,15 e 0,60 para o coeficiente de escorregamento e para a tangente do ângulo de atrito, respectivamente. Para o par escolhido foram obtidos desvios médios de + 5,9 % para a concentração de sólidos e - 3,4% para a altura do leito. Maiores detalhes constam do apêndice 3.





**Fig. 9 - Previsão da Altura do Leito em um Escoamento Anular Calculada pelas Quatro Etapas do Modelo**

**V.2.2 - AVALIAÇÃO DA LIMPEZA DE POÇOS**

Neste tópico, são apresentados diagramas visando quantificar o efeito de diversas variáveis independentes na concentração volumétrica de sólidos e na altura do leito. Estes dois parâmetros são considerados bons indicadores do grau de limpeza dos trechos anulares em estudo. Sempre que possível estão incluídos nos gráficos resultados experimentais para comparação.

- Efeito da Inclinação do Poço:

As figuras 10 e 11 ilustram a variação dos parâmetros de limpeza com a vazão de fluido para três inclinações diferentes. Observa-se que o efeito da mudança de inclinação é mais acentuado nas inclinações intermediárias que nas altas, ou seja, as curvas a 60 a 80° estão mais próximas que as curvas a 40 e 60°.

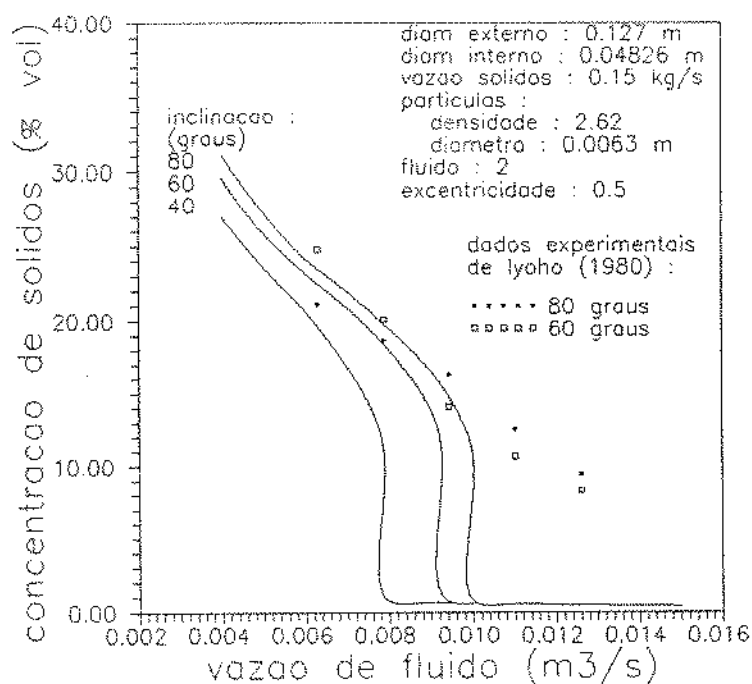


Fig. 10 - Influência da Inclinação do Poço na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular

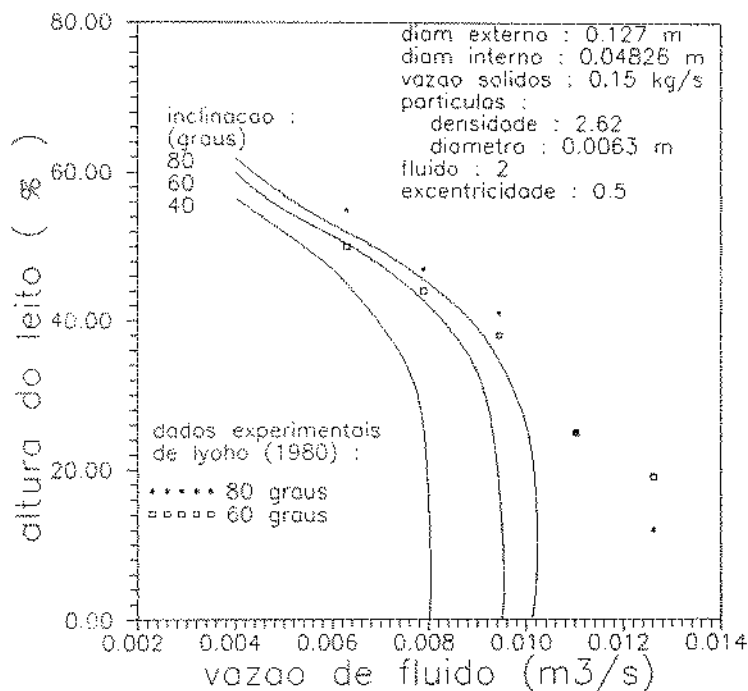
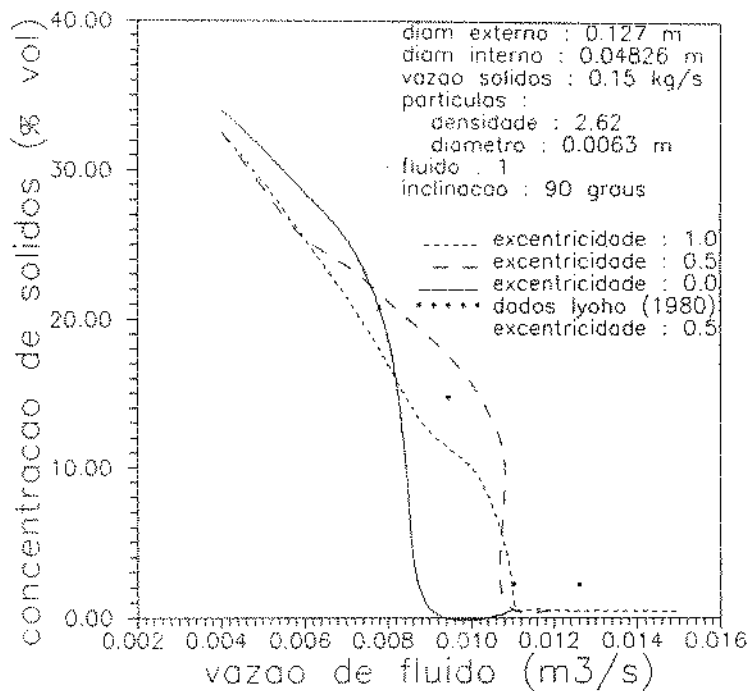


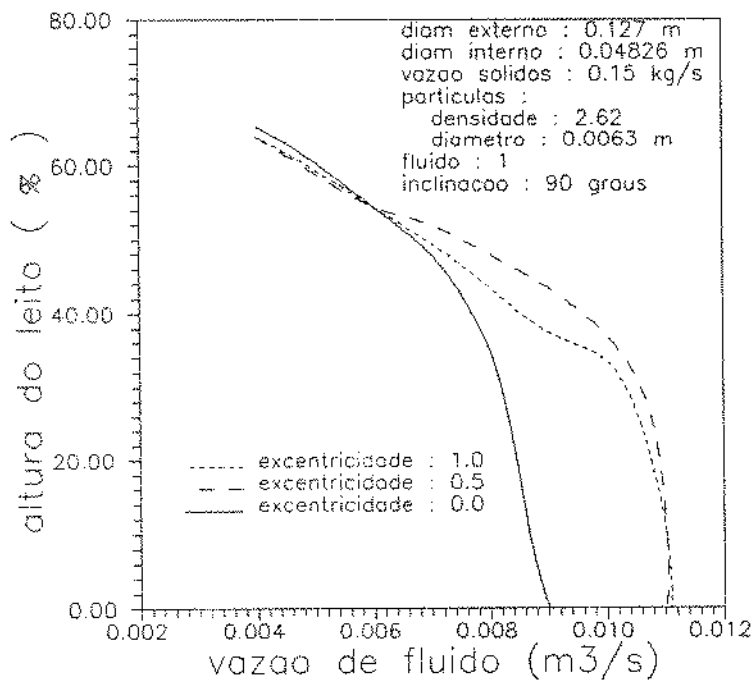
Fig. 11 - Influência da Inclinação do Poço na Altura do Leito em um Escoamento Anular

- Efeito da Excentricidade do Anular:

As figuras 12 e 13 mostram curvas de concentração e altura do leito em função da vazão de fluido para 3 excentricidades diferentes. O modelo é bastante sensível a esta variável, uma vez que os parâmetros geométricos envolvidos são calculados por expressões diferentes, a depender da região na qual a interface se encontra. Esta fato explica a forma diferente das curvas para cada excentricidade. De uma maneira geral, conclui-se que anulares excêntricas apresentam maiores problemas de limpeza que os concêntricos.



**Fig. 12 - Influência da Excentricidade do Anular na Concentração de Sólidos**



**Fig. 13 - Influência da Excentricidade do Anular na Altura do Leito**

- Efeito das Dimensões do Anular:

A figura 14 mostra a variação da concentração de sólidos com a vazão de fluido para dois diâmetros diferentes do tubo interno. A curva para o tubo maior, onde o sistema está submetido a maiores velocidades anulares, indicou valores de concentração bastante inferiores ao do tubo menor. Portanto, para efeitos de carreamento de cascalhos, é interessante furar poços com a coluna de perfuração de maior diâmetro possível.

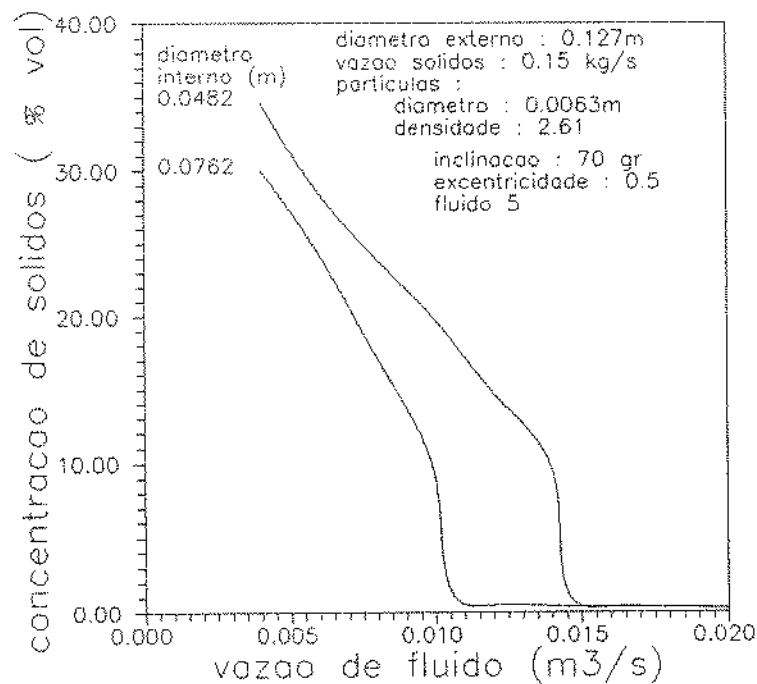
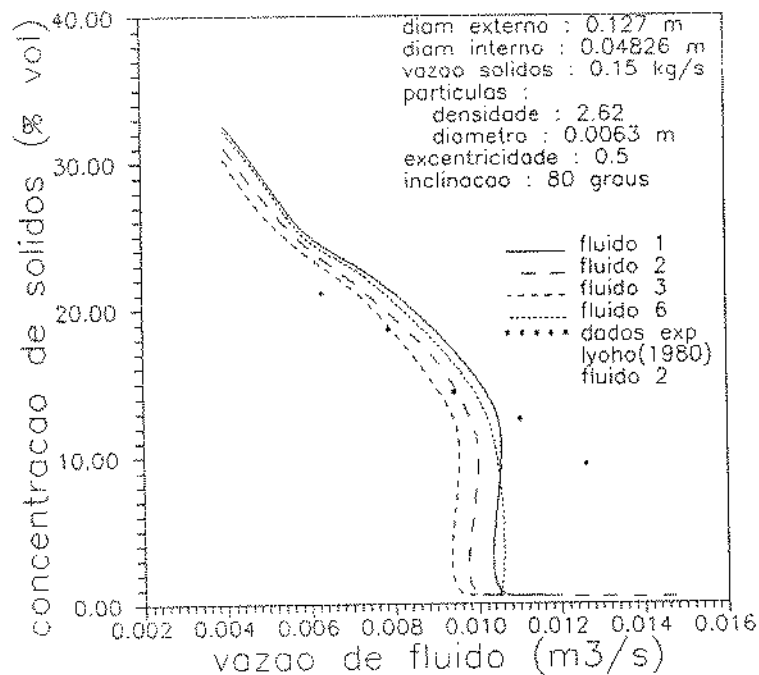


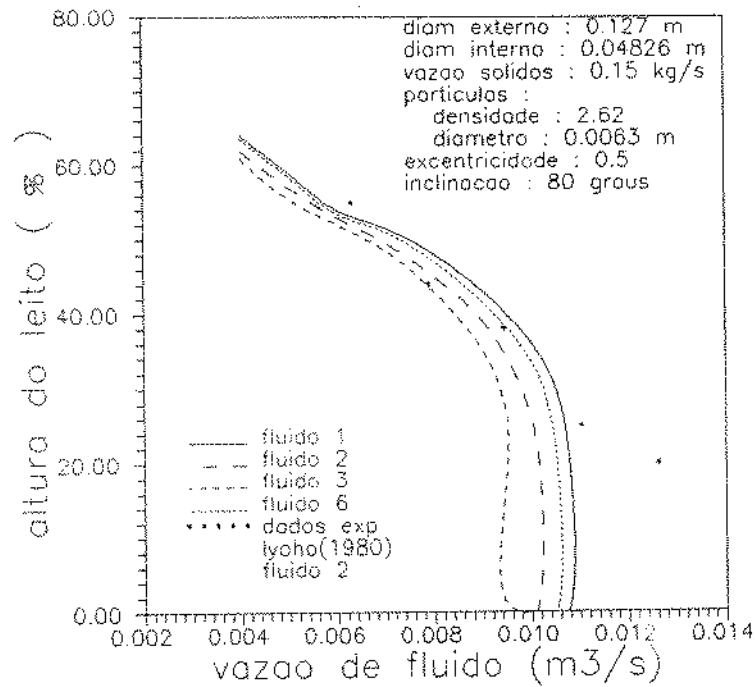
Fig. 14 - Influência das Dimensões do Espaço Anular na Concentração de Sólidos

### - Efeito das Propriedades Físicas do Fluido

As figuras 15 e 16 ilustram a variação da concentração de sólidos e da altura do leito com a vazão, para quatro fluidos de propriedades reológicas diferentes. Os parâmetros reológicos foram avaliados em conjunto, pois não é possível, na prática, sua variação isolada. De uma forma geral, os fluidos mais viscosos são transportadores mais eficientes de partículas. Tais fluidos, contudo, podem provocar perdas de carga por fricção muito elevadas durante o bombeio, diminuindo a eficiência da perfuração.



**Fig. 15 - Influência das Propriedades Reológicas do Fluido na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular**



**Fig. 16 - Influência das Propriedades Reológicas do Fluido na Altura do Leito em um Escoamento Anular**

As figuras 17 e 18 ilustram a influência da massa específica do fluido nos parâmetros de limpeza. A princípio é um parâmetro mais efetivo na limpeza que a reologia, porém o aumento desta propriedade é, por vezes, indesejável ou inviabilizado por outros aspectos da operação de perfuração.

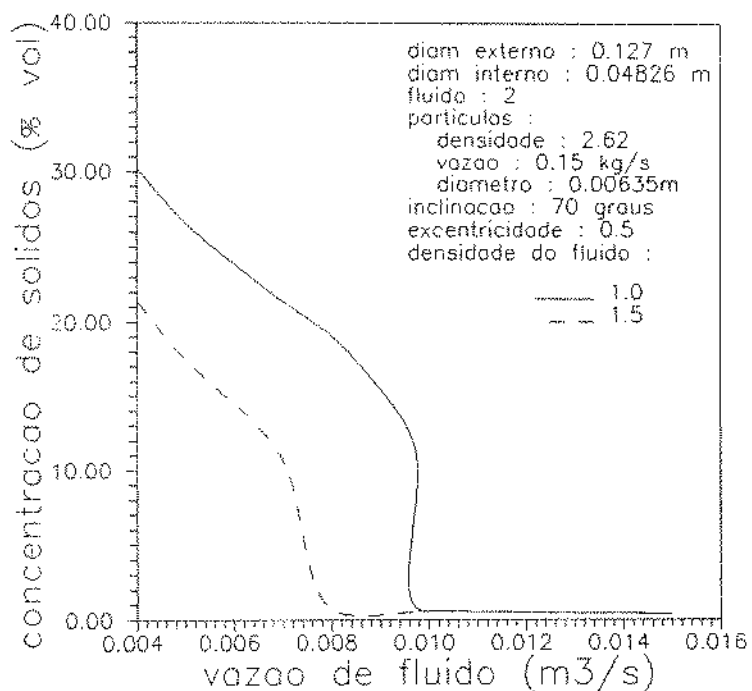


Fig. 17 - Influência da Massa Específica do Fluido na Concentração de Sólidos

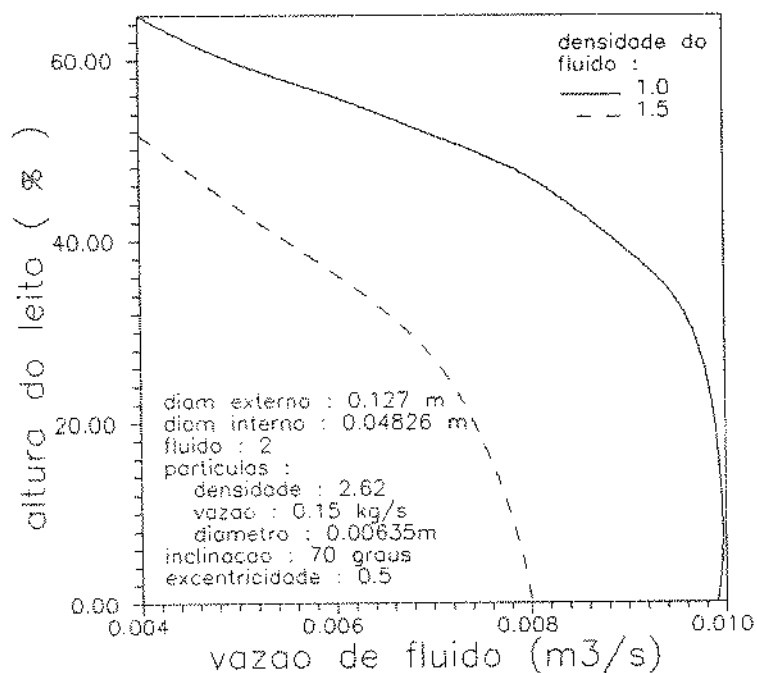


Fig. 18 - Influência da Massa Específica do Fluido na Altura do Leito em um escoamento Anular



- Efeito da Vazão de Sólidos:

As figuras 19 e 20 ilustram a variação das propriedades de limpeza com a vazão de fluido para duas vazões de sólidos, ou, indiretamente, taxas de penetração da broca. Os resultados mostram que dobrar a taxa de penetração implica num pequeno aumento na concentração de sólidos. Assim, a limpeza não deve ser um fator limitante da velocidade de perfuração de poços de elevada inclinação. Deve-se ressaltar que os exemplos utilizam baixa concentração de alimentação de sólidos, característica das operações de perfuração.

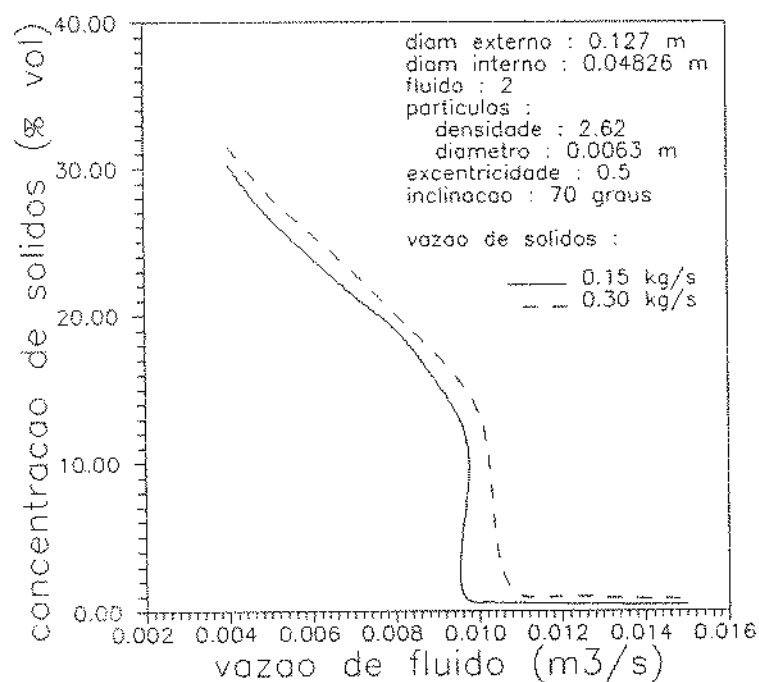
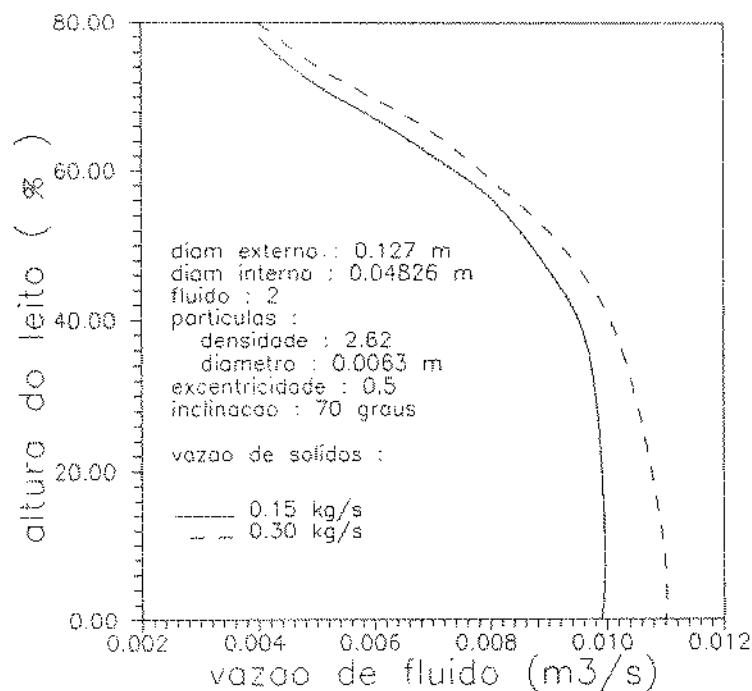


Fig. 19 - Influência da Vazão de Sólidos na Alimentação na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular

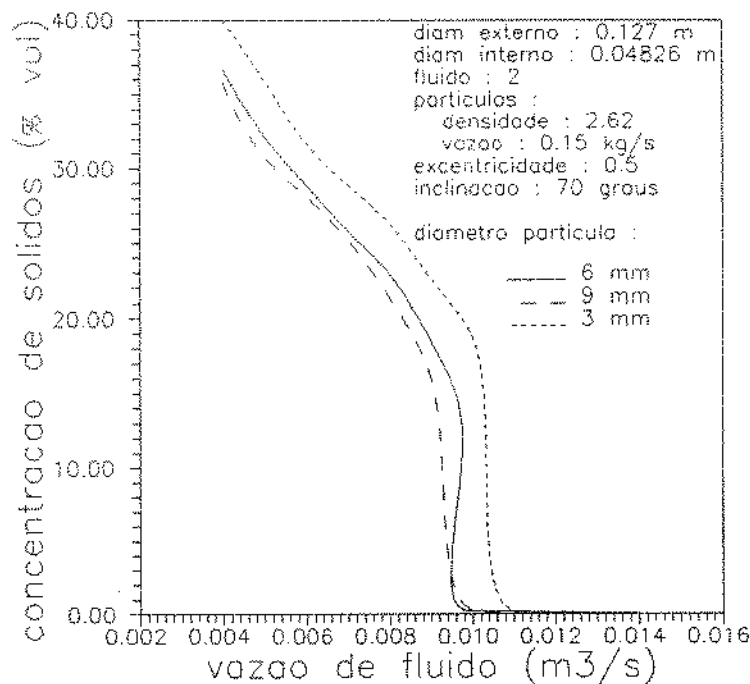


**Fig. 20 - Influência da Vazão de Sólidos na Alimentação na Altura do Leito em um escoamento Anular**

**- Efeitos do Tamanho e Forma das Partículas:**

A figura 21 mostra a variação da concentração de sólidos com a vazão para diversos diâmetros de partícula. Segundo o modelo, partículas menores seriam mais difíceis de serem transportadas. Isso se deve à forte dependência da tensão interfacial com o tamanho da partícula. Como o arraste em partículas pequenas é menor que nas grandes, conseqüentemente, maiores alturas de leito são verificadas pela hipótese do deslizamento. Modelos que prevêem o movimento dos sólidos por

saltos, como o de Bin-Haddah (1988) tiram conclusões contrárias. Parker (1987), através de experimentos, concluiu que o efeito do tamanho de partículas é secundário.



**Fig. 21 - Influência do Tamanho das Partículas na Concentração de Sólidos em um escoamento Anular**

A figura 22 mostra a variação da concentração de sólidos com a vazão de fluido para partículas de duas esfericidade distintas. A figura mostra que o efeito de forma da partícula é desprezível.

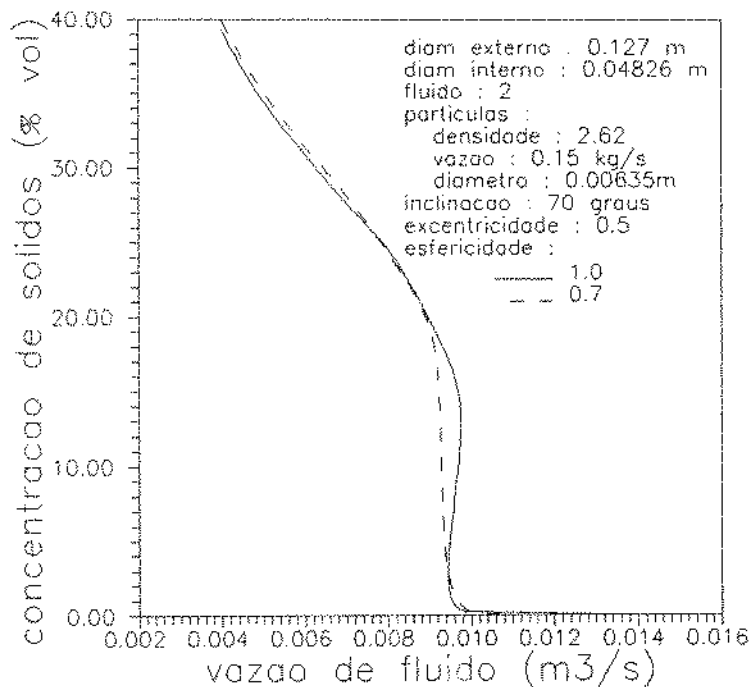


Fig. 22 - Influência da Forma das Partículas na Concentração de Sólidos em um Escoamento Anular

### V.2.3 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE A PARÂMETROS OPERACIONAIS

Neste item, pretende-se apresentar, através de um estudo de casos, um exemplo prático de como o programa desenvolvido pode auxiliar na programação de operações de campo.

Foi tomado como exemplo o poço 9-FZB-446D-CE perfurado no intuito de realizar testes de controle de horizontalidade, de limpeza do poço e de modelos para previsão de torque e arraste. Passarelli & Lomba (1989) relatam a ocorrência de arraste de 20

toneladas a 640 m durante uma conexão, já no trecho horizontal. Os dados referentes a esta situação estão na tabela 4.

diâmetro do poço	0,2150 m (8,5 pol)
diâmetro externo da coluna	0,127 m (5 pol)
inclinação	90 graus
vazão de fluido	0,022 m <sup>3</sup> /s (350 GPM)
taxa de penetração	0,004 m/s (15 m/h)
fluido: massa específica	1104 Kg/m <sup>3</sup> (9,2 lb/gal)
K	0,295 N s <sup>n</sup> / m <sup>2</sup>
n	0,698

Tabela 4 - Dados Relativos ao Poço 9-FZB-446D-CE

O programa simulador foi rodado para os dados da tabela 5, sendo o anular considerado totalmente excêntrico, ou seja, a coluna de perfuração encostada na parede inferior do poço, hipótese considerada adequada para o escoamento horizontal.

Os resultados do programa foram:

Altura relativa do leito : 53,5 %

Concentração volumétrica média

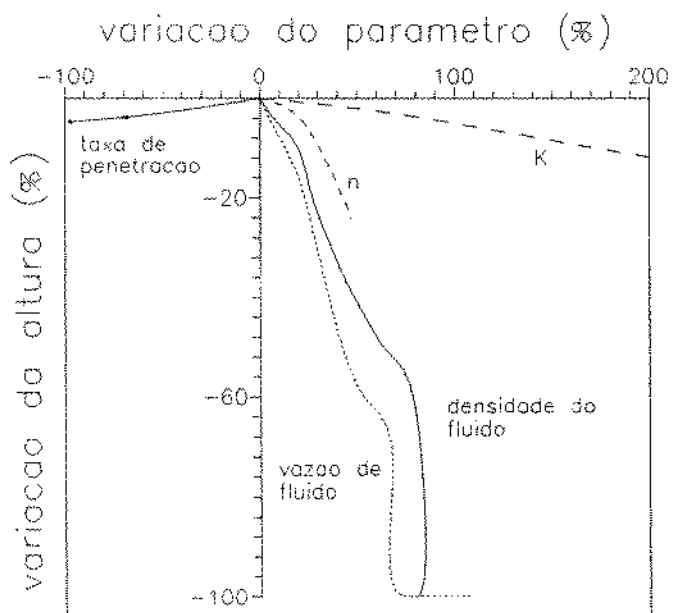
de sólidos no trecho em estudo : 17,3 %

A partir daí, o programa foi rodado para diversas situações onde foram variados, dentro de limites razoáveis, os seguintes parâmetros:

- vazão de fluido;
- densidade do fluido;
- taxa de penetração da broca;
- índice de consistência do fluido;
- índice de comportamento do fluido.

Os resultados de concentração e altura obtidos pelas simulações estão apresentados, sob a forma gráfica, nas figuras 23 e 24, respectivamente. A origem do gráfico, ponto (0,0), representa a situação base utilizada durante a operação, ou seja  $h = 53,5 \%$  e  $C_{sol} = 17,3 \%$ . Nas abcissas estão assinaladas as variações percentuais de cada um dos parâmetros acima citados, em relação ao caso base, no intuito de melhorar a limpeza do poço. Finalmente, nas ordenadas estão assinalados os decréscimos percentuais na altura e na concentração, resultantes da variação de cada parâmetro operacional.

---



**Fig. 23 - Análise de Sensibilidade da Altura do Leito em Relação a Diversos Parâmetros Operacionais no Trecho Horizontal do Poço 9-FZB-446D-CE**

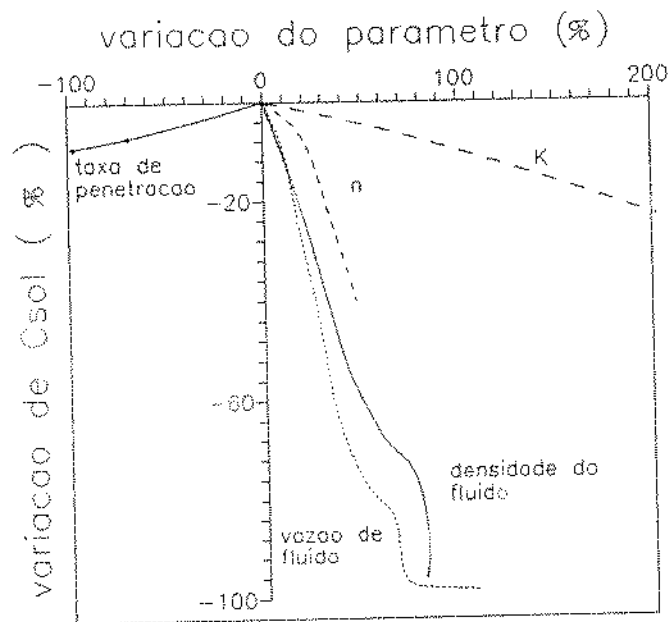


Fig. 24 - Análise de Sensibilidade da Concentração de Sólidos em Relação a Diversos Parâmetros Operacionais no Trecho Horizontal do poço 9-FZB-446D-CE

Da análise das figuras, observa-se que o parâmetro mais efetivo, para este caso, é a vazão do fluido. Um aumento da ordem de 20% na vazão provocaria um decréscimo da ordem de 40% na concentração de sólidos. A extinção total do leito de sólidos só ocorreria, contudo, com um aumento de cerca de 60% na vazão de sólidos, o que talvez seja muito elevado para o caso em questão.



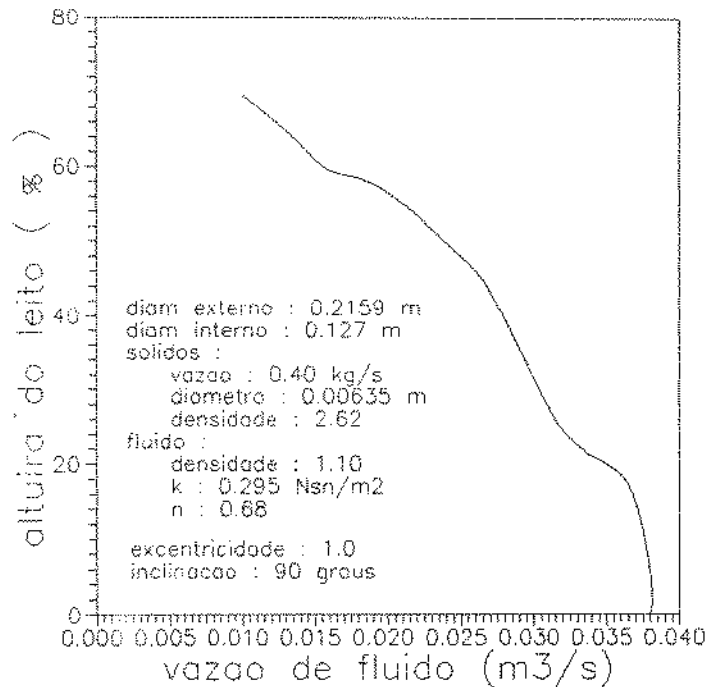
Outro parâmetro bastante influente é a densidade do fluido. Porém, na prática, aumentos da densidade do fluido estão limitados por diversos problemas de perfuração tais como o risco de prisão de coluna por diferencial de pressão, redução na taxa de penetração ou fratura da formação imediatamente após a sapata do revestimento anterior, e devem ser considerados com reservas. A utilização de baixas taxas de penetração não parece ser uma medida efetiva na melhoria da limpeza, uma vez que a altura do leito é pouco sensível à concentração como foi visto no item anterior.

A variação dos parâmetros reológicos tem efeito moderado e deve ser considerada. A análise da variação dos dois parâmetros independentemente é inadequada pois, na prática, é impossível ocorrer. Seria mais pertinente que tal análise fosse feita através de parâmetros reológicos obtidos em laboratório, resultantes da adição de viscosificantes ao fluido base.

A figura 25 ilustra a variação da altura do leito com a vazão de fluido, para o poço em estudo.

Assim, entende-se que o responsável pela programação de um poço de elevada inclinação possa utilizar o programa desenvolvido visando uma operação segura e com um mínimo de paradas para circulação do poço.

---



**Fig. 25 - Influência da Vazão de Fluido na Altura do Leito para os Dados do Poço 9-FZB-446D-CE**

#### VI.2.4 - DIAGRAMAS ADIMENSIONAIS

Com o intuito de levantar gráficos que representem mais genericamente o problema em questão, foi elaborado um procedimento de adimensionalização das equações de conservação do momento linear, análogo ao apresentado por Taitel & Dukler (1976), que está detalhada no item III.3.6.

A forma final adimensionalizada, representada pela equação (57), indica que as variáveis de saída do programa estão relacionadas com as de entrada através de quatro parâmetros adimensionais, que foram representados por  $X'$ ,  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  e  $\Pi_3$ , bem como do regime de escoamento em cada camada e de parâmetros

geométricos.

Aqui, propõe-se simplificar o sistema, para previsão da configuração leito móvel, desprezando-se a concentração de sólidos na camada superior, que é comprovadamente de ordem de grandeza inferior à concentração de sólidos no leito.

Com esta hipótese, os parâmetros  $\Pi_1$  e  $\Pi_3$  podem ser considerados como função direta da altura. A hipótese que  $\Pi_2$  é aproximadamente constante foi confirmada pela execução do programa e será utilizada.

Assim, a altura e a concentração de sólidos poderiam ser expressas unicamente como função do parâmetro  $X'$  e do regime de escoamento da camada superior, uma vez que para todos os casos rodados a camada inferior encontra-se sempre em regime laminar.

A adequação destas hipóteses está ilustrada nas figuras a seguir. As figuras 26 e 27 mostram a variação da concentração de sólidos e da altura com o parâmetro  $X'$  para quatro fluidos diferentes. Os fluidos 2 e 3 encontram-se em regime laminar na camada superior e suas curvas são quase coincidentes. Já os fluidos 1 e 6 encontram-se em regime turbulento e suas curvas são relativamente próximas e bastante afastadas em relação às dos outros fluidos.

---

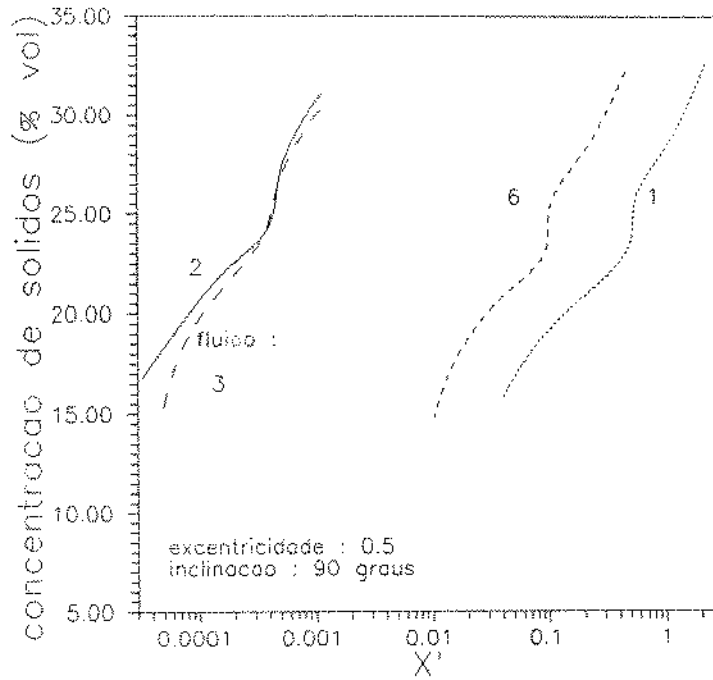


Fig. 26 - Variação da Concentração de Sólidos com o Parâmetro  $X'$  para Quatro Fluidos Distintos

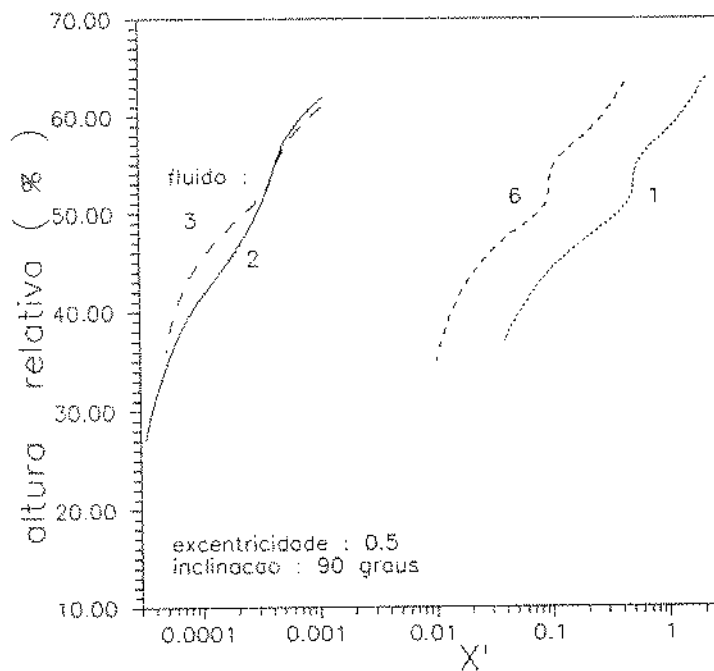


Fig. 27 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro  $X'$  para Quatro Fluidos Distintos

As figuras 28 e 29 ilustram a variação da altura do leito para duas excentricidades e inclinações. Em ambas as figuras estão plotadas curvas para o fluido 2 (em regime laminar) e para o fluido 1 (em regime turbulento). Analogamente às figuras 26 e 27, observa-se que as curvas para excentricidades ou inclinações distintas, para um mesmo regime, são bastante próximas.

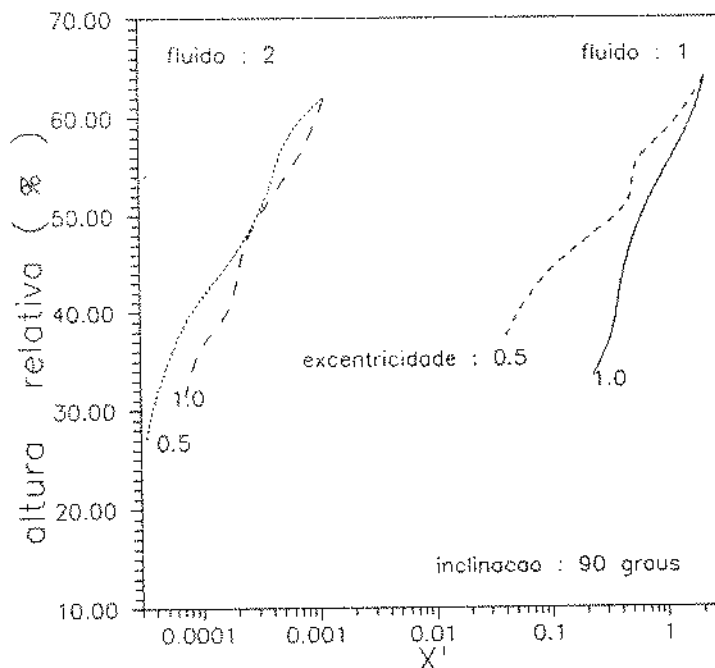
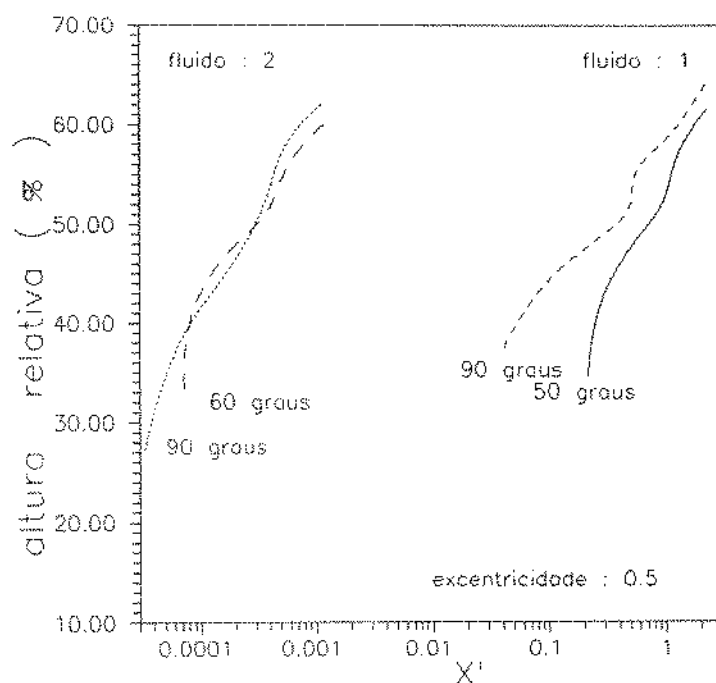


Fig. 28 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro  $X'$  para Duas Excentricidades



**Fig. 29 - Variação da Altura do Leito com o Parâmetro  $X'$  para Duas Inclinações**

Assim, a partir desta análise simplificada, pode-se concluir que as variáveis de controle da limpeza do poço podem ser estimadas a partir do parâmetro  $X'$  e do regime de escoamento da camada superior. O parâmetro  $X'$  representa a relação entre as perdas de cargas em cada uma das camadas quando escoando separadamente no duto anular.

Certamente, esta análise pode ser melhorada com a inclusão de algumas das hipóteses descartadas e com a modelagem mais precisa dos sistemas bifásicos suspensos, onde seria considerado

o escorregamento entre as fases, o que permitiria uma caracterização mais adequada do parâmetro  $X'$ .

### V.2.5 - MUDANÇAS DE PADRÃO DE ESCOAMENTO

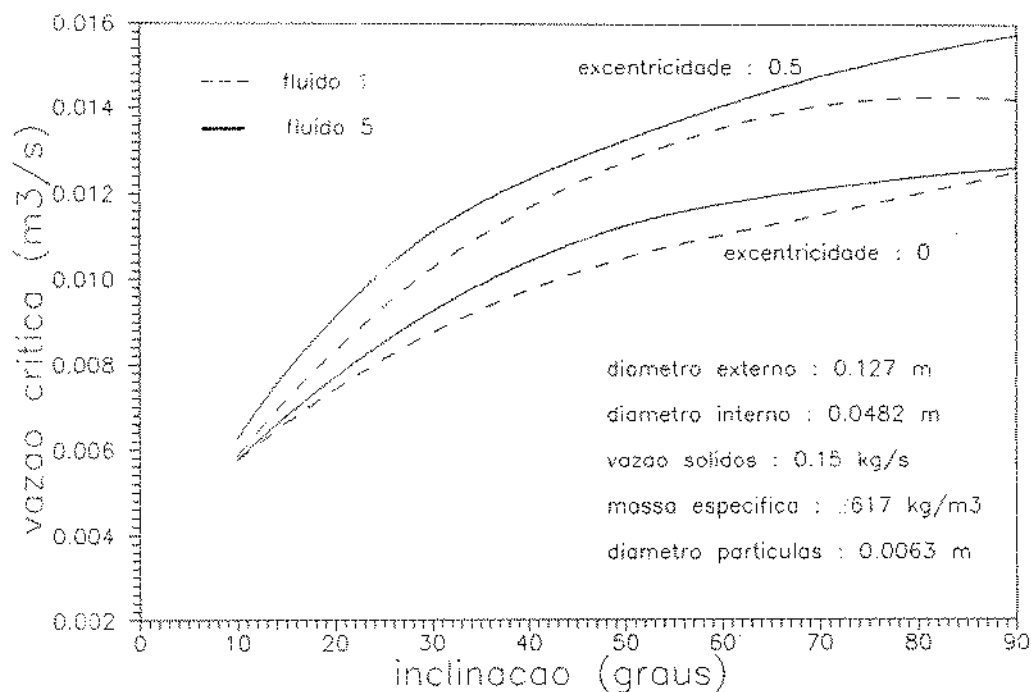
Dentre as diversas fronteiras que caracterizam a mudança de padrão em um escoamento sólido-líquido, a de maior interesse é a que separa as regiões de leito móvel e suspensão heterogênea. Alguns dos modelos para simulação do carreamento de cascalhos, tais como os de Gavignet & Sobey (1986) e Bin-Haddah (1988), tem como objetivo final o cálculo do conjunto de variáveis operacionais que garante a não formação de leito.

A figura 30 ilustra a variação da vazão crítica para não formação de leito com inclinação para dois fluidos e duas excentricidades distintas. Tais previsões foram executadas pelo modelo aqui desenvolvido.

A tabela 5 mostra a comparação das previsões do modelo com os resultados experimentais de velocidade crítica obtidas por Ford et al. (1990) para rotação de 60 RPM.

Deve-se observar que os dados experimentais obtidos não seguem a tendência esperada, uma vez que os valores de velocidade crítica oscilam com a diminuição da inclinação.

---



**Fig. 30 - Influência da Inclinação, Reologia do Fluido e Excentricidade na Vazão Crítica para Não Formação de Leito**

Diversos autores recomendam a utilização da vazão crítica durante as operações de perfuração. Muitas vezes, contudo, não é possível utilizar tais condições e opera-se em condições de leito móvel sem maiores problemas.

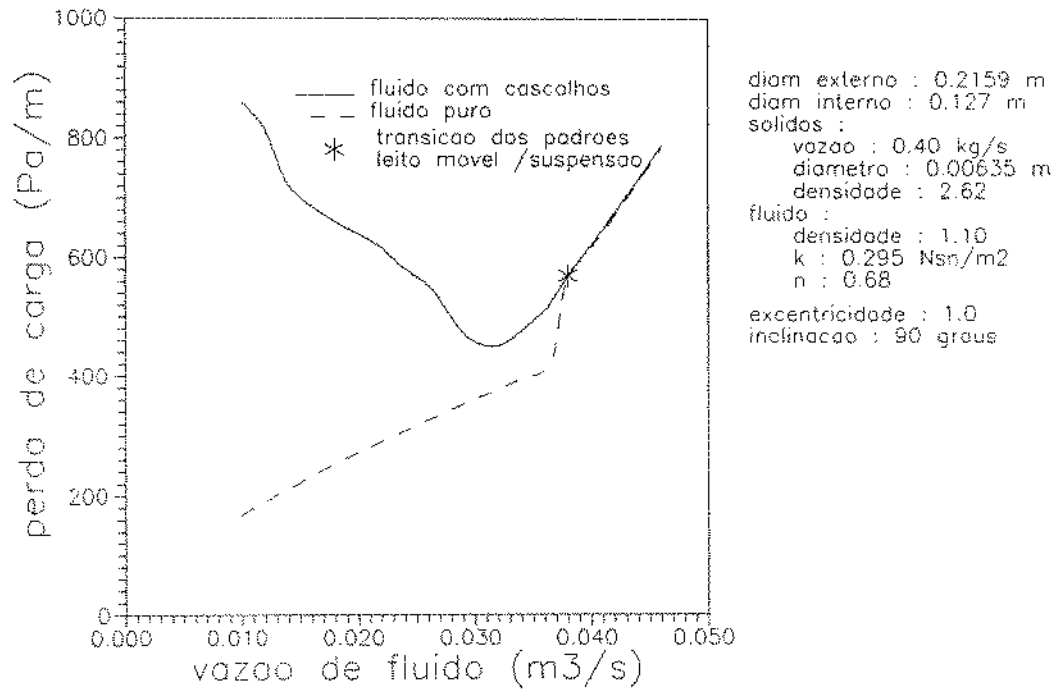


Teste	Velocidade Crítica (m/s)		Desvio
	Este Modelo	Dados Ford et al.	
65	1,090	0,773	41 %
67	0,982	0,821	20 %
68	0,747	0,773	- 3 %
69	0,718	0,802	-10 %
70	0,70	0,614	14 %
		Desvio Médio	12,4 %

Tabela 5 - Comparação de Previsões de Mudança de Padrão

#### V.2.6 - PERDAS DE CARGA

Outra contribuição do modelo aqui desenvolvido é o cálculo da perda de carga por fricção em trechos anulares. Normalmente, os programas hidráulicos de perfuração consideram as perdas de carga totais do sistema. No caso de poços de alta inclinação, valores significativamente maiores de perdas por fricção podem ser observados quando há formação de leito. A figura 31 mostra a variação da perda de carga com a vazão para um fluido puro e para o fluido com cascalhos. São utilizados os dados do trecho horizontal do poço 9-FZB-446D-CE, descritos na tabela 4.



**Fig. 31 - Influência da Vazão de Bombeio na Perda de Carga Anular para um Fluido Puro e com Cascalhos**

Observa-se que a curva do fluido com cascalhos é decrescente com a vazão, passa por um mínimo e torna-se crescente. Quando ocorre a transição leito móvel- suspensão, a curva torna-se paralela e muito próxima à do fluido puro. A descontinuidade da curva do fluido puro é devida à transição do regime laminar para o turbulento.

V.2.7 - COMPARAÇÃO COM OUTROS MODELOS

Aqui são comparados os valores de vazões críticas como função da inclinação para o escoamento do fluido 2, em um poço de 0,2159 x 0,0762 m (8,5 x 3 pol), calculados por este modelo e por outros existentes na literatura, citados no capítulo II. Para os modelos empíricos (Bin-Haddah, Iyoho e Becker) é estipulada a concentração de 5 % como a referente à vazão crítica. Os modelos teóricos (Gavignet & Sobey, Bin-Haddah e este) não necessitam de tal informação. A figura 32 ilustra o exposto.

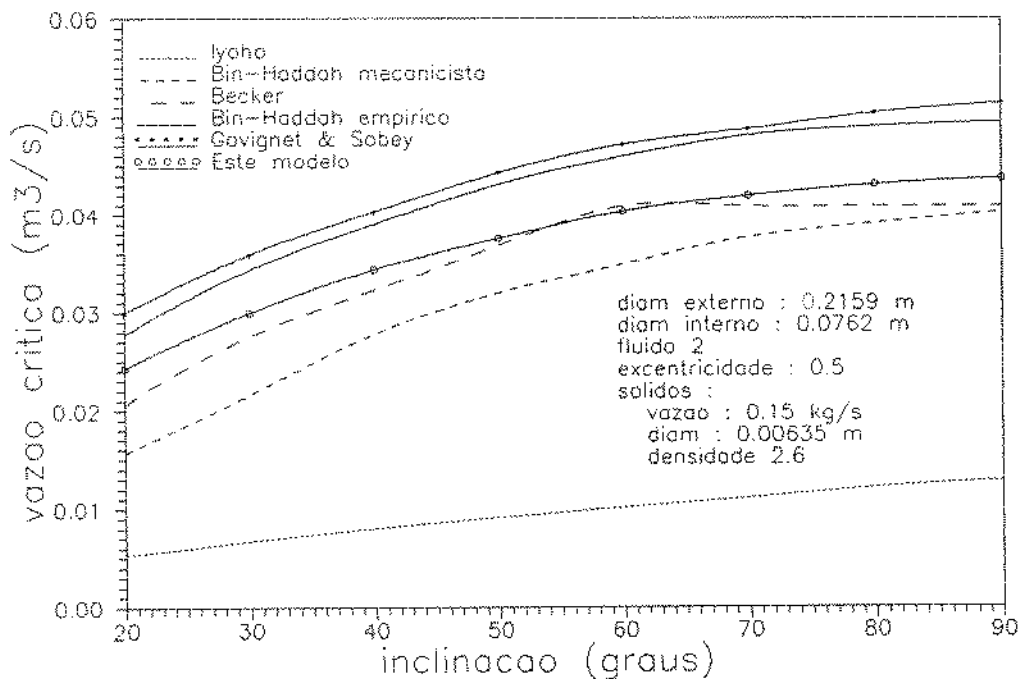


Fig. 32 - Comparação Entre o Modelo Desenvolvido e os Existentes na Literatura

Observa-se que a correlação de Iyoho, por ter sido estabelecida para condições bastante diversas das utilizadas, prevê valores de vazão crítica muito inferiores às previstas pelos outros modelos e seu uso é desaconselhado.

Os demais métodos apresentam resultados relativamente próximos, sendo que a curva referente ao modelo aqui desenvolvido se situa na região média dos valores preditos pelos outros.

## VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### VI.1 - CONCLUSÕES

- Foi apresentado um modelo matemático para descrever o escoamento axial anular de misturas sólido fluido não-newtoniano em trechos horizontais e inclinados. Este modelo é baseado no mecanismo de transporte por deslizamento de um leito de partículas sólidas formado na parte inferior do trecho anular devido à ação de forças gravitacionais.

- Foi então elaborado um programa de computador visando obter a solução numérica do sistema de equações que rege o modelo desenvolvido. Este programa pretende auxiliar a compreensão do fenômeno do transporte de cascalhos em poços de elevado inclinação, bem como ser uma ferramenta útil na programação de operações de campo.

- A execução do programa permitiu avaliar a sensibilidade do modelo a diversos parâmetros. Os resultados, compatíveis com observações experimentais estão resumidos a seguir:

#### Parâmetros relevantes:

1- Vazão de fluido: é a variável mais importante na limpeza do poço e deve ser a primeira a ser alterada em caso de problemas decorrentes da altura excessiva do leito.

2- Excentricidade - anulares totalmente excêntricos apresentam maior tendência à formação de leito que os concêntricos.

3- Inclinação do poço - geralmente, em poços próximos à vertical, não há tendência à formação de leito nas vazões habituais de operação. O aumento da inclinação, aumenta significativamente o valor da vazão necessária para manter as partículas em suspensão. Para inclinações acima de  $70^\circ$ , contudo, este efeito é atenuado.

4- Dimensões do Anular - a minimização da área da seção anular diminui consideravelmente os valores de concentração de sólidos.

5- Densidade do Fluido - pequenos aumentos de densidade do fluido podem melhorar significativamente a eficiência da limpeza de poços.

6- Reologia do fluido : tem influência moderada no modelo. O aumento dos índices de consistência e comportamento do fluido são positivos para a melhoria da limpeza. O regime de escoamento é uma variável importante e a turbulência é desejável na perfuração de poços de elevada inclinação.

#### **Parâmetros secundários:**

1- Vazão de sólidos - o modelo é pouco sensível a esta variável. Assim, a perfuração de poços de elevada inclinação não deve ter a taxa de penetração limitada por problemas de transporte de cascalhos.

2- Tamanho e forma das partículas

---

- Destes resultados, pode-se inferir que a utilização de altas vazões de bombeio, de fluidos de elevada densidade e de colunas de perfuração de diâmetro máximo são favoráveis à limpeza do anular. Recomendações neste sentido são contudo simplistas, pois a programação adequada dos parâmetros hidráulicos deve atender, além dos requisitos de limpeza, a diversos aspectos da operação de perfuração, tais como a minimização de trechos alargados ou do risco de fratura de formações fracas. Assim, esta análise teve como objetivo principal quantificar os efeitos de cada parâmetro de modo a auxiliar na programação hidráulica de um poço. Acredita-se que o uso do programa permitirá a realização de operações delicadas, tais como a perfuração de trechos horizontais com um mínimo de interrupções.

- São apresentados gráficos adimensionais com o objetivo de quantificar a limpeza de poços, a partir de simplificações no modelo. Desta análise conclui-se que a altura do leito e a concentração de sólidos podem ser estimadas a partir do parâmetro de Lockhart-Martinelli modificado para o escoamento em questão e do regime de escoamento da camada suspensa. Este procedimento deve ser aprimorado com a supressão de algumas das hipóteses simplificadoras e pode ser uma alternativa útil na estimativa rápida dos parâmetros de limpeza.

- O modelo desenvolvido possibilita a previsão das perdas de carga no anular onde escoam, em diversas configurações,

---

fluido e sólidos. Estes valores, para os casos onde há formação do leito, são sensivelmente superiores aos previstos pelos métodos convencionais para o cálculo de perdas de carga.

## VI.2 - RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

- O modelo aqui desenvolvido pode ser aperfeiçoado de modo a simular de maneira mais realista o fenômeno em questão. Dentre os diversos caminhos a seguir, pode-se citar como relevantes:

1- A introdução de relações entre as velocidades de cada fase em uma camada, descartando a hipótese do não escorregamento. Este aspecto é importante na modelagem dos padrões suspensos, onde o presente estudo tende a prever valores de concentração de sólidos inferiores aos verificados experimentalmente.

2- A extensão do presente modelo para o caso de escoamentos transientes, submetidos a geometrias diversas e com possibilidade de alteração dos valores das diversas variáveis operacionais durante a execução do programa simulador correspondente.

- O modelo desenvolvido adota alguns parâmetros e correlações de natureza empírica que foram possivelmente obtidos para situações distintas das encontradas no campo. Sugere-se que trabalhos experimentais representativos sejam realizados no intuito de validar ou reavaliar, para o escoamento em estudo, valores ou expressões para o cálculo de:

1- Coeficiente de atrito na interface leito-suspensão

---



heterogênea

2- Ângulo de atrito interno dos sólidos

3- Coeficiente de escorregamento

- Como aplicações práticas do modelo desenvolvido, propõe-se:

1- Generalizar estudos de análise de sensibilidade à variáveis operacionais. Reformular análise de sensibilidade à reologia, baseado em parâmetros obtidos em laboratório para a adição de viscosificantes a um fluido base.

2- Utilizar os resultados de perda de carga anular obtidos pelo programa simulador em procedimentos para otimização da hidráulica de perfuração.

3- Levantar correlações, em laboratório e no campo, entre os parâmetros calculados pelo programa com variáveis indicadoras de problemas de limpeza, tais como torque e arraste na coluna de perfuração.

- Levantar experimentalmente mapas de padrão de escoamento que caracterizem o sistema em estudo. Tais mapas seriam obtidos através de simuladores físicos e poderiam ter suas fronteiras comparadas com previsões teóricas do modelo desenvolvido. A determinação experimental de uma mapa deste tipo é um passo importante no melhor entendimento de escoamentos bifásicos e permite a aplicação adequada de modelos específicos para cada padrão.

---

## VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold, R. A., "Experiments on a Gravity Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear ", Proc. R. Soc. A225, p. 49-63, 1954.
- Becker, T.E., "Correlations for Drill-Cuttings Transport in Directional Well Drilling", Tese de Doutorado, U. of Tulsa, Tulsa, Ok, 1987.
- Bergles, A. E.; Collier, S. G.; Delhaye, J.M.; Hewitt, G.F. & Mayinger, F., "Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries", Cap. 2, Hemisphere/McGraw-Hill, 1981.
- Bin-Haddah, A.S., "Development of Models for Drill Cuttings Transport In Inclined Wells Based on Deposition Critical Velocity Concept", Tese de Mestrado, U. of Tulsa, Tulsa, Ok, 1988.
- Bourgoyne, A. T.; Chenevert, M. E.; Millheim, K. K. & Young, F. S., "Applied Drilling Engineering", cap.4, SPE Textbook Series, Vol 2, 1986.
- Carstens, M.R., "A Theory for Heterogeneous Flow of Solids In Pipes", Journal of the Hydraulics Division of ASCE, 95 (HY1), p. 275-286, 1969.

- Colebrook, C. F., "Turbulent Flow in Pipes with Particular Reference to the Transition Region between Smooth and Rough Pipe Laws", J. Instn. Civ. Engrs , 11, p. 133-156, 1939.
  
  - Doron, P.; Granica, D. & Barnea, D., "Slurry Flow In Horizontal Pipes - Experimental and Modeling", Int. J. of Multiphase Flow, vol. 13, n° 4, p. 535-547, 1987.
  
  - Ford, S. T.; Peden, S.M.; Oyenevin, M. B. & Zarrough, R., "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes", paper SPE 20421, SPE Annual Technical Conference, New Orleans, LA, p. 23-26, setembro, 1990.
  
  - Gandhi, R. L., " An Analysis of Hold Up Phenomena in Slurry Pipelines", Hydrotransport 4 - Fourth International Conference on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, 18 a 21 de maio de 1976.
  
  - Gavignet, A.A. & Sobey, I.J., "A Model for the Transport of Cuttings in Highly Deviated Wells", paper SPE 15417, SPE Annual Technical Conference, New Orleans, LA, Outubro, 1986.
  
  - Goedde, E., "To the Critical Velocity of Heterogeneous Hydraulic Transport", Proc. Fifth Int. Conf. on the Hydraulic Transport of Solids in Pipes, paper B4, p. 81-98, Hanover, 1978.
-

- Gomes, F.J.A.D., "Hidráulica, Fluidos de Potência: Racionalização do Uso do Fator de Fricção", I Encontro Técnico sobre Informática na Perfuração, Petrobrás, Salvador, BA, 1987.
  - Iyoho, A.W., "Drilled Cuttings Transport by Non Newtonian Drilling Fluids Through Inclined, Eccentric Anulli", Tese de Doutorado, U. of Tulsa, Ok, 1980.
  - Laruccia, M. B., "Velocidade de Sedimentação em Fluidos Não-Newtonianos: Efeito da Forma e da Concentração de Partículas", Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1990.
  - Liou, W. L. & Torrest, R.S. - " Suspension Transport and Deposition in Pipeline Flow of Non-Newtonian Polymer Solutions", Particulate and Multiphase Processes, Vol. 3, p. 207-224, Hemisphere, 1987.
  - Lockhart, R. W. & Martinelli, R. C., " Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase- Two-Component Flow in Pipes", Chem. Engn. Prog., Vol. 45, p. 39-48, 1949.
  - Lomba, R. F. T. & Martins A. L., "Estudos sobre Carreamento de Cascalhos Realizados na Universidade de Tulsa, II Seminário de Fluidos de Perfuração - DEPER-SEDES, Petrobrás, Salvador, BA, 4 a 7 dezembro, 1989.
-

- Martin, M. , "Transport des Déblais en Puits Inclinés", Revue de L'Institut Français du Pétrole, Vol. 44, n° 4, julho-agosto, 1989.
  
  - Metzener & Reed, "Flow of Non-Newtonian Fluids - Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent Flow Regions", AIChE J., Vol. 1, p. 434, 1955.
  
  - Parker, D. J., "An Experimental Study of the Effect of Hole Washout and Cutting Size on the Annular Hole Cleaning in Highly Deviated Wells", Tese de Mestrado, U. of Tulsa, Tulsa, OK, 1987.
  
  - Passarelli, R. & Lomba, R. F. T., "Fluidos à Base de Água para Perfuração de Poços com Elevada Inclinação", II Seminário de Fluidos de Perfuração - DEPER-SEDES, Petrobrás, Salvador, BA, 4 a 7 de dezembro, 1989.
  
  - Richardson, J.F. & Zaki, W.N., "Sedimentation and Fluidisation, Part I", Trans. Instn. Chem. Engrs., vol. 32, p. 35-53, 1954.
  
  - Ryan, N. W. & Johnson, M. M., "Transition From Laminar to Turbulent Flow In Pipes", AIChE J., vol. 5, p. 433, 1959.
-

- Sá, C. H. M., "Avaliação Experimental dos Efeitos de Parede, da Reologia e da Concentração de Partículas em um Escoamento Axial Anular Sólido-Fluido Não-Newtoniano", Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas- Unicamp, 1990.
  
  - Silva, M.G.P. & Martins, A.L., "Escoamento Turbulento de Fluidos de Perfuração", 2º Congresso Latino Americano de Hidrocarbonetos, TT 207, 16 a 21 de outubro Rio de Janeiro, RJ, 1987.
  
  - Taitel Y. & Dukler, A. E. , "A Theoretical Approach to the Lockhart-Martinelli Correlation for Stratified Flow", Int. J. Multiphase Flow, Vol 2, p. 591-595, Pergamon/Elsevier, 1976.
  
  - Taylor, G. - "The Dispersion of Matter in Turbulent Flow Through a Pipe", Proc. R. Soc., A223, p. 446-468, 1954.
  
  - Televantos, Y., Shook, C.A., Carleton, A. & Streat, M., "Flow of Slurries of Coarse Particles at High Solid Concentrations", CAn. J. Chem. Eng., vol 57, p. 255-262, 1979.
  
  - Tomren, P. M., "The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus", Tese de Mestrado, U. of Tulsa, Tulsa, OK, 1979.
-

- Wicks, M., "Transport of Solids at Low Concentrations in Horizontal Pipes", Advances in Solid-Liquid Flow In Pipes and Its Applications", Pergamon Press, p. 101-124, 1971.
  
  - Wilson, K.C., "A Unified Physically-Based Analysis of Solid-Liquid Pipeline Flow", Hydrotransport 4 Conference, BHRA Fluid Engineering, A1, p. 1-16, maio, 1976.
  
  - Zandi, I. & Govatos, G., "Heterogeneous Flow of Solids in Pipelines", Proc. ASCE J. Hydraulics Division, 93 (HY3), p. 145-149, 1967.
-

A P É N D I C E S



## APÊNDICE 1 - DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES GERAIS PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

### 1.1 - ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

A modelagem de escoamentos bifásicos se baseia, assim como a dos monofásicos, nas leis gerais de conservação da mecânica dos fluidos. Geralmente, são necessárias leis de conservação, ou balanços, para cada fase, bem como relações que descrevam interações entre elas, chamadas condições de salto na interface. Para a caracterização completa de um sistema, é, em geral, suficiente a formulação de balanços de massa, momento linear, e energia. Para o caso particular de escoamentos isotérmicos, os balanços de massa e momento linear são normalmente suficientes para estabelecer as relações entre as variáveis independentes e dependentes envolvidas.

Finalmente, para a formulação matemática específica das leis de conservação para um dado escoamento são necessárias informações sobre a geometria da interface entre as duas fases presentes. Essa caracterização é conhecida como padrão de escoamento bifásico.

As leis de conservação podem ser expressas matematicamente de diversas formas, cada qual tendo sua aplicação de acordo com as características específicas de cada escoamento. No presente trabalho serão utilizadas equações médias no tempo e na seção transversal do trecho em estudo. O diagrama da figura 33 apresenta o procedimento utilizado para a obtenção das equações.

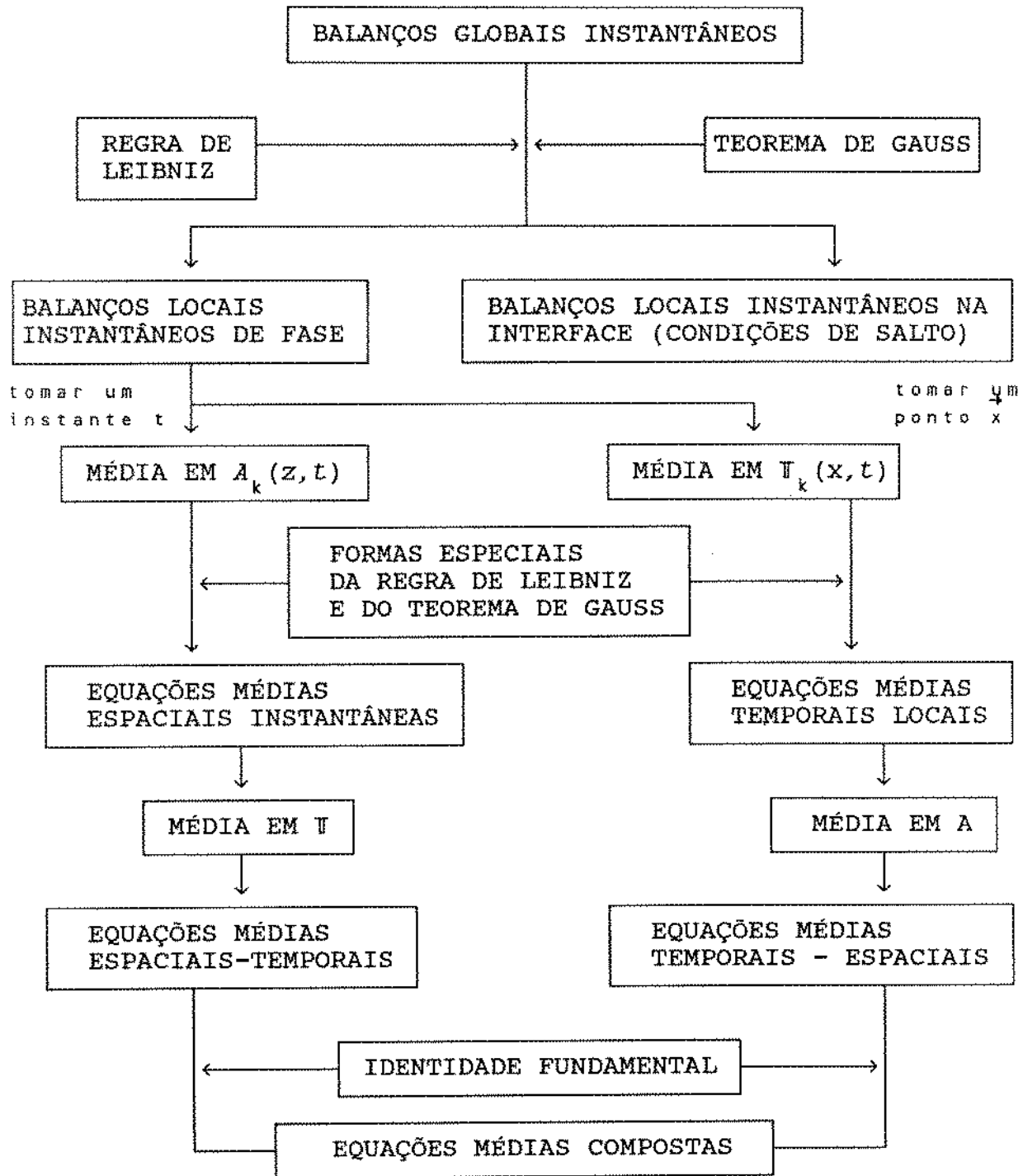


Fig. 33 - Procedimento Geral para Obtenção de Equações Médias para as Leis de Conservação

## 1.2 - DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

Seja um dado volume de controle bifásico,  $V(t)$ , envolvido pela superfície  $A(t)$ , de acordo com a figura 34. Esse volume pode ser dividido em dois subvolumes,  $V_1(t)$  e  $V_2(t)$  circundados pelas superfícies  $A_1(t)$  e  $A_2(t)$ , cada qual contendo uma fase  $k$ . A interface entre as fases tem superfícies  $A_i(t)$ , cujo contorno pode ser descrito por  $C(t)$ .

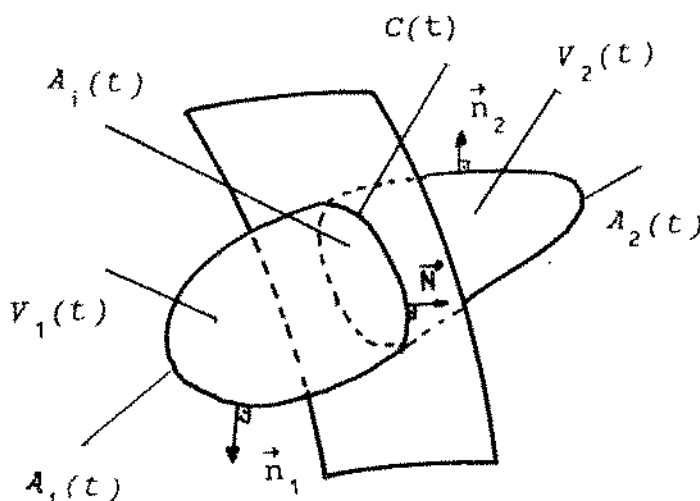


Fig. 34 - Volume de Controle Bifásico

$\vec{n}_1$ ,  $\vec{n}_2$ , e  $\vec{N}$  representam vetores unitários normais às superfícies  $A_1(t)$ ,  $A_2(t)$  e  $A_i(t)$ , respectivamente.

Iremos então restringir a definição do volume  $V(t)$  à de um volume geométrico fixo, onde  $V(t) = V_0$  e  $A(t) = A_0$ , adequado para a análise de escoamentos em dutos. Deve-se observar que a mesma formulação matemática final seria obtida para outros tipos de volume de controle, tais como volumes geométricos móveis ou volumes materiais.

Segundo o procedimento proposto por Delhaye, exposto detalhadamente em Bergles et al. (1981), as leis integrais de balanço podem ser descritas, para sistemas bifásicos, pelos chamados Balanços Globais Instantâneos, cuja forma geral é:

$$\sum_{k=1,2} \frac{d}{dt} \int_{V_k(t)} \rho_k \Psi_k dV = - \sum_{k=1,2} \int_{A_k(t)} \rho_k \Psi_k (\vec{U}_k \cdot \vec{n}_k) dA +$$

$$+ \sum_{k=1,2} \int_{V_k(t)} \rho_k \Phi_k dV - \sum_{k=1,2} \int_{A_k(t)} (\vec{n}_k \cdot \vec{J}_k) dA \quad (66)$$

Onde os valores de  $\Psi_k$ ,  $\Phi_k$  e  $J_k$  são, respectivamente, a quantidade específica, o termo de fonte e o termo de fluxo, e podem ser definidos, para cada balanço de acordo com a tabela 6.

Balanço	Massa	Momento Linear	Energia
$\Psi_k$	1	$\vec{U}_k$	$e_k$
$\vec{J}_k$	0	$-T_k$	$\vec{q}_k - T_k \cdot \vec{U}_k$
$\Phi_k$	0	$\vec{f}$	$\vec{f} \cdot \vec{U}_k$

Tabela 6 - Grandezas Características das Equações de Balanço

A aplicação do Teorema de Gauss e da Regra de Leibniz na equação (66), fornece um conjunto de equações diferenciais, chamados Balanços Locais Instantâneos :

- para uma fase k (1 ou 2):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \Psi_k) + \nabla \cdot (\rho_k \Psi_k \vec{U}_k) + \nabla \cdot \vec{J}_k - \rho_k \Phi_k = 0 \quad (67)$$

- para a interface  $A_i(t)$  (condição de salto):

$$\dot{m}_1 \Psi_1 + \vec{n}_1 \cdot \vec{J}_1 + \dot{m}_2 \Psi_2 + \vec{n}_2 \cdot \vec{J}_2 = 0 \quad (68)$$

Finalmente, é interessante a obtenção de equações que relacionem grandezas médias, pois essas são de aferição experimental mais simples. A integração dos Balanços Locais Instantâneos de Fase, equação (67), ao longo da seção transversal de um duto, de acordo com a figura 35, fornece:

$$\int_{A_k(z,t)} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_k \Psi_k) dA + \int_{A_k(z,t)} \nabla \cdot (\rho_k \Psi_k \vec{U}_k) dA + \int_{A_k(z,t)} \nabla \cdot \vec{J}_k dA - \int_{A_k(z,t)} \rho_k \Phi_k dA = 0 \quad (69)$$

A aplicação, na equação (69), de formas especiais do Teorema de Gauss e da Regra de Leibniz, resulta nas Equações Instantâneas Médias na área  $A_k(z,t)$ :

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} [ A_k \langle \rho_k \Psi_k \rangle_z ] + \frac{\partial}{\partial z} A_k [ \langle \vec{n}_z \cdot \rho_k \Psi_k \vec{U}_k \rangle_z ] + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} [ A_k \langle \vec{n}_z \cdot \vec{J}_k \rangle_z ] - A_k \langle \rho_k \Phi_k \rangle_z = \\
 & - \int_{C(z,t)} (\dot{m}_k \Psi_k + \vec{n}_k \cdot \vec{J}_k) \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} - \int_{C_k(z,t)} \vec{n}_k \cdot \vec{J}_k \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (70)
 \end{aligned}$$

onde os operadores  $\langle \rangle_z$  indicam médias na área e  $z$  é a coordenada do eixo do duto.

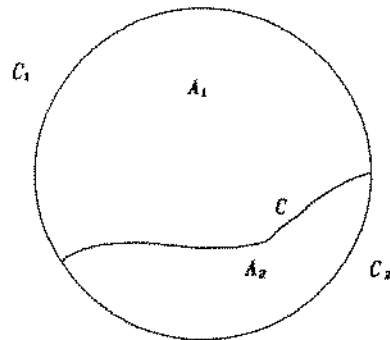


Fig. 35 - Seção Transversal do Duto

A média no tempo da equação (70) fornece, para cada fase  $k$ , as equações médias espaciais temporais:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \overline{[A_k \langle \rho_k \Psi_k \rangle_z]} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{[A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \Psi_k \vec{U}_k) \rangle_z]} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{[A_k \langle \vec{n}_z \cdot \vec{J}_k \rangle_z]} + \\
 & - \overline{A_k \langle \rho_k \Phi_k \rangle_z} = - \int_{C(z,t)} (\dot{m}_k \Psi_k + \vec{n}_k \cdot \vec{J}_k) \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} - \int_{C_k(z,t)} \vec{n}_k \cdot \vec{J}_k \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (71)
 \end{aligned}$$

onde o operador  $\overline{\quad}$  indica a média no tempo.

Assim, substituindo as funções descritas na tabela 6, podemos escrever as equações médias para a conservação da massa e do momento linear, que serão ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho.

Massa :

$$\frac{\partial}{\partial t} \overline{A_k \langle \rho_k \rangle_2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k) \rangle_2} = - \int \overline{(\dot{m}_k)} \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (72)$$

Momento Linear :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \overline{A_k \langle \rho_k \vec{U}_k \rangle_2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{A_k \langle \vec{n}_z \cdot (\rho_k \vec{U}_k \vec{U}_k) \rangle_2} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{A_k \langle \vec{n}_z \cdot T_k \rangle_2} - \overline{A_k \langle \rho_k \vec{f} \rangle_2} \\ & = - \int \overline{(\dot{m}_k \vec{U}_k + \vec{n}_k \cdot T_k)} \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} - \int \overline{\vec{n}_k \cdot T_k} \frac{dC}{\vec{n}_k \cdot \vec{n}_{kc}} \quad (73) \end{aligned}$$

As condições de salto na interface podem ser obtidas pela substituição das funções da tabela 6 na equação 68 :

Massa :

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0 \quad (74)$$

Momento Linear :

$$\vec{m}_1 \vec{U}_1 - \vec{n}_1 T_1 + \vec{m}_2 \vec{U}_2 - \vec{n}_2 T_2 = 0 \quad (75)$$



## APÊNDICE 2 - EXPRESSÕES PARA CÁLCULO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

### 2.1 - TUBOS CIRCULARES:

Seja um tubo de raio  $r$ , contendo um depósito, cuja altura pode ser caracterizada pelo ângulo  $\theta_b$  mostrado na figura 36.  $\theta_b$  varia entre  $-\pi/2$  (sem depósito) até  $\pi/2$  (tubo completamente obstruído). Os parâmetros geométricos podem ser descritos por:

camada superior:

$$\text{- área : } A_s = \frac{r^2 (\pi - 2 \theta_b)}{2} - r^2 \text{ sen } \theta_b \text{ cos } \theta_b \quad (76)$$

$$\text{- perímetro : } S_s = r (\pi - 2 \theta_b) \quad (77)$$

camada inferior:

$$\text{- área : } A_L = \pi r^2 - A_s \quad (78)$$

$$\text{- perímetro: } S_L = 2 \pi r - S_s = r (\pi + 2 \theta_b) \quad (79)$$

perímetro da interface :

$$S_i = 2 r \text{ cos } \theta_b \quad (80)$$

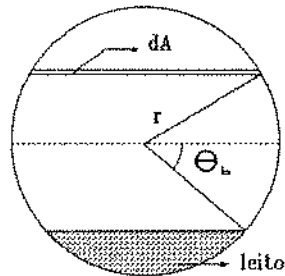


Fig. 36 - Tubo com Depósito

O elemento de área horizontal, assinalado na figura 36, pode ser calculado pela seguinte aproximação:

Seja  $a$  a área do retângulo que aproxima o elemento de área em questão, que pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}
 a &= \text{base} \times \text{altura} = 2 r \cos \theta \cdot [\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin \theta] r = \\
 &2 r^2 \cos \theta [\sin \theta \cos \Delta\theta + \sin \Delta\theta \cos \theta - \sin \theta] = \\
 &2 r^2 \cos \theta [\sin \theta (\cos \Delta\theta - 1) + \sin \Delta\theta \cos \theta] \quad (81)
 \end{aligned}$$

Quando  $\Delta\theta \rightarrow 0$  temos que :

$$\sin \Delta\theta \rightarrow \Delta\theta$$

$$\cos \Delta\theta \rightarrow 1$$

$$\text{Daí:} \quad a = 2 r^2 \cos^2 \theta \Delta\theta \quad (82)$$

$$\text{e} \quad da = 2 r^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (83)$$

## 2.2 - ANULARES CONCÊNTRICOS:

Seja o anular concêntrico determinado por um tubo externo de raio  $r$  e um interno de raio  $k.r$ . Neste caso, dividiremos a seção reta em questão em três regiões distintas de acordo com a altura do leito. A figura 37 ilustra as três situações distintas:

As três regiões podem ser definidas por:

$$\text{I} : \quad \text{sen } \theta_b < -k$$

$$\text{II} : \quad -k \leq \text{sen } \theta_b \leq k$$

$$\text{III} : \quad \text{sen } \theta_b > k$$

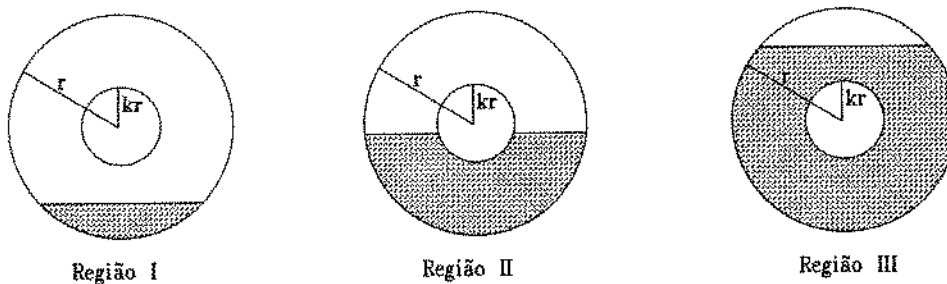


Fig. 37 - Anular Concêntrico com Depósito

Para a definição dos parâmetros geométricos referentes à Região II, é necessária ainda a definição do ângulo  $\theta_b^*$ , como assinalado na figura 38.  $\theta_b^*$  e  $\theta_b$  mantêm a seguinte relação:

$$\text{sen } \theta_b^* = \frac{\text{sen } \theta_b}{k} \quad (84)$$

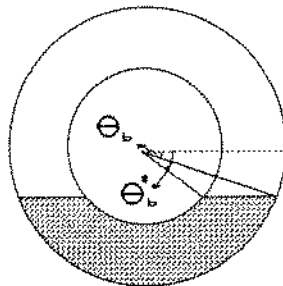


Fig. 38 - Definição dos Ângulos no Anular Concêntrico - Região

II

Observa-se ainda que os parâmetros geométricos na região III são semelhantes aos desenvolvidos para o tubo.

Os parâmetros geométricos podem então ser descritos por:

camada superior:

- Área:

$$\text{Região I} \quad : \quad A_s = (\pi - 2 \theta_b) \frac{r^2}{2} - r^2 \sin \theta_b \cos \theta_b - \pi k^2 r^2$$

(85)

$$\text{II} : A_s = [(\pi - 2 \theta_b) - k^2 (\pi - 2 \theta_b^*)] + r^2 [\text{sen } \theta_b \cos \theta_b - k^2 \text{sen } \theta_b^* \cos \theta_b^*] \quad (86)$$

$$\text{III} : A_s = \frac{r^2 (\pi - 2 \theta_b)}{2} - r^2 \text{sen } \theta_b \cos \theta_b \quad (87)$$

- Perímetro:

$$\text{Região I} : S_s = r (\pi - 2 \theta_b) + 2 \pi k r \quad (88)$$

$$\text{II} : S_s = \pi r (k + 1) - 2 r (\theta_b + k \theta_b^*) \quad (89)$$

$$\text{III} : S_s = r (\pi - 2 \theta_b) \quad (90)$$

camada inferior:

- Área:

$$\text{Região I} : A_L = \pi r^2 (1 - k^2) - A_s \quad (91)$$

$$\text{II} : A_L = \pi r^2 (1 - k^2) - A_s \quad (92)$$

$$\text{III} : A_L = \pi r^2 - A_s \quad (93)$$

- Perímetro:

$$\text{Região I} : S_L = 2 \pi r (k + 1) - S_s \quad (94)$$

$$\text{II} : S_L = 2 \pi r (k + 1) - S_s \quad (95)$$

$$\text{III} : S_L = 2 \pi r - S_s \quad (96)$$

perímetro da interface:

$$\text{Região I} : S_i = 2 r \cos \theta_b \quad (97)$$

$$\text{II} : S_i = 2 r (\cos \theta_b - k \cos \theta_b^*) \quad (98)$$

$$\text{III} : S_i = 2 r \cos \theta_b \quad (99)$$

elemento de área horizontal:

$$\text{Região I} : da = 2 r^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (100)$$

$$\text{II} : da = 2 (1 - k^2) r^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (101)$$

$$\text{III} : da = 2 r^2 \cos^2 \theta d\theta \quad (102)$$

### 2.3 - ANULARES EXCÊNTRICOS:

Seja  $L$  a distância entre os centros dos tubos de um anular excêntrico de acordo com a fig. 39.  $L$  é positivo quando o tubo interno está deslocado para "baixo" e negativo quando para "cima". A excentricidade,  $\epsilon$  é definida por:

$$\epsilon = \frac{L}{r - k r} \quad (103)$$

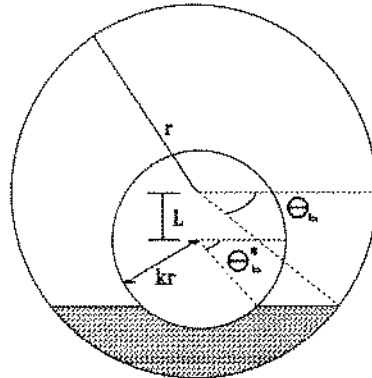


Fig. 39 - Anular Excêntrico com Depósito

As expressões desenvolvidas para cálculo dos parâmetros geométricos no anular concêntrico são válidas aqui, mudando apenas as definições das regiões, que passam a ser descritas por:

- Região I :  $\text{sen } \theta_b < - | k_{exc} |$
- II :  $- | k_{exc} | \leq \text{sen } \theta_b \leq | k_{exc1} |$
- III :  $\text{sen } \theta_b > | k_{exc1} |$

onde  $k_{exc} = \frac{L + k r}{r}$  (104)

$$k_{exc1} = \frac{L - k r}{r} \quad (105)$$

e  $\theta_b^* = \text{arc sen } \left( \frac{h + L - r}{k r} \right)$  (106)

onde  $h = r (1 + \text{sen } \theta_b)$  (107)

### APÊNDICE 3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS EMPÍRICOS DO MODELO A PARTIR DE DADOS EXPERIMENTAIS

Conforme o descrito no capítulo V , os parâmetros empíricos do modelo, quais sejam o coeficiente de escorregamento e a tangente do ângulo de atrito, foram ajustados a partir de dados experimentais.

Para o escoamento em tubos, foram utilizados os dados de perda de carga obtidos por Liou & Torrest (1987) para o escoamento de sistemas sólido-solução polimérica. Os valores do coeficiente de escorregamento foram variados entre 0,15 e 0,40 e da tangente do ângulo de atrito entre 0,4 e 0,6, e as perdas de carga previstas pelo modelo foram comparadas com as experimentais. Os pares de parâmetros que mais se ajustaram, após um tratamento estatístico simples, estão descritos na tabela 7. Lamentavelmente o número de dados experimentais disponível é bastante restrito para uma análise estatística mais consistente.

Já para o escoamento em dutos anulares, foram utilizados os dados de concentração volumétrica de sólidos de Iyoho (1980) e Tomren (1979) para o escoamento de sistemas Carbopol-Sólidos em trechos de excentricidade 0,5 e diversas inclinações. Nos testes considerados, o tubo interno girava com rotação de 50 RPM. Foram utilizados testes com rotação para ajuste dos coeficientes, uma vez que este parâmetro não é contemplado pelo modelo e desta forma seria considerado , ainda que de maneira precária.



Vazão total (m <sup>3</sup> /s)	Conc. na alim. (% vol.)	Perda Carga exp.  (KPa/m)	Perda de carga teórica (KPa/m) (erro relativo %)			
			$\eta$	0,25	0,30	0,30
			$\tan \phi$	0,2	0,4	0,6
7,1 x 10 <sup>-4</sup>	1,5	2,7	2,67 (-1,11)	2,2 (-18,5)	1,89 (-30,0)	
	1,05	2,4	2,53 (+5,4)	2,04 (-15)	1,75 (-27)	
1,0 x 10 <sup>-3</sup>	1,7	1,95	3,19 (+63,5)	2,36 (+21)	2,06 (+5,1)	
	3,1	2,45	3,39 (+38,4)	2,68 (+9,3)	2,33 (-4,8)	
1,24 x 10 <sup>-3</sup>	1,6	1,86	3,6 (+93,5)	2,52 (+35,4)	2,04 (+9,6)	
desvio médio (%)			+39,93	+6,44	-9,42	
desvio médio absoluto (%)			40,37	19,84	15,3	

Tabela 7 - Ajuste dos Parâmetros Empíricos Para o Escoamento em Tubos

A tabela 8 mostra os resultados do tratamento estatístico para os pares que mais se adequaram. Para o par escolhido ( $\eta=0,15$ ,  $\tan\phi=0,6$ ) o erro médio relativo para os valores de altura do leito foi de -3,4%.

Parâmetros $\eta$ $\tan\phi$	0,15 0,4	0,15 0,6	0,20 0,4	0,20 0,6	0,175 0,4	0,175 0,6
erro médio relativo (%)	+17,5	+5,9	+39,4	+36,2	+21,6	+16,6
desvio padrão do erro	24,8	20,4	33,2	32,2	27,5	24,9
nº de pontos	9	9	12	10	8	8

Tabela 8 - Ajuste dos Parâmetros Empíricos para o Escoamento em Dutos Anulares