

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

*IDAGAWA*

ESTUDO DO DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS NA  
PERFURAÇÃO DE POÇOS DIRECIONAIS

Esse exemplar corresponde a redação final da  
tese defendida pelo Engenheiro Luiz Seitiro  
Idagawa e aprovada pela comissão  
 julgadora em 07/11/90

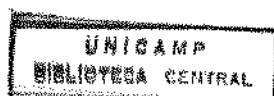
36/90

*Eric Maidla*  
Prof. Dr. ERIC EDGAR MAIDLA

Autor : Luiz Seitiro Idagawa *mt*

Orientador : Eric Edgar Maidla *mt*

Novembro de 1990.

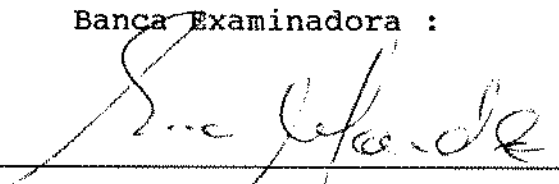


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO


A dissertação "Estudo do Diagnóstico de Problemas na Perfuração de Poços Direcionais", elaborada por Luiz Seitiro Idagawa 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, 07 de Novembro de 1990.

Banca Examinadora :



Eric Edgar Maidla, Ph.D.



Cesar Costapinto Santana, Ph.D.



Otto Luiz Alcântara Santos, Ph.D.

## AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Eric Edgar Maidla, pela sugestão do tema deste trabalho e pela dedicação na orientação desta tese.

À PETROBRÁS S/A, pela oportunidade e condições oferecidas para participar do curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo e realização deste trabalho.

Aos colegas do curso, professores e funcionários da Unicamp, pelo apoio e agradável convívio que me proporcionaram neste período.

A todos os colegas da Petrobrás, que de forma direta ou indireta contribuíram na elaboração deste trabalho, especialmente ao Eng. João Carlos R. Plácido, do Cempes, pela colaboração na obtenção do material didático.

Finalmente, à minha esposa Emilia pelo carinho e compreensão durante todo este período.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	ii
NOMENCLATURA .....	vi
RESUMO .....	x

### Capítulo

1	INTRODUÇÃO .....	1
	1.1 OBJETIVOS .....	3
	1.2 COMPOSIÇÃO DE ESFORÇOS ATUANTES NA COLUNA .	4
2	REVISÃO DA LITERATURA .....	11
	2.1 Modelos de Torque e Arraste .....	11
	2.2 Aplicações de Modelos de Torque e Arraste .	17
	2.3 Testes de Laboratório .....	22
	2.4 Influências no Fator de Atrito .....	30
	2.5 Valores médios de Fatores de Atrito .....	33
	2.6 Equipamentos de Superfície para Medições de Torque, Peso e Profundidade .....	37
3	MODELO DE TORQUE E ARRASTE PROPOSTO .....	42
	3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO .....	42
	3.2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO .....	44
	3.2.1 Carga no Gancho .....	44
	3.2.1.1 Componente Axial e Atrito Mecânico para Colunas sem Rigidez .....	44

3.2.1.2	Contribuição da Rigidez de Coluna .....	53
3.2.1.3	Contribuição do Atrito Hidrodinâmico ..	63
3.2.2)	Cálculo de Torque .....	66
4	PROGRAMA DE COMPUTADOR " D.P.D." .....	68
4.1	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA .....	68
4.2	UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA .....	75
5	RESULTADOS .....	79
5.1	Avaliação do Modelo com os Dados de Campo ..	79
5.2	Simulações Numéricas utilizando o modelo ...	121
5.2.1	Simulações com Micro-Poço .....	128
5.3	Diagnóstico de Problemas no Poço .....	138
5.3.1	Simulações de problemas no poço .....	143
5.3.2	Exemplos de campo .....	162
6	CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES .....	167
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	171
	APÊNDICE A - Cálculo da Força Normal - $F_n$ .....	179
	APÊNDICE B- Curvatura do Poço (Dog-Leg) - $\beta$ .....	180
	APÊNDICE C - Parâmetros Reológicos do Fluido .....	181
	APÊNDICE D - Efeito Hidrodinâmico .....	184
	ANEXO 1: Diagrama de blocos do programa de computador ..	198
	ANEXO 2: Tabela de conversão de unidades .....	201

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Fatores de atrito - Testes de Campo .....	34
2 Fatores de atrito - Testes de Laboratório .....	35
3 Fatores de atrito médios (Revisão da literatura) .	36
4 Poço 1: Fatores de atrito calculados Descida de revestimento .....	84
5 Poço 1: Fatores de atrito calculados Coluna de perfuração .....	85
6 Poço 1: Fatores de atrito calculados Cabo de perfilagem .....	86
7 Poço 2: Fatores de atrito calculados Descida de revestimento .....	89
8 Poço 3: Fatores de atrito calculados Descida de revestimento .....	92
9 Poço 4: Fatores de atrito calculados Coluna de perfuração .....	95
10 Valores médios dos fatores de atrito - Dados de campo .....	98
11 Influências da rigidez de coluna e do atrito hidro- dinâmico sobre o fator de atrito - Valores médios .	123
12 Influências da rigidez de coluna e do atrito hidro- dinâmico sobre o Peso no Gancho .....	124
13 Influência da rigidez de coluna sobre o torque ...	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1    Calibrador do indicador de peso no gancho .....	37
2    Medidor de torque .....	38
3    Tensômetro para medições de peso no gancho .....	39
4,5  Medidor de profundidade .....	40
6,7  Calibrador do medidor de profundidade .....	40
8    Esforços atuantes num elemento de coluna .....	45
9    Esforços atuantes num elemento de coluna .....	54
10   Coluna Bi-apoiada sujeita a curvatura do poço ....	57
11   Poço 1 - Trajetória do poço - Projeção vertical ...	82
12   Poço 1 - Dog-Leg Severity - DLS .....	83
13   Poço 2 - Trajetória do poço - Projeção vertical ...	87
14   Poço 2 - Dog-Leg Severity - DLS .....	88
15   Poço 3 - Trajetória do poço - Projeção vertical ...	90
16   Poço 3 - Dog-Leg Severity - DLS .....	91
17   Poço 4 - Trajetória do poço - Projeção vertical ...	93
18   Poço 4 - Dog-Leg Severity .....	94
19   Poço 1 - Previsão do peso no gancho Descida de revestimento .....	99
20   Poço 1 - Previsão do peso no gancho Coluna de perfuração .....	100
21   Poço 1 - Previsão do peso no gancho Cabo de perfilagem .....	101
22   Poço 2 - Previsão do peso no gancho Descida de revestimento .....	102

23	Poço 3 - Previsão do peso no gancho	
	Descida de revestimento .....	103
24	Poço 4 - Previsão do peso no gancho	
	Coluna de perfuração .....	104
25	Poço 1 - Fatores de atrito calculados	
	Descida de revestimento .....	105
26	Poço 2 - Fatores de atrito calculados	
	Descida de revestimento .....	106
27	Poço 4 - Fatores de atrito calculados	
	Coluna de perfuração .....	107
28	Poço 1 - Razão de Arraste- Descida de revestim. ...	108
29	Poço 1 - Razão de Arraste- Coluna de perfuração ..	109
30	Poço 1 - Razão de Arraste- Cabo de perfilagem ....	110
31	Poço 2 - Razão de Arraste- Descida de revestim. ...	111
32	Poço 3 - Razão de Arraste- Descida de revestim. ...	112
33	Poço 4 - Razão de arraste- Coluna de perfuração ..	113
34	Poço 1 - Previsão de torque	
	Coluna de revestimento .....	114
35	Poço 1 - Previsão de torque	
	Coluna de perfuração .....	115
36	Poço 2 - Previsão de torque	
	Coluna de revestimento .....	116
37	Poço 3 - Previsão de torque	
	Coluna de revestimento .....	117
38	Poço 4 - Previsão de torque	
	Coluna de perfuração .....	118



39	Poço 4 - Perfil de Arraste x Profundidade	
	Coluna de perfuração .....	119
40	Poço 4 - Perfil de Torque x Profundidade	
	Coluna de perfuração .....	120
41	Poço 1 - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	fator de atrito - Coluna de perfuração ..	126
42	Poco 1 - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	peso no gancho - Coluna de perfuração ..	127
43	Micro-poço - Trajetória do poço- Projeção Vertical	130
44	Micro-poço - Previsão do peso no gancho	
	Coluna de perfuração .....	131
45	Micro-poço - Previsão do peso no gancho	
	Coluna de perfuração .....	132
46	Micro-poço - Previsão de torque na superfície	
	Coluna de perfuração .....	133
47	Micro-poço - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	fator de atrito - Coluna de perfuração ..	134
48	Micro-poço - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	fator de atrito - Coluna de perfuração ..	135
49	Micro-poço - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	peso no gancho - Coluna de perfuração ...	136
50	Micro-poço - Efeito do atrito hidrodinâmico sobre o	
	peso no gancho - Coluna de perfuração ...	137
51	Poço X - Efeito do arraste sobre o fator de atrito	141
52	Poço X - Efeito do torque sobre o fator de atrito .	142
53	Poço X - Previsão do peso no gancho	
	Simulação de chaveta .....	146

54	Poço X - Previsão de torque na superfície	
	Simulação de chaveta .....	147
55	Poço X - Fatores de atrito aparente	
	Simulação de chaveta .....	148
56	Poço X - Previsão do peso no gancho	
	Simulação de desmoronamento e ponte .....	152
57	Poço X - Previsão de torque na superfície	
	Simulação de desmoronamento .....	153
58	Poço X - Fatores de atrito aparente	
	Simulação de desmoronamento .....	154
59	Poço X - Previsão do peso no gancho	
	Simulação de fechamento de poço .....	157
60	Poço X - Previsão de torque na superfície	
	Simulação de fechamento de poço .....	158
61	Poço X - Fatores de atrito aparente	
	Simulação de fechamento de poço .....	159
62	Poço 2 - Previsão do peso no gancho para diagnóstico	
	de poço - Descida de revestimento .....	163
63	Poço 2 - Fatores de atrito aparente	
	Descida de revestimento .....	164
64	Poço 4 - Previsão do peso no gancho para diagnóstico	
	de poço - Coluna de perfuração .....	165
65	Poço 4 - Fatores de atrito aparente	
	Coluna de perfuração .....	166

## NOMENCLATURA

- Aj - Área total dos jatos da broca, ..... m<sup>2</sup> [pol<sup>2</sup>]
- Cc - Constante de aderência do fluido
- CcL - Constante de aderência - Regime laminar
- CcT - Constante de aderência - Regime turbulento
- D - Profundidade vertical, ..... m [pé]
- Dh - Diâmetro do poço, ..... m [pol]
- DLS - Taxa de variação total do ângulo  
(Dog-Leg Severity), ..... rd/m [graus/100pés]
- D<sub>tj</sub> - Diâmetro externo da conexão do tubo, ..... m [pol]
- E - Módulo de Elasticidade da coluna, ..... Pa [lbf/pol<sup>2</sup>]
- f - Fator de fricção para o fluido
- fa - Fator de proporcionalidade entre a vazão do anular e  
a vazão total
- Fn - Força normal de contato com rigidez EI = 0, N [lbf]
- Fvt - Arraste hidrodinâmico total, ..... N/m [lbf/pé]
- Fva - Arraste hidrodinâmico no anular, ..... N/m [lbf/pé]
- Fvp - Arraste hidrodinâmico no interior da coluna, ..... N/m  
[lbf/pé]
- H - Raio do poço menos raio externo da coluna, .. m [pol]
- Hb - Altura da bobina do viscosímetro, ..... m [cm]
- HD - Afastamento horizontal do poço, ..... m [pé]
- $\hat{i}$  - Vetor unitário na direção norte
- I - Momento de Inércia, ..... m<sup>4</sup> [pol<sup>4</sup>]
- ID - Diâmetro interno da coluna, ..... m [pol]

- $\vec{j}$  - Vetor unitário na direção leste
- $\vec{k}$  - Vetor unitário na direção vertical
- K - Taxa de curvatura do poço (Dog-Leg Severity), .. rd/m  
[rd/pé]
- Kp - Índice de consistência do fluido, .... Pa.s<sup>n</sup> [eq.CP]
- L - Comprimento de influência da rigidez de coluna, m [pé]
- MD - Profundidade medida, ..... m [pé]
- n - Índice de potência do fluido
- N - Força normal de contato resultante, ..... N [lbf]
- Nb - Velocidade de rotação do rotor do viscosímetro, rd/s  
[rpm]
- Ntj - Quantidade de conexões de tubo na coluna
- OD - Diâmetro externo da coluna, ..... m [pol]
- P - Contribuição da rigidez de coluna sobre Fn, N/m[lbf/pé]
- Pa - Perda de pressão no anular, ..... Pa [lbf/pol<sup>2</sup>]
- Patj - Perda de pressão no anular(poço-conexões), Pa[lbf/pol<sup>2</sup>]
- Pb - Perda de pressão nos jatos da broca, . Pa [lbf/pol<sup>2</sup>]
- Pp - Perda de pressão no interior da coluna, Pa [lbf/pol<sup>2</sup>]
- Qa - Vazão do fluido no anular, ..... m<sup>3</sup>/s [gal/min]
- Qb - Vazão através dos jatos da broca, ... m<sup>3</sup>/s [gal/min]
- Qp - Vazão do fluido no interior da coluna, m<sup>3</sup>/s [gal/min]
- Qt - Vazão total do fluido, ..... m<sup>3</sup>/s [gal/min]
- R - Raio de curvatura do poço, ..... m [pé]
- Rb - Raio da bobina do viscosímetro, ..... m [cm]
- REY - Número de Reynolds
- REYL - Número de Reynolds crítico - fluxo laminar
- REYT - Número de Reynolds crítico - fluxo turbulento

- Rr - Raio do rotor do viscosímetro, ..... m [cm]
- $R_{tj}$  - Raio externo do comando ou da conexão do tubo, m [pol]
- S - Comprimento da coluna a partir do ponto A em direção ao ponto B (fig. 8), ..... m [pé]
- S1 - Comprimento de coluna entre 2 registros direcionais consecutivos, ..... m [pé]
- T - Tração na coluna, ..... N [lbf]
- Tb - Torque na bobina do viscosímetro, .... N.m [dyna.cm]
- TG - Peso no gancho, ..... N [lbf]
- TQ - Torque na coluna, ..... N.m [lbf.pé]
- TQS - Torque na superfície, ..... N.m [lbf.pé]
- U - Vetor unitário tangente à trajetória do poço no ponto B (fig. 8)
- V - Vetor unitário tangente à trajetória do poço no ponto A (fig. 8)
- $\bar{V}_a$  - Velocidade média do fluido no anular, ... m/s [pé/s]
- $\bar{V}_{ae}$  - Velocidade média equivalente no anular, . m/s [pé/s]
- Vc - Velocidade axial da coluna, ..... m/s [pé/s]
- vf - Velocidade do fluido, ..... m/s [pé/s]
- $\bar{V}_p$  - Velocidade média do fluido no interior, . m/s [pé/s]
- $\bar{V}_{pe}$  - Velocidade média equivalente no interior, m/s [pé/s]
- X - Coordenada (Norte-Sul) da trajetória do poço, m [pé]
- Y - Coordenada (Leste-Oeste) da trajetória do poço, m [pé]
- y - Deslocamento da viga Bi-apoiada, ..... m [pé]
- $Y_C$  - Deslocamento da trajetória do poço em S1, ... m [pé]
- W - Peso unitário da coluna no ar, ..... N/m [lbf/pé]
- Wb - Projeção do peso flutuado na direção binormal, N [lbf]

- Wf - Peso unitário flutuado da coluna, .... N/m [lbf/pé]
- Wp - Projeção do peso flutuado na direção principal, N [lbf]
- Wu - Projeção do peso flutuado na direção axial, N [lbf]
- Z - Coordenada vertical da trajetória do poço, .. m [pé]

### ALFABETO GREGO

- $\alpha_0$  - Inclinação do poço no ponto A (fig. 8), ... rd [grau]
- $\alpha_1$  - Inclinação do poço no ponto B (fig. 8), .. rd [grau]
- $\beta$  - Curvatura do poço (Dog-Leg), ..... rd [rd]
- $\phi_0$  - Azimute (direção) do poço no ponto A (fig.8), rd [grau]
- $\phi_1$  - Azimute (direção) do poço no ponto B (fig.8), rd [grau]
- $\Omega$  - Velocidade angular do rotor do viscosímetro, rd/s[rd/s]
- $\dot{\gamma}$  - Taxa de cisalhamento do fluido, .....  $s^{-1}$  [ $s^{-1}$ ]
- $\mu$  - Fator de atrito
- $\mu_a$  - Fator de atrito aparente do poço
- $\mu_p$  - Viscosidade plástica - Fluido Binghamiano, Pa.s [cp]
- $\rho_f$  - Massa específica do fluido, .....  $kg/m^3$  [lbm/gal]
- $\rho_s$  - Massa específica da coluna, .....  $kg/m^3$  [lbm/gal]
- $\tau$  - Tensão de cisalhamento do fluido
- $\tau_b$  - Tensão de cisalhamento do fluido, .... Pa [dyna/cm<sup>2</sup>]
- $\tau_0$  - Limite de escoamento-Fluido Binghamiano, Pa[lbf/100pe<sup>2</sup>]
- $\tau_{wa}$  - Tensão de cisalhamento na parede externa da coluna,  
Pa [lbf/pol<sup>2</sup>]
- $\theta$  - Leitura do viscosímetro, ..... rd [grau]

## RESUMO

O Estudo do Diagnóstico de Problemas na Perfuração de Poços Direcionais, baseia-se em analisar os esforços de torque e arraste durante as movimentações de colunas de perfuração ou de revestimentos no interior do poço. Estes esforços quando comparados com os valores previstos, podem servir como parâmetros adicionais importantes para a avaliação das condições mecânicas do poço, possibilitando assim, identificar com antecedência possível prisão de coluna que possa ocorrer e evitar ou minimizar tempo adicional de sonda, de alto custo operacional, para solucionar tal problema.

O acompanhamento da variação do fator de atrito em função da profundidade, pode auxiliar também no diagnóstico de problemas mecânicos do poço.

Para a previsão de torque e arraste, foi adotado o modelo matemático similar ao proposto por Maidla (3) que se baseia no conceito de fator de atrito entre a coluna e as paredes do poço. No modelo proposto foram incluídos as influências da rigidez de coluna, diâmetro do poço e um outro modelo considerando o atrito hidrodinâmico.

Foi elaborado um programa de computador em linguagem Fortran para a previsão de torque e arraste ou para o cálculo do fator de atrito se fornecidos os torques e pesos no gancho.

Os fatores de atrito calculados, na faixa de 0.21-0.33, com os dados de poços de diferentes trajetórias e composições de colunas de perfuração ou de revestimentos, tiveram

resultados consistentes com os divulgados na literatura.

Simulações com dados de testes em 4 poços de diferentes tipos de trajetória e composições de colunas, mostraram que a rigidez de coluna influencia muito pouco no fator de atrito (cerca de 1.0 % para revestimentos e 2.0 % para colunas de perfuração no poço horizontal). Quanto ao atrito hidrodinâmico, maior influência foi detectada (cerca de 8 % para revestimentos e 3 % para colunas de perfuração). Simulações no micro-poço, mostraram que a influência do atrito hidrodinâmico é bastante significativa, chegando a superar 50 % para a velocidade de manobra de 1.22 m/s [4 pés/s].

Verificou-se que, a influência da rigidez de coluna contribue muito pouco para os esforços de torque na superfície, inferior a 1 % , sendo maior no poço horizontal, cerca de 2 %.

Observou-se maior influência tanto da rigidez de coluna como do atrito hidrodinâmico sobre o peso no gancho nas operações de descidas de colunas face às retiradas de colunas.

A influência do atrito hidrodinâmico sobre o peso no gancho no poço horizontal (raso) foi cerca de 1% para retiradas e 8 % para descidas de colunas de perfuração. No micro-poço, esta influência foi superior a 25 % para a velocidade de manobra de 1.22 m/s [4 pés/s].

Finalmente, alguns procedimentos para o diagnóstico de problemas no poço são sugeridos e discutidos.



## 1 INTRODUÇÃO

O projeto e execução de um poço de petróleo, entre outros aspectos, invocam sempre dois importantes fatores para se atingir com êxito seus objetivos finais e com menor custo : atravessar satisfatoriamente os objetivos geológicos e de produção, viabilizando sempre que possível, plena avaliação do poço e o seu aproveitamento se o mesmo revelar produtor; garantir as condições de segurança operacional em que se destacam a não ocorrência de kicks (influxo indesejado dos fluidos da formação para dentro do poço), erupções, perdas de circulação e prisões de coluna; medidas estas que devem ser constantemente observadas desde o início da perfuração até a última intervenção no poço.

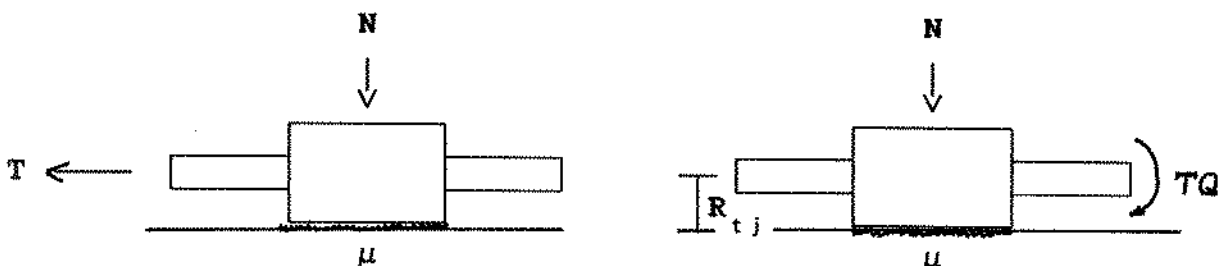
Prisões ou ameaças de prisão de colunas têm sido uma constante preocupação na atividade de exploração de petróleo, pois dependendo da severidade em que ocorre a prisão, são dispendidos enormes gastos para a sua liberação, podendo inclusive comprometer a qualidade do poço ou resultar na sua perda total.

Durante a perfuração de poços direcionais, maiores cuidados são necessários face a poços verticais. Os problemas de desgaste de revestimento tornam-se mais severos e maiores torques (momento necessário para girar a coluna) e arrastes (esforço adicional para a movimentação axial da coluna devido as forças de atrito) são gerados durante as manobras, além da

maior dificuldade de se manter as boas condições mecânicas do poço.

Com o aumento da inclinação do poço, maior parcela do peso da coluna passa a ser suportada pelas paredes do poço, resultando perfis de torque e arraste mais complexos, podendo variar significativamente dependendo da trajetória do poço e da composição de coluna. Isso dificulta ao operador, a avaliação imediata das condições do poço somente com os valores de torque e peso no gancho medidos na superfície. Cálculos mais complexos são necessários para a obtenção dos valores esperados destes parâmetros.

Multiplicando-se o fator de atrito pela força normal da coluna sobre as paredes do poço, obtém-se boas estimativas de torque e arraste que poderão ser usados tanto para projetos de poços direcionais como para diagnosticar problemas no poço quando combinados com outros parâmetros, tais como: variação da pressão de bombeio, pistoneios, amostras de calha, repassamentos, etc., visto que, é muito difícil estabelecer as reais causas do agravamento das condições mecânicas do poço somente com a monitoração e análise de torque e arraste.



$$\mu = \frac{T}{N}$$

$$\mu = \frac{TQ}{N \cdot R_{tj}}$$

Onde:  $\mu$  é o fator de atrito entre as superfícies.

Uma das principais barreiras para se obter melhor previsão de torque e arraste é o valor do fator de atrito a ser considerado. Isso motivou intensas pesquisas de laboratório e de campo para se ter boas estimativas no valor do fator de atrito entre a coluna e as paredes do poço que ocorrem nos poços de petróleo.

Os resultados de fator de atrito obtidos a partir de dados de campo e medições no laboratório mostraram que a sua variação se concentra num range relativamente pequeno mesmo para diferentes composições de colunas, trajetória de poço ou litologia.

Os principais fatores que influenciam no coeficiente de atrito são comentados no capítulo seguinte.

Baseados nos resultados de fatores de atrito obtidos no campo e no laboratório, é possível obter boas estimativas de torque e arraste, podendo o fator de atrito ser ajustado com base em outros poços adjacentes ou mesmo durante a perfuração do próprio poço. Com a monitoração desse parâmetro durante as operações de perfuração, pode-se tentar diagnosticar algum problema no poço.

## 1.1 OBJETIVOS

Através de um modelo matemático e com o auxílio de recursos computacionais, determinar os valores esperados de torque e arraste durante as operações de manobras de colunas e também determinar o fator de atrito aparente do poço.

Estes resultados combinados com a variação do fator de atrito aparente do poço nas operações de manobras de colunas, são analisados para tentar identificar algum problema mecânico no poço, ou seja, avaliar a intensidade da interferência do poço sobre os esforços atuantes na coluna e assim indicar possível necessidade de medidas preventivas para evitar uma futura prisão de coluna.

## 1.2 COMPOSIÇÃO DE ESFORÇOS ATUANTES NA COLUNA

Vários parâmetros contribuem para o peso e torque na superfície tais como: componente axial do peso flutuado da coluna, atrito mecânico, atrito hidrodinâmico, erros de medida e interferência do poço, sendo o último item, de maior interesse para este estudo.

**1.2.1 COMPONENTE AXIAL DO PESO FLUTUADO** - Esta contribuição é obtida através da medição do peso somente com a rotação da coluna e sem reciprocação. Com este procedimento eliminam-se os efeitos do atrito mecânico e hidrodinâmico. Esta parcela representa o peso próprio da coluna no meio fluido considerando-se a trajetória do poço.

**1.2.2 ATRITO MECÂNICO** - Representa um esforço adicional para se movimentar a coluna e age sempre no sentido contrário ao do movimento. Normalmente, este esforço independe da área de contato e da velocidade da coluna.

Torques são necessários para imprimir rotação à coluna e de intensidade igual ao fator de atrito multiplicado pelo raio da coluna e pela força normal que a coluna exerce sobre as paredes do poço. O arraste é obtido mediante a multiplicação do fator de atrito com a força normal. A força normal é a resultante dos efeitos da gravidade sobre a coluna, da tração atuante na coluna ao longo da curvatura total do poço e da rigidez de coluna.

**1.2.3 ATRITO HIDRODINÂMICO** - É o esforço adicional devido a movimentação axial da coluna no interior do poço cheio de fluido. Este movimento de coluna provoca escoamento de fluido tanto no anular como no interior da coluna (se houver comunicação com o anular) que geram tensões de cisalhamento entre as paredes da coluna e o fluido. Baseado no conceito de pistoneio/sobreprensão, pode-se calcular esta influência.

**1.2.4 ERROS DE MEDIDA** - Uma das principais fontes de erros de medida é a sensibilidade e precisão dos equipamentos utilizados para medições de torque e peso no gancho. Trajetória do poço, composição de coluna, calibre do poço, etc., quando incorretos, conduzem também a erros de interpretação dos parâmetros monitorados. O espaçamento entre duas medições de inclinação e direção do poço é muito importante, sendo que grandes intervalos podem disfarçar possíveis curvaturas severas do poço.

**1.2.5 INTERFERÊNCIAS DO POÇO** - Ou problema no poço, podem ser causados por vários fatores. Um dos principais indícios de problemas no poço e que ocorrem com grande frequência são os repassamentos. A identificação exata da causa(s) do problema é muito difícil, sendo que o êxito no diagnóstico depende do maior número de informações que são consideradas.

Abaixo são listados e discutidos de maneira sussinta os principais problemas que podem ocorrer durante a perfuração de um poço.

#### **1.2.5.1 Desmoronamento de poço**

Chama-se desmoronamento, às quedas de partes ou blocos da rocha que formam as paredes do poço. O desmoronamento pode ser provocado por :

Pressão hidrostática insuficiente no interior do poço para superar a pressão de poros da rocha.

Ação mecânica da coluna sobre as paredes do poço.

Excessiva vazão de bombeio que em regime turbulento provoca a lavagem das paredes do poço e possível desmoronamento.

Dissolução de camadas ou domos salinos formando cavernas e conseqüente desmoronamento de camadas superiores.

A análise dos cascalhos provenientes do poço é um dos meios para se detectar o desmoronamento.

#### **1.2.5.2 Fechamento de poço**

É a obstrução total ou um simples estreitamento no diâmetro do poço. Pode ocorrer devido o inchamento dos

folhelhos por hidratação.

É muito frequente ocorrer fechamento de poço quando se perfuram domos salinos com peso de fluido insuficiente.

Durante a retirada de coluna, pode-se induzir um pistoneio, reduzindo assim, a pressão hidrostática e provocando o fechamento ou desmoronamento das paredes do poço.

#### 1.2.5.3 Perda de circulação

É a invasão de fluido para a formação através de fraturas já existentes ou provocadas, ou em formações com altas permo-porosidades. Perdas de circulação podem ocorrer também em zonas produtoras depletadas.

A perda de circulação provoca instabilidade mecânica no poço devido a redução da pressão hidrostática e consequente desmoronamento das camadas superiores ou inferiores à zona de perda, podendo inclusive, permitir produção indesejada dos fluidos da formação pondo em risco a segurança do poço.

#### 1.2.5.4 Má limpeza do poço

Durante a perfuração de um poço, os cascalhos gerados pela broca são removidos para a superfície pelo fluido circulante no poço. Quando se utiliza vazão insuficiente ou quando as propriedades do fluido são inadequadas, os cascalhos não são removidos totalmente e vão se acumulando no espaço anular podendo resultar na prisão de coluna.

Em poços direcionais, os cascalhos formam um leito na parte inferior das paredes do poço dificultando mais ainda a sua remoção.

Situações existem, em que a vazão ótima é limitada pela capacidade dos equipamentos de bombeio. Outra limitação ocorre em poços com variações grandes na sua geometria, tais como: mudança no diâmetro nominal do poço, alargamentos, cavernas, etc.

#### 1.2.5.5 Prisão por pressão diferencial

Quando se perfuram formações permeáveis, principalmente calcarenitos e arenitos, rebocos são formados nas paredes do poço devido à filtração do fluido e consequente deposição de sólidos desse fluido.

Associando-se fluido com peso e filtrado muito altos, rebocos mais espessos são formados criando-se condições mais favoráveis para a ocorrência de prisão por diferencial de pressão. Com a prisão por diferencial de pressão, a circulação de fluido continua plena, porém, sem os movimentos axiais e de rotação.

Em poços direcionais, a prisão pode ocorrer com maior facilidade devido maior extensão da coluna ficar apoiada sobre as paredes do poço.

#### 1.2.5.6 Chavetas

Quando um poço sofre um desvio muito acentuado, comum em operações de desvio de poço ou em trechos de crescimento e diminuição de ângulo de poços direcionais, o atrito constante da coluna vai formando uma cavidade do diâmetro da tubulação sobre a formação, denominado de chaveta.

Durante a retirada de coluna, os comandos (de maior



diâmetro) ou os estabilizadores encontram dificuldades em passar pela chaveta, podendo haver acunhamento e prisão se excessiva tração for aplicada para transpor a chaveta.

#### 1.2.5.7 Pontes

São estrangulamentos localizados no diâmetro do poço que podem ocasionar acunhamentos ou topadas durante a descida de coluna, sendo necessário pequenos repassamentos para prosseguir na sua descida.

#### 1.2.5.8 Alargamentos

Podem ser causados por excessiva hidráulica, hidratação dos folhelhos, dissolução de camadas ou domos salinos, ação mecânica da coluna, perdas de circulação, kicks, etc. É também consequência de algum tipo de desmoronamento localizado.

Alargamentos, além de prejudicarem a qualidade de cimentação de revestimentos, podem causar topadas de coluna e podem provocar prisão de coluna pois são regiões de acúmulo de cascalho. Dificultam também as operações de pescaria durante as tentativas de conexão da coluna pescadora com a parte presa.

#### 1.2.5.9 Batentes

Batentes, são variações frequentes e bruscas no diâmetro do poço. Ocorrem em formações duras, tais como: calcáreos e os diabásios ou quando existem frequentes intercalações de formações moles e duras e de pequenas espessuras.

Os batentes dificultam ou impedem a descida de revestimento. A utilização de revestimentos com conexões sem

luva podem facilitar a sua descida.

#### 1.2.5.10 Deformação do poço

O desequilíbrio provocado nas tensões da rocha ao se perfurar o poço, pode resultar na deformação do diâmetro do poço. Repassamentos são necessários para recalibrar o poço, sendo necessário em alguns casos, a elevação no peso do fluido.

#### 1.2.5.11 Kicks e Blow-outs

Kick é a produção indesejada dos fluidos da formação para dentro do poço devido a pressão hidrostática insuficiente para conter a pressão de poros da formação, que se não controlada, pode conduzir a um blow-out.

Pistoneios, perdas de circulação, falta de completação do poço com fluido durante a retirada de coluna também favorecem a ocorrência de um kick.

Kicks podem provocar instabilidades no poço tais como: desmoronamentos, alargamentos, fechamento de poço, contaminações do fluido de perfuração, etc.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MODELOS DE TORQUE E ARRASTE

Johancsik e outros (1) apresentaram um dos primeiros modelos para a previsão de torque e arraste de colunas em poços direcionais. No modelo, atrito hidrodinâmico e rigidez da coluna são desprezados.

Adota o critério do ângulo médio para o cálculo da força normal e considera coluna com peso flutuado.

O modelo foi testado em 3 poços, medindo torque e peso no gancho com equipamentos portáteis de maior precisão que os da sonda. Os poços com fluido base água, foram testados com quase toda sua extensão revestida e com colunas de perfuração, resultando fatores de atrito entre 0.25 - 0.40 .

Sheppard e outros (2) investigaram as vantagens de vários tipos de trajetórias de poço quanto aos torques e arrastes resultantes. Concluíram que para poços com constante crescimento de ângulo, ou do tipo "Catenária", resultam menores torques e arrastes na superfície, porém, maiores esforços normais são gerados na composição de fundo (comandos e estabilizadores) devido maiores inclinações finais dos poços e que podem acarretar outros problemas.

O modelo considerou a influência da pressão hidrostática sobre os esforços normais e axiais da coluna. Concluiu que a soma destas contribuições ao longo da trajetória do poço até a

superfície resultam nas mesmas equações que consideram somente o peso flutuado da coluna. Foi feito teste em um único poço e um perfil de fator de atrito foi obtido no intervalo de 579 a 731 m [1900 a 2400 pés] com colunas de perfuração. O valor médio do fator de atrito foi de 0.36.

Maidla e Wojtanowicz (3,4,5) apresentaram um modelo para previsão de torque e arraste baseado nas equações analíticas de interpolação na trajetória de poço pelo método de mínima curvatura (33). O modelo considera a influência do atrito hidrodinâmico e da área de contato entre a coluna e as paredes do poço. Considera também, peso de coluna flutuado.

O trabalho foi dedicado principalmente para a análise de descidas de revestimentos.

Concluíram que o efeito da área de contato é desprezível. Quanto ao atrito hidrodinâmico, embora possa ser desprezado em colunas de perfuração, o seu efeito pode ser significativo nas operações de descidas de revestimentos.

Com modelos Bi e Tri-dimensionais, fizeram comparações quanto aos efeitos de mudanças na direção do poço. Concluíram que o modelo Bi-dimensional superestima o fator de atrito, subestimando a previsão de esforços normais e axiais, não recomendando portanto, o seu uso para o cálculo do fator de atrito.

Através de simulações numéricas concluíram também que, para pequenas inclinações de poços, pequenos erros nas medições de peso no gancho conduzem a grandes erros no fator de atrito.

Quatro poços com fluido base água foram testados. Medições de peso no gancho foram feitas com um equipamento

portátil de maior precisão que o da sonda. Os fatores de atrito obtidos foram de 0.21 - 0.30 para movimentos ascendentes e 0.27 - 0.43 para movimentos descendentes.

Maiores fatores de atrito em movimentos descendentes são explicados devido efeitos adicionais de interferência do poço que se manifestam durante a descida de revestimento.

Gazaniol (6) propôs um modelo simples Bi-dimensional (mudanças no azimute do poço ignorados) para a previsão de torque e arraste. Para colunas com movimentos axiais e de rotação simultânea, a força normal de contato é multiplicada por um fator. Para o arraste, este fator é a razão entre a velocidade axial da coluna com a velocidade resultante (soma vetorial da velocidade axial com a velocidade linear de rotação). Para o torque, este fator é a razão entre a velocidade linear de rotação pela velocidade resultante.

Foram feitos testes em 6 poços utilizando MWD<sup>1</sup> (Measuring While Drilling) para avaliar a transmissão de peso e torque a partir da superfície até a broca durante a perfuração.

Verificou que 90 % a 95 % do peso aplicado na superfície era transmitido para a broca. Isto significa que o atrito devido ao movimento axial teve pouca ou nenhuma influência na transmissão de peso, visto que, a velocidade axial durante a

---

1. MWD: Equipamento de fundo de poço e conectado à coluna de perfuração para perfilagem e medições de diversos parâmetros em tempo real durante a perfuração. As informações são transmitidas para a superfície através de impulsos de pressão no fluido.

perfuração é praticamente nula (mesmo para altas taxas de penetração) comparada com a velocidade linear de rotação.

Foram conduzidos também, testes para avaliar isoladamente as influências de rotação, peso sobre a broca, litologia, vibração da coluna e composição da coluna na transmissão de torque. Constatou que estes parâmetros podem influenciar na transmissão de torque aplicado na superfície para a broca.

Embora a transmissão de torque tenha sido atenuada com o aumento da rotação de coluna (devido as forças centrífugas) no poço vertical, o aumento da rotação não afetou a transmissão de torque em trechos de poço inclinado.

Child e Ward (7) usando como aproximação a teoria de Dobramento Contínuo de Coluna, incluíram o efeito de rigidez e sem considerar entretanto o atrito hidrodinâmico.

Adotando fatores de atrito de 0.25 (poço aberto) e 0.20 (poço revestido) em fluido base água e 0.18 (poço aberto) e 0.14 (poço revestido) em fluido base óleo, validaram o modelo com sucesso em 7 poços nas operações de perfuração e manobras de colunas de perfuração e de revestimentos. Os erros médios entre os valores calculados e medidos foram de 7 % para peso no gancho e de 10 % para o torque.

Ho (8) desenvolveu um modelo para a previsão de torque e arraste através de um equacionamento mais rigoroso. Incluiu o efeito de rigidez de coluna baseado na teoria de grandes deformações. O modelo não considera atrito

hidrodinâmico e a solução é obtida pelo método de diferenças finitas.

Simulações mostraram que os efeitos da rigidez podem ser significativos para comandos sujeitos às grandes curvaturas e confinados em poços de seção anular poço/comando pequeno. Para tubos de perfuração, incluindo os tubos pesados (HWDP), os efeitos da rigidez mostraram-se desprezíveis.

Concluiu também que, em poços cujas trajetórias possuem curvaturas suaves, menores que  $0.00087 \text{ rd/m}$  [1.5 graus/100pés], os efeitos da rigidez podem ser desprezados.

Dykstra (9) apresentou um dos modelos mais recentes para a previsão de torque e arraste.

Nos estudos preliminares, foram analisados os modelos de Johancsik e o método de elementos finitos (estático). Concluiu-se que o modelo de Johancsik prevê adequadamente as forças de contato para maioria dos casos.

Para melhor avaliar as influências da rigidez dos comandos e estabilizadores e em condições mais críticas, um outro modelo foi proposto. No modelo de Johancsik, foram adicionados as influências de rigidez de coluna e do diâmetro do poço.

Para a rigidez da coluna, foi adotado como aproximação, o modelo de viga engastada. Cada elemento de coluna com rigidez constante e de comprimento igual à máxima extensão de coluna livre, sem dobramento e confinada no poço, foi considerada engastada em uma das extremidades. Imaginou-se forças de igual intensidade e uniformemente espaçadas ao longo

desse elemento de coluna, de tal forma que o momento resultante destas forças fosse igual ao momento gerado pela curvatura do poço ( rigidez de coluna dividido pelo raio de curvatura do poço). Estas forças foram tratadas como forças normais adicionais que a coluna exerce sobre as paredes do poço. Para o cálculo da curvatura do poço foi adotado o método de raio de curvatura.

As perdas de pressão, no caso de circulação de fluido, foram convertidas em peso de fluido equivalente para o cálculo de peso de coluna flutuado. Como opção, a influência da pressão hidrostática agindo em cada seção diferente da coluna também foi analisada para avaliar o estado de tensão da coluna.

O raio da coluna considerado para o cálculo de torque, baseou-se na equação derivada por Lubinski (35) em que prevê o contato da parte central da coluna com as paredes do poço em função da rigidez, tração na coluna e da geometria do poço e coluna. Para trações superiores que o mínimo necessário para provocar esse contato, foi adotada uma função linear entre a tração e o raio médio (conexão e tubo), para determinar o raio equivalente a ser usado no cálculo de torque.

Testes em 5 poços mostraram que as previsões de peso no gancho tiveram pouca ou nenhuma influência da rigidez de coluna. A máxima diferença de peso no gancho ao se considerar a rigidez de coluna foi de 3 %.

Simulações mostraram que, alterando a curvatura do poço em até 0.0087 rd/m [15 graus/100 pés] numa extensão de 152 m [500 pés], a máxima influência da rigidez da coluna para a previsão do peso no gancho foi de 4 %.



Para a previsão de torque, a influência da rigidez foi mais significativa, principalmente em poços rasos e diminuindo a sua influência com o aumento da profundidade. Teste no intervalo de 1067 a 1524 m [3500 a 5000 pés], resultou diferenças na previsão de torque devido a influência da rigidez em 20 % a 1067 m [3500 pés] e diminuindo para 2 % a 1524 m [5000 pés].

Os resultados considerando peso de coluna flutuado, foram mais consistentes que os calculados pelas forças hidrostáticas agindo em cada seção diferente da coluna.

Os fatores de atrito medidos em testes de campo encontram-se na tabela 1.

## 2.2 APLICAÇÕES DE MODELOS DE TORQUE E ARRASTE

Corbett e Dawson (10) através de uma análise de regressão linear com dados de poços direcionais já perfurados, conseguiram uma função de amplitude senoidal que correlaciona as trajetórias do poço real e poço projetado.

A otimização da composição de coluna de perfuração é sugerida através da combinação do modelo de torque e arraste de Johancsik com a trajetória de poço simulada pela função acima mencionada.

No exemplo ilustrado, é adotado fator de atrito 0.26 em fluido base água, valor obtido a partir de outros poços da área.

Whitten (11) com o auxílio do MWD<sup>1</sup> para obter em tempo real a litologia e a inclinação e direção do poço, definiu Severidade do Poço (força normal total de contato que os comandos e os estabilizadores exercem sobre as paredes do poço dividido pelo seu comprimento total) para prevenir riscos de prisão da composição de fundo através da análise desse parâmetro combinado com o número de estabilizadores defronte às formações permeáveis.

Para o cálculo da força normal, foi considerada a influência da pressão hidrostática agindo em cada seção transversal diferente dos comandos e estabilizadores.

Lesage e outros (12) combinaram o uso do MWD<sup>1</sup> com o modelo de torque e arraste de Johancsik para determinar fatores de atrito para o torque e para o arraste, a cada 0.3048 m [1 pé] de poço perfurado.

Com o perfil destes 2 parâmetros, os autores sugerem avaliar as condições mecânicas do poço e transferência de torque e peso sobre a broca a partir da superfície até o MWD.

Definiram também torque adimensional (torque dividido pelo diâmetro da broca e pelo peso sobre a broca, medidos pelo MWD) para monitorar a seção da coluna abaixo do MWD.

Testes de campo indicaram fatores de atrito para torque de 0.30-0.40 em fluido base água e de 0.12-0.20 em fluido base óleo. Observaram-se grandes variações nos fatores de atrito para o arraste causadas pelas interferências das condições do poço.

Brett e outros (13) sugeriram o uso de modelos matemáticos para previsão de torque e arraste nas fases de projeto, perfuração e análise posterior de poços, objetivando estabelecer respectivamente, melhor trajetória de poço, detectar problemas no poço e identificar deficiências no planejamento de poço.

Baseado no modelo proposto por Sheppard e adotando o método de curvatura mínima para interpolações, torque e arraste foram previstos com sucesso em alguns poços monitorados.

Fatores de atrito de 0.17-0.22 para colunas de perfuração e de 0.25 para revestimentos em poços com fluido base água, corresponderam muito bem com as curvas de torque e arraste de poços perfurados e concluídos sem problemas.

Garden (14) combinou o modelo de Johancsik com as equações de flambagem de colunas para planejar a máxima extensão de poço horizontal.

Ressalta a necessidade de se considerar 2 valores para o fator de atrito em poços horizontais: um dinâmico e outro estático. O fator de atrito estático, de maior valor, a ser considerado para imprimir movimentação inicial à coluna.

Falconer e outros (15) mostram como o modelo de torque e arraste podem ser usados para diagnosticar problemas no poço. Torque, arraste e fator de atrito são monitorados durante a perfuração com MWD. Baseados nos aumentos percentuais destes parâmetros, problemas no poço são identificados. Estes incrementos são correlacionados com algumas causas de problemas

no poço e medidas preventivas são sugeridas.

São reportados valores para o fator de atrito em fluido base água de 0.18 - 0.22 obtidos em testes de campo e em condições de perfuração normal sem problemas.

Kerr, Claytor e Swan (16,17) analisaram problemas de transmissão de peso sobre a broca em poços com intervalos horizontais extensos. Procuraram dimensionar colunas de perfuração e equipamentos de superfície através de estimativas de torque e peso no gancho utilizando modelos de torque e arraste existentes.

Gust e Mac Donald (18) descrevem o projeto e cimentação com rotação de um liner de 0.14 m [5.5 pol] de grande extensão em poço horizontal.

Baseado no modelo de torque e arraste, as conexões do liner foram especificadas conforme o máximo torque esperado durante a cimentação com rotação. O fator de atrito adotado para a estimativa de arraste foi de 0.35 e que foi obtido nas manobras de colunas de perfuração em fluido base água.

Plácido (19) combinou os modelos de Johancsik e Gazaniol para a previsão de torque e arraste em operações de manobra com movimentos axiais e de rotação simultânea.

Foram feitos testes em 2 poços horizontais com fluido base água. Em um dos poços, com a coluna de perfuração e sem rotação, os fatores de atrito foram 0.39-0.43 para movimentos ascendentes e 0.28-0.34 para movimentos descendentes.

Lesso e outros (20) explicam os procedimentos adotados para planejar o desenvolvimento do campo de Amauligak, Beaufort Sea - Canadá, usando o modelo de torque e arraste.

Com as estimativas de torque e arraste, foram dimensionados principalmente os componentes da coluna de perfuração e o Top-Drive<sup>2</sup>.

Nos projetos, foram simuladas possíveis necessidades de correção na direção do poço, desvios e tortuosidade do poço. Para estas situações, as trajetórias de projeto foram alteradas a cada 30 m de profundidade, às inclinações e direções originais foram somados números randômicos entre -0.5 e +0.5 multiplicados por um fator determinado pelo operador, ou seja :

$$\text{Incl. Simul.} = \text{Incl. Orig.} + \text{Ran}(x) * \text{Fator} \quad \text{e}$$

$$\text{Direção Simul.} = \text{Direção Orig.} + \text{Ran}(x) * \text{Fator} / 2 * \text{Sen}(\text{Incl. Simul.})$$

Belaskie e outros (21) ilustram através de alguns exemplos de campo, como o modelo de torque e arraste combinado com o torque e peso sobre a broca medidos pelo MWD<sup>1</sup> podem ser usados para avaliar o desgaste da broca e ameaças de prisão.

Como parâmetro adicional para a análise, foi definido torque adimensional (torque dividido pelo diâmetro da broca e pelo peso sobre a broca medidos pelo MWD).

Em um dos poços testados com fluido base água, o fator de atrito médio em condições normais de perfuração foi de 0.18.

---

2. TOP-DRIVE: Equipamento de superfície que permite retiradas de coluna com rotação e bombeio de fluido. Durante a perfuração é possível adicionar até 3 tubos de perfuração para cada conexão.

### 2.3 TESTES DE LABORATÓRIO

Mondshine (22) realizou testes de laboratório em escala reduzida para avaliar os efeitos de lubrificantes sobre o fator de atrito. Os testes foram realizados somente com rotação e entre metal-metal.

Nos primeiros testes, os resultados mostraram-se insensíveis às variações de esforços normais 1.65 - 4.96 MPa [240-720 psi] em baixas rotações de  $2\pi$  e  $4\pi$  rd/s [60 e 120 rpm] e resultaram valores erráticos para rotações maiores de  $8\pi$  e  $12\pi$  rd/s [240 e 360 rpm]. O fator de atrito para a água foi de 0.36-0.44 e para as amostras de fluido de campo 0.24-0.29.

Novos testes a 4.96 Mpa [720 psi] de esforço normal e  $2\pi$  rd/s [60 rpm] foram feitos com amostras de campo e com os preparados no laboratório. Os fatores de atrito obtidos na maioria dos testes foram : fluido base água 0.20-0.30 , água pura e fluidos de baixo teor de sólidos 0.34-0.42 e fluido base óleo 0.06-0.13 .

O efeito da adição de óleo diesel, óleo cru, querosene ou asfalto, em fluido base água, foi praticamente nulo sobre o fator de atrito.

Nos testes com fluido base água doce e base água salgada aditivados com diferentes tipos de lubrificantes , pouca ou nenhuma redução no fator de atrito foi constatada para maioria dos fluidos com lubrificantes convencionais.

Lubrificantes especiais foram utilizados durante a perfuração de 3 poços com fluido base água, constatando-se reduções no torque e arraste após a adição destes lubrificantes.

Alford (23) estudou através de testes de laboratório, os efeitos de lubrificantes adicionados ao fluido. Torques aplicados para girar um eixo vertical metálico no interior de um furo central de uma amostra cilíndrica de arenito foram medidos para diferentes forças de contato. Os testes foram realizados com fluido circulante à pressão atmosférica.

Concluiu que a eficiência dos lubrificantes depende do tipo do fluido, tipo do lubrificante e também da concentração do lubrificante no fluido.

Os fatores de atrito equivalentes não foram convertidos e reportados pelo autor.

Bratovich e outros (24) investigaram problemas na perfilagem em poços de altas inclinações através de testes de laboratório e de campo utilizando fluido base água. Diversos adaptadores redutores de atrito acoplados às ferramentas de perfilagem foram utilizados nos testes.

Os fatores de atrito medidos no laboratório tiveram grandes influências do tipo do adaptador e das condições de teste (sobre o revestimento ou sobre uma cavidade de cimento). O fator de atrito da ferramenta de perfilagem sobre o cimento teve uma variação de 0.13 a 0.87 e sobre o revestimento de 0.02 a 0.65. Sem os adaptadores, os fatores de atrito foram: 0.36-0.52 sobre o cimento e 0.25-0.35 sobre o revestimento.

Os testes de campo foram conduzidos somente nos intervalos de poço com curvatura mínima e em poços de inclinações máximas entre 0.78 e 1.22 rd [45 e 70 graus]. Para poço aberto, o fator de atrito obtido através de um modelo simples sem

considerar a curvatura do poço foi de 0.40 para cabo e 0.36 para a ferramenta de perfilagem

White e Dawson (25) investigaram atritos e desgastes de revestimentos em testes de laboratório e em escala real.

Os testes foram feitos somente com a rotação da conexão de 0.162 m [6 <sup>3</sup>/<sub>8</sub> pol] sobre o revestimento de 0.244 m [9 <sup>5</sup>/<sub>8</sub> pol] , visto que mínimo desgaste é causado pelo atrito devido o movimento axial durante a perfuração.

Fatores de atrito obtidos a  $\pi/2$  rd/s [15 rpm] foram de 0.25-0.30 para fluido base água e 0.10-0.15 para fluido base óleo.

Resultados bem inferiores obtidos a velocidades maiores, média de  $4\pi$  rd/s [120 rpm], são explicados devido a formação de um filme lubrificante na interface das superfícies e que provavelmente não ocorre nas operações de campo.

Maiores desgastes de revestimentos ocorreram em fluido base óleo. Revestimentos de maior dureza brinell tiveram também maiores desgastes.

Bol (26) efetuou testes de campo e de laboratório para investigar os efeitos de diferentes tipos e composições de fluido sobre o atrito e desgaste do revestimento.

Testes utilizando 3 tipos de equipamentos em escala reduzida e que avaliam o coeficiente de lubricidade, indicaram grandes diferenças nos resultados de fatores de atrito para o mesmo fluido e condições de teste. Os fatores de atrito obtidos foram : fluido base água 0.10-0.30 , fluido base água com



lubrificante 0.05-0.25 e fluido base óleo 0.03-0.15.

Posteriormente, testes em 5 poços com fluido base água foram feitos. Os resultados de fatores de atrito calculados com modelo similar ao do Johancsik, foram comparados com os do laboratório e nenhuma relação foi obtida. Os efeitos dos lubrificantes constatados no laboratório não se manifestaram nos testes de campo. O fator de atrito obtido no campo foi de 0.20 - 0.30 independentemente da extensão relativa entre poço aberto e poço revestido.

Para se ter melhor correlação com os resultados de campo, novos testes de laboratório foram feitos, porém, em escala real. O fator de atrito obtido foi de 0.25-0.35 com fluido adensado, correlacionando muito bem com os obtidos no campo.

Para fluidos com pesos superiores a  $1438 \text{ kg/m}^3$  [12 lbm/gal], observou-se uma diminuição no fator de atrito.

Concluiu-se que em fluidos adensados, a baritina forma uma camada deslisante na superfície de contato, proporcionando menores fatores de atrito e menores desgastes no revestimento.

A adição do lubrificante, mostrou-se eficaz somente em fluidos de baixo peso (até cerca de  $1500 \text{ kg/m}^3$  [12.5 lbm/gal]).

Concluiu também que os testes de laboratório em escala reduzida não representam bem as condições reais de campo pois resultaram fatores de atrito significativamente diferentes daqueles observados no campo e nos testes de laboratório em escala real.

Corbett e Dawson (27) num trabalho posterior analisaram

a influência dos protetores de revestimentos sobre o fator de atrito. Os testes de laboratório, em escala real, foram feitos somente com a rotação do protetor de borracha sobre o revestimento de 0.244 m [ $9 \frac{5}{8}$  pol] e imersos em fluido base água de  $1438 \text{ kg/m}^3$  [12 lb/gal] e com 0.5 % de areia.

Nos testes, houve uma diminuição gradual no fator de atrito em função da duração do teste. Maiores rotações resultaram também em menores fatores de atrito.

Para 0.5 h de teste a  $2.5\pi \text{ rd/s}$  [75 rpm] e 8898 N [2000 lbf] de esforço normal, o fator de atrito reduziu de .5 para .2

Para testes de longa duração a  $4.17\pi \text{ rd/s}$  [125 rpm] e com 2 % de areia no fluido, observou-se perfeito polimento no revestimento. O fator de atrito após 20 h de teste foi de 0.05.

Teste em poço direcional com fluido base água e em poço revestido, resultou fator de atrito de 0.31 para coluna sem os protetores de revestimento. Com a adição dos protetores, o fator de atrito diminuiu de 0.29 para 0.20 após 35 minutos de teste a  $2.3\pi \text{ rd/s}$  [70 rpm].

No segundo teste, de longa duração e com os protetores, o fator de atrito diminuiu de 0.29 para 0.10 após 100 h de teste a  $2.3\pi \text{ rd/s}$  [70 rpm].

Maidla e Wojtanowicz (3, 28) fizeram testes de laboratório para a determinação do fator de atrito em amostras de calcarenito e arenito de formatos circular de 0.1524 m [6 pol] de diâmetro e cobertos com reboco previamente obtidos através de uma filtração dinâmica a 0.69 MPa [100 psi] de pressão durante 30 min. em parte das amostras e 2 min. nos

restantes das amostras. Os testes foram realizados à pressão atmosférica e com um disco ou cilindro de ferro de peso variável girando sobre a amostra. Os fluidos utilizados foram base óleo (sem reboco) e base água de diferentes composições, incluindo lubrificantes.

Em fluidos base água, a presença do reboco diminuiu o fator de atrito estabilizado, porém, nenhuma influência foi observada quanto ao tempo de filtração.

Concluíram também que, lubrificantes podem reduzir o fator de atrito somente em fluidos de baixo teor de sólidos e de baixo peso.

Para fluidos base água com lignosulfonato, o fator de atrito foi de 0.23, coerente com os observados no campo de 0.21 a 0.44.

Para fluido base óleo, o fator de atrito (cerca de 0.24) foi praticamente igual ao do fluido base água.

Através de uma análise estatística de todos os resultados chegou-se a um range de 0.20 - 0.30 para o fator de atrito.

Quigley (29) avaliou os fatores de atrito através de cerca de 800 testes de laboratório em escala reduzida. O equipamento utilizado para os testes foi projetado para permitir testes entre um cilindro de aço rotativo e amostras de rocha ou ferro e imersos em fluido circulante.

No seu trabalho, ressalta as seguintes influências sobre o fator de atrito nos testes em escala reduzida: tipo e densidade do fluido, tipo e concentração de lubrificante e das características das superfícies de contato.

Vinte e oito tipos de lubrificantes em 2 tipos de fluido base água com pesos 1078-1917 kg/m<sup>3</sup> [9-16 lbm/gal] foram testados a temperatura de  $27 \pm 3$  °C e  $5\pi$  rd/s [150 rpm].

Os testes mostraram que o fator de atrito foi menor para fluido base água com lignosulfonato e nos fluidos de peso 1917 kg/m<sup>3</sup> [16 lbm/gal] em comparação com 1078 kg<sup>3</sup> [9 lbm/gal] . Testes com amostras de rocha (arenitos e calcarenitos) também resultaram menores fatores de atrito em comparação com as amostras de ferro. A influência do tipo da rocha sobre o fator de atrito foi muito pequena.

Para fluidos base água sem lubrificantes, o fator de atrito médio foi de 0.30 em amostras de ferro e de 0.20 em amostras de rocha. Num único teste com fluido de campo, base óleo, o fator de atrito medido foi de 0.05 para amostras de ferro e de 0.10 para amostras de rocha.

Somente 4 dos 28 tipos de lubrificantes testados reduziram efetivamente o fator de atrito em amostras de ferro e quase nenhum benefício obteve-se em amostras de rocha.

Quigley e outros (30) utilizando um simulador em escala real realizaram testes com fluidos de lignosulfonato não adensados de 1054 kg/m<sup>3</sup> [8.8 lbm/gal] para avaliar os fatores de atrito.

O simulador com 14.6 m [48 pés] de comprimento e com seção de teste de 4.57 m [15 pés] de comprimento foi projetado para representar as condições reais de campo. Aloja amostras permeáveis ou de revestimentos com diâmetros de 0.216 m [8.5 pol] a 0.311 m [12.25 pol] e permite testes com inclinações

entre  $\pi/4$  e  $\pi/2$  rd [45 e 90 graus] da vertical.

O simulador permite ainda movimentos axiais e de rotação simultânea de uma conexão de tubos de perfuração e com força de contato até 4448 N [1000 lbf] durante o teste. O fator de atrito neste caso, é considerado proporcional à soma vetorial das velocidades axial e de rotação, ou seja, igual a raiz quadrada da soma dos quadrados do fator de atrito para o torque com fator de atrito para o arraste.

Os testes objetivaram analisar os efeitos dos seguintes fatores sobre o fator de atrito: vazão de fluido para a formação do reboco em condições dinâmicas, cascalhos adicionados ao fluido, inclinação do poço e velocidade axial e de rotação simultânea. Tipo do fluido e força de contato também foram analisados para comparação de resultados obtidos com equipamentos testadores de lubricidade em escala reduzida.

As condições de testes foram : anular (revestimento) de 0.216 m [8.5 pol] x .102 m [4 pol] e conexão de .162 m [6.38 pol], vazões de 0 e 0.019 m<sup>3</sup>/s [ 0 e 300 gal/min] , forças de contato de 890 e 2224 N [200 e 500 lbf], inclinações de  $\pi/4$  e  $\pi/2$  rd [45 e 90 graus] e velocidades de 0 e  $3.33\pi$  rd/s [0 e 100 rpm] combinados com 0.229 m/s [45 pés/min] de velocidade axial. Nas amostras de fluido contendo lubrificantes, usou-se concentrações de 5 % Vol.

A análise estatística dos resultados de testes mostraram que :

\* a adição dos cascalhos no fluido reduziu o fator de atrito, resultado análogo ao encontrado por BOL (26) em testes com fluidos de pesos superiores a 1438 kg/m<sup>3</sup> [12 lbm/gal] e sem

cascalhos e que apresentaram também menores fatores de atrito. Os efeitos dos cascalhos sobre o fator de atrito não foram conclusivos, pois efeitos contrários tem-se observado em operações de campo.

- \* os efeitos de movimentos axial e de rotação simultânea reduziram consideravelmente o fator de atrito, o que mostra claramente as vantagens do uso de Top-Drive<sup>2</sup>.
- \* a vazão de fluido com ou sem cascalhos, quase não influenciou no fator de atrito.
- \* é possível reduzir até 88 % no fator de atrito adicionando-se 5 % Vol de lubrificantes no fluido.
- \* os resultados obtidos nestes testes mostraram-se coerentes com os obtidos em testes com equipamentos em escala reduzida e nas mesmas condições de teste.

Os fatores de atrito médios encontram-se na tabela 2.

#### 2.4 INFLUÊNCIAS NO FATOR DE ATRITO

O fator de atrito depende de vários fatores, tais como : características das superfícies de contacto, lubricidade e tipo do fluido, peso do fluido, litologia da formação, reboco e condições mecânicas do poço.

Baseado nos resultados obtidos nos testes de laboratório e de campo e comentados nos itens anteriores, abaixo, um resumo das principais conclusões:

- a) O fator de atrito independe da força de contato entre as duas superfícies.
- b) Obtém-se considerável redução no fator de atrito para o arraste com a rotação da coluna.
- c) Geralmente, o fator de atrito em poço revestido apresenta maior fator de atrito que em poço aberto (testes de laboratório).
- d) O fator de atrito aumenta com o aumento do peso de fluido até  $1438 \text{ kg/m}^3$  [12 lbm/gal], acima deste valor, o fator de atrito diminui com o aumento do peso de fluido.
- e) Em fluidos base água, o lignosulfonato geralmente diminui o fator de atrito.
- f) Em alguns testes, fluidos base óleo apresentaram menores fatores de atrito frente aos fluidos base água.
- g) Em fluidos base água, amostras com reboco apresentaram menores fatores de atrito.
- h) Maiores benefícios com lubrificantes são obtidos em fluidos de baixo teor de sólidos e de baixo peso.
- i) Maiores concentrações de lubrificantes proporcionam melhores resultados.

- j) Os efeitos de lubrificantes são maiores em regiões de poço revestido, havendo uma diminuição acentuada dos seus efeitos no poço aberto.
  
- k) O efeito da adição direta de óleo diesel, óleo cru, querosene ou asfalto no fluido base água foi quase nulo.
  
- l) Protetores de revestimento tiveram menores fatores de atrito que as conexões de coluna. Observou-se uma diminuição gradual no fator de atrito em função do tempo de rotação sobre o revestimento, indicando a ocorrência de polimento das 2 superfícies.



## 2.5 VALORES MÉDIOS DE FATORES DE ATRITO

Um resumo de fatores de atrito médios obtidos em testes de campo e de laboratório encontram-se nas tabelas 1 e 2. Os dados da tabela 1, para testes de campo, mostram que os fatores de atrito se concentram num range praticamente igual tanto para poço aberto, poço revestido ou em testes nos poços parcialmente revestidos.

Nos testes de laboratório (tab.2), para fluidos base água, os fatores de atrito medidos com amostras de revestimento foram maiores que os medidos com amostras de rocha.

Efeitos contrários observaram-se para fluidos base óleo. Se excluir-mos os dados de testes realizados com torque e tração simultânea e os testes com adição de lubrificantes com concentrações de 5 % Vol (testes realizados por Quigley (30)), podemos estabelecer um único range para o fator de atrito em fluido base água para testes de laboratório com amostras de revestimento (tab. 2).

Os ranges médios para o fator de atrito, calculados a partir de dados das tabelas 1 e 2, excluindo testes com tração e rotação simultânea, encontram-se na tabela 3.

TABELA 1  
FATORES DE ATRITO - Testes de CAMPO

FLUIDO BASE ÁGUA			
AUTOR	POÇO ABERTO + REVESTIDO	POÇO ABERTO	POÇO REVESTIDO
Johancsik			0.25-0.40
Sheppard		0.36	
Maidla	0.21-0.30 ^ 0.27-0.43 v		
Child & Ward		0.25	0.20
Dykstra		0.25-0.30	0.20-0.25
Corbett & Dalson	0.26		0.31
Lesage	0.30-0.40 τ <sub>0</sub>		
Brett	0.17-0.25		
Falconer	0.18-0.22		
Gust & McDonald	0.35		
Placido	0.39-0.43 ^ 0.28-0.34 v		
Belaskie	0.18		
Bratovich		0.36-0.40	
Bol	0.20-0.30		
FLUIDO BASE ÓLEO			
Chil & Ward		0.18	0.14
Lesage	0.12-0.20		
Dykstra		0.20-0.25	0.15-0.20

^ Retirando coluna  
v Descendo coluna  
τ<sub>0</sub> Para torque

TABELA 2

## FATORES DE ATRITO - Testes de LABORATÓRIO

FLUIDO BASE ÁGUA				
AUTOR	SEM LUBRIFICANTES		COM LUBRIFICANTES	
	ROCHA	REVEST.	ROCHA	REVEST.
Mondshine		0.20-0.30		0.30-0.40 0.23-0.26 <sup>L</sup>
Bratovich		0.25-0.35		
White & Dalson		0.25-0.30		
Bol		0.25-0.35		0.25-0.35
Maidla	0.20-0.30 0.23 <sup>L</sup>		0.20-0.30	
Quigley [29]	0.20	0.30		
Quigley [30]		0.38-0.58 <sup>1</sup> 0.28-0.51 <sup>2</sup> 0.33-0.36 <sup>3</sup> 0.14-0.29 <sup>4</sup> 0.56-0.61 <sup>5</sup> 0.49 <sup>6</sup>		0.13-0.20 <sup>1</sup> 0.03 <sup>2</sup> 0.04-0.06 <sup>3</sup> 0.02 <sup>4</sup> 0.06-0.10 <sup>5</sup> 0.02 <sup>6</sup>
FLUIDO BASE ÓLEO				
	ROCHA	REVEST.		
Mondshine		0.06-0.13		
White & Dalson		0.10-0.15		
Bol		0.03-0.15		
Maidla	0.24			
Quigley [29]	0.10	0.05		

- L Fluido tratado com lignosulfonato  
 1 Para arraste e sem cascalho no fluido  
 2 Para arraste e com cascalho no fluido  
 3 Para torque e sem cascalho no fluido  
 4 Para torque e com cascalho no fluido  
 5 Valor composto de arraste com rotação e sem cascalho  
 6 Valor composto de arraste com rotação e com cascalho

TABELA 3  
 FATORES DE ATRITO MÉDIOS  
 (Revisão da literatura)

	TESTES DE CAMPO	
	BASE ÁGUA	BASE ÓLEO
POÇO ABERTO	0.30 - 0.33	0.12 - 0.22
POÇO REVESTIDO	0.24 - 0.29	0.15 - 0.17
POÇO PARCIALMENTE REVESTIDO	0.25 - 0.31	0.12 - 0.20
MÉDIA	0.26 - 0.31	0.16 - 0.19

	TESTES DE LABORATÓRIO	
	BASE ÁGUA	BASE ÓLEO
AMOSTRAS		
ROCHA	0.21 - 0.26	0.17
REVESTIMENTO	0.26 - 0.36 *	0.06 - 0.12
MÉDIA	0.25 - 0.34	0.10 - 0.14

\* Exclui testes com 5 % Vol de lubrificante

## 2.6 EQUIPAMENTOS DE SUPERFÍCIE PARA MEDIÇÕES DE TORQUE, PESO E PROFUNDIDADE

Johancsik (1) expõe um dispositivo portátil para calibração de peso no gancho (fig. 1). Preparado num comando curto de 0.762 m [30 pol] de comprimento, o dispositivo tem capacidade de 0-2224 kN [0-500000 lbf] e precisão de até 0.5% .

Conectado na parte inferior da haste de perfuração (kelly), são medidos os pesos indicados pelo calibrador e pelo equipamento de sonda. Assim, é obtida uma curva de calibração e que servirá para ajustar o peso medido pelo equipamento de sonda, conseguindo assim, maior precisão do peso no gancho.

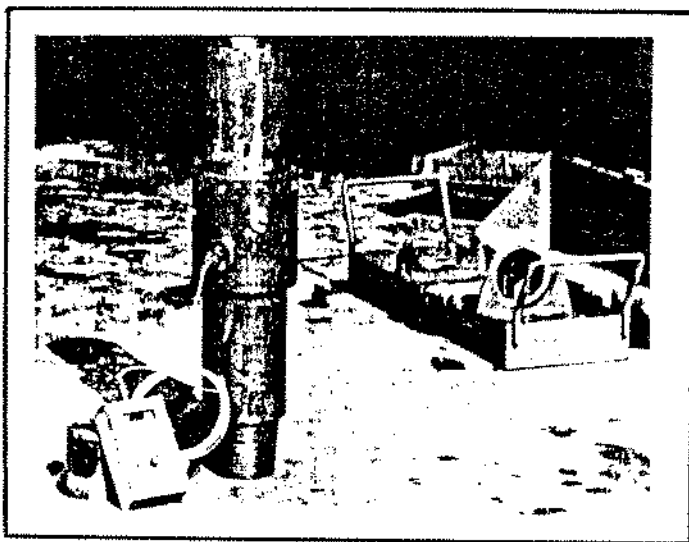


FIG. 1 - CALIBRADOR DO INDICADOR DE PESO NO GANCHO

Foi projetado também um outro dispositivo portátil para medições de torque (fig. 2), com valores fornecidos em unidades próprias, com capacidade até 67 kN.m [50000 lbf.pé]. O

dispositivo é instalado entre a mesa rotativa e a bucha do Kelly e o torque é medido utilizando extensômetros nos 4 pinos que transmite torque da mesa rotativa para a haste de perfuração. Os sinais são processados e transmitidos na forma de ondas de frequência modulada para outra unidade eletrônica e em local fixo.

A calibração é feita aplicando-se torques conhecidos.

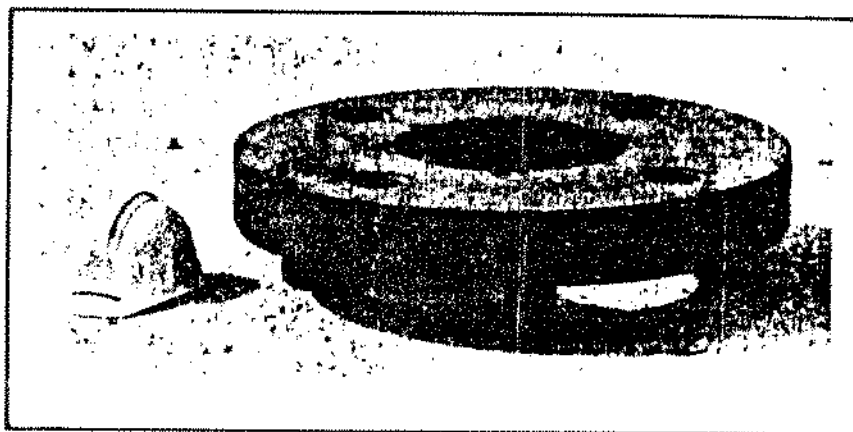


FIG. 2 - MEDIDOR DE TORQUE

Lesage e outros (31) projetaram equipamentos portáteis e de medições mais precisas do peso no gancho, profundidade e vazão de saída. De fácil instalação na maioria das sondas e com mínimo ou nenhuma modificação nas sondas, requerendo porém, calibração de procedimentos simples e rápido para cada tipo de sonda.

Os sinais dos sensores são convertidos em sinais elétricos e são processados para manipulação de informações pelo computador, permitindo assim, o controle das operações de perfuração em tempo real.

a) PESO NO GANCHO - Um tensômetro (Clamp Line Tensiometer) é

instalado no cabo de perfuração (linha morta) e mede a tração desse cabo. (fig. 3).

A sua capacidade máxima é de 444884 N [100000 lbf] por linha passando pelo bloco de coroamento e precisão de  $\pm 3\%$ .

Maidla [4], nos testes de campo para avaliação de fatores de atrito, utilizou com sucesso um equipamento idêntico para medições do peso no gancho.

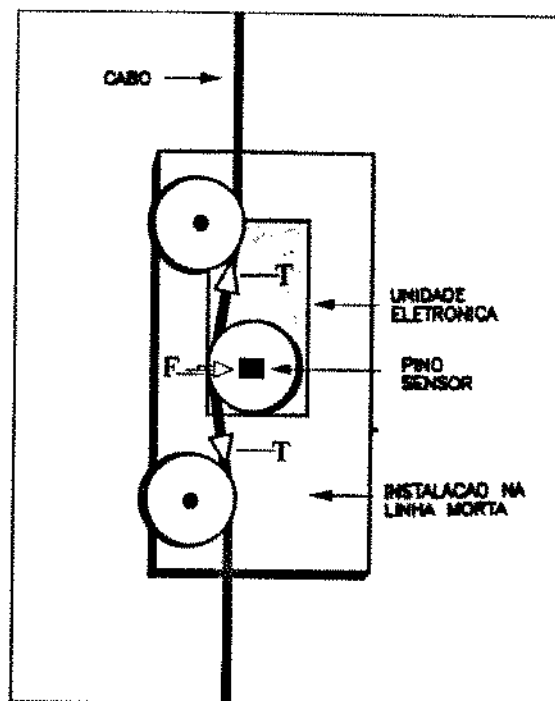


FIG. 3 - TENSÔMETRO PARA MEDIÇÕES DE PESO NO GANCHO

- b) PROFUNDIDADE - É medida com um mecanismo de polias acionado pelo eixo do guincho (figs. 4 e 5). A precisão do sistema é de  $\pm 0.1\%$ .

A decisão de contabilizar mudanças na profundidade é feita automaticamente em função do peso no gancho.

A calibração é feita comparando-se profundidades medidas pelo equipamento e por um outro sistema de calibração. (figs. 6 e 7).

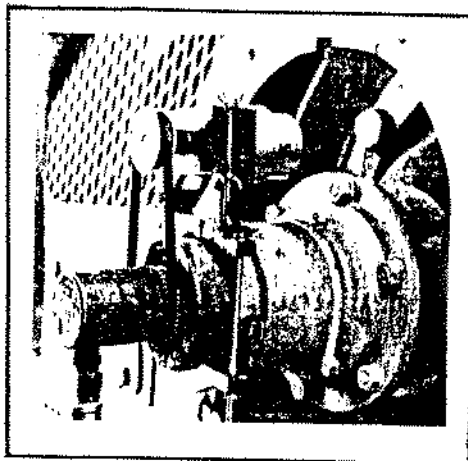
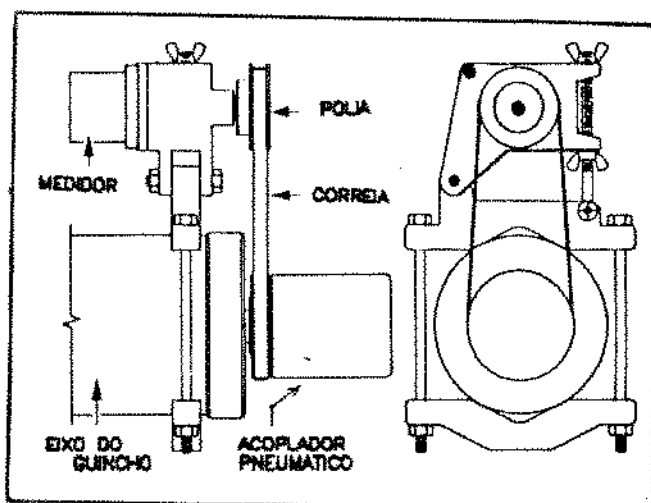


FIG. 4

FIG. 5

## MEDIDOR DE PROFUNDIDADE

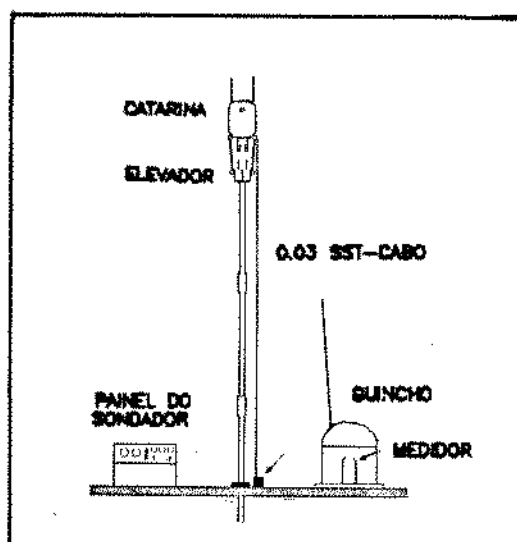


FIG. 6

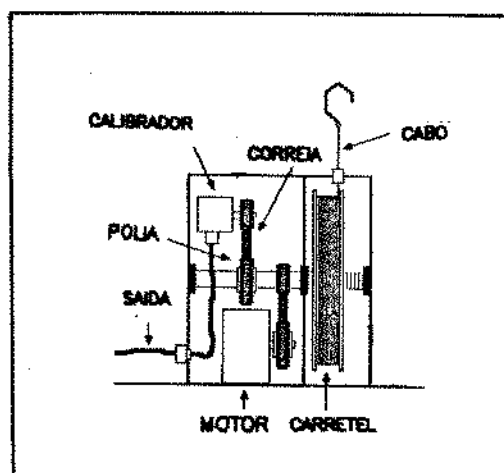


FIG. 7

## CALIBRADOR DO MEDIDOR DE PROFUNDIDADE



c) VAZÃO DE SAÍDA - Para a medição de vazão de saída é feita uma janela de 0.051 m x 0.2032 m [ 2 pol x 8 pol] na linha de retorno (flow-line) sobre o qual é instalado o sensor de vazão.

A precisão do equipamento é de  $\pm 0.00158 \text{ m}^3/\text{s}$  [ $\pm 25 \text{ GPM}$ ] para vazões entre 0 e  $0.075 \text{ m}^3/\text{s}$  [0 e 1200 GPM] .

O conjunto possui um sensor ultrasônico (independe do tipo e propriedades do fluido e também do leito de cascalhos formado na linha de saída) , sensores de temperatura para correção da velocidade do som e um sensor do tipo pêndulo para medição da inclinação da linha de saída para calibração do medidor de vazão.

O tempo gasto pelo som para chegar a um outro sensor instalado no interior da linha de saída, a uma distância conhecida, é comparado com o tempo gasto através do ar puro. Assim, é identificada presença de gás na linha de saída e o sensor de vazão faz a correção da velocidade do som automaticamente.

### 3 MODELO DE TORQUE E ARRASTE PROPOSTO

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

Para o cálculo de torque e arraste de colunas de perfuração e de revestimentos, é adotado o modelo matemático similar ao proposto por Maidla (3).

Baseado no conceito de fator de atrito, torque e arraste são calculados em função dos esforços normais de contato que a coluna exerce sobre as paredes do poço.

O fator de atrito normalmente independe da trajetória do poço, da força normal e da área de superfície de contato. Depende porém, de vários outros fatores, tais como: características das superfícies de contato, lubricidade e tipo do fluido, peso do fluido, litologia da formação, reboco e condições mecânicas do poço.

Conforme comentados com maiores detalhes no capítulo anterior, item 2.4), estas influências permanecem praticamente inalteradas durante a perfuração de um poço, exceto para as condições mecânicas do poço.

Como simplificação, todas estas influências são representadas por um único valor, sendo que a alteração nas condições mecânicas do poço irá refletir no fator de atrito aparente e que será monitorado para o diagnóstico de problemas no poço.

Nos cálculos de torque e arraste, é estabelecido um valor para o fator de atrito e a contribuição de esforços de

cada intervalo entre 2 registros direcionais consecutivos são calculados e somados a partir da extremidade da coluna até a superfície. Estas contribuições de esforços são calculadas com base nas equações analíticas da trajetória do poço pelo Método de Mínima Curvatura (33) e que são usadas também para interpolações nos casos de mudanças nas geometrias da coluna ou do poço. O mesmo procedimento é adotado tanto para retiradas de coluna como para descidas de coluna.

O modelo considera as seguintes influências :

- a) Mudança na inclinação e direção do poço.
- b) Geometria do poço e da coluna
- c) Flutuação de coluna imerso no fluido.
- d) Atrito mecânico que inclui influências do
  - o Fator de atrito
  - o Rigidez de coluna
  - o Diâmetro do poço x coluna
- e) Atrito hidrodinâmico.

As influências da rigidez de coluna e do diâmetro do poço x coluna foram adicionadas no modelo atual.

Para o atrito hidrodinâmico, o modelo atual expandiu aplicações para qualquer composição de coluna de perfuração ou de revestimento. Com base nos conceitos de pistoneio ou de sobrepressão, o atrito hidrodinâmico é calculado considerando-se tensões de cisalhamento atuantes nas paredes internas e externas da coluna devido ao fluxo de fluido provocado pela movimentação da coluna.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Os principais esforços que atuam em uma coluna com movimento axial ou de rotação, são :

- a) Componente axial do peso da coluna flutuado
- b) Atrito mecânico
- c) Atrito hidrodinâmico

#### 3.2.1 CARGA NO GANCHO

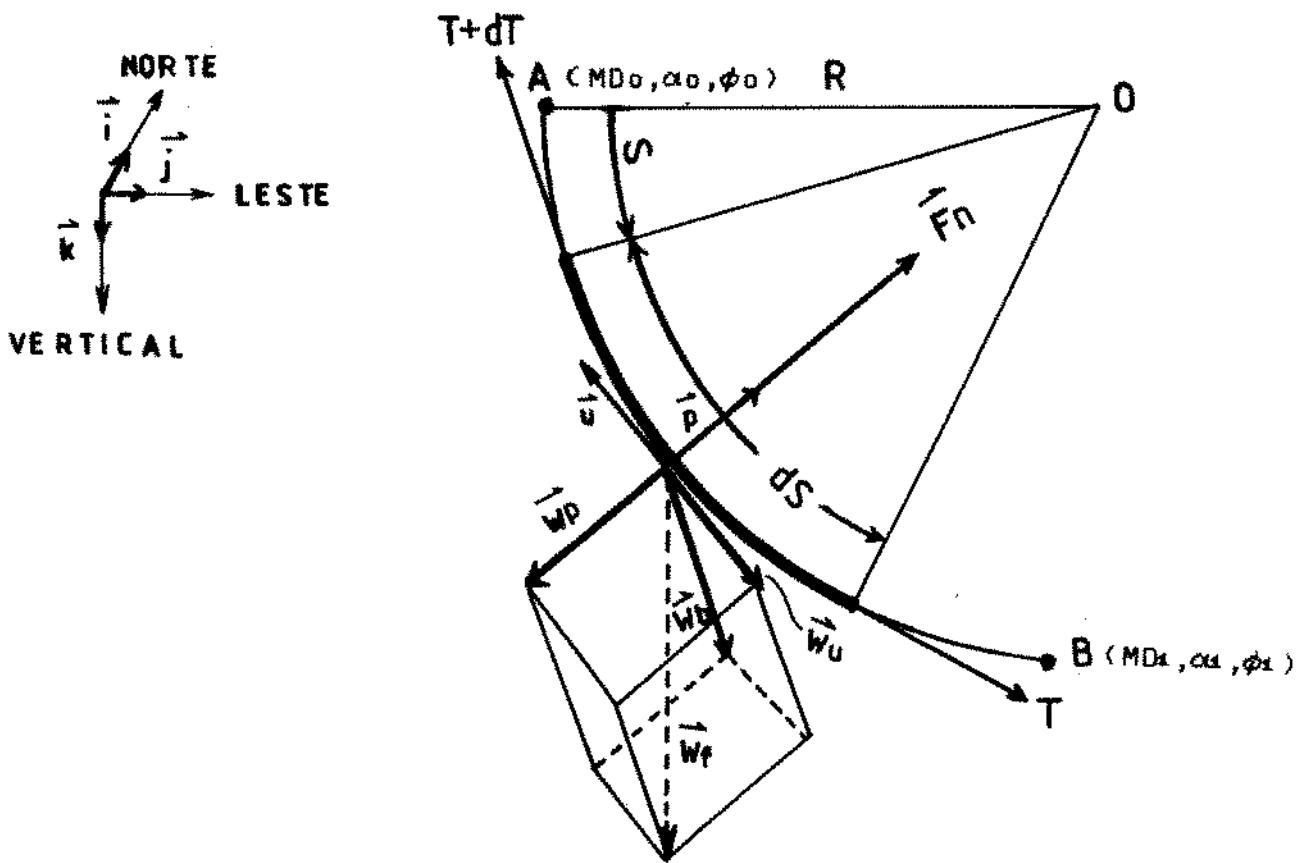
A fig. 8 ilustra uma configuração tridimensional de esforços atuantes em um pequeno elemento de coluna. O peso flutuado da coluna é decomposto num sistema tri-ortogonal, resultando componentes axial, normal ou principal e binormal (44). Pontos A e B representam duas profundidades consecutivas de registros direcionais, onde :

$$\begin{aligned}
 W_u &= W_f \cdot dS \cdot \vec{k} \cdot \vec{u} \\
 W_p &= W_f \cdot dS \cdot \vec{k} \cdot \vec{p} \\
 W_b &= W_f \cdot dS \cdot \vec{k} \cdot \vec{b}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\text{Sendo : } W_f = W ( 1 - \rho_f / \rho_s )$$

#### 3.2.1.1 COMPONENTE AXIAL E ATRITO MECÂNICO PARA COLUNAS SEM RIGIDEZ

Considerando a fig. 8 , para coluna flexível sem rigidez, a força normal de contato resultante, fica :



### SISTEMA TRIEDRICO

- $u$  : VETOR UNITARIO TANGENTE
- $p$  : VETOR UNITARIO NORMAL
- $b$  : VETOR UNITARIO BINORMAL

FIG. 8 ESFORÇOS ATUANTES NUM ELEMENTO DE COLUNA

$$\vec{N} = \vec{F}_n + \vec{W}_p + \vec{W}_b \quad (2)$$

Como  $dS$  é infinitesimal, a variação na tração axial em  $dS$  é desprezível. Portanto, pode-se assumir para o cálculo de  $F_n$ ,

$$T = T + dT \quad (3)$$

Apêndice A , mostra que :

$$F_n = T \cdot dS / R \quad (4)$$

Como  $\vec{W}_b$  é ortogonal a  $\vec{W}_u$  e  $\vec{F}_n$  , somando vetorialmente estes esforços, a eq. (2) fica:

$$N = \left[ W_b^2 + \left( T \cdot dS / R + |W_p| \right)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

O cálculo do atrito mecânico independe do sentido da força normal de contato  $N$  , sendo influenciado somente pelo seu valor absoluto.

Compondo as eqs. (1) e (5) e somando a componente axial do peso, tem-se:

$$\frac{dT}{dS} = Wf.k.u \pm \mu \cdot \left[ (Wf.k.b)^2 + \left( \frac{T}{R} \pm |Wf.k.p| \right)^2 \right]^{0.5} \quad (6)$$

Onde:  $\mu$  é o fator de atrito entre a coluna e as paredes do poço

No primeiro símbolo de  $\pm$  na eq. (6), o sinal positivo é aplicado para movimentos ascendentes e o sinal negativo para movimentos descendentes. O sinal positivo dentro da raiz quadrada nas eqs. (5) e (6) é aplicado em regiões de diminuição de inclinação do poço "Drop-Off" e o sinal negativo para regiões de crescimento de inclinação "Build-Up".

As coordenadas X, Y e Z de um ponto arbitrário da trajetória do poço (vide figs. 8 e 1.B do apêndice B) definidas pelo método de Mínima Curvatura e deduzidas por Taylor (33), são:

$$\begin{aligned} X &= X_0 + S1/\beta ( -Ax.\cos(S.\beta/S1) + Vx.\sen(S.\beta/S1) + Ax ) \\ Y &= Y_0 + S1/\beta ( -Ay.\cos(S.\beta/S1) + Vy.\sen(S.\beta/S1) + Ay ) \quad (7) \\ Z &= Z_0 + S1/\beta ( -Az.\cos(S.\beta/S1) + Vz.\sen(S.\beta/S1) + Az ) \end{aligned}$$

$$\text{Onde: } Ax = ( Ux - Vx \cdot \cos(\beta) ) / \text{sen}(\beta)$$

$$Ay = ( Uy - Vy \cdot \cos(\beta) ) / \text{sen}(\beta)$$

$$Az = ( Uz - Vz \cdot \cos(\beta) ) / \text{sen}(\beta)$$

$$Vx = \text{sen}(\alpha_0) \cdot \cos(\phi_0) \quad Ux = \text{sen}(\alpha_1) \cdot \cos(\phi_1)$$

$$Vy = \text{sen}(\alpha_0) \cdot \text{sen}(\phi_0) \quad Uy = \text{sen}(\alpha_1) \cdot \text{sen}(\phi_1)$$

$$Vz = \cos(\alpha_0) \quad Uz = \cos(\alpha_1)$$

Apêndice B, mostra que a curvatura total do poço "Dog-Leg"  $\beta$  entre os pontos A e B é dada por :

$$\beta = \text{arc Cos}( Ux.Vx + Uy.Vy + Uz.Vz ) \quad (8)$$

A função da trajetória do poço pode ser escrita como :

$$\vec{r}(s) = x.\vec{i} + y.\vec{j} + z.\vec{k} \quad (9)$$

Os vetores unitários  $\vec{u}$ ,  $\vec{p}$  e  $\vec{b}$ , são obtidos com as seguintes derivadas com relação a S (44) :

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= \vec{r}' / |\vec{r}'| \quad (\text{Vetor tangente à curva}) \\ \vec{p} &= \vec{r}'' / |\vec{r}''| \quad (\text{Vetor normal principal à curva}) \\ \vec{b} &= \vec{u} \times \vec{p} = \text{det.} \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ u_x & u_y & u_z \\ p_x & p_y & p_z \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

(Vetor binormal)



Desenvolvendo eqs (10) com as eqs. (7) e (9), resultam:

$$| r' | = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2} = 1$$

$$| r'' | = \sqrt{X''^2 + Y''^2 + Z''^2} = \beta / S1$$

$$\begin{aligned} \vec{u} &= ( Ax \cdot \text{sen}(S\beta/S1) + Vx \cdot \text{cos}(S.\beta/S1) ). \vec{i} + \\ & ( Ay \cdot \text{sen}(S\beta/S1) + Vy \cdot \text{cos}(S.\beta/S1) ). \vec{j} + \\ & ( Az \cdot \text{sen}(S\beta/S1) + Vz \cdot \text{cos}(S.\beta/S1) ). \vec{k} \\ \vec{p} &= ( Ax \cdot \text{cos}(S\beta/S1) - Vx \cdot \text{sen}(S.\beta/S1) ). \vec{i} + \\ & ( Ay \cdot \text{cos}(S\beta/S1) - Vy \cdot \text{sen}(S.\beta/S1) ). \vec{j} + \\ & ( Az \cdot \text{cos}(S\beta/S1) - Vz \cdot \text{sen}(S.\beta/S1) ). \vec{k} \\ \vec{b} &= ( Az.Vy - Ay.Vz ). \vec{i} + ( Ax.Vz - Az.Vx ). \vec{j} + \\ & ( Ay.Vx - Ax.Vy ). \vec{k} \end{aligned} \quad (11)$$

A taxa de curvatura é igual a :  $K = | r'' | = \beta/S1$

Definida também como :  $K = 1 / R$

Portanto :  $\beta / S1 = 1 / R$  (12)

Finalmente, substituindo as eqs. (11) e (12) na eq. (6) e efetuando produtos escalar de  $\vec{k} \cdot \vec{u}$ ,  $\vec{k} \cdot \vec{p}$  e  $\vec{k} \cdot \vec{b}$ , chega-se à seguinte expressão :

$$\frac{dT}{dS} = Wf \cdot (Az \cdot \sin(S.\beta/S1) + Vz \cdot \cos(S.\beta/S1))^{\pm} \cdot \mu \cdot \left[ (Wf \cdot (Ay.Vx - Ax.Vy))^2 + (T.\beta/S1)^{\pm} \cdot |Wf \cdot (Az.\cos(S.\beta/S1) - Vz.\sin(S.\beta/S1))|^2 \right]^{0.5}$$

(13)

A convenção de sinais de  $\pm$  na eq. (13) é a mesma adotada na eq. (6).

A eq. (13) é limitada para valores de  $\beta$  na faixa de  $0 < \beta \leq \Pi/2$  e inclinações de  $0 \leq \alpha \leq \Pi$ .

Integrando a eq. (13), entre os pontos A e B (fig. 8), tem-se a contribuição total entre 2 estações de registros direcionais.

$$\Delta T = - \int_B^A dT \quad (14)$$

$$\text{Portanto: } TG = \sum \Delta T$$

Note que a eq. (13) não possui solução analítica pois a equação diferencial é função de T. Para a solução numérica, foi adotado o Método de Runge Kutta de quarta ordem.

Nas eqs. (7), o comprimento arbitrário  $S$  é definida a partir da posição A em direção à posição B. Portanto, para a integração numérica de B para A, deve-se substituir  $S$  por  $(S_1 - nh)$ , onde "h" é o passo de integração e "n" o numero de passos.

Para intervalos entre A e B, onde a curvatura do poço é nula, ou seja,  $\beta = 0$ , o cálculo de  $\Delta T$  é imediato,

$$\Delta T = Wf.S_1 . \cos(\alpha_0) \pm \mu.Wf.S_1 . \sen(\alpha_0) \quad (15)$$

O sinal positivo na eq.(15) é atribuido para movimentos ascendentes e o negativo para movimentos descendentes.

O peso no gancho devido a contribuição somente do peso flutuado da coluna considerando-se a trajetória do poço, é obtido mediante a rotação da coluna e sem movimento axial. Assim, o atrito mecânico e o hidrodinâmico se anulam.

Com  $\mu = 0$  nas eqs. (13) e (15), tem-se as seguintes equações definitivas para esta situação :

a)  $0 < \beta \leq \Pi/2$  :

$$\Delta T = - \int_{s_1}^0 Wf. ( Az.\sen(S.\beta/S_1) + Vz.\cos(S.\beta/S_1) ) d S$$

Integrando a equação acima, resulta :

$$\Delta T = \frac{Wf.S1}{\beta} .( Vz.sen(\beta) + Az.(1 - cos(\beta)) ) \quad (16)$$

b)  $\beta = 0$  :

$$\Delta T = Wf.S1.cos(\alpha_0) \quad (17)$$

### 3.2.1.2 CONTRIBUIÇÃO DA RIGIDEZ DE COLUNA

Nos estudos preliminares elaborados por Dykstra (9) , o modelo de torque e arraste sem considerar a rigidez de coluna ( $EI = 0$ ) foi avaliado através do Método de Elementos Finitos (estático). Resultados mostraram que o modelo simplificado prevê adequadamente os esforços normais de contato para a maioria dos casos.

Posteriormente, para considerar a influência da rigidez de coluna, Dykstra adotou o modelo de viga engastada e avaliou o seu modelo através de simulações e testes de campo. Comparando os resultados com o modelo sem considerar a rigidez, concluiu que a influência da rigidez é significativa somente em condições muito severas de curvatura do poço e com colunas de alta rigidez.

No modelo proposto, a coluna é considerada BI-APOIADA na extremidade da coluna onde a curvatura da coluna é nula.

Fig. 9.A , mostra um elemento de coluna representada num plano, sujeita a uma tração  $T$  e com raio de curvatura  $R$  idêntico ao do poço .  $W_f$  é o peso unitário flutuado da coluna, sendo  $\alpha$  inclinação média do poço entre os pontos  $A$  e  $B$ .  $F$  representa esforço normal distribuído que a coluna exerce sobre as paredes do poço.

Na fig. 9.B, a componente  $W_f \cdot \cos \alpha$  é desprezada uma vez que a sua influência é mínima sobre a força normal se comparada com a influencia de  $T$  ou também devido a sua pequena contribuição no cálculo de Momento em função de pequenos deslocamentos da coluna.

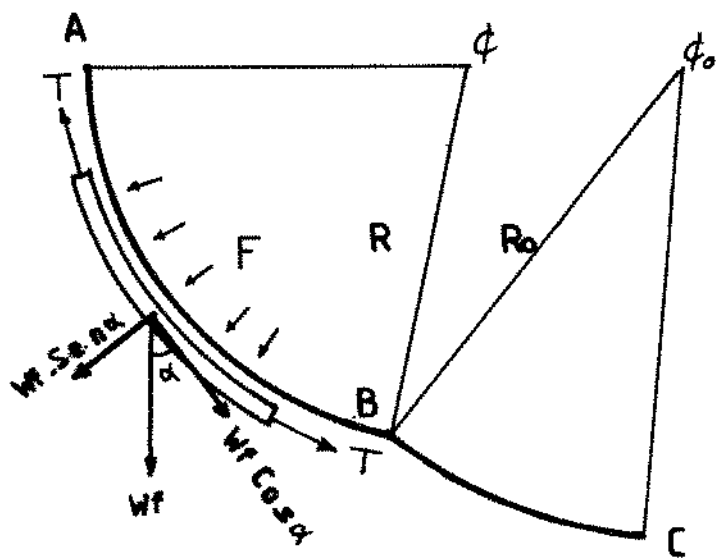


FIG-9.A

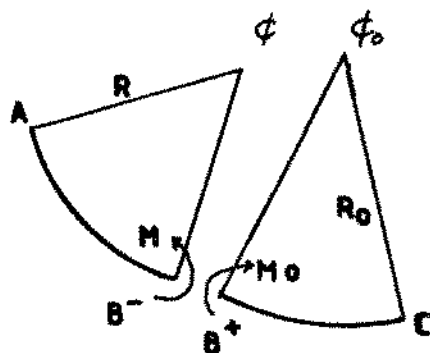
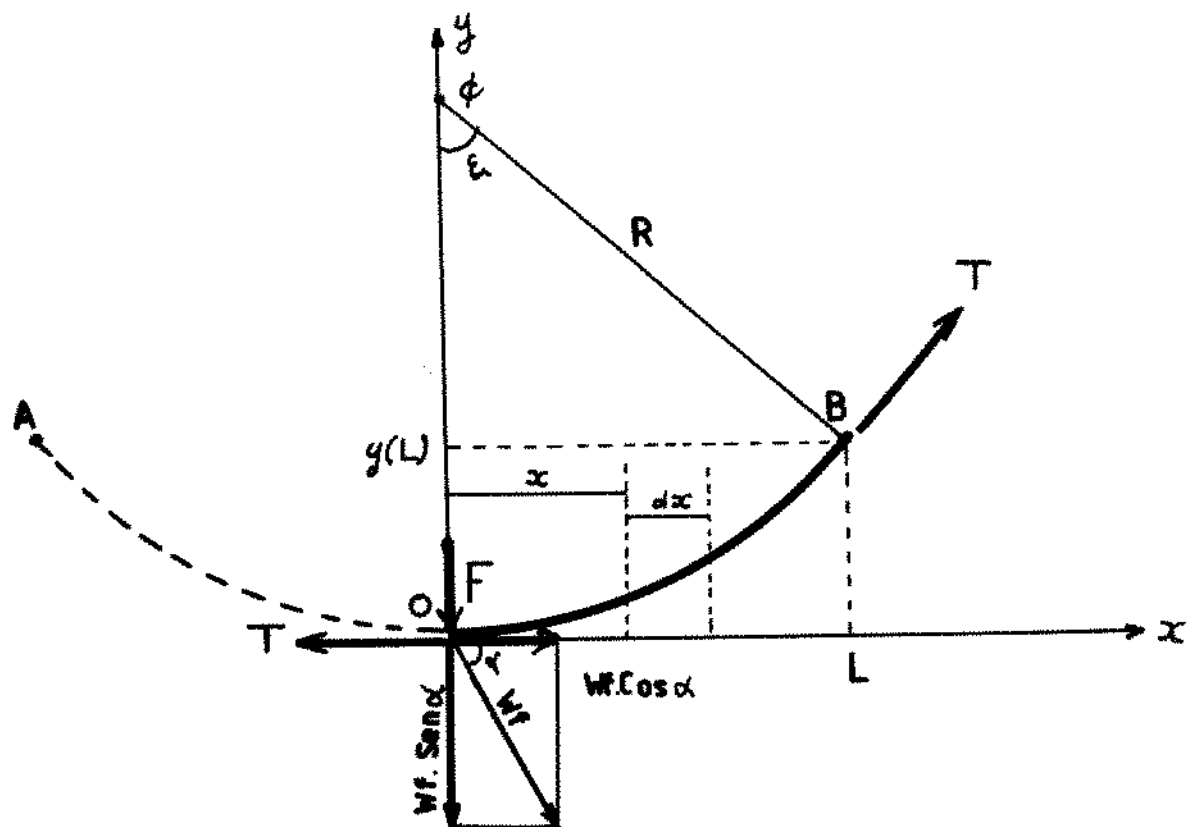


FIG-9.C



$\alpha$ : Incl. média entre  $\overline{AB}$

FIG-9.B

FIG. 9 ESFORÇOS ATUANTES NUM ELEMENTO DE COLUNA

Denominando :

$$\begin{aligned} q &= Wf.\text{sen}(\alpha) && \text{para } \alpha_A < \alpha_B && \text{(Build-up)} \\ q &= -Wf.\text{sen}(\alpha) && \text{para } \alpha_A > \alpha_B && \text{(Drop-Off)} \\ T &= \pm T && && \text{( + tração / - compressão )} \\ C &= 1/R && && \text{curvatura do poço} \end{aligned}$$

O balanço de momentos com relação ao ponto B da fig. 9.B e aproximando intervalo  $\overline{OB}$  por  $\overline{OL}$ , resulta (35) :

$$\frac{E.I}{R} + Ty - \int_0^L (q + F).dx.(L - x) = E.I.\frac{d^2y}{dx^2} \quad (18)$$

Se no trecho  $\overline{OB}$ ,  $R = \text{cte} \implies d^2y / dx^2 = 1/R \therefore$  não há influência da rigidez de coluna .

#### a) EXTREMIDADE DA COLUNA

Na extremidade da coluna, a curvatura é nula (ponta livre), portanto :

$$d^2y / dx^2 = 0 \quad , \text{ substituindo na eq. (18),}$$

$$E.I.C + Ty - \int_0^L (q + F).dx.(L - x) = 0 \quad (19)$$

Integrando a eq.(19) de 0 a L e substituindo o deslocamento y por  $y(L) = R(1 - \cos\xi) = R(1 - \cos(L/R))$  ,

$$F = -q + \frac{2}{L^2} \left[ E.I.C + T.R(1 - \cos(L/R)) \right]$$

$$F = -q + 2.E.I.C / L^2 + 2.T.R(1 - \cos(L/R)) / L^2$$

$$\text{Como : } 2.R(1 - \cos(L/R)) / L^2 \cong 1/R = C \quad ,$$

$$\boxed{F = -q + T.C + 2.E.I.C / L^2} \quad (20)$$

Esforço normal distribuído que a coluna exerce no fundo do poço. (Coluna representada num plano)

#### a.1) DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO L

Na extremidade da coluna, a tração  $T = 0$  e  $d^2y/dx^2 = 0$  para  $x = L$ . Aproximando a configuração da coluna como uma viga BI-APOIADA conforme a fig. 10, a equação diferencial da viga para pequenas deformações e com carga distribuída arbitrária  $Q$  é dada por :

$$E.I. \frac{d^4 y(x)}{d x^4} = Q \quad (21)$$

E o momento de inércia para um elemento de seção circular,

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (OD^4 - ID^4) \quad (22)$$

Considerando a fig. 10, as condições de contorno da eq. (21) para viga Bi-apoiada, são :



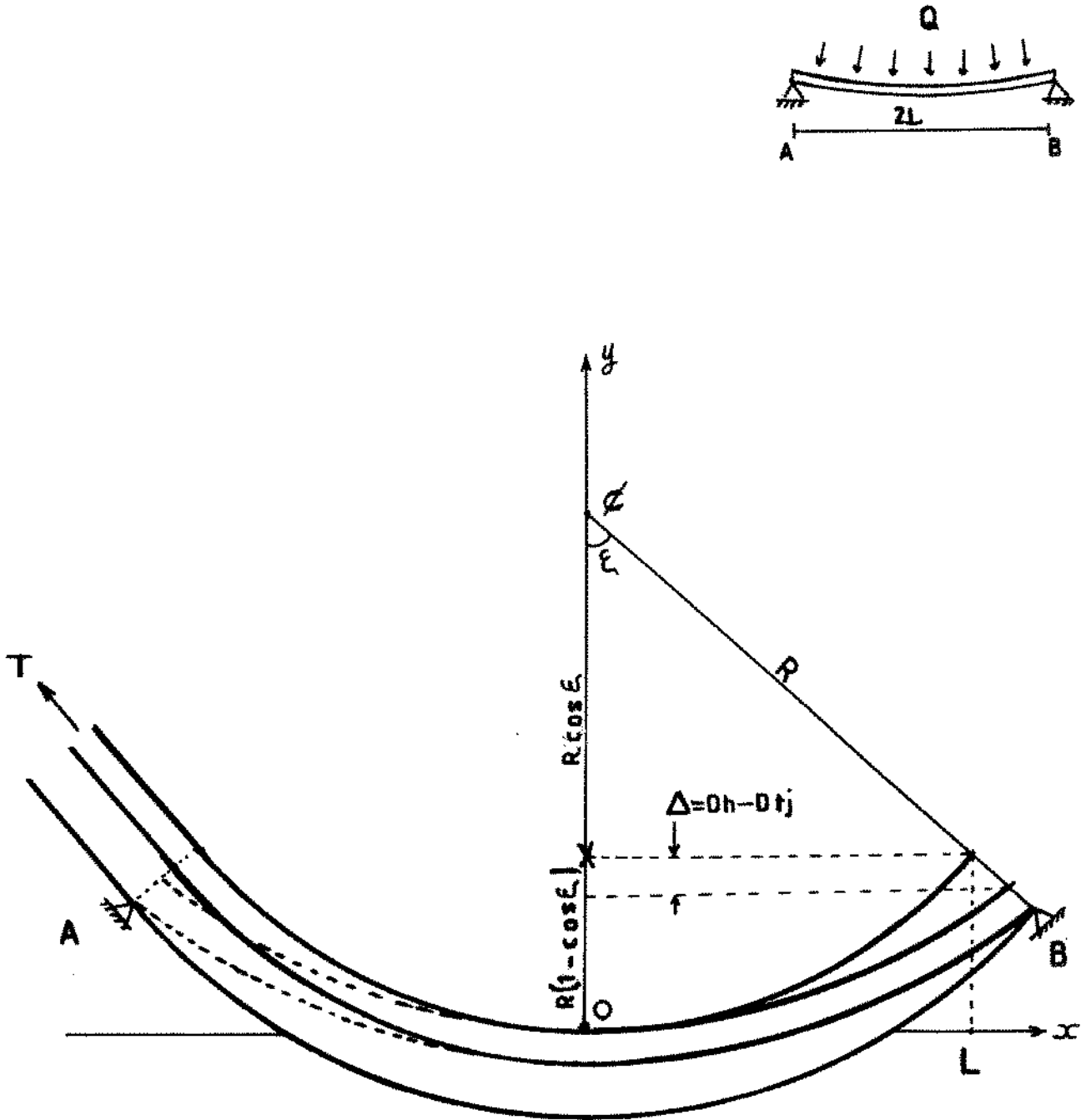


FIG. 10 COLUNA BI-APOIADA SUJEITA À CURVATURA DO POÇO

$$y(0) = y''(L) = y''(-L) = 0 \quad \text{e} \quad y(L) = y(-L)$$

Integrando a eq. (21) e aplicando as condições de contorno, resulta :

$$y(x) = \frac{Q}{E.I.} \cdot \left( \frac{x^4}{24} - \frac{L^2 \cdot x^2}{4} \right) \quad (23)$$

O momento máximo da viga Bi-apoiada ocorre para  $x = 0$

$$M = E.I. \cdot \frac{d^2 y(x)}{dx^2} \Big|_{x=0} = \frac{Q \cdot L^2}{2} \quad (24)$$

E o momento geométrico para  $x = 0$ ,

$$M = E.I / R \quad (25)$$

Igualando as eqs. (24) e (25), tem-se :

$$\frac{Q \cdot L^2}{2} = \frac{E.I}{R} \quad \therefore \quad Q = \frac{2 \cdot E.I}{R \cdot L^2} \quad (26)$$

A máxima deflexão da viga ocorre para  $x = L$ , substituindo na eq.(23), tem-se :

$$y_{\max} = \frac{5 \cdot QL^4}{24 \cdot E.I} \quad (27)$$

Substituindo eq.(26) na eq.(27), tem-se :

$$y_{\max} = \frac{5.L^2}{12.R} \quad (28)$$

Corrigindo os deslocamentos da coluna e da trajetória do poço no ponto B, tem-se :

$$\Delta = (Dh - D_{tj}) = y_{\max, \text{poço}} - y_{\max, \text{col.}} \quad (29)$$

$$\Delta = R(1 - \cos(L/R)) - 5.L^2/12.R \quad (30)$$

Explicitando L na eq.(30) e sabendo-se que ,  
 $2.R(1 - \cos(L/R)) / L^2 \cong 1/R = C$  , tem-se :

$$\boxed{L = \sqrt{12.R.(Dh - D_{tj})}} \quad \text{ou} \quad \boxed{L = \sqrt{R.(Dh - D_{tj})}} \quad (31)$$

(unidades de campo)

Substituindo L da eq.(31) na eq.(20),

$$\boxed{F = -q + T.C + \frac{E.I}{6.(Dh - D_{tj}).R^2}} \quad (32)$$

Portanto, a contribuição da rigidez de coluna sobre os esforços normais que a coluna exerce sobre as paredes do poço na parte final da coluna , fica :

$$\boxed{P = \frac{E.I}{6.(Dh - D_{tj}).R^2}} \quad \boxed{P = \frac{E.I}{72.(Dh - D_{tj}).R^2}} \quad (33)$$

(unidades de campo)

R pode ser obtido nas eqs.(8) e (12)

## b) INTERVALOS SUPERIORES

Como a trajetória do poço é definida em função de cada registro direcional em que são definidos um raio de curvatura para cada um dos intervalos entre 2 registros direcionais consecutivos, ocorre uma descontinuidade de momentos na interface desses 2 intervalos conforme ilustra a fig. 9.C

Para compatibilizar esta descontinuidade, é adotado para o momento atuante na interface como sendo a média dos momentos devido aos raios de curvaturas do intervalo anterior e posterior, ou seja, para o intervalo  $\overline{AB}$  da fig. 9.C,

$$M(x = B) = \frac{E.I.}{2} \left[ \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=B^+ (R=R_0)} + \frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_{x=B^- (R=R)} \right] \quad (34)$$

Substituindo eq.(34) na eq.(18),

$$\frac{E.I}{R} + Ty - \int_0^L (q + F).dx.(L - x) = \frac{E.I}{2} \left[ \frac{1}{R} + \frac{1}{R_0} \right] \quad (35)$$

Integrando a eq.(35) de 0 a L e substituindo o deslocamento y por  $y(L) = R(1 - \cos\xi) = R(1 - \cos(L/R))$ ,

$$F = -q + \frac{E.I}{L^2} [C - C_0] + \frac{2.T.R.(1 - \cos(L/R))}{L^2} \quad (36)$$

Como :  $2.R(1 - \cos (L/R)) / L^2 \cong 1/R = C$  , tem-se :

$$F = -q + T.C + E.I.( C - C_0 ) / L^2 \quad (37)$$

Substituindo L da eq.(31) na eq.(37),

$$F = -q + T.C + \frac{E.I}{12.(Dh - D_{tj}).R} \left[ \frac{Ro - R}{R.Ro} \right] \quad (38)$$

Portanto, a contribuição da rigidez de coluna sobre os esforços normais que a coluna exerce sobre as paredes do poço nos intervalos superiores, fica :

$$P = \frac{E.I}{6.(Dh - D_{tj}).R^2} \left[ \frac{|Ro - R|}{2.Ro} \right]$$

ou

(39)

$$P = \frac{E.I}{72.(Dh - D_{tj}).R^2} \left[ \frac{|Ro - R|}{2.Ro} \right]$$

(unidades de campo)

$$\text{Se : } Ro \rightarrow \infty \quad P \rightarrow \frac{E.I}{12(Dh - D_{tj})R^2} \quad \text{ou} \quad \frac{E.I}{144(Dh - D_{tj})R^2}$$

(unid.de campo)

$$\text{Se : } R \rightarrow \infty \quad P \rightarrow 0$$

Como a rigidez de coluna dificulta o movimento da coluna no poço, é adotado o valor absoluto na eq. (39).

R é o raio de curvatura do intervalo em questão e  $R_0$  é o raio de curvatura do intervalo anterior (inferior). R e  $R_0$  podem ser obtidos nas eqs. (8) e (12).

Adicionando a influência da rigidez de coluna P eqs.(33) e (39) na eq. (13), tem-se:

$$\frac{dT}{dS} = Wf. ( Az.\text{sen}(S.\beta/S1) + Vz.\text{cos}(S.\beta/S1) )^{\pm} \\ \mu. \left[ ( Wf.(Ay.Vx - Ax.Vy) )^2 + ( P + |T.\beta/S1|^{\pm} \right. \\ \left. | Wf.(Az.\text{cos}(S.\beta/S1) - Vz.\text{sen}(S.\beta/S1)) | )^2 \right]^{0.5} \quad (40)$$

E a eq.(15) para  $\beta = 0$  permanece inalterada.

### 3.2.1.3 CONTRIBUIÇÃO DO ATRITO HIDRODINÂMICO

Para o cálculo do atrito hidrodinâmico é adotado o modelo reológico de POTÊNCIA (POWER - LAW).

$$\tau = K_p \cdot \dot{\gamma}^n = K_p \cdot (dv_f/dy)^n \quad (41)$$

Baseado nos conceitos de Pistoneio ou de Sobrepressão, são calculadas as perdas de pressão no anular e interior da coluna (se houver comunicação com o anular) devido ao fluxo de fluido causado pelo movimento axial da coluna dentro do poço.

São assumidas as seguintes hipóteses:

- a) Poço inexpandível
- b) Anular poço x coluna concêntrico
- c) Fluido incompressível
- d) Viscosidade do fluido constante com a variação de pressão e temperatura
- e) Manobras sem circulação com as bombas de lama, porém, anular e interior da coluna sempre cheios de fluido.
- f) A razão  $OD / Dh \geq 0.3$  para aproximação do anular como placas paralelas no cálculo de perdas de pressão (SLOT)

A determinação dos parâmetros do fluido  $n$  e  $K_p$  a partir de testes de fluido com viscosímetros rotatórios encontra-se no

apêndice C (43). Para testes com mais de 2 leituras no viscosímetro,  $n$  e  $K_p$  podem ser determinados através de uma regressão linear pelo método de mínimos quadrados de  $\tau_b$  e  $\dot{\gamma}$ .

O atrito hidrodinâmico para o interior da coluna pode ser representado por uma única expressão em função das perdas de pressão. As perdas de pressão são calculadas em função do regime de fluxo laminar ou turbulento (43) :

$$F_{vp} = \frac{\pi}{4} \cdot ID^2 \cdot (dP_p / dS) \quad (42)$$

No anular poço/coluna, o atrito hidrodinâmico é causado pela tensão de cisalhamento do fluido agindo nas paredes externas da coluna.

$$F_{va} \cdot S = 2 \cdot \pi \cdot (OD/2) \cdot S \cdot \tau_{wa}$$

$$F_{va} = \pi \cdot OD \cdot \tau_{wa} \quad \text{ou} \quad F_{va} = 12 \cdot \pi \cdot OD \cdot \tau_{wa} \quad (43)$$

(unidades de campo)

O roteiro para o cálculo de  $dP_p/dS$  e  $\tau_{wa}$  para cada seção diferente do anular e interior da coluna encontra-se no apêndice D .

Portanto, a contribuição total do atrito hidrodinâmico é a soma das contribuições do atrito nas paredes internas e externas da coluna.

$$F_{vt} = F_{vp} + F_{va} \quad (44)$$



Somando esta influência  $F_{vt}$  (eq. 44) na composição axial das eqs. (15) e (40), tem-se finalmente as seguintes equações definitivas para o cálculo de arraste :

a)  $0 < \beta \leq \Pi/2$  :

$$\frac{dT}{dS} = Wf. ( Az.\text{sen}(S.\beta/S1) + Vz.\text{cos}(S.\beta/S1) ) \pm F_{vt} \pm \mu. \left[ ( Wf.(Ay.Vx - Ax.Vy) )^2 + ( P + |T.\beta/S1 \pm | Wf.(Az.\text{cos}(S.\beta/S1) - Vz.\text{sen}(S.\beta/S1)) | )^2 \right]^{0.5}$$

(45)

b)  $\beta = 0$  :

$$\Delta T = S1. ( Wf. \text{cos}(\alpha_0) \pm F_{vt} \pm \mu.Wf. \text{sen}(\alpha_0) ) \quad (46)$$

Nos 2 primeiros símbolos de  $\pm$  nas eqs. (45) e (46), o sinal positivo é atribuído para movimentos ascendentes e o negativo para movimentos descendentes.

O sinal positivo dentro da raiz quadrada da eq. (45) é atribuído em regiões de diminuição de inclinação do poço "Drop-Off" e o sinal negativo para regiões de crescimento de inclinação "Build-Up".

### 3.2.2 CÁLCULO DE TORQUE

Com a velocidade axial da coluna nula, o cálculo de torque independe do atrito hidrodinâmico.

O torque na coluna é definida por :

$$dTQ = \mu \cdot R_{tj} \cdot N(dS) \quad (47)$$

As expressões para o torque são obtidas diretamente a partir das forças normais resultantes das eqs.(15) e (40).

a)  $0 < \beta \leq \Pi/2$  :

$$\frac{dTQ}{dS} = \frac{\mu}{12} R_{tj} \left[ ( Wf.(Ay.Vx - Ax.Vy) )^2 + ( P + |T.\beta/S1|^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. | Wf.(Az.\cos(S.\beta/S1) - Vz.\sen(S.\beta/S1)) |^2 \right]^{0.5} \\ \text{(unidades de campo)} \quad (48)$$

Na eq. (48), o torque é função também de T e que varia com a profundidade. Portanto, para o cálculo de torque é necessário o cálculo da tração em função da profundidade, porém sem considerar o atrito mecânico e o hidrodinâmico. A solução é obtida pelo método de Runge Kutta de 4ª. ordem.

$$\Delta TQ = - \int_B^A d TQ \quad e \quad TQS = \sum \Delta TQ$$

b)  $\beta = 0$  :

$$\Delta TQ = \mu \cdot (R_{t_j} / 12) \cdot Wf \cdot S1 \cdot \text{sen}(\alpha_0)$$

(unidades de campo)

(49)

$$TQS = \sum \Delta TQ$$

## 4 PROGRAMA DE COMPUTADOR "D.P.D."

### 4.1 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

Os principais objetivos do programa são os de calcular os fatores de atrito tanto para o torque como para descidas ou retiradas de colunas se fornecidos os torques e pesos no gancho ou, se fornecido o fator de atrito, o programa calcula as trações e torques a partir da extremidade da coluna até a superfície.

O programa de computador "D.P.D." elaborado em linguagem FORTRAN 77 foi desenvolvido para utilização em microcomputadores PC . O diagrama de blocos do programa encontra-se no Anexo 1.

O programa consiste de :

A) PROGRAMA PRINCIPAL

B) SUBROTINAS :LEITURA, NKLAMA, DIREC, GEOMET, MATAA, PERDA, FRICCAO, FLAMA, RIGDZ, MIZERO, TRACAO, TORQUE, TRAC2 e TORQ2.

A) PROGRAMA PRINCIPAL

No programa principal, são definidas as opções de entrada e saída do programa e também são feitas as leituras de dados de entrada e impressão e armazenamento em arquivos dos dados de entrada e dos resultados. O controle das convergências das diversas rotinas usadas no programa e a determinação do intervalo ótimo de integração numérica são também executados no

programa principal.

No processo de convergência, são admitidos erros máximos de 445 N [100 lbf] para peso no gancho e de 68 N.m [50 lbf.pé] para torque na superfície. O máximo intervalo de integração numérica é de 15 m [50 pés].

No programa, pode-se estabelecer um valor padrão para o fator de atrito que será usado a partir da superfície até uma certa profundidade definida pelo usuário e um outro valor correspondente ao intervalo restante é então calculado em função do torque e/ou peso no gancho medidos na superfície. Se o fator de atrito correspondente à toda extensão da coluna resultar inferior ao valor padrão, o menor valor é adotado.

A execução do programa inicia-se com a leitura da geometria do poço e das características e composição da coluna, seja através da digitação destes dados em formato livre e que neste caso, os dados são armazenados em um arquivo de nome designado pelo usuário, ou a partir do acesso de um arquivo já existente.

Para maior facilidade, o programa permite a critério do usuário, a consulta de um arquivo contendo as características de revestimentos, comandos e tubos de perfuração, baseados na Norma API-RP-7G (51), comumente utilizados nas operações de perfuração. Estas características incluem : diâmetros internos e externos das tubulações e das conexões, peso nominal e peso médio com as conexões e tipos de conexões.

A seguir, o programa solicita a definição das seguintes opções :

## BLOCO I

- a) Descida ou retirada de coluna com broca
- b) Descida ou retirada de coluna com extremidade aberta
- c) Descida ou retirada de coluna com extremidade fechada
- d) Descida ou retirada de revestimento

## BLOCO II

- a) Dados o índice de potência e de consistência do fluido
- b) Dados o limite de escoamento e a viscosidade plástica
- c) Dadas 2 ou mais leituras de testes do fluido no reômetro

## BLOCO III

- a) Dado fator de atrito, calcular a tração e torque resultantes na superfície para diversas profundidades da extremidade da coluna.
- b) Dados os torques e/ou pesos no gancho, calcular o fator de atrito aparente do poço.
- c) Dado fator de atrito, calcular o arraste e torque na coluna em função da profundidade para uma dada profundidade da extremidade da coluna.

## BLOCO IV

- a) Efeito hidrodinâmico desprezado
- b) Efeito da rigidez de coluna desprezado
- c) Efeitos hidrodinâmico e de rigidez de coluna desprezados
- d) Efeitos da rigidez de coluna e hidrodinâmico considerados

Após a definição da opção no Bloco II, devem ser

fornecidos o peso e parâmetros do fluido e também a quantidade e diâmetros dos jatos da broca caso a opção a) no Bloco I tenha sido escolhida.

A sequência de "chamadas" das subrotinas é basicamente a mesma adotada na descrição das subrotinas abaixo.

## B) SUBROTINAS

### B.1) LEITURA

Faz a leitura da geometria do poço e das características e composição da coluna armazenados em um arquivo.

### B.2) NKLAMA

Faz a leitura da reologia do fluido, convertendo se necessário, para parâmetros do fluido modelo de potência.

### B.3) DIREC

Faz a conversão da direção do poço de cada registro direcional da forma comumente registrada no campo para o azimute com relação ao norte geográfico e determina também a trajetória do poço pelo método de mínima curvatura.

### B.4) GEOMET

Esta subrotina correlaciona as geometrias do poço, coluna e conexões em função de cada profundidade que houver alguma alteração na dimensão da geometria do poço ou coluna.

## B.5) MATAA

Nesta subrotina são feitas as interpolações entre dois registros direcionais nas profundidades de mudanças de geometria da coluna ou do poço. É formada a matriz geral AA contendo para cada registro direcional ou profundidade interpolada, os seguintes parâmetros que são ou serão armazenados na matriz :

- 1 Profundidade medida- MD
- 2 Arraste hidrodinâmico por unidade de comprimento -Fvt
- 3 Dog leg -  $\beta$
- 4 Componente Vx
- 5 Componente Vy
- 6 Componente Vz
- 7 Comprimento entre 2 registros direcionais - S1
- 8 Componente Ax
- 9 Componente Ay
- 10 Componente Az
- 11 Diâmetro do poço - Dh
- 12 Diâmetro externo da coluna - OD
- 13 Diâmetro interno da coluna - ID
- 14 Diâmetro externo da conexão -Dtj
- 15 Peso unitário flutuado da coluna - Wf
- 16 Comprimento de cada junta da coluna
- 17 Módulo de elasticidade da coluna - E
- 18 Raio de curvatura do poço - R
- 19 Contribuição da rigidez de coluna - P
- 20 Comprimento da influência da rigidez de coluna - L



**B.6) PERDA**

Esta subrotina calcula as perdas de pressão de cada seção diferente do anular e interior da coluna.

Os resultados são usados para o cálculo do atrito hidrodinâmico.

**B.7) FRICCAO**

Determina o fator de fricção hidráulico para o regime de fluxo turbulento em função do número de Reynolds e índice de potência do fluido Modelo de Potência.

**B.8) FLAMA**

Calcula o atrito hidrodinâmico de cada seção diferente do anular ou do interior da coluna.

**B.9) RIGDZ**

Calcula a influência da rigidez de coluna para cada intervalo de registro direcional ou profundidade interpolada.

**B.10) MIZERO**

Nas operações de rotação de coluna e sem movimento axial, esta subrotina calcula o peso no gancho através da integração analítica para cada intervalo de registro direcional ou profundidade interpolada. Os resultados de cada integração são somados a partir da extremidade da coluna até a superfície.

**B.11) TRACAO**

Dado o fator de atrito, determina a tração resultante na

superfície através da integração numérica pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem para cada intervalo de registro direcional ou profundidade interpolada e efetua o somatório destas integrações a partir da extremidade da coluna até a superfície.

#### B.12) TORQUE

Adota o mesmo procedimento que a subrotina TRACAO. Calcula porém, o torque resultante na superfície.

#### B.13) TRAC2 e TORQ2

Ambas as subrotinas são semelhantes às subrotinas TRACAO e TORQUE, adotam no entanto 2 valores para o fator de atrito.

## 4.2 UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA

Para a utilização do programa "D.P.D." são necessários os seguintes dados :

- a) Arquivo de registros direcionais
- b) Arquivo de características de revestimentos, comandos e tubos de perfuração (opcional). Este arquivo já existe disponível com o nome de REDPDC.DAT .
- c) Geometria do poço (diâmetros e profundidades)
- d) Características e composição da coluna (diâmetros internos e externos da tubulação e da conexão; peso médio unitário com a conexão; comprimento médio de cada junta diferente que compõem a coluna; quantidade, módulo de elasticidade e massa específica de cada tipo diferente do coluna.
- e) Peso e propriedades do fluido de perfuração
- f) Quantidade e diâmetros dos jatos da broca (se for o caso)
- g) velocidade de manobra
- h) Fator de atrito se a opção para a estimativa de torque e/ou tração for escolhida
- i) Medições de campo se a opção para o cálculo do fator de atrito aparente do poço for escolhida. Os dados de medições incluem :profundidade medida, torque e/ou peso no gancho e modo de manobra (descendo ou retirando coluna).

As unidades de todos os dados de entrada do programa são especificadas toda vez que é solicitada a digitação do valor do dado e também são identificadas as unidades de todos os dados

de saída do programa.

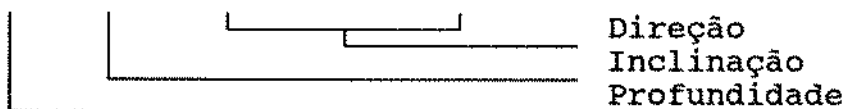
A denominação de todos os arquivos de entrada e de saída devem ter extensão do tipo XXXXXX.DAT , onde XXXXXX é o nome do arquivo já existente ou criado durante a utilização do programa.

O arquivo de registros direcionais deve conter em ordem crescente de profundidade, os seguintes dados:

- a) Profundidade medida em (pés)
- b) Inclinação do poço em (graus)
- c) Direção do poço em (graus) nas seguintes formas, a título de exemplos: N 10 E, N 20 W , S 10 E, S 20 W , etc.

O formato destes dados em linguagem Fortran, deve ser:

F9.2,F6.2,6X,A1,F6.2,1X,A1



Para cada diâmetro diferente do poço, devem ser fornecidos a partir do fundo do poço, o diâmetro e a máxima profundidade correspondente, sendo que o último dado de diâmetro deve corresponder à profundidade zero.

Quanto à composição da coluna, os dados devem ser fornecidos a partir da extremidade da coluna e sempre que

corresponder à última ou única seção diferente de coluna, deve-se registrar como quantidade de juntas igual a zero, que servirá como indicador de final de dados da composição da coluna.

Para comandos de perfuração, o diâmetro da conexão é o mesmo diâmetro nominal do comando. No caso do tubo de perfuração, deve-se adotar o peso médio unitário em que inclui o peso da conexão. Para colunas de aço, o módulo de elasticidade é de aproximadamente  $0,2068427 \text{ GPa}$  [ $30 \cdot 10^6 \text{ lbf/pol}^2$ ] com massa específica de  $7850 \text{ kg/m}^3$  [ $65,4 \text{ lbm/gal}$ ].

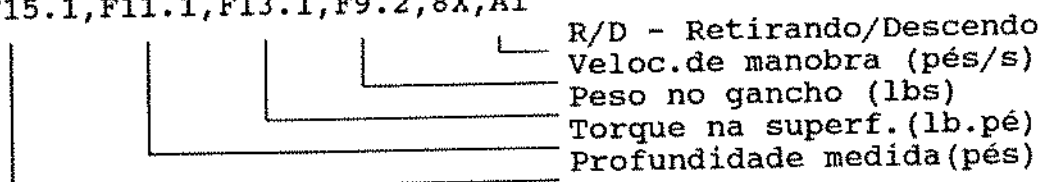
A mínima velocidade de manobra admissível para o programa é de  $0.03 \text{ m/s}$  [ $0,1 \text{ pé/s}$ ] se a opção de se considerar o atrito hidrodinâmico for escolhida.

Quando a opção para a estimativa de torque e/ou peso no gancho é escolhida, isto é, o fator de atrito é fornecido, o "INTERVALO ENTRE 2 PONTOS (MD, T, TQ)" que o programa solicita, significa o espaçamento em profundidade medida da extremidade da coluna em que serão estimados os torques e pesos no gancho para cada uma dessas profundidades. Assim, obtém-se um perfil de torque e peso no gancho em função da profundidade medida da extremidade da coluna.

Para o cálculo do fator de atrito aparente do poço, os dados de profundidade, torque e/ou tração na superfície podem ser fornecidos via digitação na "tela" e que neste caso, os dados são armazenados em um arquivo, ou a partir do acesso de um arquivo contendo estes dados.

O formato destes dados em linguagem Fortran, deve ser :

F15.1, F11.1, F13.1, F9.2, 8X, A1



Inserir o valor zero caso não se dispõe de algum dado no formato acima.

Exceto para a trajetória do poço, cujos resultados são armazenados no arquivo TRAJ.DAT, todos os resultados incluindo os dados de entrada são listados em tela e armazenados em arquivos para posterior obtenção dos gráficos para melhor avaliação dos resultados.

Os principais resultados, são :

- a) Estimativas de torque e peso no gancho para diversas profundidades da extremidade da coluna, ou torque e arraste em função da profundidade para uma dada profundidade da extremidade da coluna. Tração ou peso no gancho são calculados para 3 situações :
  - o Retirando coluna
  - o Descendo coluna
  - o Girando a coluna e sem movimento axial
  
- b) Fatores de atrito aparente do poço em função de cada profundidade com dados de torque e/ou peso no gancho.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 AVALIAÇÃO DO MODELO COM OS DADOS DE CAMPO

Quatro poços direcionais foram considerados. Tres poços marítimos localizados na Costa do Golfo, Louisiana-EUA e citados na ref. (3) e um poço horizontal terrestre localizado no estado do Ceará - Brasil e citado na ref. (19) .

Os poços foram perfurados utilizando fluido base água.

Neste trabalho, são considerados as medições de peso no gancho durante a perfuração destes 4 poços e que constam nas refs. (3) e (19) . Nenhuma medição de torque nestes poços é disponível.

#### 5.1.1 DESCRIÇÃO DOS POÇOS

POÇO 1, do tipo S, foi perfurado até 3435 m [11270 pés] e com máxima inclinação de 0.684 rd [39.2 graus] à profundidade medida de 1534 m [5032 pés] . A taxa média de crescimento de inclinação foi de 0.00126 rd/m [2.2 graus/100 pés]. Com K.O.P. em torno de 457 m [1500 pés], final de Build-up a 1509 m [ 4950 pés] e início de Drop-off em torno de 2621 m [8600 pés]. A profundidade vertical final foi de 3050 m [10006 pés] com afastamento horizontal de 1318 m [4326 pés].

A projeção vertical da trajetória do poço e o perfil de Dog-Leg Severity, encontram-se nas figs. 11 e 12. Peso e parâmetros do fluido, composição da coluna e dados de medições

encontram-se nas tabelas 4, 5 e 6.

POÇO 2, do tipo Build and Hold, foi perfurado até 3517 m [11538 pés] e com máxima inclinação de 0.285 rd [16.35 graus] à profundidade medida de 3108 m [10200 pés]. A taxa média de crescimento de inclinação foi de 0.000286 rd/m [0.5 graus/100 pés] . Com K.O.P. em torno de 1158 m [3800 pés] e final de Build-up em torno de 2347 m [7700 pés]. A profundidade vertical final foi de 3460 m [11354 pés] com afastamento horizontal de 515 m [1690 pés].

A projeção vertical da trajetória do poço e o perfil de Dog-Leg Severity, encontram-se nas figs. 13 e 14. Peso e parâmetros do fluido, composição da coluna e dados de medições encontram-se na tabela 7.

POÇO 3, do tipo Build and Hold, foi perfurado até 2733 m [8967 pés] e com máxima inclinação de 0.912 rd [52.25 graus] à profundidade medida de 2076 m [6810 pés]. A taxa média de crescimento de inclinação foi de 0.0016 rd/m [2.8 graus/100pés] Com K.O.P. em torno de 518 m [1700 pés] e final de Build-up em torno de 1006 m [3300 pés]. A profundidade vertical final foi de 2118 m [6950 pés] com afastamento horizontal de 1488 m [4881 pés].

A projeção vertical da trajetória do poço e o perfil de Dog-Leg Severity encontram-se nas figs. 15 e 16. Peso e parâmetros do fluido, composição da coluna e dados de medições encontram-se na tabela 8.



POÇO 4, horizontal, foi perfurado até 1128 m [3701 pés]. A taxa média de crescimento de inclinação foi de 0.00317 rd/m [5.54 graus/100 pés]. Com K.O.P. a 68 m [223 pés] e final de Build-up em torno de 564 m [1850 pés]. A profundidade vertical final foi de 564 m [1253 pés], afastamento horizontal de 885 m [2904 pés] e com extensão horizontal de 553 m [1814 pés].

A projeção vertical da trajetória do poço e o perfil de Dog-Leg Severity encontram-se nas figs. 17 e 18. Peso e parâmetros do fluido, composição da coluna e dados de medições encontram-se na tabela 9.

FIG. 11: POÇO 1 – TRAJETÓRIA DO POÇO  
 Projção Vertical

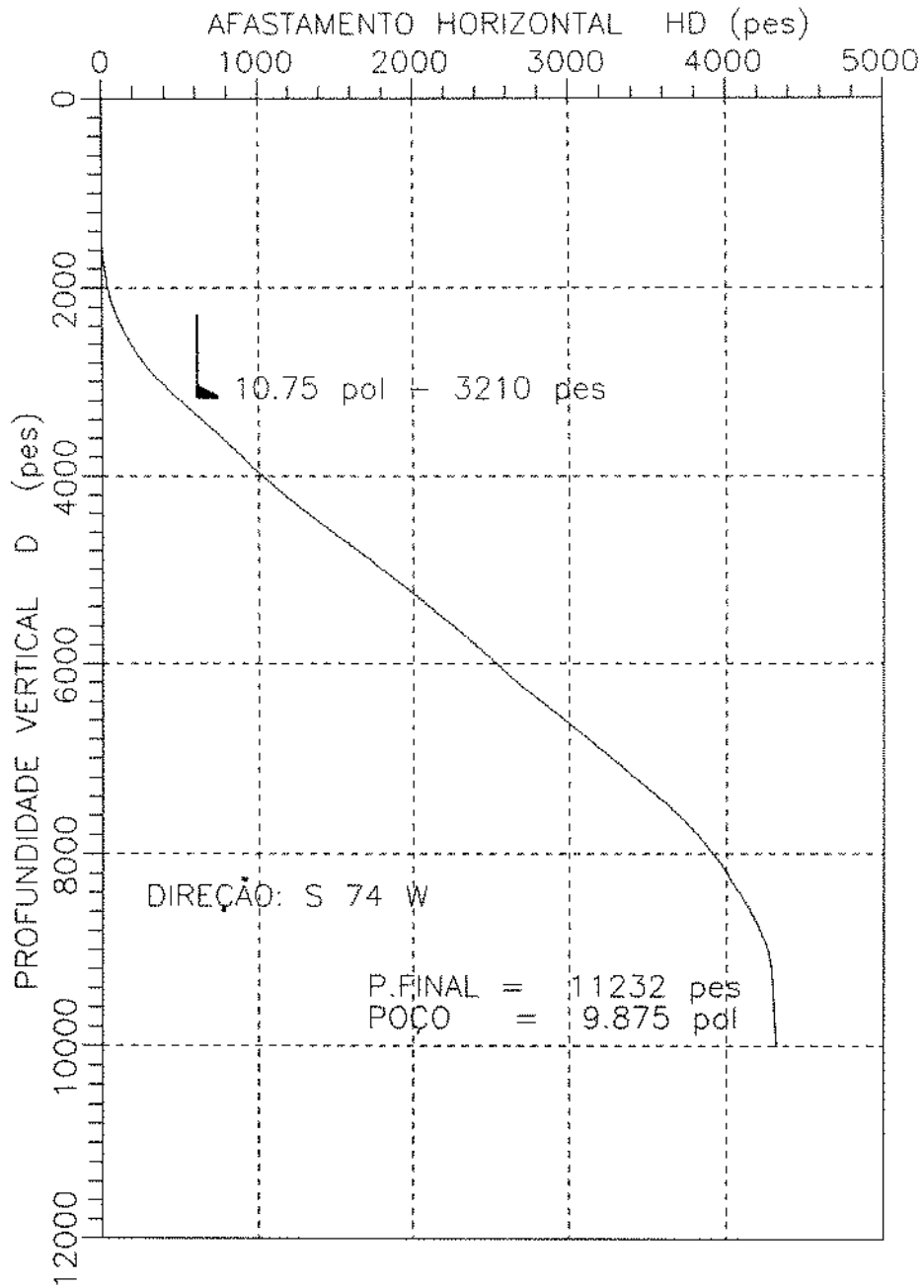
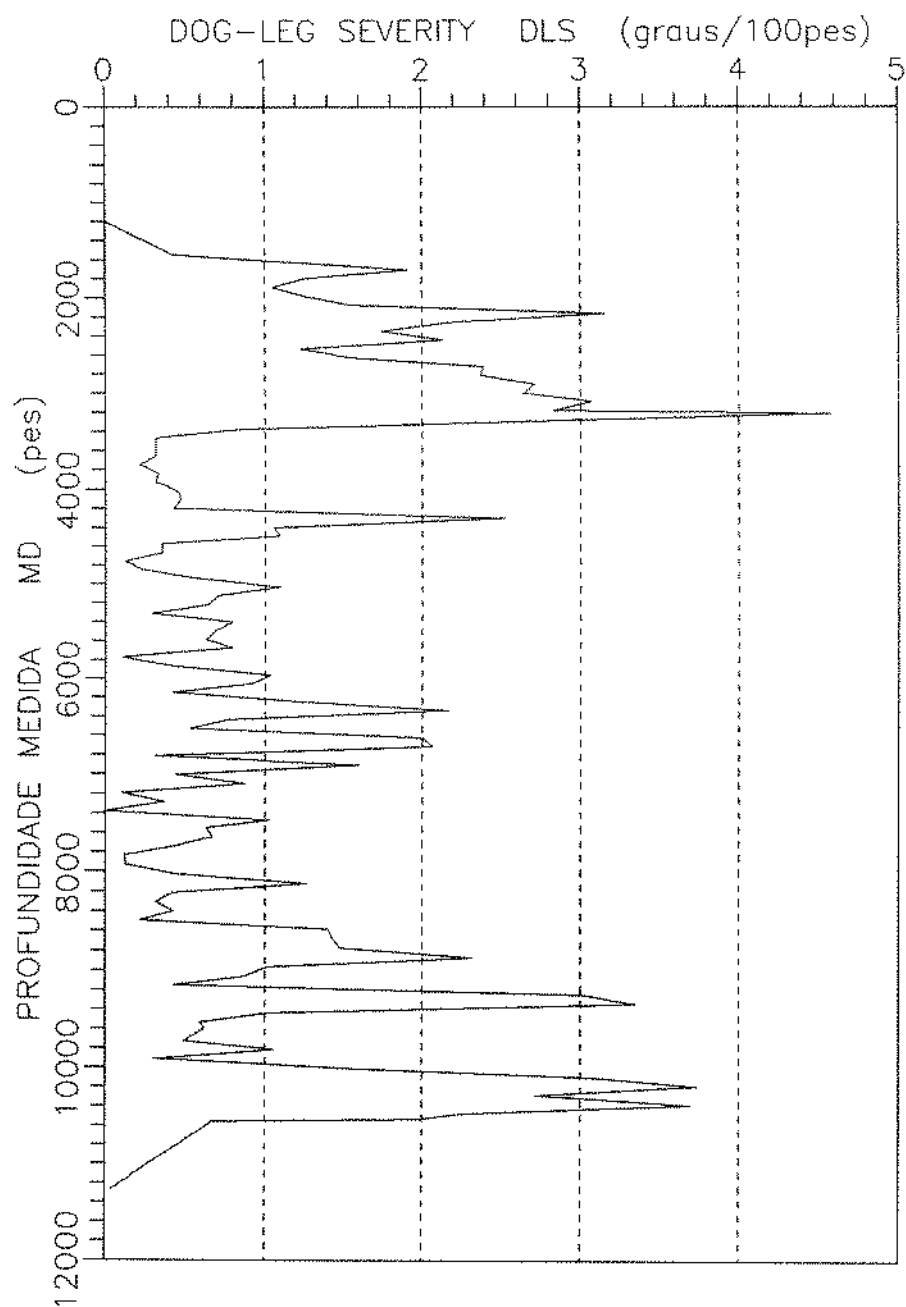


FIG. 12: POÇO 1 - DOG-LEG SEVERITY



## TABELA 4

## POÇO 1 : FATORES DE ATRITO CALCULADOS- DESCIDA DE REVESTIMENTO

DADOS : Peso do fluido : 10.80 lbm/gal  
 Índice de consistência do fluido : 124.9 eq.CP  
 Índice de potência do fluido : 0.781  
 Diâmetro da broca : 9.875 pol  
 Último revestimento: Diâmetro : 10.750 pol  
                           Sapata : 3210 pés

Composição da coluna de revestimento :

PROFUNDIDADE (pés)	OD (pol)	ID (pol)	PESO NOMINAL (lb/pé)	OBS
5390	7.625	6.875	29.7	REV
10267	7.625	6.640	33.7	REV
11232	7.625	6.500	39.0	REV

## MEDIÇÕES E RESULTADOS :

MD (pés)	TG (lbf)	VC (pés/s)	MODO	FATORES DE ATRITO CALCULADOS			
				EI= 0 FV= 0	EI≠ 0 FV= 0	EI= 0 FV≠ 0	EI≠ 0 FV≠ 0
4579	108800	1.7	D	0.354	0.348	0.305	0.300
4619	109000	2.0	D	0.364	0.358	0.308	0.303
4659	108400	2.0	D	0.394	0.388	0.339	0.334
4699	114000	0.5	D	0.265	0.260	0.249	0.245
4897	113100	2.1	D	0.355	0.350	0.303	0.299
4897	144100	1.0	R	0.222	0.219	0.214	0.212
5135	113500	2.0	D	0.412	0.407	0.364	0.359
5175	114000	1.5	D	0.411	0.406	0.374	0.370
5294	114200	2.0	D	0.437	0.432	0.390	0.385
5371	115100	2.0	D	0.436	0.431	0.390	0.385
5407	113900	2.0	D	0.469	0.464	0.423	0.418
5605	115300	2.0	D	0.483	0.478	0.438	0.433
5882	128400	0.1	D	0.306	0.302	0.303	0.299
5924	130000	0.1	D	0.289	0.286	0.286	0.283
5924	174900	0.7	R	0.223	0.221	0.219	0.217
5924	127000	0.5	D	0.334	0.330	0.322	0.319
5964	125900	2.0	D	0.356	0.353	0.318	0.315
6385	133800	0.5	D	0.308	0.305	0.298	0.295
6912	135800	0.6	D	0.354	0.351	0.342	0.339
7079	134100	2.2	D	0.393	0.389	0.357	0.353
7157	136800	0.7	D	0.370	0.367	0.357	0.353

R - Retirando coluna

D - Descendo coluna

EI- Contribuição da rigidez de coluna

FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico

TABELA 5

## POÇO 1 : FATORES DE ATRITO CALCULADOS- COLUNA DE PERFURAÇÃO

DADOS : Peso do fluido : 10.80 lbm/gal  
 Índice de consistência do fluido : 124.9 eq.CP  
 Índice de potência do fluido : 0.781  
 Diâmetro da broca : 9.875 pol  
 Último revestimento: Diâmetro : 10.750 pol  
 Sapata : 3210 pés

Composição da coluna de perfuração :

PROFUNDIDADE (pés)	OD (pol)	ID (pol)	PESO NOMINAL (lb/pé)	OBS
9646	5.000	4.276	21.4	DP
11166	5.000	3.000	49.3	HW
11270	7.000	2.813	110.0	DC

## MEDIÇÕES E RESULTADOS :

MD (pés)	TG (lbf)	VC (pés/s)	MODO	FATORES DE ATRITO CALCULADOS			
				EI= 0 FV= 0	EI≠ 0 FV= 0	EI= 0 FV≠ 0	EI≠ 0 FV≠ 0
11250	269000	4.0	R	0.165	0.165	0.157	0.156

R - Retirando coluna

D - Descendo coluna

EI- Contribuição da rigidez de coluna

FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico

TABELA 6

## POÇO 1 : FATORES DE ATRITO CALCULADOS- CABO DE PERFILAGEM

DADOS : Peso do fluido : 10.80 lbm/gal  
 Índice de consistência do fluido : 124.9 eq.CP  
 Índice de potência do fluido : 0.781  
 Diâmetro da broca : 9.875 pol  
 Último revestimento: Diâmetro : 10.750 pol  
 Sapata : 3210 pés

Composição da coluna (CABO) :

PROFUNDIDADE (pés)	OD (pol)	ID (pol)	PESO NOMINAL (lb/pé)	OBS
10600	0.500	0.000	0.35	CABO
10630	3.000	0.000	16.67	TESTEM.

## MEDIÇÕES E RESULTADOS :

MD (pés)	TG (lbf)	VC (pés/s)	MODO	FATORES DE ATRITO CALCULADOS			
				EI= 0 FV= 0	EI≠ 0 FV= 0	EI= 0 FV≠ 0	EI≠ 0 FV≠ 0
10070	4200	0.7	R	0.321	-	0.318	-
10200	4400	0.7	R	0.345	-	0.342	-
10260	2400	0.7	D	0.227	-	0.223	-
10260	4100	0.7	R	0.275	-	0.272	-
10270	2200	0.7	D	0.321	-	0.317	-
10270	4400	0.7	R	0.337	-	0.334	-
10350	4500	0.7	R	0.347	-	0.344	-

R - Retirando coluna

D - Descendo coluna

EI- Contribuição da rigidez de coluna

FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico

FIG. 13: POÇO 2 - TRAJETÓRIA DO POÇO  
Projeção Vertical

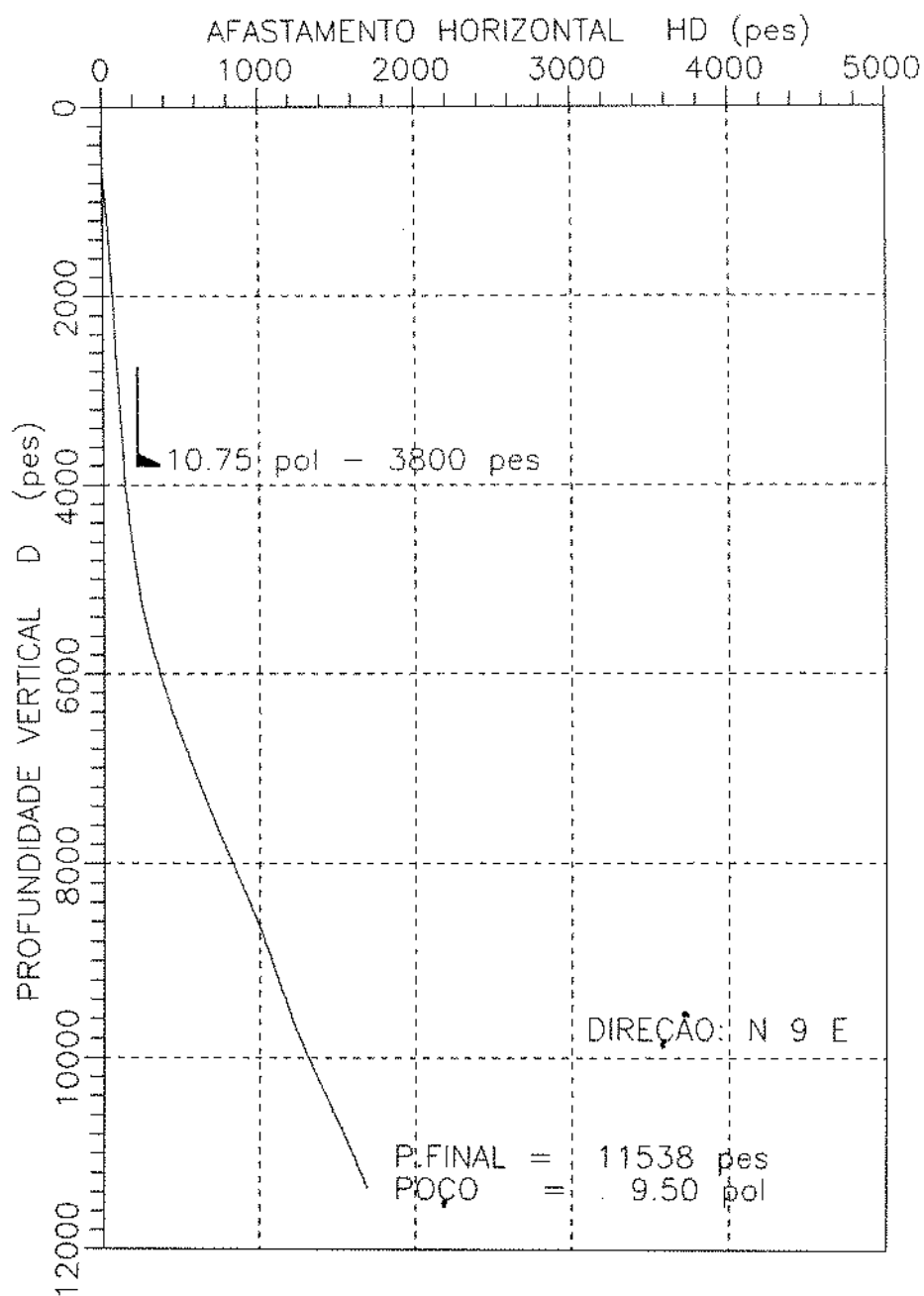


FIG. 14: POÇO 2 - DOG-LEG SEVERITY

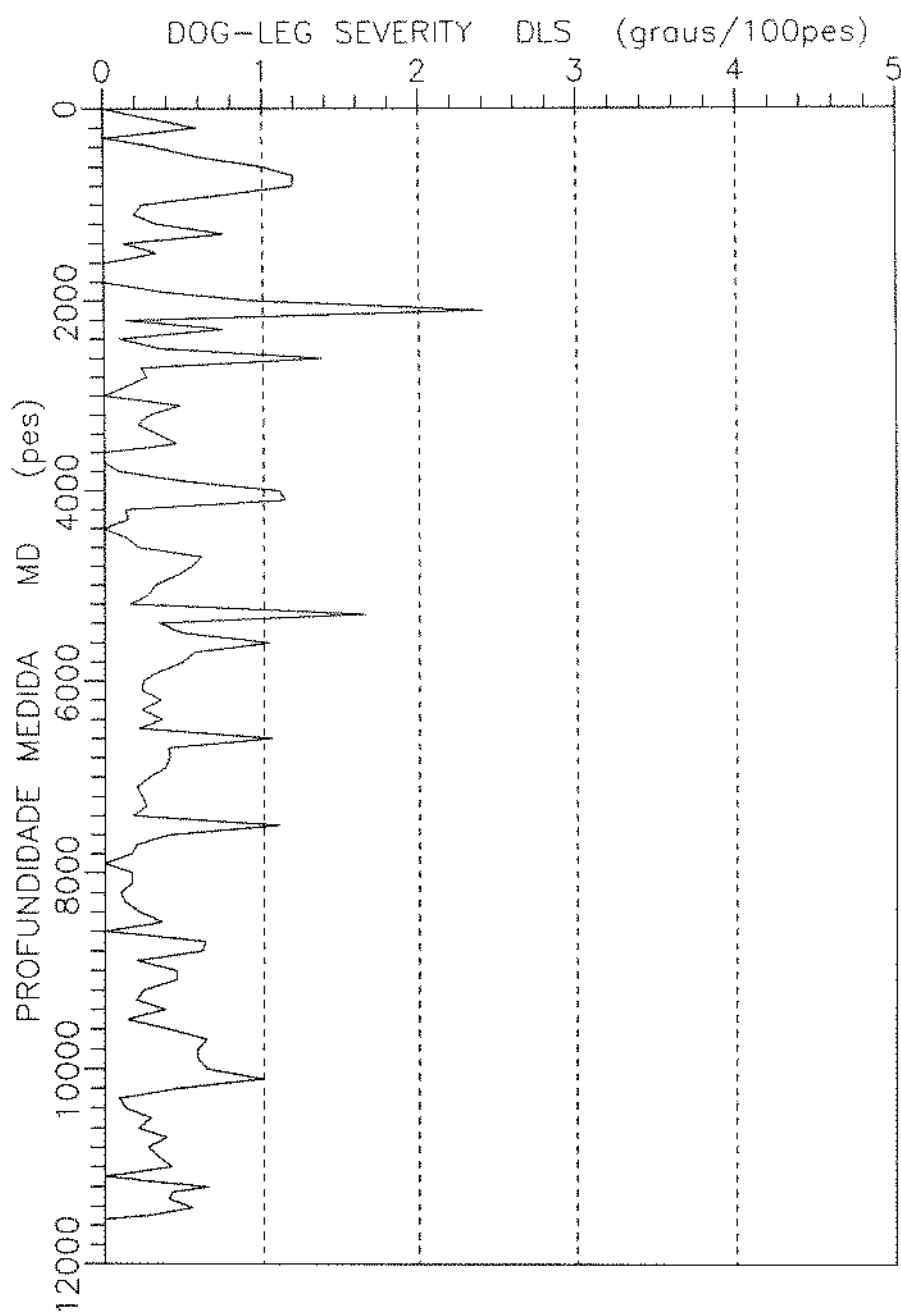




TABELA 7

## POÇO 2 : FATORES DE ATRITO CALCULADOS- DESCIDA DE REVESTIMENTO

DADOS : Peso do fluido : 9.30 lbm/gal  
 Índice de consistência do fluido : 125.7 eq.CP  
 Índice de potência do fluido : 0.688  
 Diâmetro da broca : 9.5 pol  
 Último revestimento: Diâmetro : 10.750 pol  
   Sapata : 3800 pés  
 Composição da coluna de revestimento :

PROFUNDIDADE (pés)	OD (pol)	ID (pol)	PESO NOMINAL (lb/pé)	OBS
11538	7.625	6.875	29.7	REV

## MEDIÇÕES E RESULTADOS :

MD (pés)	TG (lbf)	VC (pés/s)	MODO	FATORES DE ATRITO CALCULADOS			
				EI= 0 FV= 0	EI≠ 0 FV= 0	EI= 0 FV≠ 0	EI≠ 0 FV≠ 0
5922	132000	2.0	D	0.497	0.491	0.440	0.435
6004	135000	2.0	D	0.455	0.451	0.399	0.395
6174	137000	2.0	D	0.493	0.488	0.437	0.433
6257	140000	2.0	D	0.456	0.451	0.400	0.397
6300	139000	2.0	D	0.504	0.499	0.449	0.444
6717	148000	2.0	D	0.476	0.472	0.423	0.419
7093	154000	2.0	D	0.498	0.494	0.446	0.442
7799	166000	2.0	D	0.510	0.507	0.461	0.458
7927	174000	2.0	D	0.409	0.406	0.361	0.359
9400	192000	2.0	D	0.530	0.527	0.486	0.483
9400	277000	2.0	R	0.381	0.379	0.361	0.360
9442	192000	2.0	D	0.539	0.536	0.496	0.493
9656	192000	2.0	D	0.586	0.583	0.543	0.539
9741	195000	2.0	D	0.564	0.561	0.521	0.518
9741	294000	2.0	R	0.426	0.424	0.407	0.405
9828	192000	2.0	D	0.622	0.618	0.578	0.575
9911	192000	2.0	D	0.638	0.635	0.595	0.592
10039	195000	2.0	D	0.624	0.620	0.581	0.578
10039	302000	2.0	R	0.409	0.407	0.391	0.389
10079	194000	2.0	D	0.644	0.641	0.602	0.598
10209	194000	2.0	D	0.669	0.665	0.626	0.623
10380	198000	2.0	D	0.649	0.646	0.607	0.604
10508	203000	2.0	D	0.611	0.608	0.570	0.567
10593	203000	2.0	D	0.626	0.623	0.585	0.582
10674	203000	2.0	D	0.640	0.637	0.599	0.595
10761	206000	2.0	D	0.620	0.617	0.579	0.576
10845	206000	2.0	D	0.634	0.631	0.593	0.590
10974	211000	2.0	D	0.600	0.597	0.559	0.556
11101	209000	2.0	D	0.642	0.639	0.601	0.598
11189	213000	2.0	D	0.613	0.610	0.572	0.569

FIG. 15: POÇO 3 – TRAJETÓRIA DO POÇO  
 Projeção Vertical

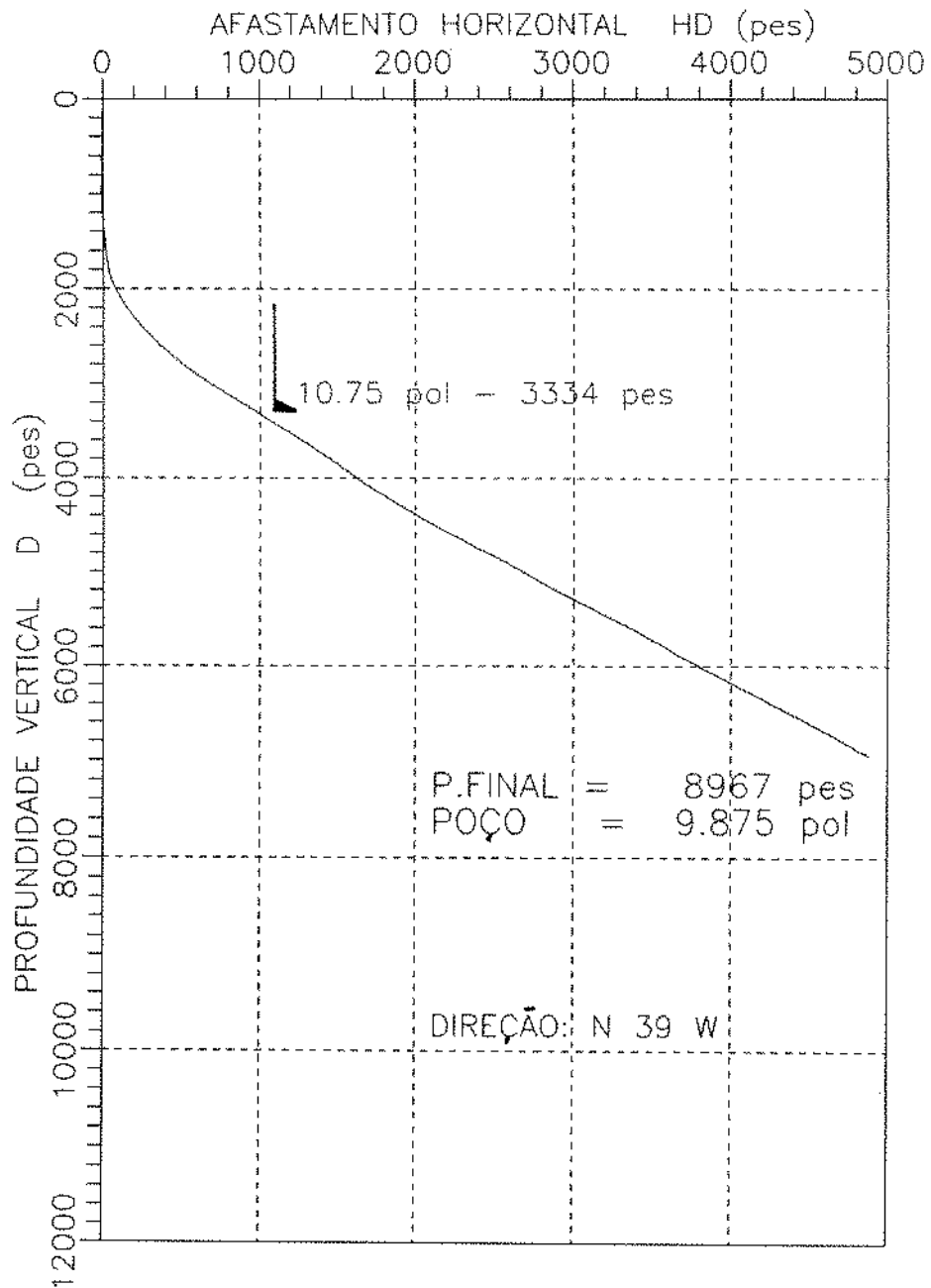
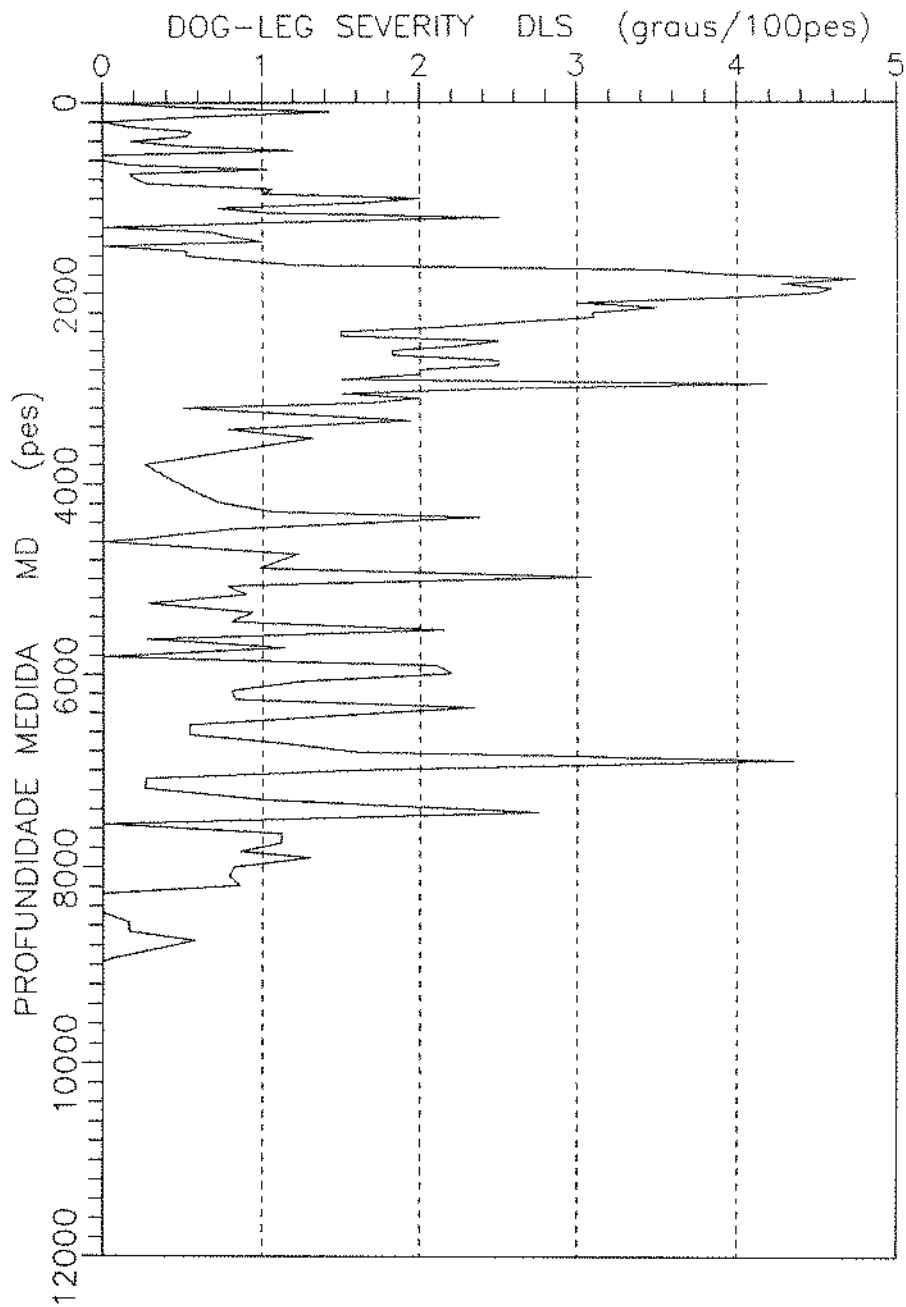


FIG. 16: POÇO 3 - DOG-LEG SEVERITY



## TABELA 8

## POÇO 3 : FATORES DE ATRITO CALCULADOS- DESCIDA DE REVESTIMENTO

DADOS : Peso do fluido : 10.20 lbm/gal  
 Índice de consistência do fluido : 143.4 eq.CP  
 Índice de potência do fluido : 0.726  
 Diâmetro da broca : 9.875 pol  
 Último revestimento: Diâmetro : 10.750 pol  
                           Sapata : 3334 pés

Composição da coluna de revestimento :

PROFUNDIDADE (pés)	OD (pol)	ID (pol)	PESO NOMINAL (lb/pé)	OBS
8967	7.625	6.625	39.0	REV

## MEDIÇÕES E RESULTADOS :

MD (pés)	TG (lbf)	VC (pés/s)	MODO	FATORES DE ATRITO CALCULADOS			
				EI= 0 FV= 0	EI≠ 0 FV= 0	EI= 0 FV≠ 0	EI≠ 0 FV≠ 0
8967	160000	2.0	D	0.293	0.288	0.277	0.272

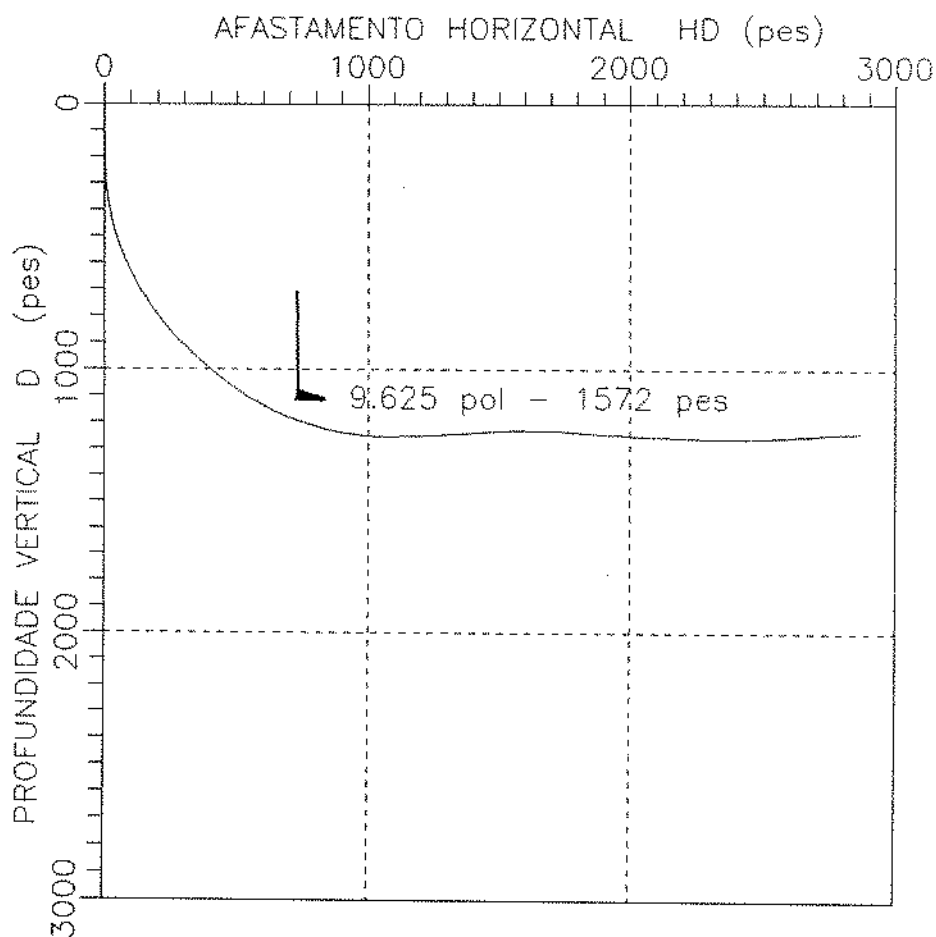
R - Retirando coluna

D - Descendo coluna

EI- Contribuição da rigidez de coluna

FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico

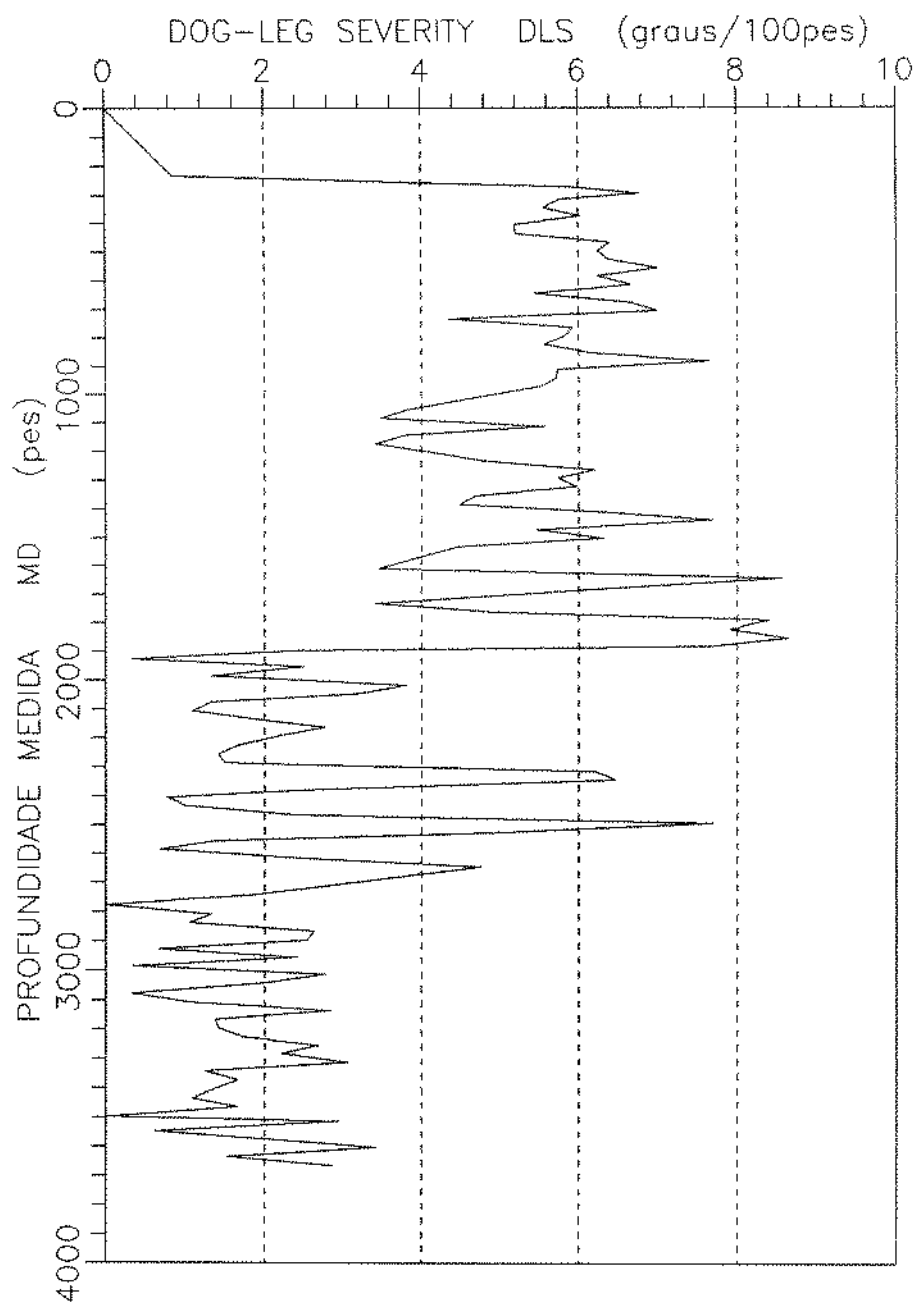
FIG. 17: POÇO 4 -- TRAJETÓRIA DO POÇO  
Projeção Vertical



P.FINAL = 3665 pes  
P.VERT. = 1241 pes  
POÇO = 8.5 pol

DIREÇÃO: N 2 W

FIG. 18: POÇO 4 - DOG-LEG SEVERITY





### 5.1.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas tabelas 4 a 9 são apresentados os fatores de atrito aparente calculados com os dados de 4 poços monitorados e na tabela 10, um resumo das médias desses resultados.

Os resultados mostram-se praticamente insensíveis quanto ao tipo de trajetória do poço ou composição de coluna, não havendo grandes diferenças entre os valores calculados.

Na média, os fatores de atrito se situaram na faixa de 0.21 - 0.33, consistentes com os divulgados na literatura que foram de 0.26 - 0.31 para testes de campo e 0.25 - 0.34 para testes de laboratório (vide tab. 3).

Resultaram maiores fatores de atrito para descidas de colunas face às retiradas de colunas, salvo para o poço horizontal em que maior valor foi obtido para retiradas de colunas, isto devido às possíveis interferências do poço nestas operações.

No poço 2, maiores valores foram obtidos com relação ao restante dos poços. Isto indica maior sensibilidade do fator de atrito em poços com pequenas inclinações e portanto com menores razões de arraste "DWR" em que pequenas interferências do poço conduzem a grandes aumentos no fator de atrito aparente do poço.

$$\boxed{\text{DWR} = | \text{TGm} - \text{TGo} | / \text{TGo}} \quad (50)$$

Onde : TGm = Peso no gancho manobrando coluna

TGo = Peso no gancho girando a coluna com  $V_c = 0$



Nas figuras 19 a 24, são apresentadas as previsões e medições do peso no gancho em função da profundidade da extremidade da coluna.

As curvas de previsões foram calculadas adotando fatores de atrito médios constantes na tabela 10 e correspondem respectivamente da esquerda para a direita, as previsões de descidas, rotação da coluna sem movimento axial e retiradas de colunas.

Os valores medidos mostram uma boa correlação com os valores previstos. No poço 4, horizontal, ocorreram maiores diferenças provavelmente devido a maiores interferências do poço.

Nas figuras 25, 26 e 27, observam-se uma tendência de estabilização do fator de atrito com o aumento da profundidade em que normalmente ocorre também o aumento da razão de arraste "DWR" (figs. 28 a 33).

Nas figuras 34 a 38 são apresentadas as previsões de torque na superfície em função da profundidade da extremidade da coluna. O ponto de inflexão na fig. 35 (poço 1) à profundidade de  $\pm 1524$  m [ $\pm 5000$  pés], corresponde ao final de Build-up em que ocorre maior influência dos comandos (mais pesados) até esta profundidade. O mesmo fato não é observado em outros poços devido as colunas não serem mistas como no poço 1.

Figuras 39 e 40 são exemplos de perfis de arraste e torque para uma dada profundidade da extremidade da coluna.

TABELA 10

VALORES MÉDIOS DOS FATORES DE ATRITO - DADOS DE CAMPO

POÇO	COLUNA	FATORES DE ATRITO			$\sigma$
		R	D	RD	
1	REVESTIMENTO	0.214	0.336	0.324	0.058
	PERFURAÇÃO	0.156	-	-	-
	CABO PERFIL	0.322	0.270	0.307	0.044
2	REVESTIMENTO	0.385	0.519	0.506	0.086
3	REVESTIMENTO	-	0.272	-	-
4	PERFURAÇÃO	0.343	0.308	0.325	0.076

Excluindo o POÇO 2 (baixa inclinação), os fatores de atrito médios, são :

- o DESCENDO REVESTIMENTO : 0.333  $\sigma = 0.049$
- o RETIRANDO REVESTIMENTO : 0.214  $\sigma = 0.004$
- o DESCENDO COLUNA PERF. : 0.308  $\sigma = 0.046$
- o RETIRANDO COLUNA PERF. : 0.316  $\sigma = 0.115$
- o GERAL (exclui Cabo) : 0.318  $\sigma = 0.069$

$\sigma$  - Desvio padrão  
R - Retirando coluna  
D - Descendo coluna  
RD- Descendo e retirando coluna

FIG. 19: POÇO 1 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

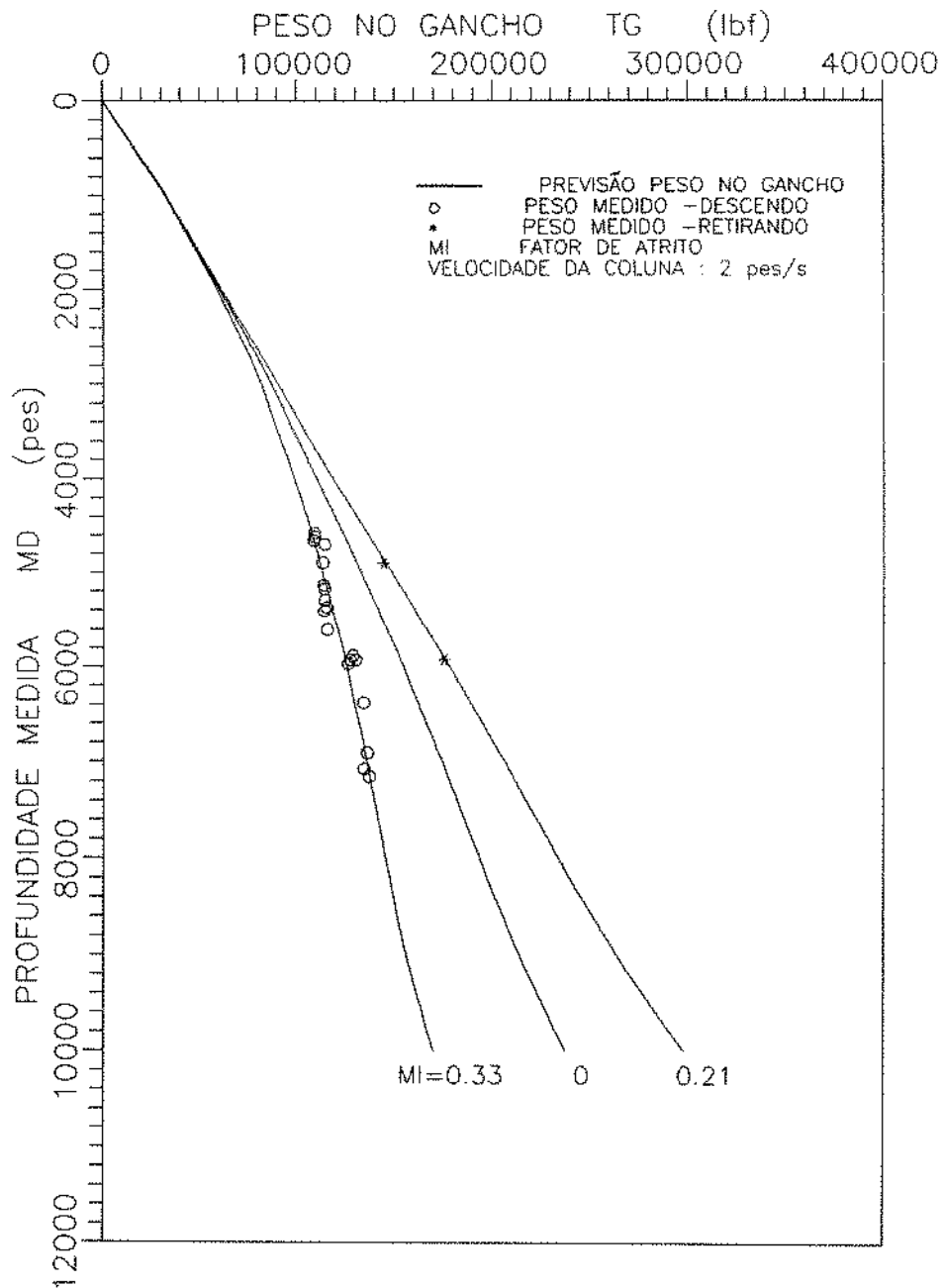


FIG. 20: POÇO 1 – PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
COLUNA DE PERFURAÇÃO

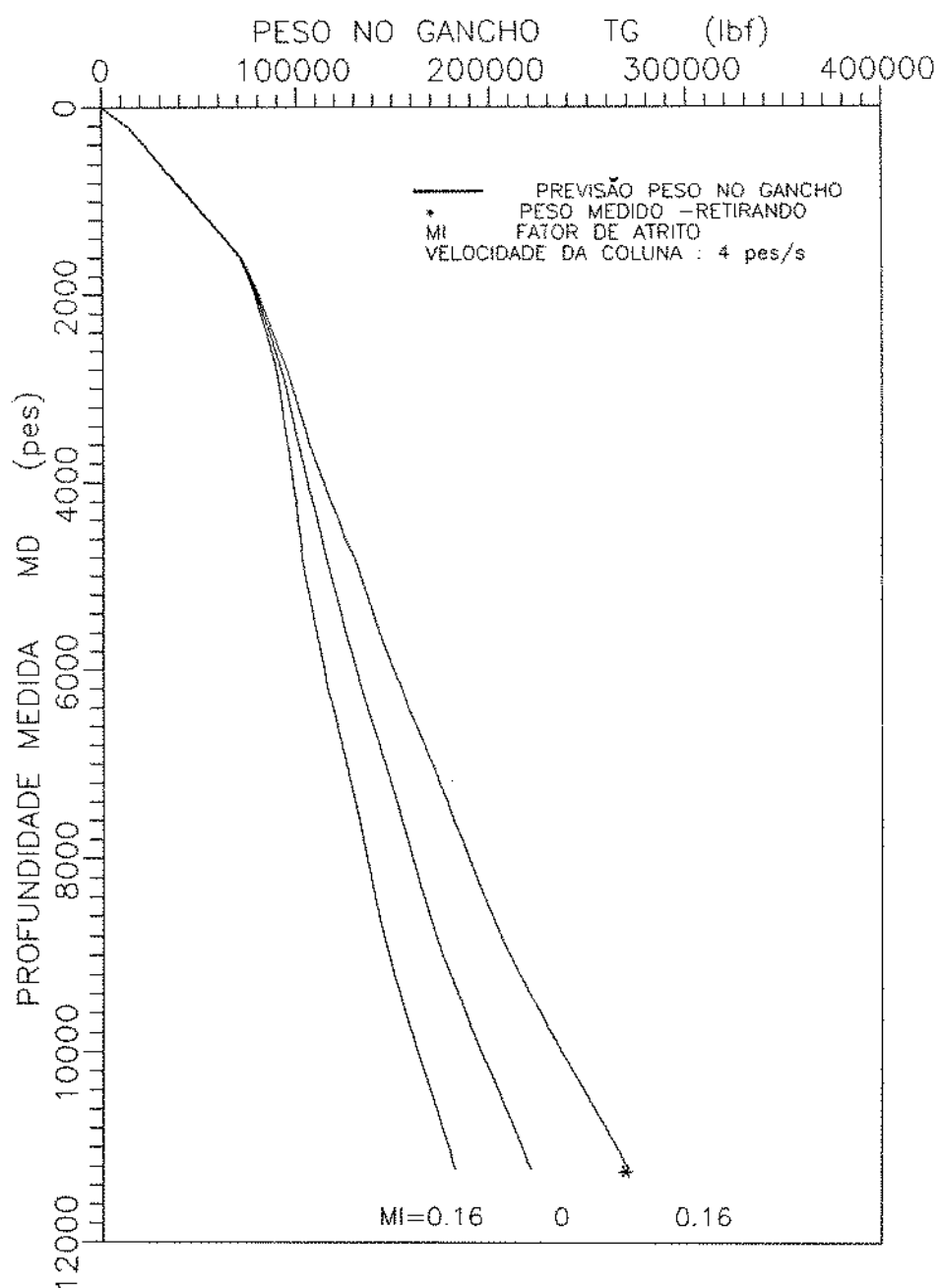


FIG. 21: POÇO 1 - PREVISÃO DE PESO NO GANCHO  
CABO DE PERFILAGEM

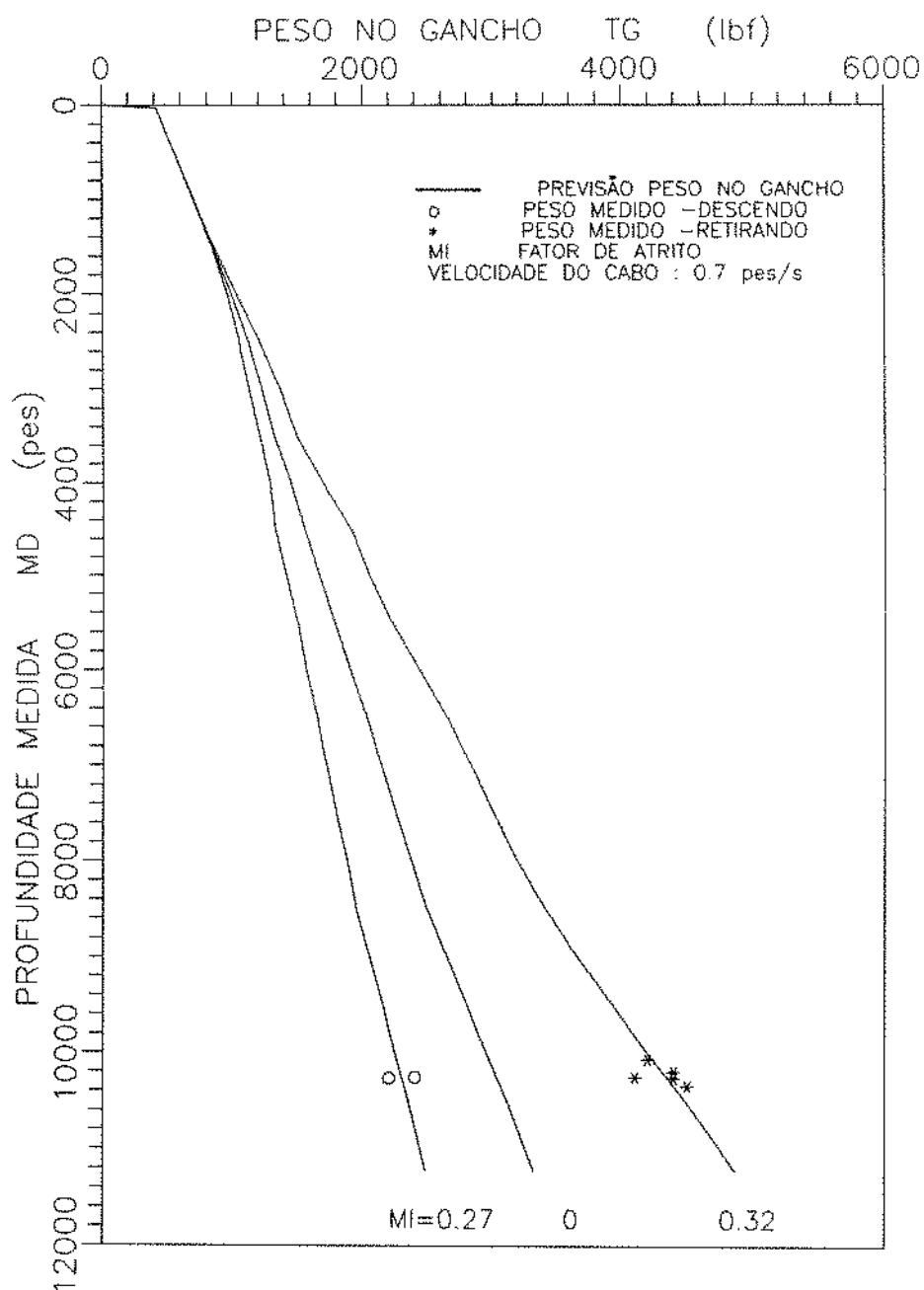


FIG. 22: POÇO 2 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

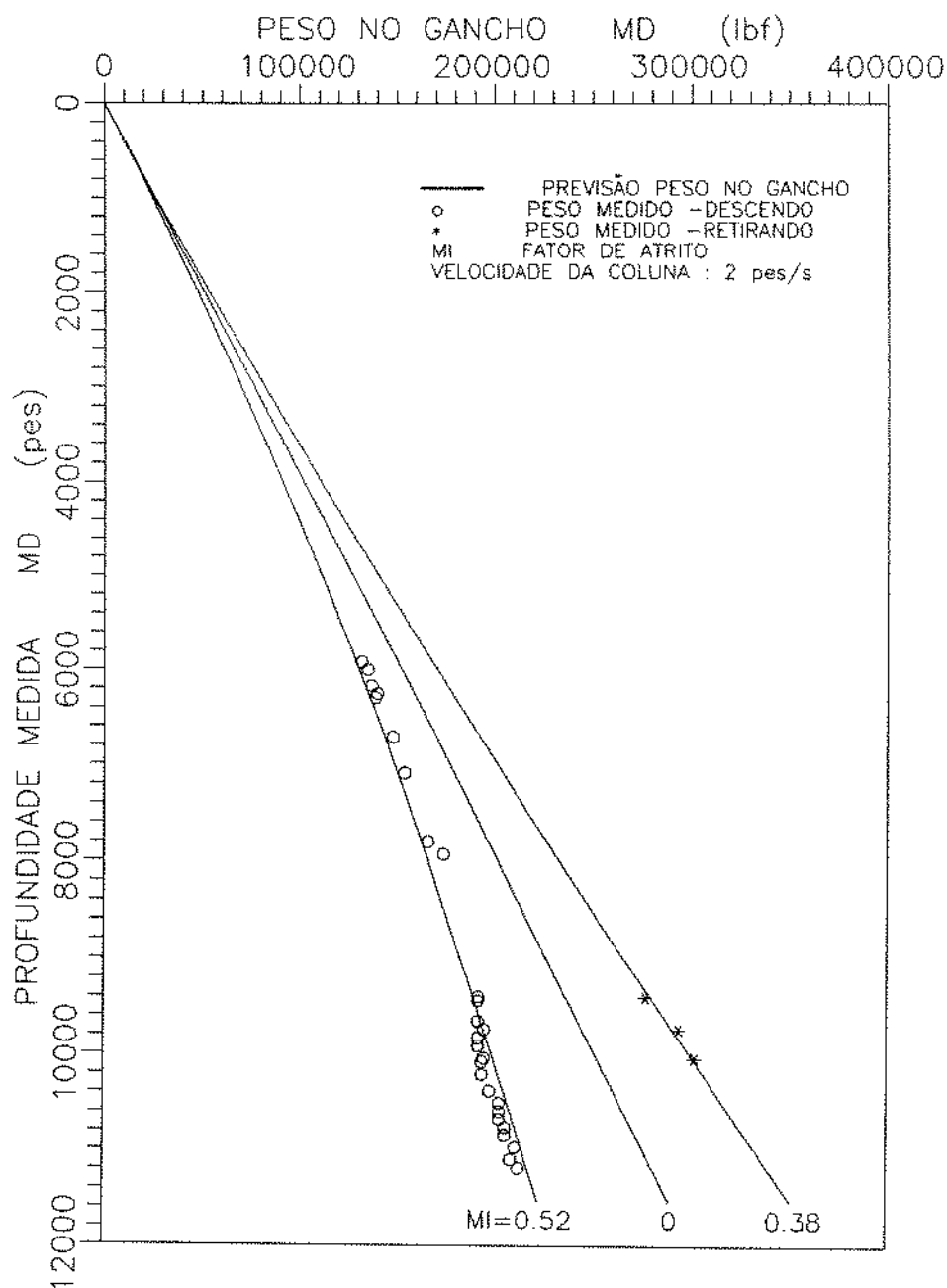


FIG. 23: POÇO 3 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

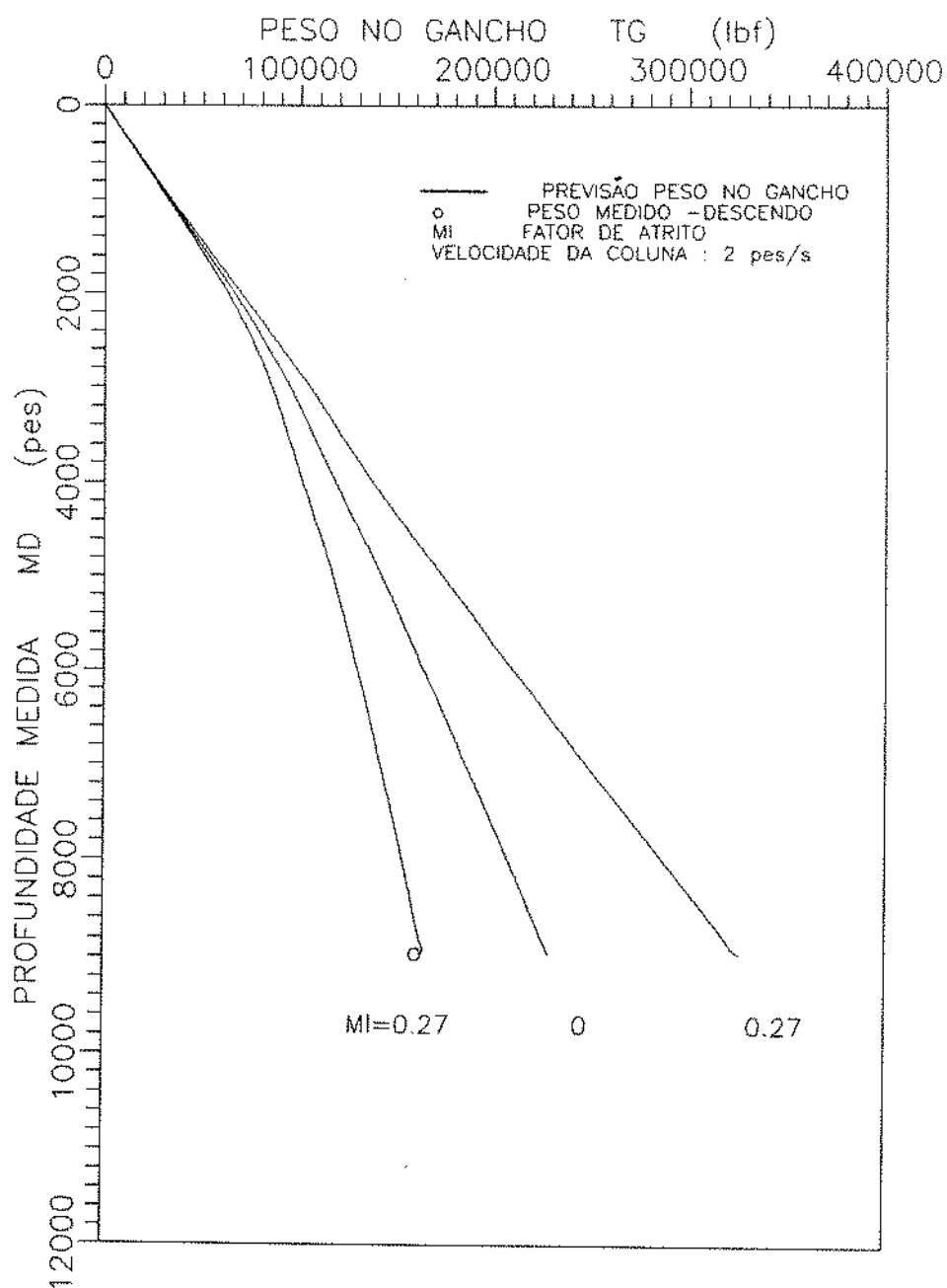


FIG. 24: POÇO 4 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
COLUNA DE PERFURAÇÃO

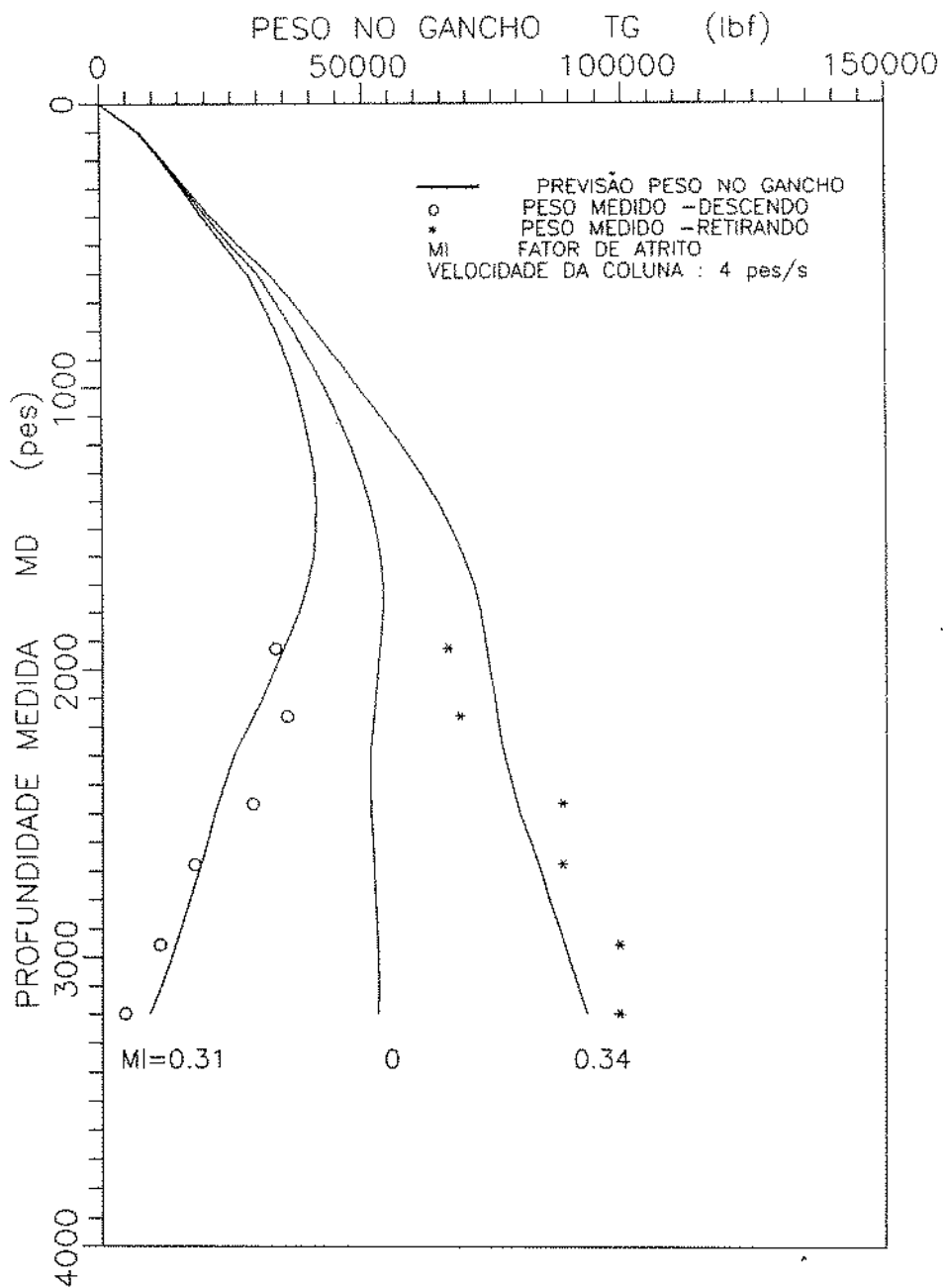




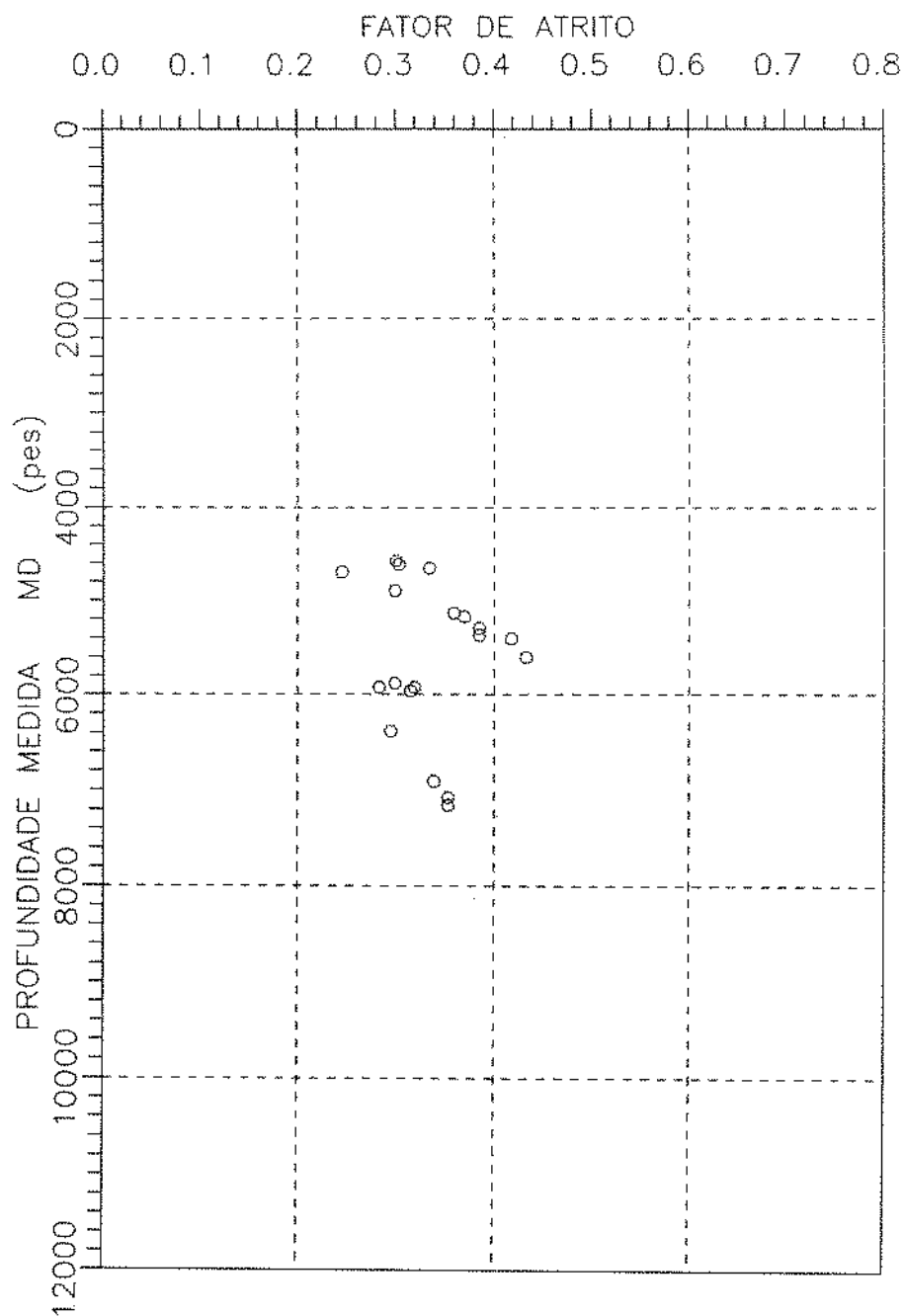
FIG. 25: POÇO 1 – FATORES DE ATRITO CALCULADOS  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

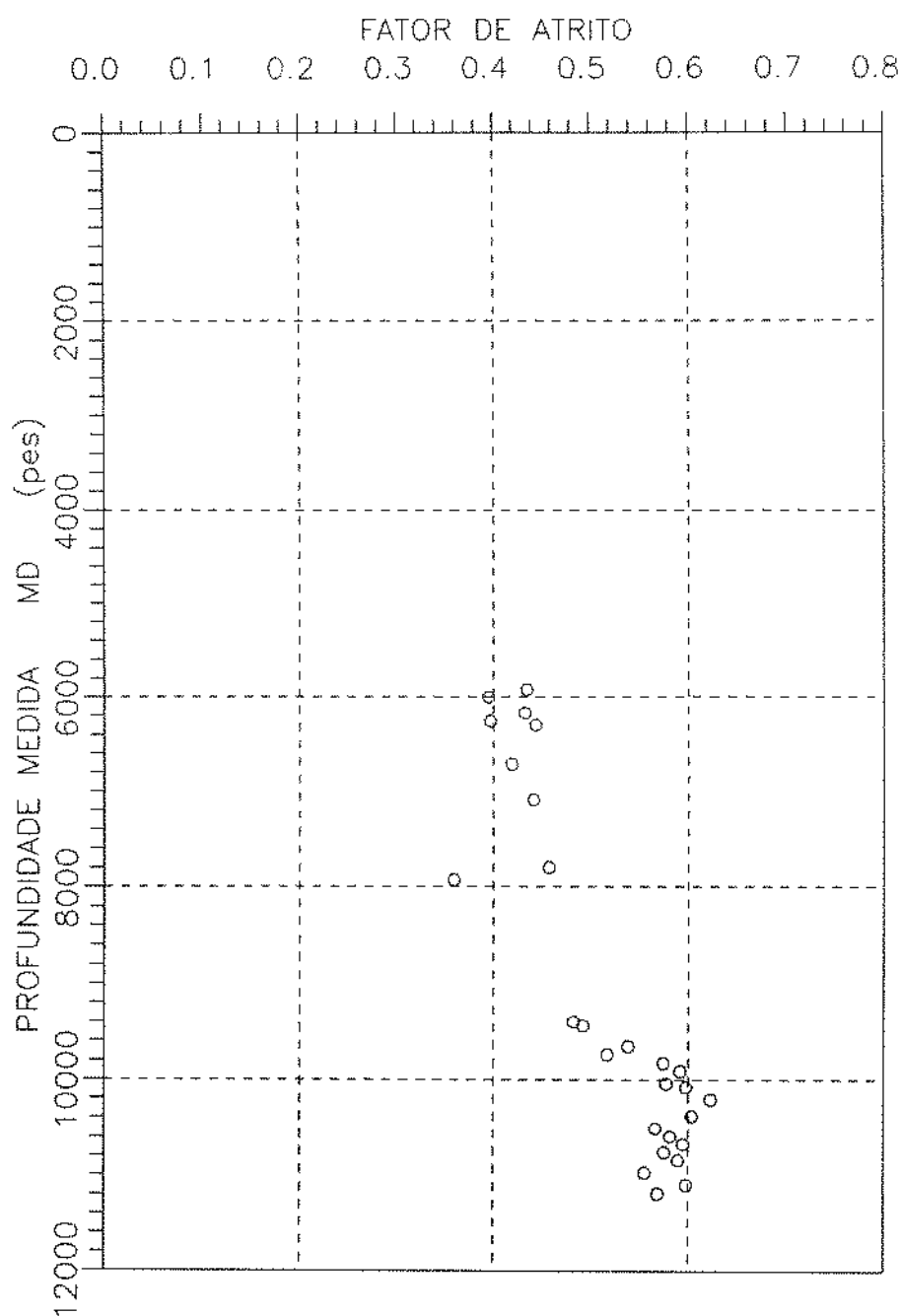
FIG. 26: POÇO 2 - FATORES DE ATRITO CALCULADOS  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

FIG. 27: POÇO 4 -- FATORES DE ATRITO CALCULADOS COLUNA DE PERFURAÇÃO

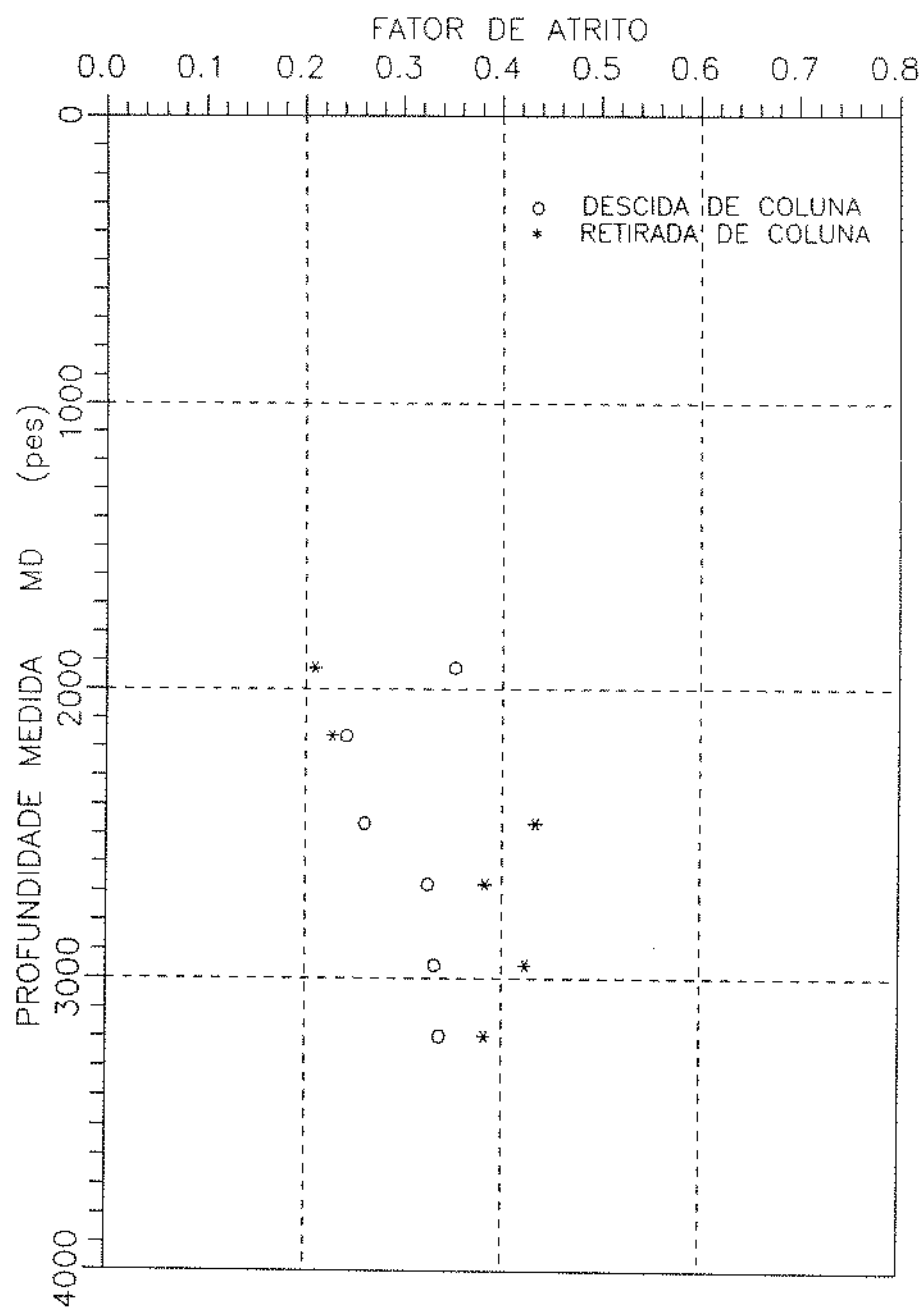


FIG. 28: POÇO 1 - RAZÃO DE ARRASTE  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

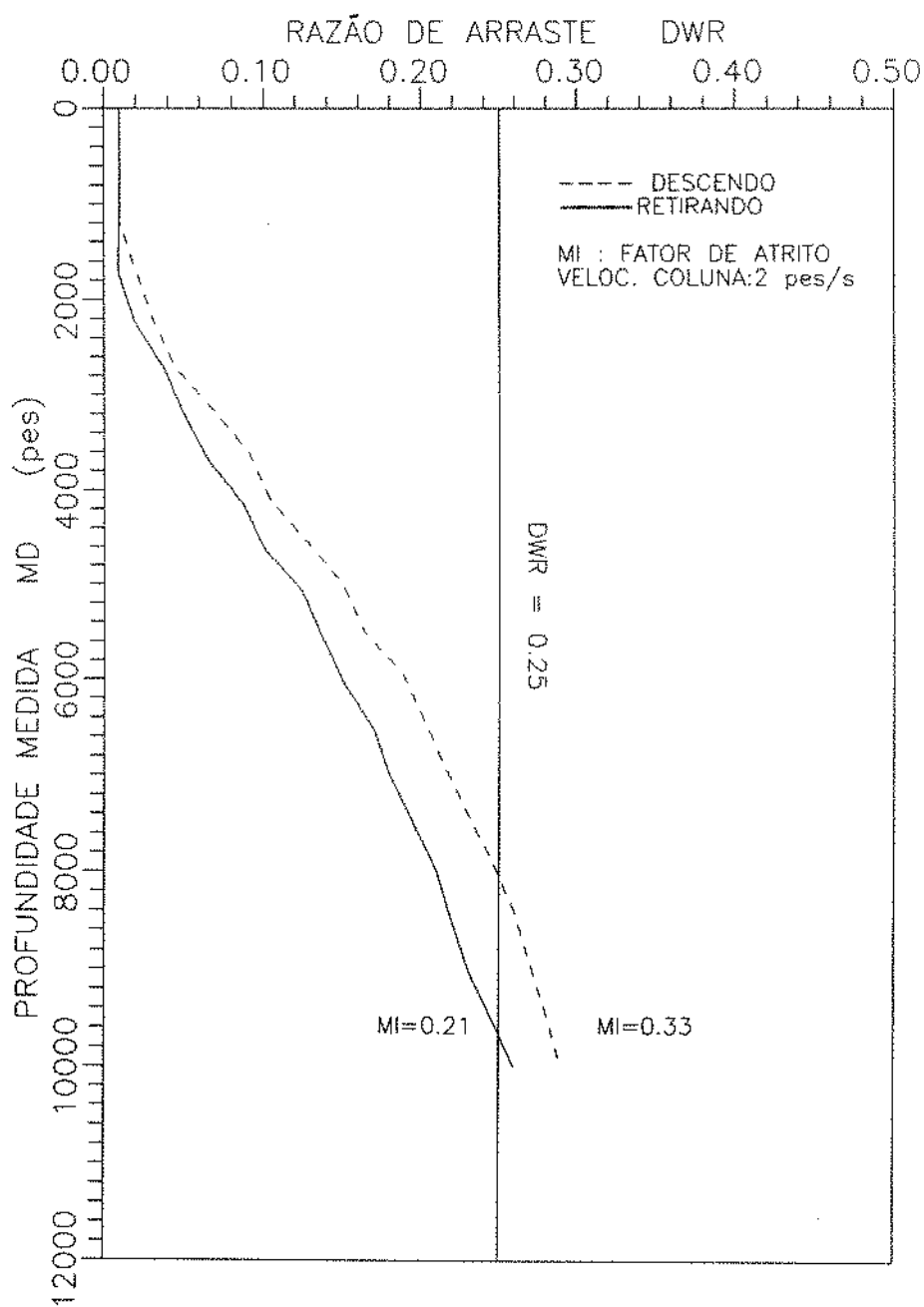


FIG. 29: POÇO 1 - RAZÃO DE ARRASTE  
COLUNA DE PERFURAÇÃO

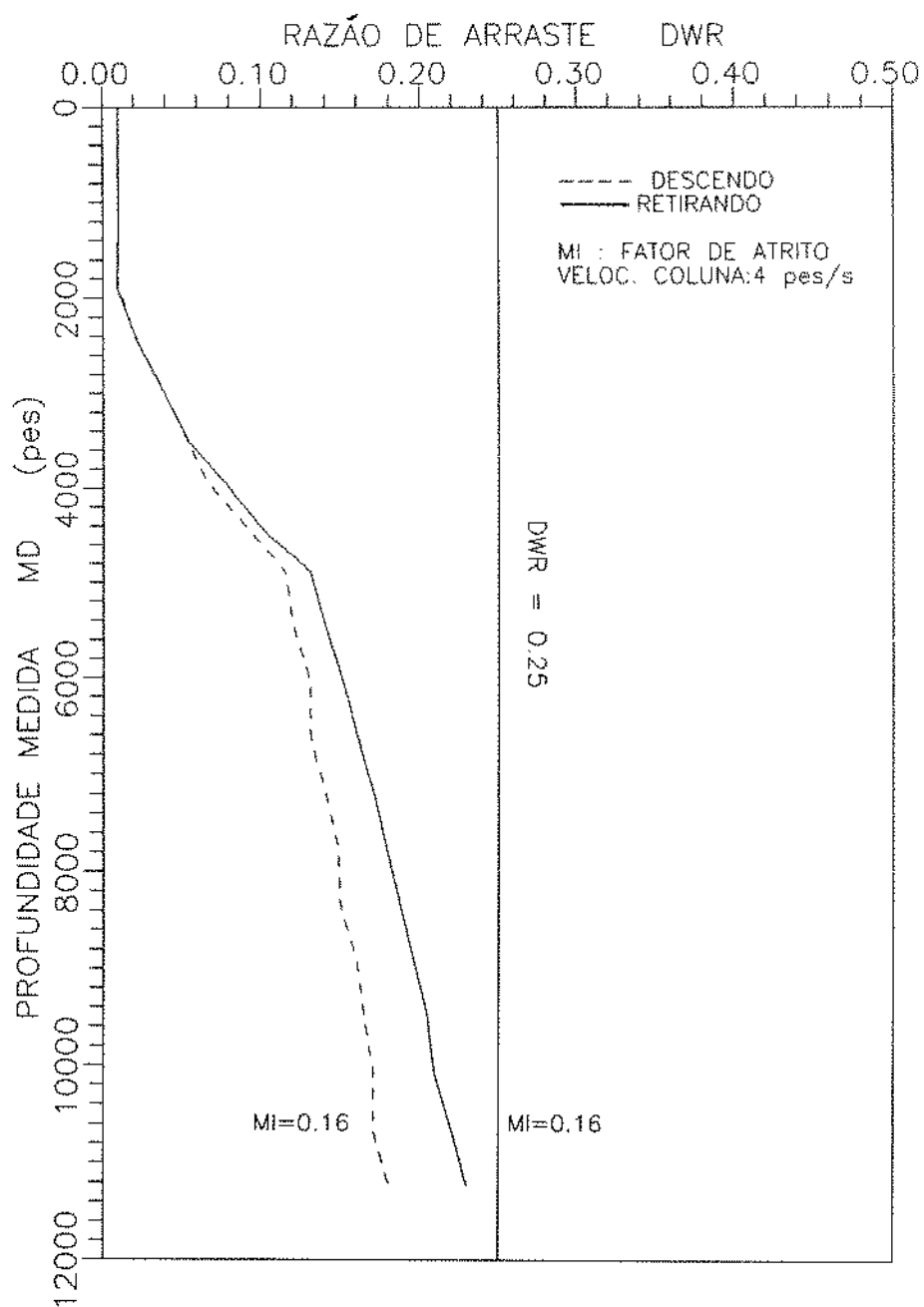


FIG. 30: POÇO 1 - RAZÃO DE ARRASTE  
CABO DE PERFILAGEM

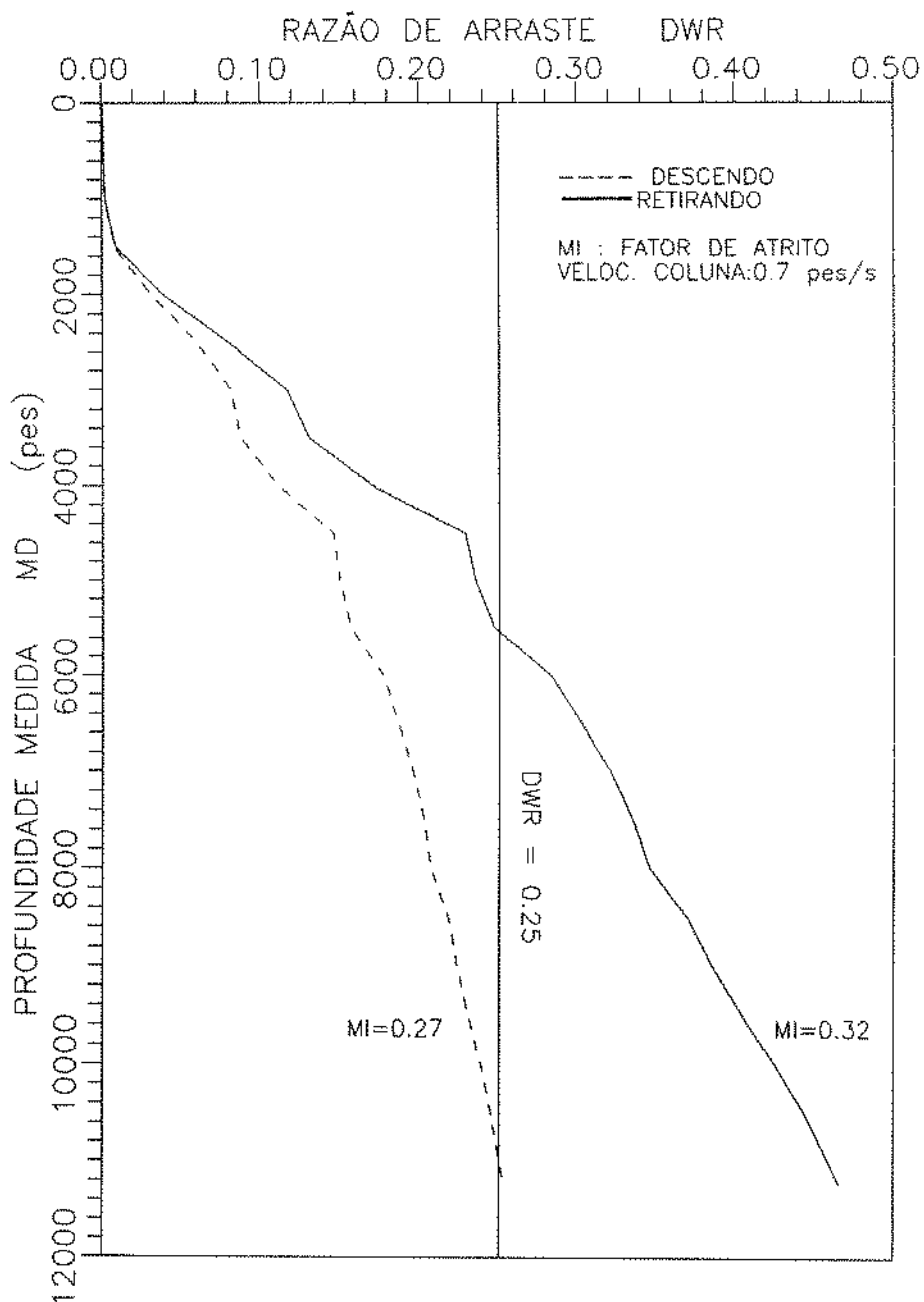


FIG. 31: POÇO 2 - RAZÃO DE ARRASTE  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

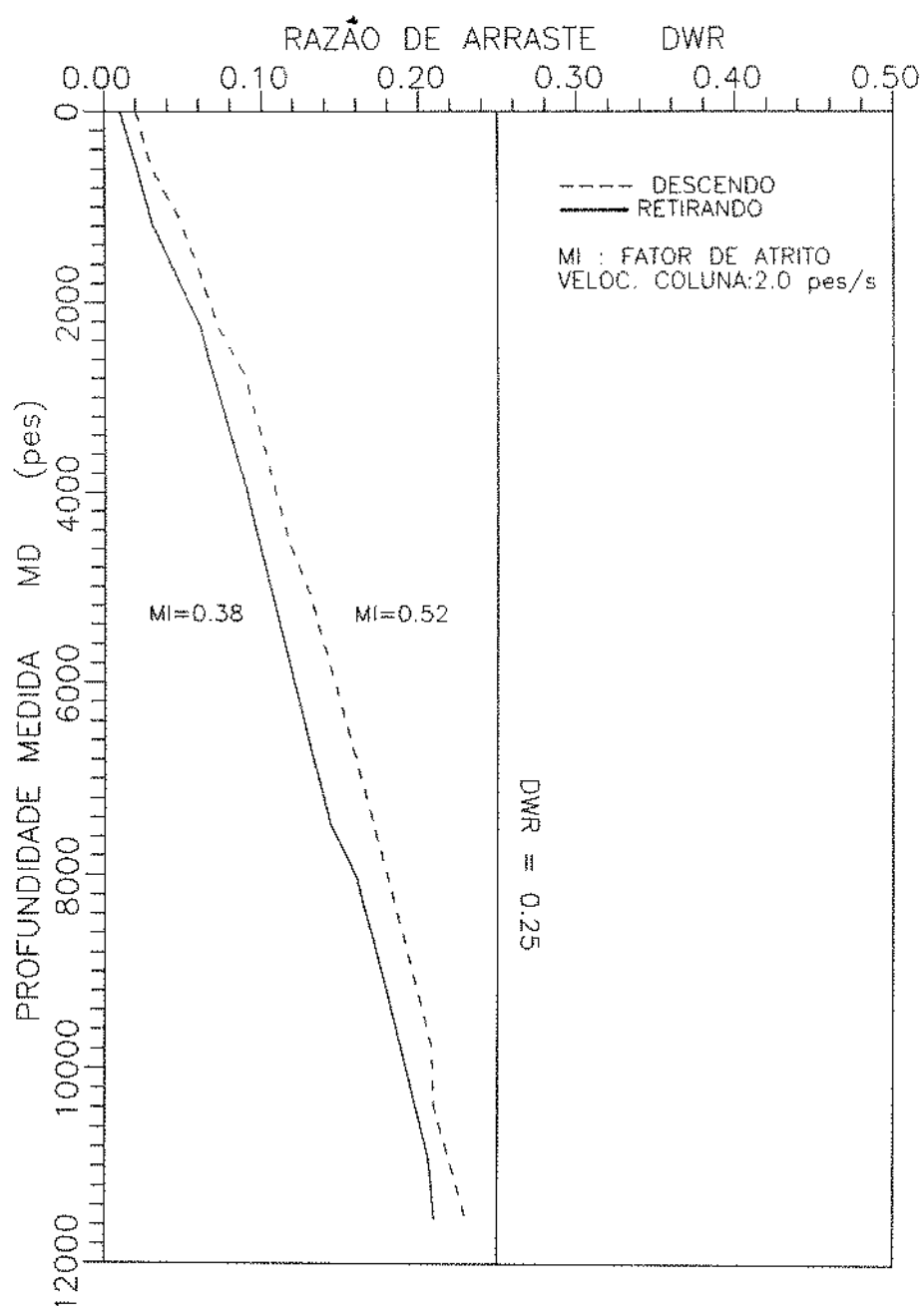


FIG. 32: POÇO 3 - RAZÃO DE ARRASTE  
DESCIDA DE REVESTIMENTO

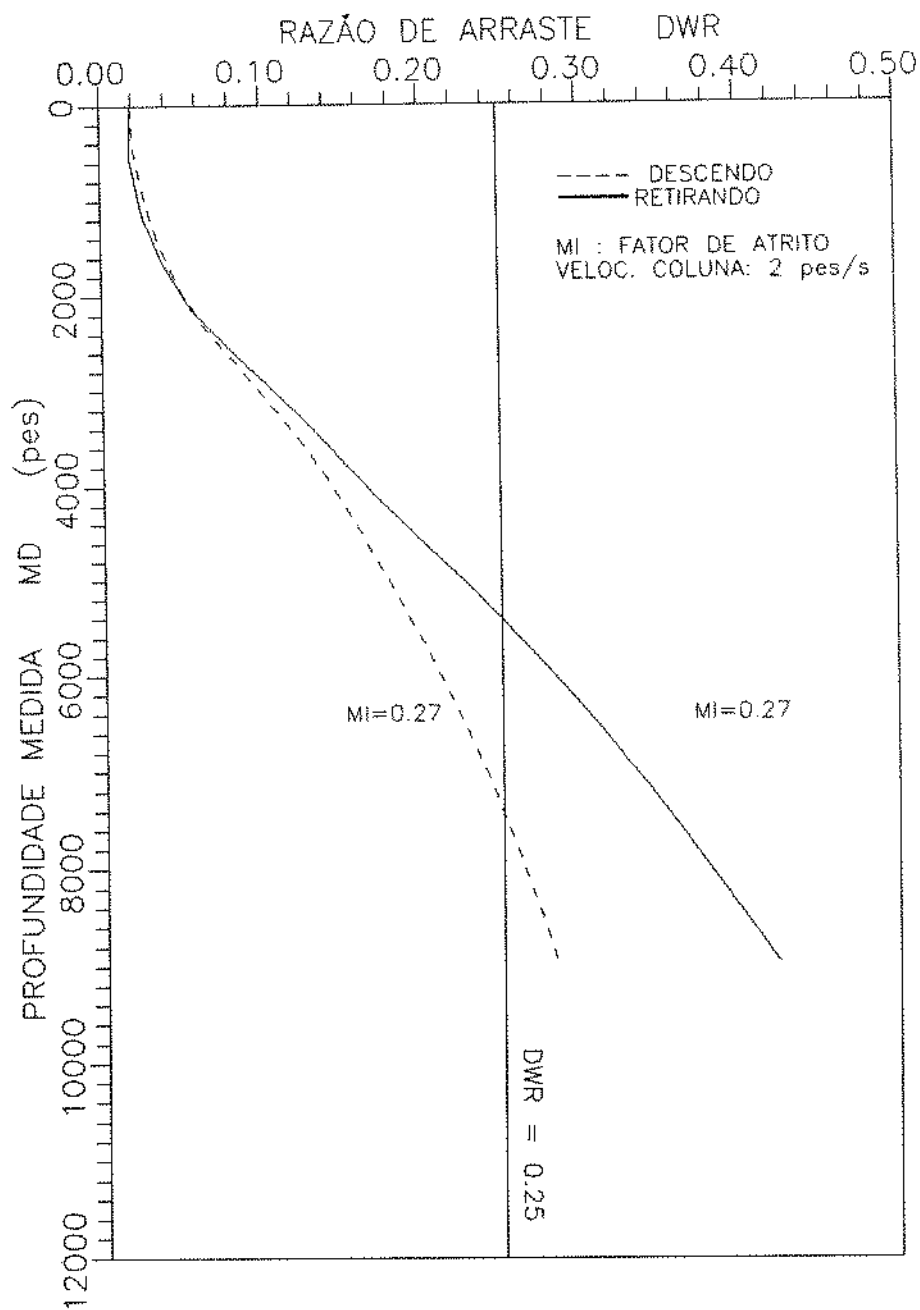




FIG. 33: POÇO 4 - RAZÃO DE ARRASTE  
COLUNA DE PERFURAÇÃO

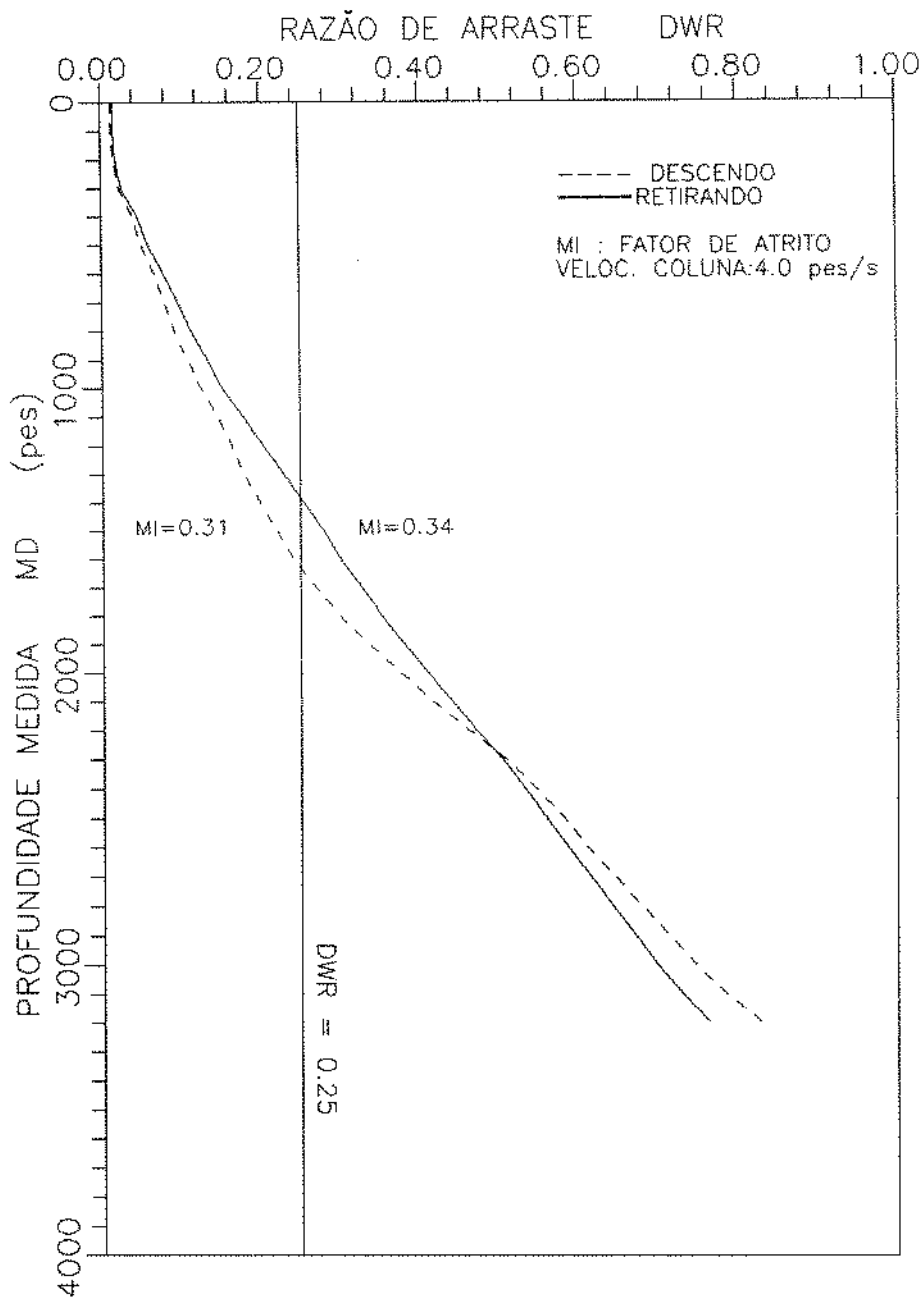


FIG. 34: POÇO 1 - PREVISÃO DE TORQUE COLUNA DE REVESTIMENTO

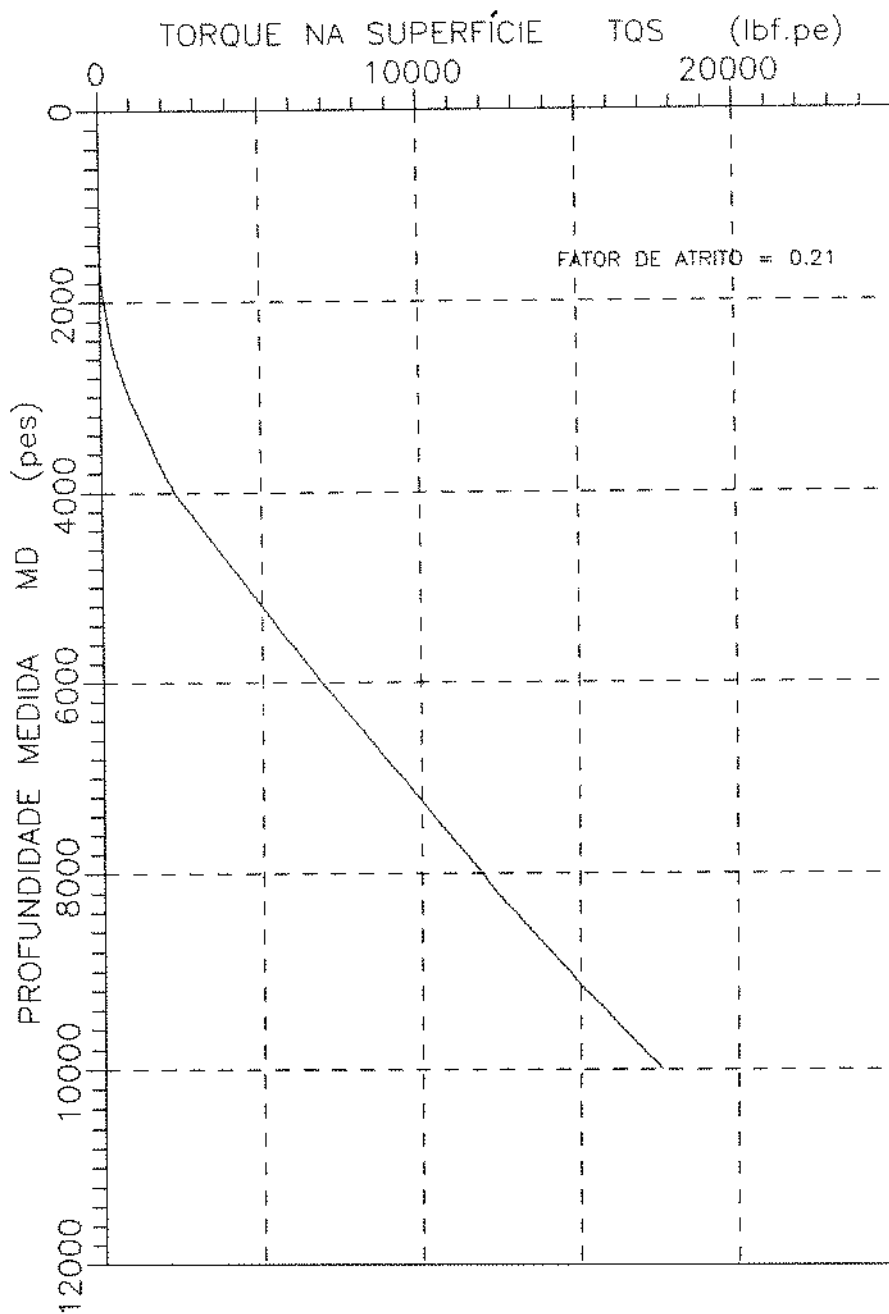


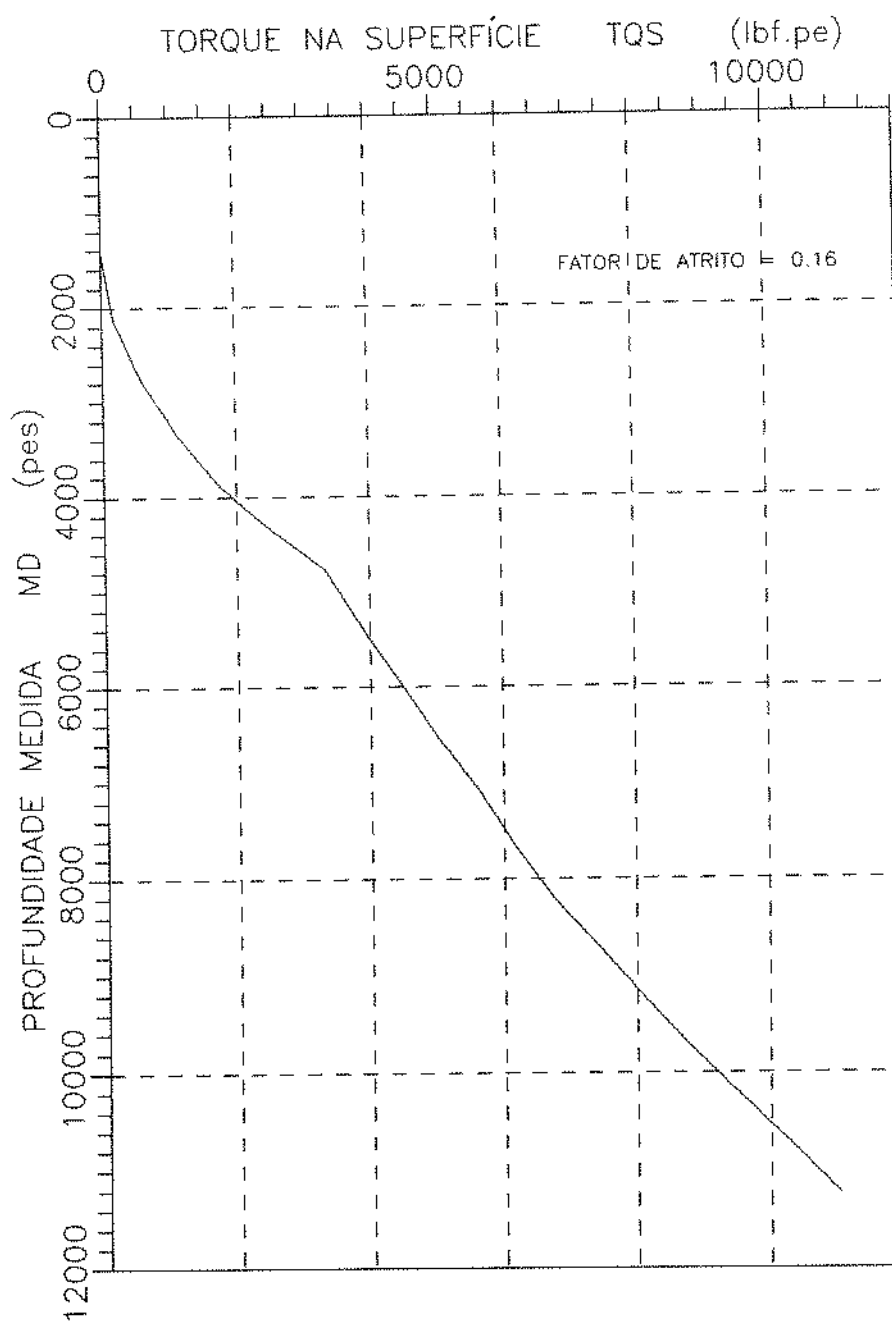
FIG. 35: POÇO 1 - PREVISÃO DE TORQUE  
COLUNA DE PERFURAÇÃO

FIG. 36: POÇO 2 - PREVISÃO DE TORQUE COLUNA DE REVESTIMENTO

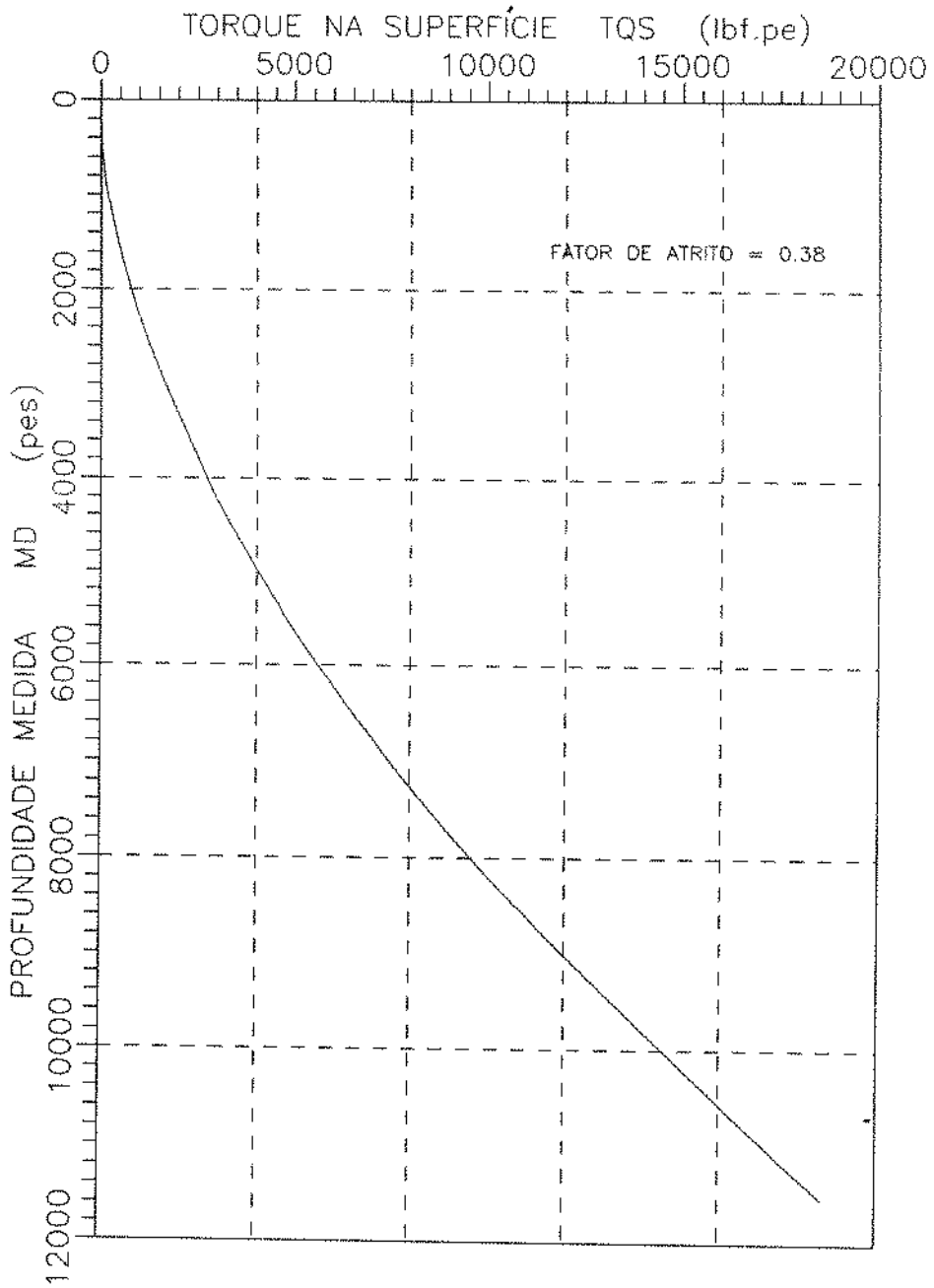


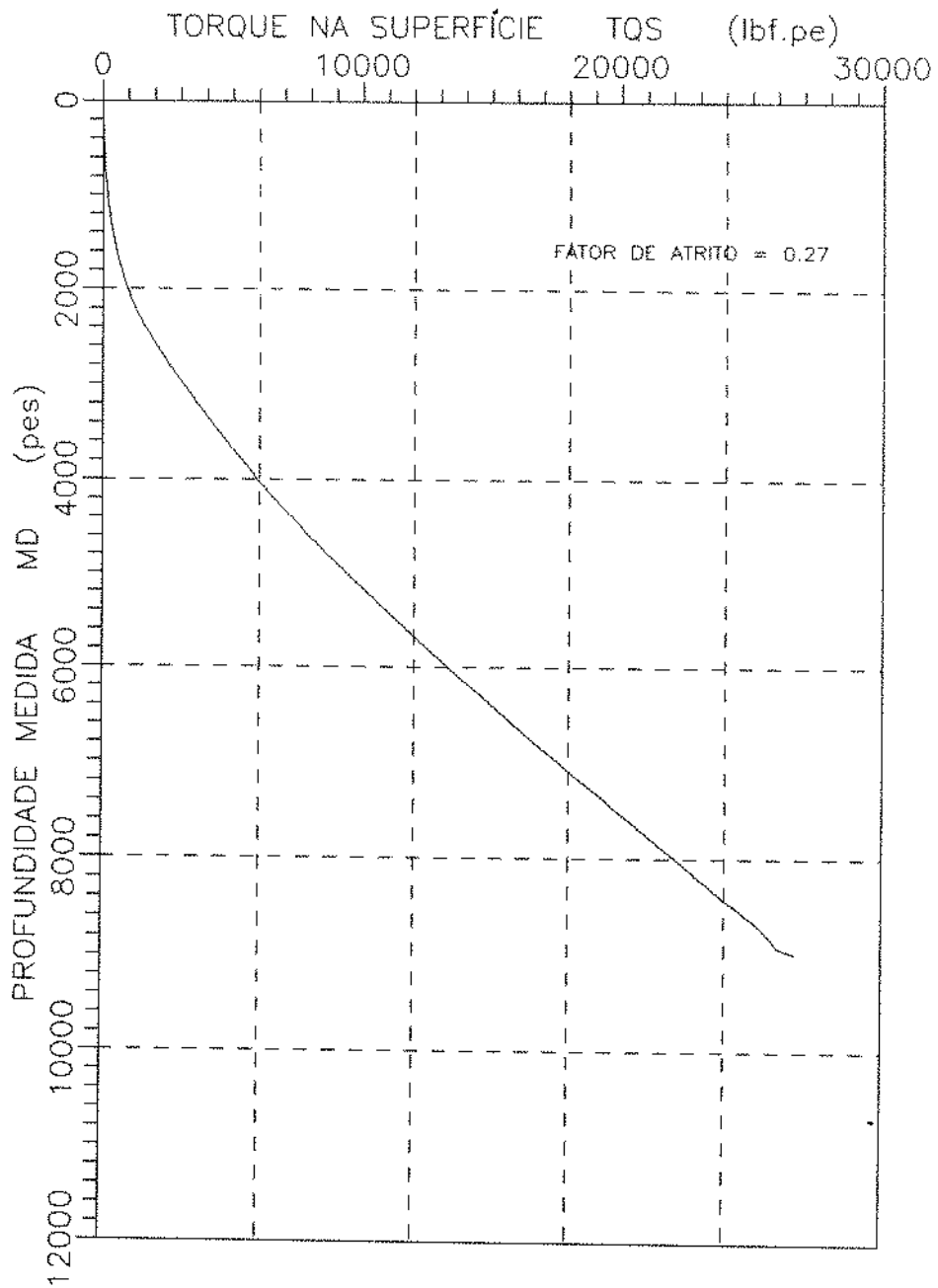
FIG. 37: POÇO 3 - PREVISÃO DE TORQUE  
COLUNA DE REVESTIMENTO

FIG. 38: POÇO 4 - PREVISÃO DE TORQUE COLUNA DE PERFURAÇÃO

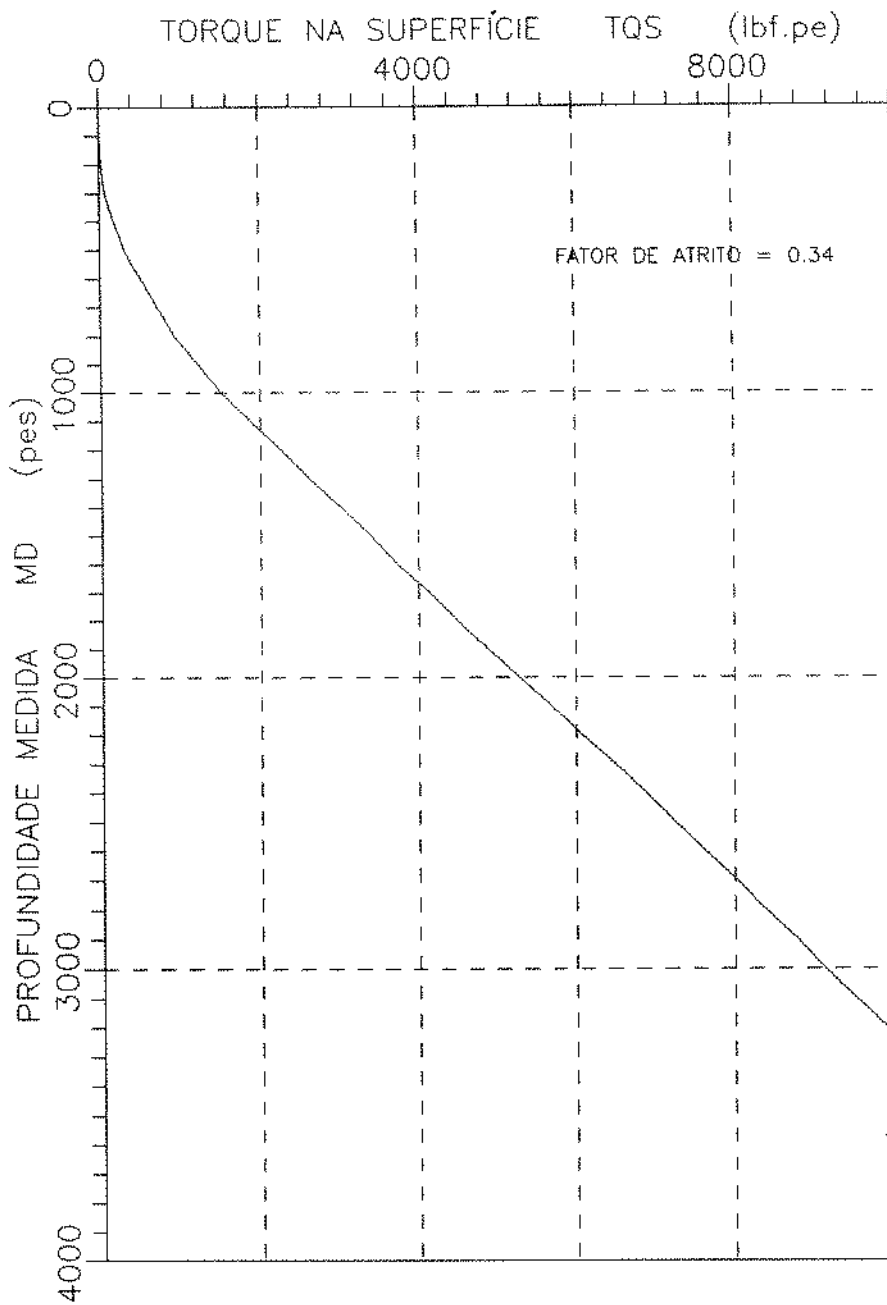


FIG. 39: POÇO 4 - PERFIL DE ARRASTE x PROFUNDIDADE COLUNA DE PERFURAÇÃO

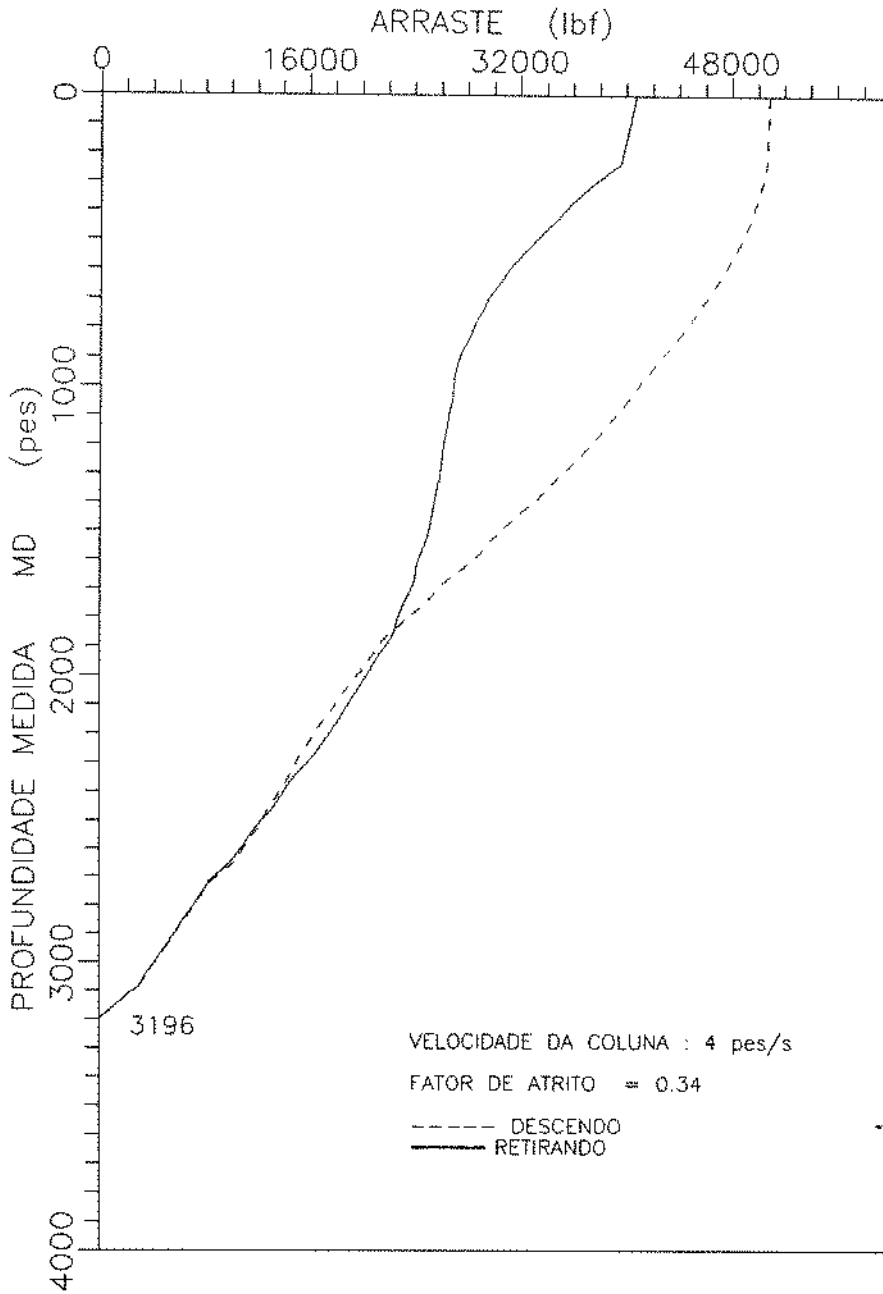
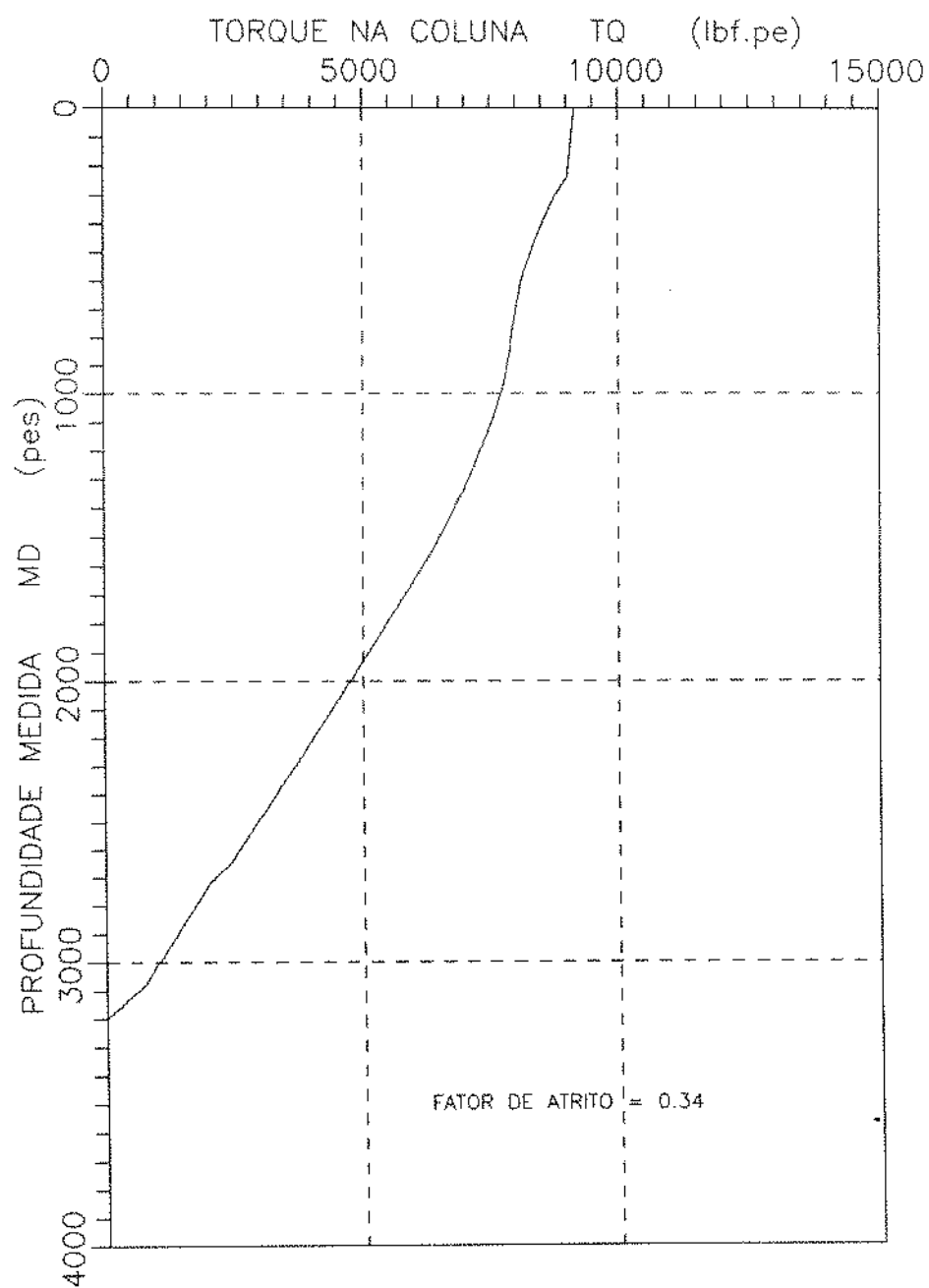


FIG. 40: POÇO 4 - PERFIL DE TORQUE x PROFUNDIDADE COLUNA DE PERFURAÇÃO





## 5.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS UTILIZANDO O MODELO

Os resultados das simulações das influências do atrito hidrodinâmico e da rigidez de coluna sobre o fator de atrito, torque e peso no gancho encontram-se nas tabelas 4-9 e 11, 12.

A contribuição da rigidez da coluna sobre o fator de atrito foi cerca de 1 % para colunas de revestimento e praticamente nula para colunas de perfuração, havendo maior influência, cerca de 2 % , no poço horizontal.

A influência do atrito hidrodinâmico sobre o fator de atrito foi mais significativa, cerca de 8 % para colunas de revestimento e cerca de 3 % para colunas de perfuração. Houve maior influência no poço 1 para coluna de perfuração devido o baixo valor do fator de atrito aparente do poço.

Os efeitos do atrito hidrodinâmico e da rigidez de coluna sobre o peso no gancho foram maiores em operações de descidas de colunas face às operações de retiradas de colunas. Houveram maiores contribuições em poços mais rasos (vide tabela 12) . Estes efeitos foram praticamente nulos em poços convencionais, tornando-se significativos no poço horizontal.

Verifica-se também que, a influência da rigidez de coluna contribue muito pouco nos esforços de torque na superfície, sendo maior no poço horizontal (vide tabela 13).

Figuras 41 e 42 mostram os efeitos do atrito hidrodinâmico sobre o fator de atrito e sobre o peso no gancho em função da velocidade da coluna. A profundidade da coluna é de 3048 m [10000 pés] e o fator de atrito adotado com atrito

hidrodinâmico nulo, é de 0.30 . Em ambas as figuras, os efeitos são maiores nas operações de descidas de colunas. O efeito do atrito hidrodinâmico é maior também sobre o fator de atrito se comparada com o efeito sobre o peso no gancho.

TABELA 11

INFLUÊNCIAS DA RIGIDEZ DE COLUNA E DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
SOBRE O FATOR DE ATRITO - VALORES MÉDIOS

POÇO	COLUNA	FATORES DE ATRITO			
		EI = 0 FV = 0	EI ≠ 0 FV = 0	EI = 0 FV ≠ 0	EI ≠ 0 FV ≠ 0
1	REVESTIMENTO	0.359	0.354 (1.4)	0.328 (8.6)	0.325 (9.5)
	PERFURAÇÃO	0.165	0.165 (0.0)	0.157 (4.8)	0.156 (5.5)
	CABO PERFIL	0.310	- -	0.307 (1.0)	- -
2	REVESTIMENTO	0.552	0.549 (0.5)	0.509 (7.8)	0.506 (8.3)
3	REVESTIMENTO	0.293	0.288 (1.7)	0.277 (5.5)	0.272 (7.2)
4	PERFURAÇÃO	0.339	0.332 (2.1)	0.332 (2.1)	0.326 (3.8)
MÉDIA REVESTIMENTO		0.469	0.465 (0.8)	0.432 (7.9)	0.428 (8.7)
MÉDIA COLUNA PERFURAÇÃO		0.326	0.320 (1.8)	0.318 (2.5)	0.312 (4.3)

( ) Contribuição percentual com relação à coluna 3  
(EI = FV = 0)

EI- Contribuição da rigidez de coluna  
FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico

TABELA 12

INFLUÊNCIAS DA RIGIDEZ DE COLUNA E DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
SOBRE O PESO NO GANCHO

FATOR DE ATRITO ADOTADO = 0.30							
POÇO	PROF. (pés)	COLUNA	M O D O	PESO NO GANCHO (lbf)			
				EI = 0 FV = 0	EI ≠ 0 FV = 0	EI = 0 FV ≠ 0	EI ≠ 0 FV ≠ 0
1	11232	REV	R	374925	375620	379310	380010
			D	198110	197730	193710	193325
		BHA	R	317845	318065	319550	319770
			D	159010	158910	157990	157890
2	11538	REV	R	334600	334790	337410	337595
			D	251300	251150	246950	246800
3	8967	REV	R	344080	345410	347550	348880
			D	158640	157810	155690	154860
4	3196	BHA	R	86590	87200	87540	88150
			D	14130	13270	12940	12070
PERCENT. RELAÇÃO COLUNA: EI = 0 FV = 0	%	MÉDIA	R	-	0.21	1.00	1.21
		REV	D	-	0.26	1.94	2.20
		BHA POCO1	R	-	0.06	0.54	0.60
			D	-	0.06	0.64	0.70
		BHA POCO4	R	-	0.70	1.10	1.80
			D	-	6.08	8.42	14.60

Velocidade de manobra : REV : 2.0 pés/s  
BHA : 2.0 pés/s

REV - Coluna de revestimento  
BHA - Coluna de perfuração  
EI- Contribuição da rigidez de coluna  
FV- Contribuição do atrito hidrodinâmico  
R - Retirando coluna  
D - Descendo coluna

TABELA 13

## INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DE COLUNA SOBRE O TORQUE

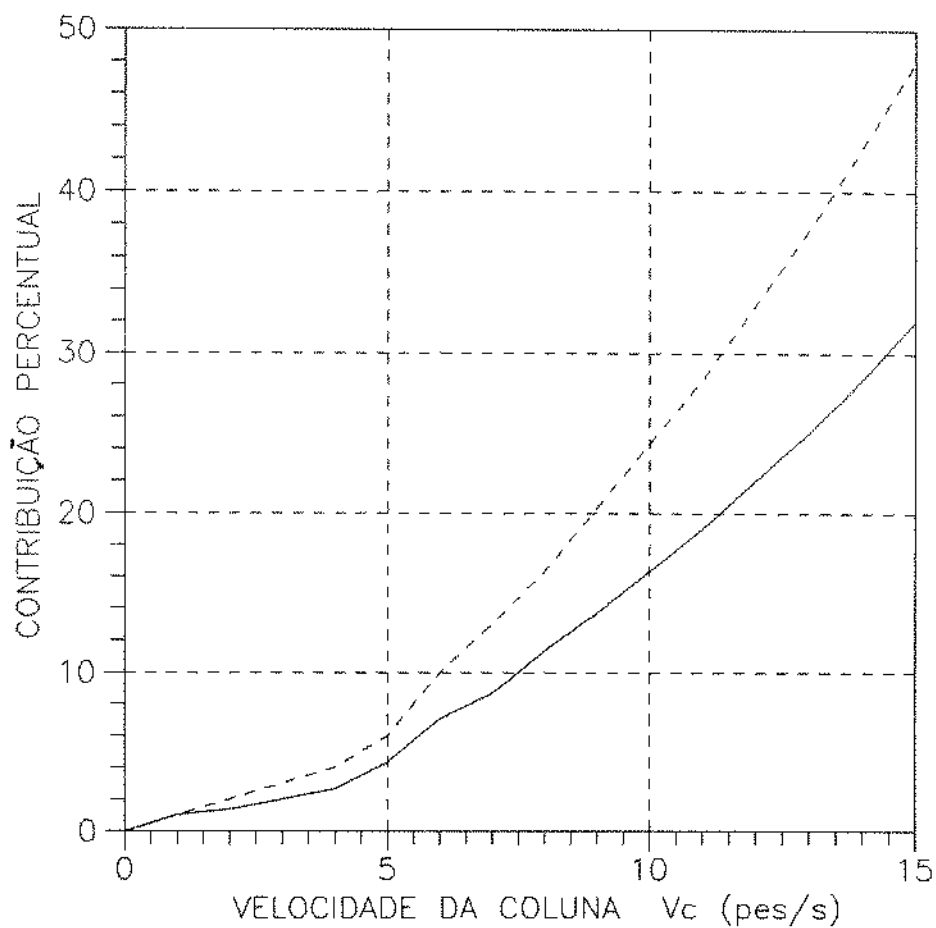
FATOR DE ATRITO ADOTADO = 0.30					
POÇO	PROF. (pés)	COLUNA	TORQUE (lbf.pé) )		
			EI = 0	EI ≠ 0	%
1	11232	REV	30340	30520	0.59
		BHA	20360	20400	0.20
2	11538	REV	14660	14720	0.41
3	8967	REV	31370	31740	1.18
4	3196	BHA	8700	8855	1.78

Contribuição da rigidez de coluna (EI ≠ 0) :

Média para Revestimentos = 0.73 %

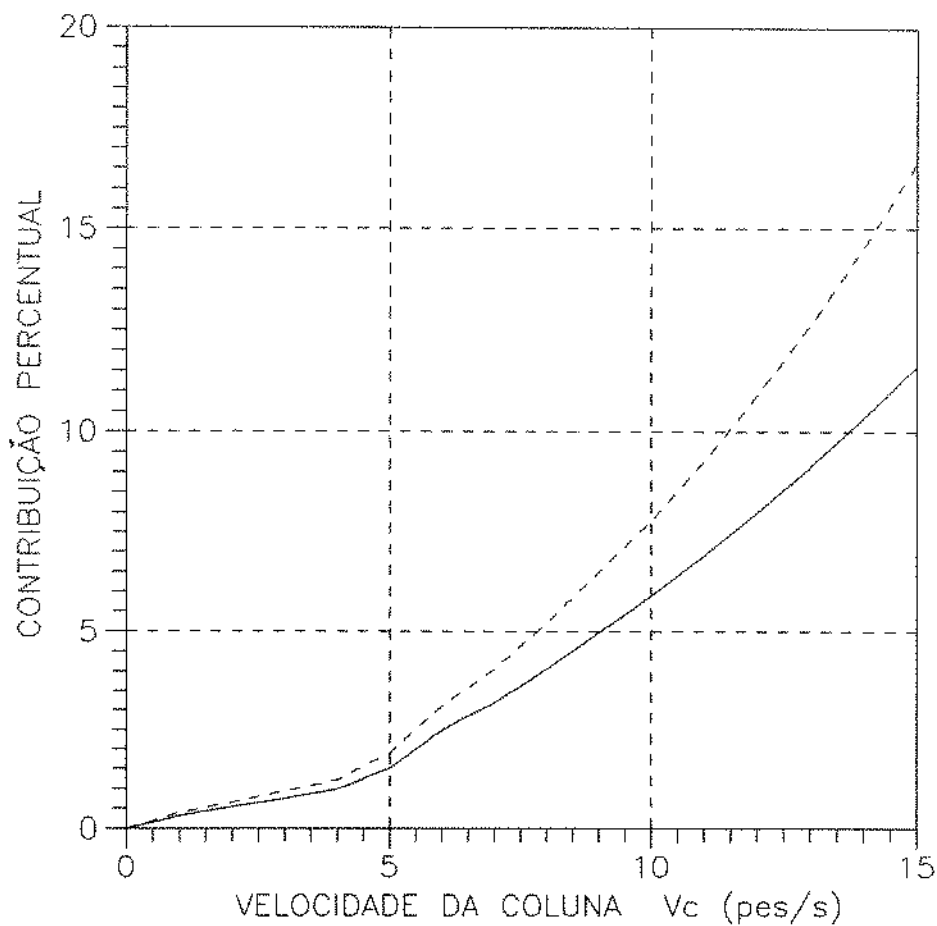
REV - Coluna de revestimento  
 BHA - Coluna de perfuração  
 EI- Contribuição da rigidez de coluna

FIG. 41: POÇO. 1 - EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
 SOBRE O FATOR DE ATRITO  
 Coluna de Perfuração



-----DESCENDO COLUNA  
 —————RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 10000 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA : 3 x 13  
 COMPARAÇÃO COM RIGIDEZ NULA

FIG. 42: POÇO. 1 — EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
 SOBRE O PESO NO GANCHO  
 Coluna de Perfuração



-----DESCENDO COLUNA  
 —————RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 10000 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA : 3 x 13  
 COMPARAÇÃO COM RIGIDEZ NULA

### 5.2.1 SIMULAÇÕES COM MICRO-POÇO

As simulações foram feitas para um micro-poço horizontal de 0.066 m [2.5984 pol] com K.O.P. na superfície, taxa de crescimento do ângulo de 0.001145 rd/m [2 graus/100 pés]. Nas simulações, foram adotados 2 tipos de fluido base água: um de 1.032 kg/m<sup>3</sup> [8.6 lbm/gal] com  $n = 0.779$  e  $K_p = 0.1333 \text{ Pa.s}^n$  [133.3 eq.CP] e outro de 1.260 kg/m<sup>3</sup> [10.5 lbm/gal] com  $n = 0.782$  e  $K_p = 0.189 \text{ Pa.s}^n$  [189 eq.CP]. Profundidade final medida de 1493 m [4900 pés].

Coluna de perfuração consistindo de broca de 0.066 m [2.5984 pol] com um jato de 0.00794 m [10/32 pol] de diâmetro, 30.5 m [100 pés] de comandos de 0.0555 m [2.185 pol] de diâmetro externo e 0.0237 m [0.933 pol] de diâmetro interno, 426.7 m [1400 pés] de tubos de perfuração de 0.05 m [1.968 pol] de diâmetro externo e 0.037 m [1.457 pol] de diâmetro interno, 61 m [200 pés] de comandos e o restante de tubos de perfuração.

A projeção vertical da trajetória do poço e os resultados das simulações encontram-se nas figuras 43 a 50.

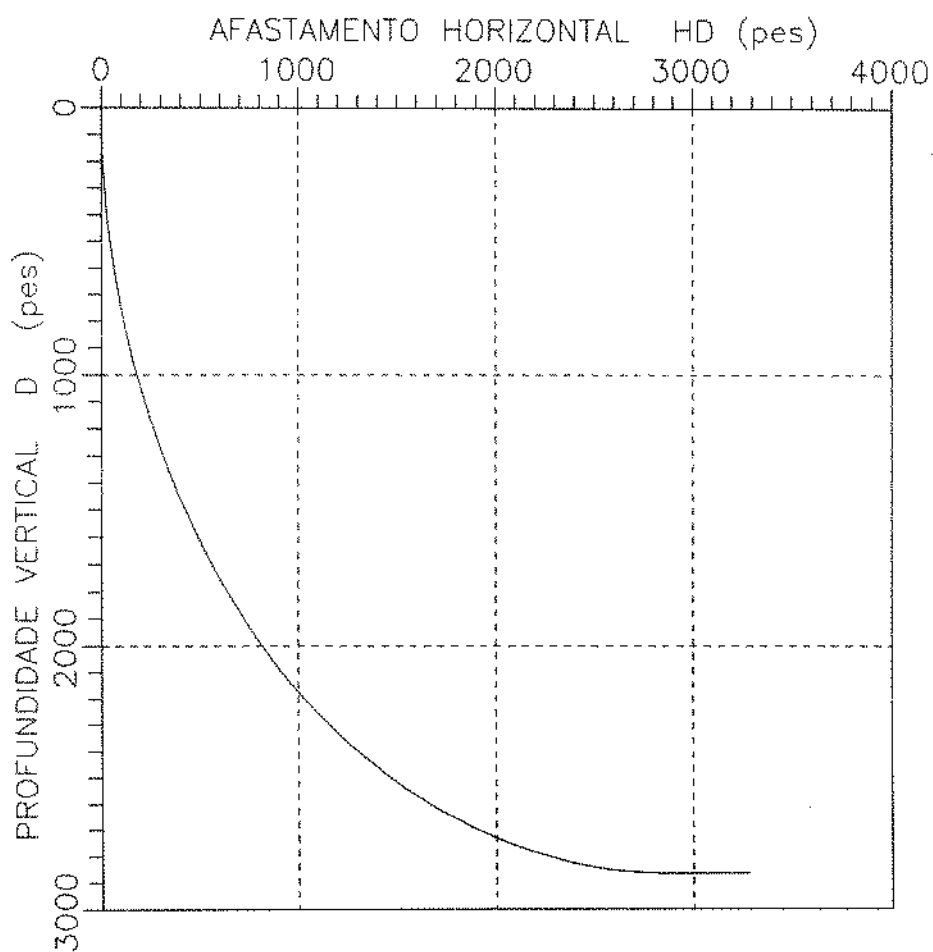
Os resultados mostram que, no caso do micro-poço, devido às pequenas dimensões do poço e da coluna e com espaço anular extremamente pequeno, a influencia do atrito hidrodinâmico é significativa tanto sobre o peso no gancho como sobre o fator de atrito.

Ainda no caso do micro-poco, a influencia do atrito



hidrodinâmico sobre o fator de atrito é maior se comparada com a sua influência sobre o peso no gancho. (vide figs. 47 a 50).

FIG. 43: MICRO-POÇO – TRAJETÓRIA DO POÇO  
Projeção Vertical



P.FINAL = 4900 pes  
P.VERT. = 2865 pes  
POÇO = 2.60 pol

DIREÇÃO: N 0° E

FIG. 44: MICRO-POÇO - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO COLUNA DE PERFURAÇÃO

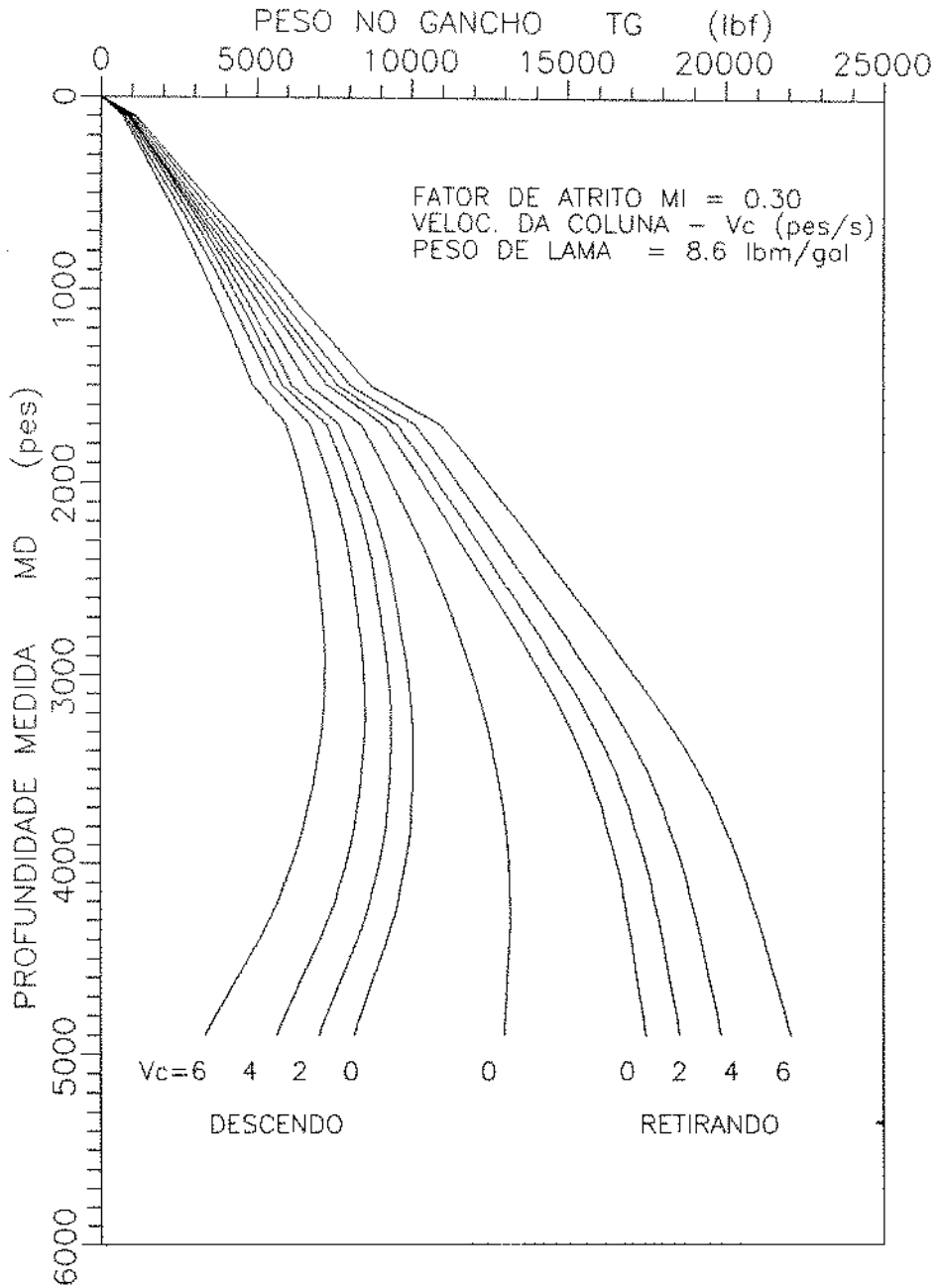


FIG. 45: MICRO-POÇO - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO COLUNA DE PERFURAÇÃO

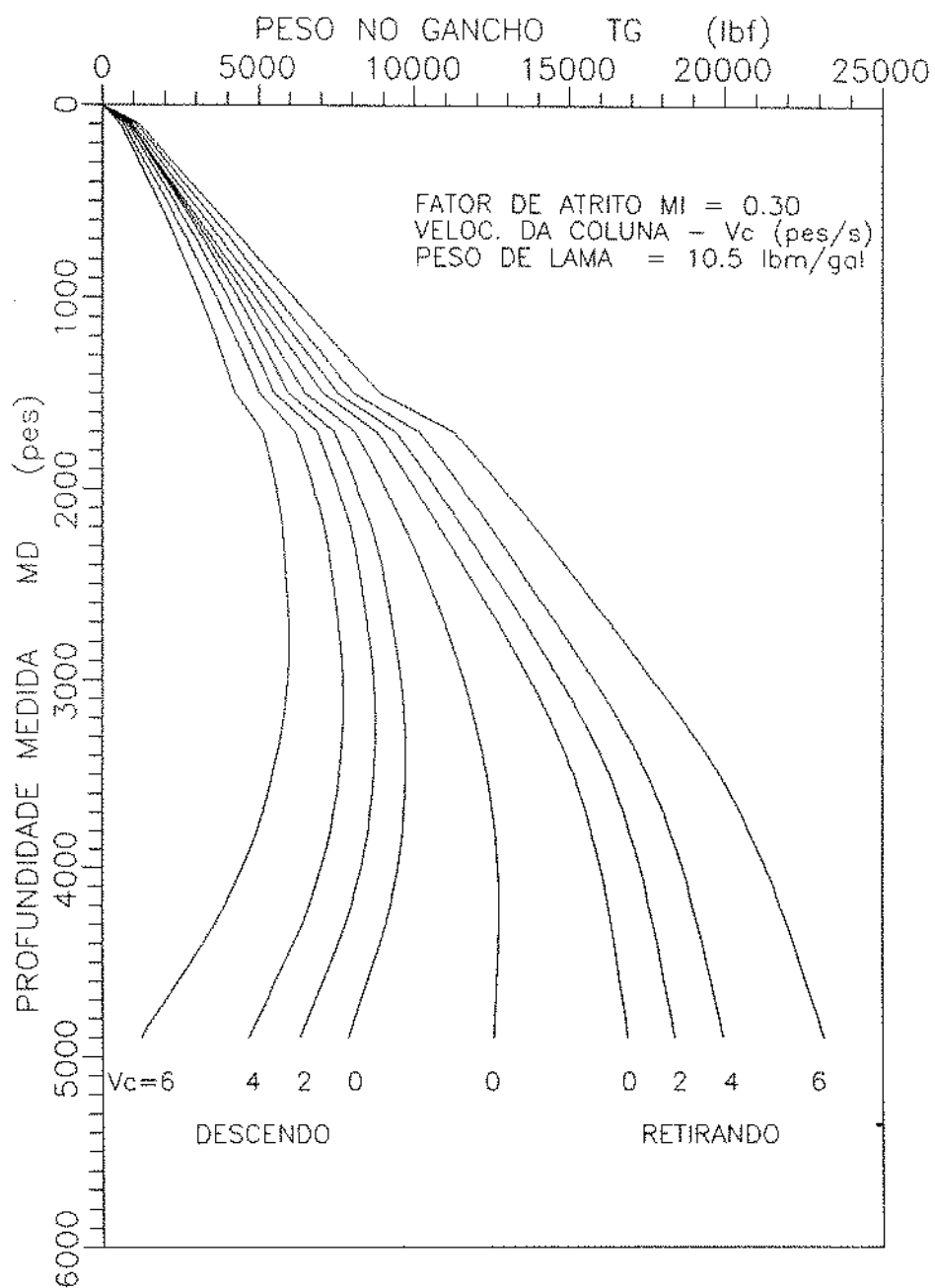


FIG. 46: MICRO-POÇO – PREVISÃO DE TORQUE NA SUPERFÍCIE – Coluna de perfuração

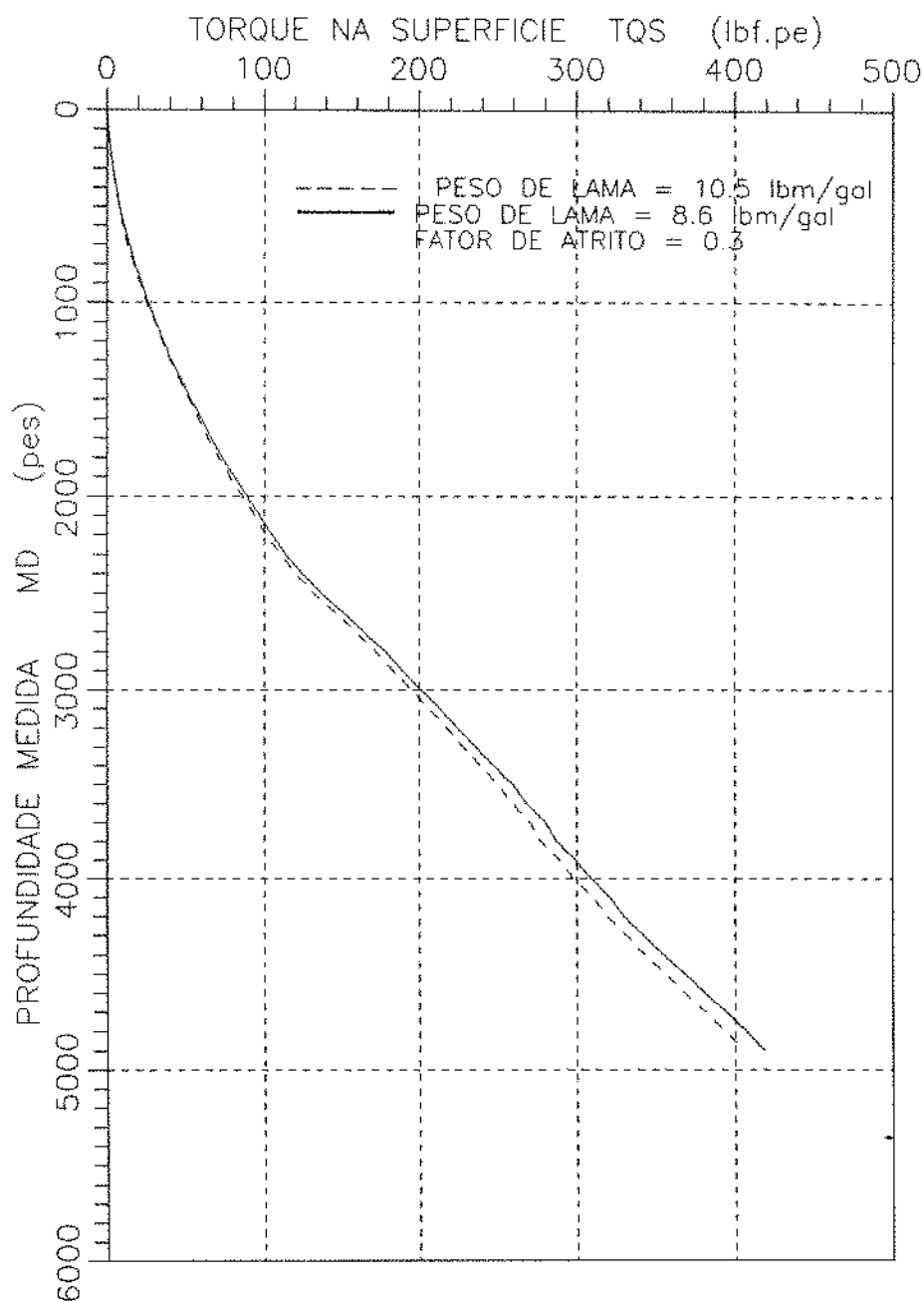
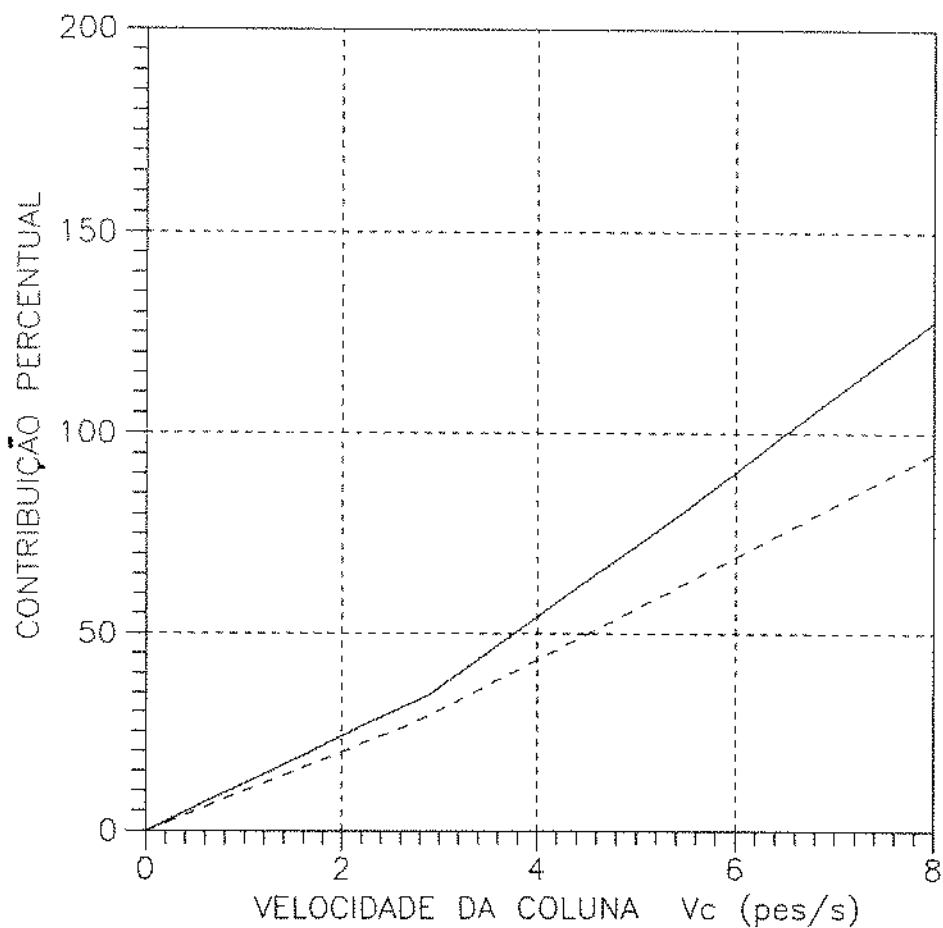
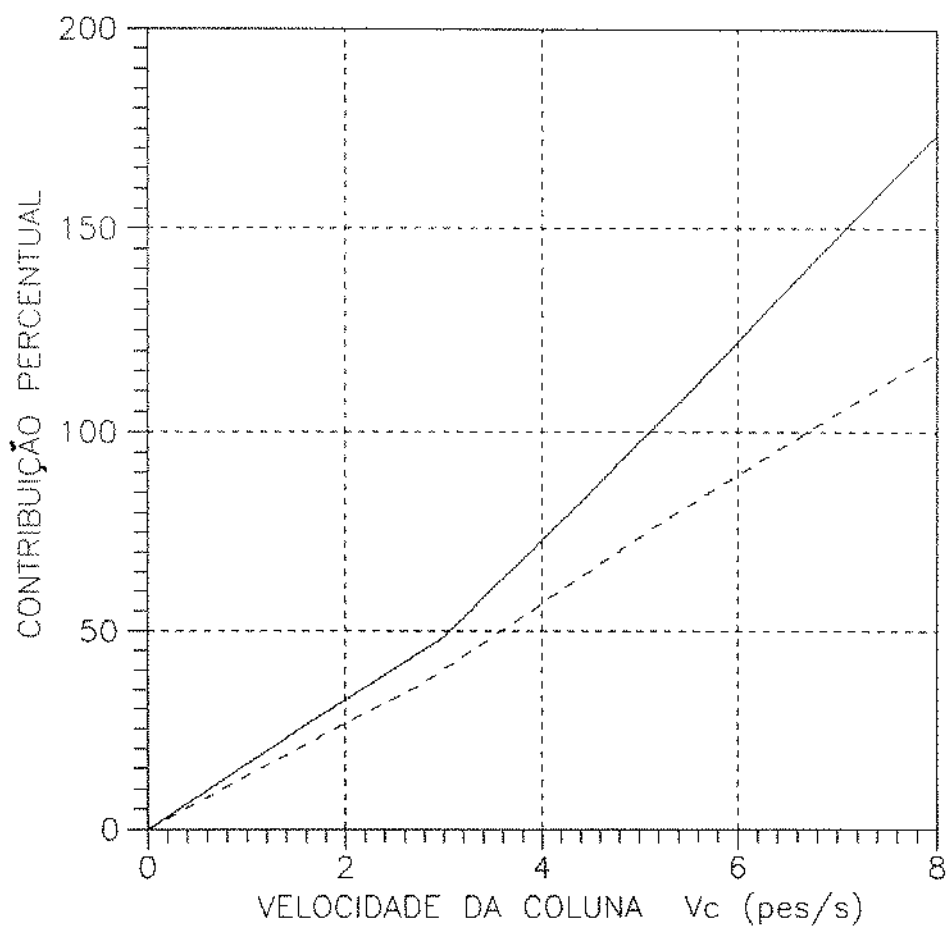


FIG. 47: MICRO-POÇO - EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
SOBRE O FATOR DE ATRITO  
Coluna de Perfuração



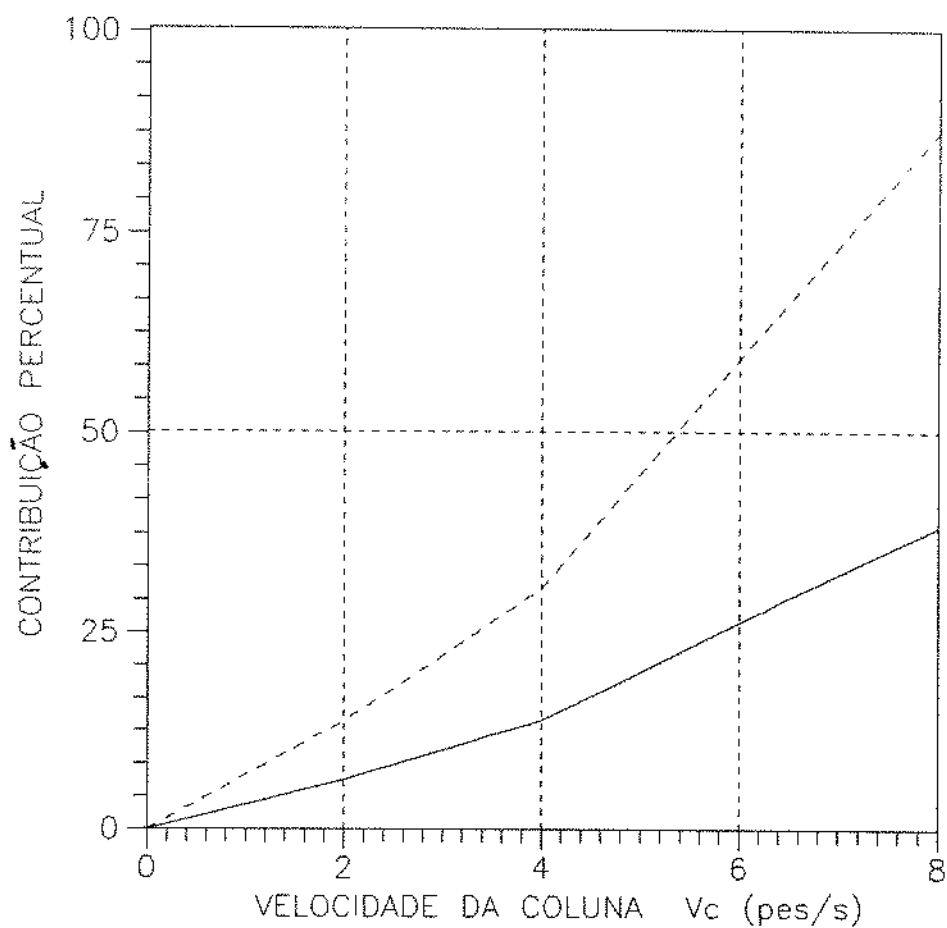
-----DESCENDO COLUNA  
 —————RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 4900 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA :  $1 \times 10$   
 LAMA DE 8.6 lbm/gal

FIG. 48: MICRO.-POÇO — EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
SOBRE O FATOR DE ATRITO  
Coluna de Perfuração



-----DESCENDO COLUNA  
 —————RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 4900 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA :  $1 \times 10$   
 LAMA DE 10.5 lbm/gal

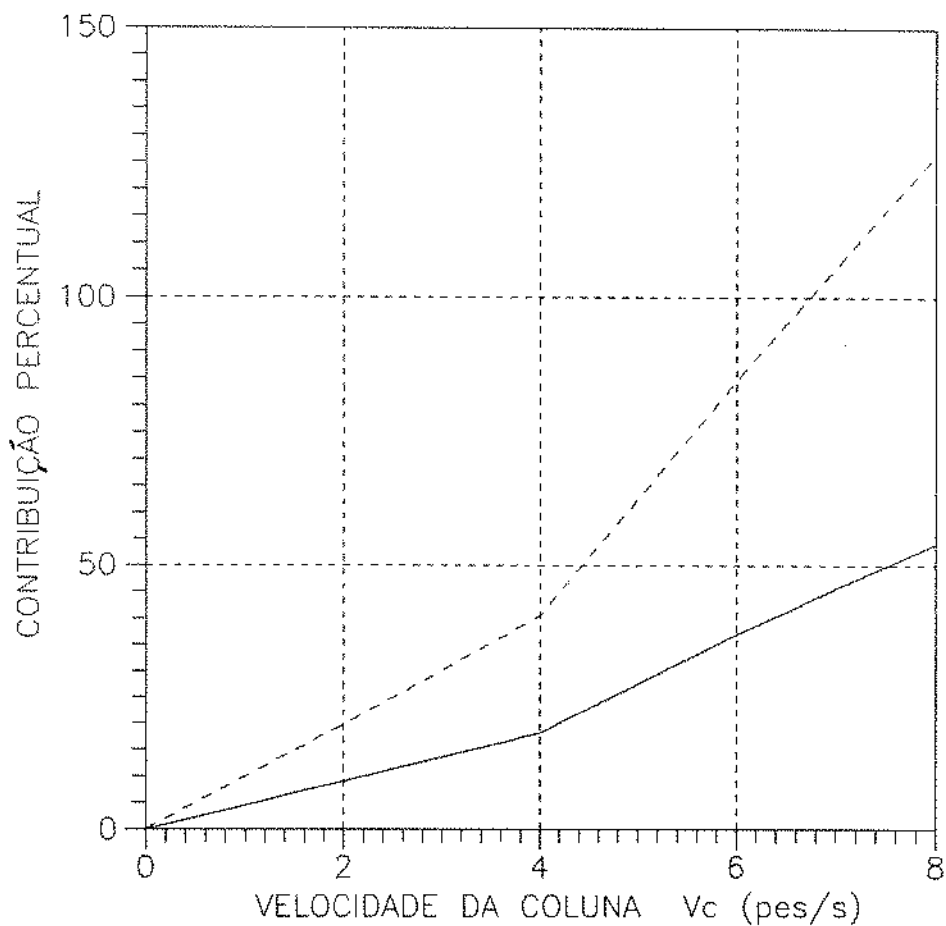
FIG. 49: MICRO-POÇO - EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO SOBRE O PESO NO GANCHO  
Coluna de Perfuração



-----DESCENDO COLUNA  
 \_\_\_\_\_RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 4900 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA :  $1 \times 10$   
 LAMA DE 8.6 lbm/gal



FIG. 50: MICRO-POÇO - EFEITO DO ATRITO HIDRODINÂMICO  
 SOBRE O PESO NO GANCHO  
 Coluna de Perfuração



-----DESCENDO COLUNA  
 \_\_\_\_\_RETIRANDO COLUNA  
 PROFUNDIDADE = 4900 pes  
 FATOR DE ATRITO ( $V_c=0$ ) = 0.30  
 JATOS DA BROCA :  $1 \times 10$   
 LAMA DE 10.5 lbm/gal

### 5.3 DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS NO POÇO

Neste trabalho, o diagnóstico de problemas no poço baseia-se na monitoração de 3 parâmetros :

- o PESO NO GANCHO
- o TORQUE NA SUPERFÍCIE
- o FATOR DE ATRITO APARENTE DO POÇO

Com a análise destes parâmetros juntamente com outros dados convencionais da perfuração, tais como: litologia da formação, pressões e vazões de circulação, etc; pretende-se detectar algum problema no poço.

Para maior precisão nos resultados, optou-se em considerar situações de descidas ou retiradas de colunas sem a rotação da mesma e sem circulação de fluido no poço utilizando as bombas de lama.

O regime transitório de movimentação da coluna não é considerado, sendo que somente os dados em regime permanente de velocidade devem ser usados.

A influência da característica do reboco formado pelo fluido defronte às formações porosas também não é considerada separadamente, e sim, incorporada no valor resultante do fator de atrito aparente.

Maidla (3) concluiu que, para valores baixos de Razão de Arraste "DWR" há uma grande variação do fator de atrito, estabilizando-se para valores de "DWR" superiores a 25 %, excluindo portanto, poços verticais ou de pequenas inclinações.

Dois procedimentos básicos para o diagnóstico são propostos :

o Torques e pesos no gancho medidos durante as manobras de colunas são comparados com os valores estimados. As estimativas são feitas adotando fatores de atrito padrões considerando boas condições mecânicas do poço.

o O segundo método consiste na avaliação da tendência de crescimento do fator de atrito aparente do poço. Para o cálculo do fator de atrito, pode-se adotar um fator de atrito padrão até uma certa profundidade em que se espera estar com o poço em boas condições, por exemplo, até a sapata do último revestimento. Assim, o fator de atrito calculado será o correspondente ao restante do poço.

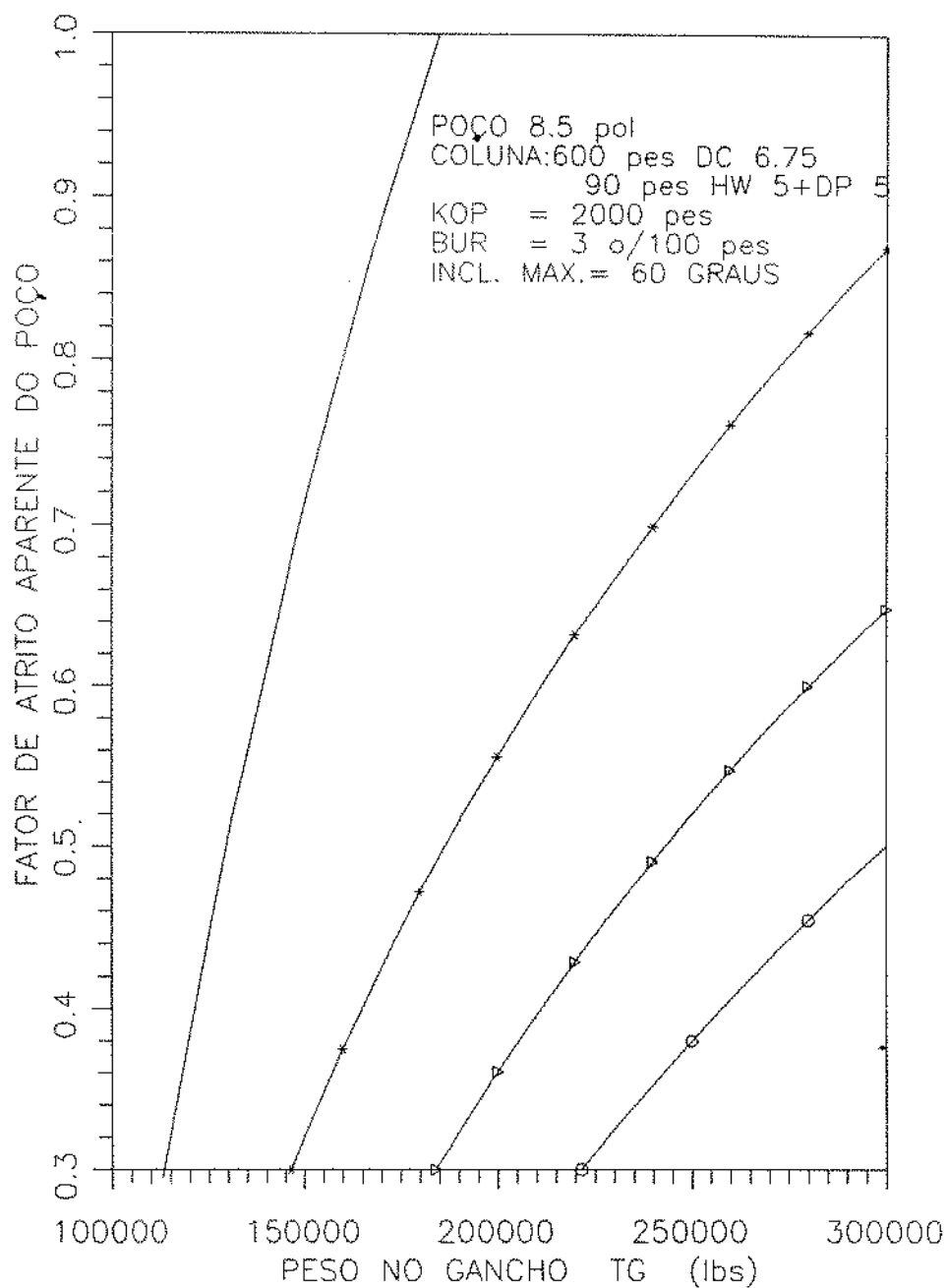
Em ambos os métodos, é importante a comparação dos pesos no gancho, torques e fatores de atrito aparente que são obtidos nas diversas manobras de colunas.

A sensibilidade do fator de atrito quanto aos aumentos do peso no gancho ou do torque é ilustrada nas figuras 51 e 52. A simulação foi feita para um POÇO X de 0.216 m [8.5 pol] do tipo BUILD and HOLD com K.O.P. a 610 m [2000 pés], taxa de crescimento do ângulo de 0.00172 rd/m [3 graus/100 pés], inclinação máxima de  $\pi/3$  rd [60 graus] e peso do fluido de 1200 kg/m<sup>3</sup> [10 lbm/gal] com  $n = 0.7$  e  $K_p = 0.15 \text{ Pa.s}^n$  [150 eq.CP]. Coluna de perfuração consistindo de broca de 0.216 m

[8.5 pol] com 3 jatos de 0.0103 m [13/32 pol], 182.9 m [600 pés] de comandos de 0.172 m [6.75 pol] , 27.4 m [90 pés] de tubos pesados (HW) de 0.127 m [5 pol] e tubos de 0.127 m [5 pol] .

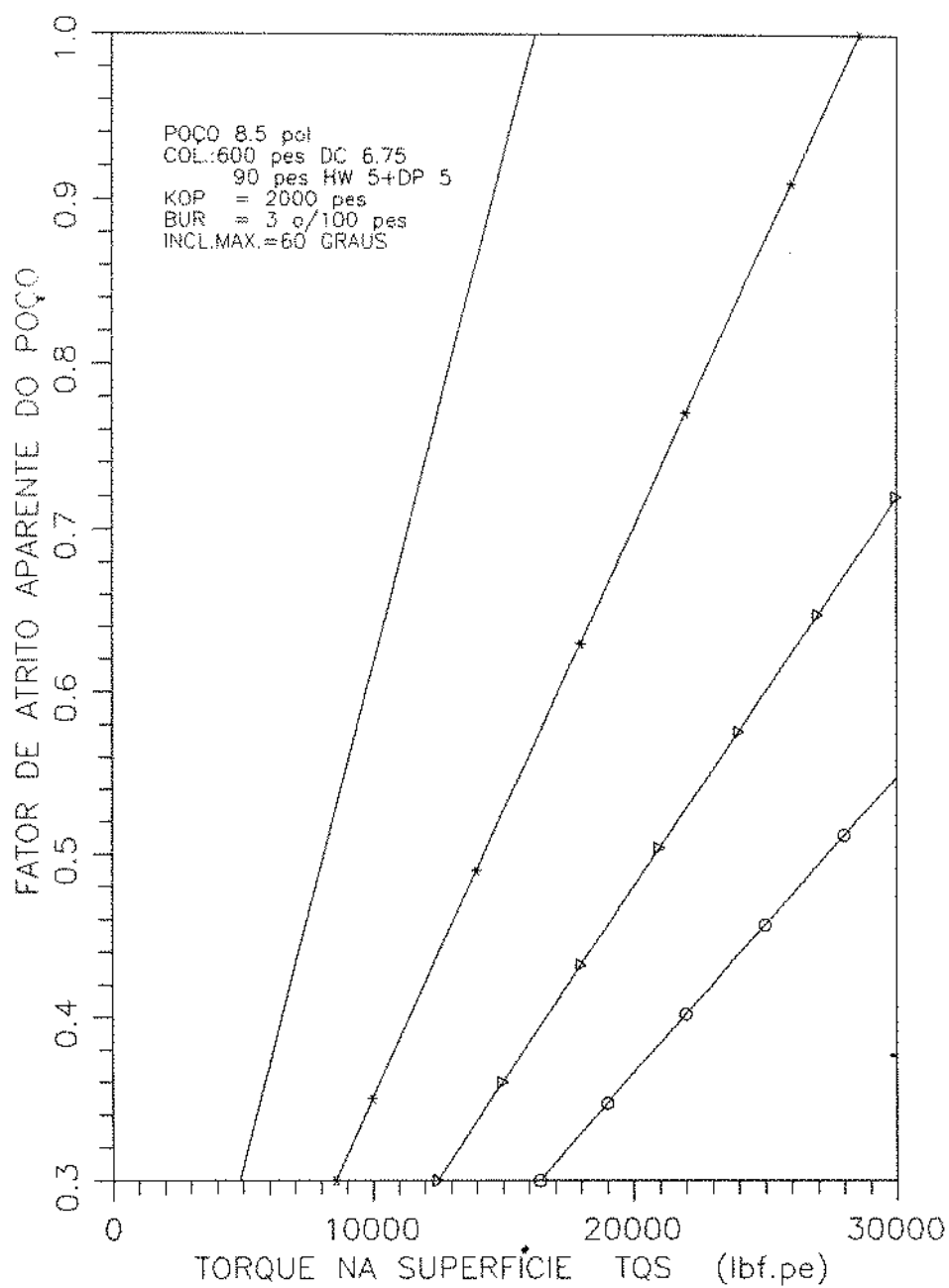
Ambas as figuras mostram maior sensibilidade do fator de atrito em poços mais rasos, onde, pequenos incrementos de peso no gancho ou no torque, conduzem a grandes aumentos no fator de atrito. Portanto a monitoração no campo, do peso no gancho e do torque utilizando equipamentos precisos são recomendáveis.

FIG. 51: POÇO X - EFEITO DO ARRASTE SOBRE O FATOR DE ATRITO



- ○ ○ ○ ○ 10000 pes
- △ △ △ △ △ 8000 pes
- \* \* \* \* \* 6000 pes
- 4000 pes

FIG. 52: POÇO X – EFEITO DO TORQUE SOBRE O FATOR DE ATRITO



○○○○○○ 10000 pes  
 ▽▽▽▽▽ 8000 pes  
 \* \* \* \* \* 6000 pes  
 ————— 4000 pes

### 5.3.1 SIMULAÇÕES DE PROBLEMAS NO POÇO

#### 5.3.1.1) SIMULAÇÃO DE CHAVETA

É considerada como uma solicitação de tração adicional na profundidade da chaveta durante a manobra. A tração adicional é proporcional ao peso da coluna abaixo da chaveta, da curvatura do poço e da severidade da chaveta.

As funções adotadas para a simulação, são :

$$\text{a) RETIRADA DE COLUNA : } T = T_o. \exp \left\{ \frac{MDe - MDc}{R} . Kc \right\} \quad (51)$$

$$\text{b) DESCIDA DE COLUNA : } T = T_o. \left[ 2 - \exp \left\{ \frac{MDe - MDc}{R} . Kc \right\} \right] \quad (52)$$

$$\text{a) PARA O TORQUE : } TQ = TQ_o. \exp \left\{ \frac{MDe - MDc}{R} . Kc \right\} \quad (53)$$

Onde:

$T_o, TQ_o$  = Tração e torque da coluna sem considerar a chaveta.

$T, TQ$  = Tração e torque da coluna considerando a chaveta.

$MDe$  = Profundidade medida da extremidade da coluna.

$MDc$  = Profundidade medida da chaveta.

$Kc$  = Constante adimensional que depende da severidade da chaveta, do tipo da formação e do poço/coluna.

$R$  = Raio de curvatura do poço na profundidade de simulação de chaveta.

$K_c$  pode ser escolhido em função da influência desejada da chaveta. Por exemplo, da eq. (51),

$$K_c = \frac{R \cdot \ln (T/T_0)}{(MDe - MDc)}$$

Adotando como padrão :  $(MDe - MDc) = 2133 \text{ m [7000 pés]}$

$$\beta = 0.001718 \text{ rd/m [3 graus/100pés]}$$

Influência desejada : 20 %

Resulta :  $(T/T_0) = 1.2 \quad \therefore \quad K_c = 0.05$

Figs. (53) e (54) foram obtidas simulando-se uma chaveta a 914 m [3000 pés] com  $K_c = 0.05$  para o poço X.

Em ambas as figuras, há um aumento gradual das diferenças entre os valores estimados com a chaveta e sem a chaveta em função da profundidade da extremidade da coluna. Nas retiradas de colunas, estas diferenças são mais acentuadas (fig. 53).

A identificação da existência da chaveta no poço pode ser dificultada devido às curvas de previsões parecerem com as curvas de previsões normais (sem chaveta), porém, com fator de atrito maior.

Assim, dados adicionais devem ser obtidos em manobras posteriores e com medições de peso no gancho e/ou torque no



mesmo intervalo. Comparando-se os resultados com os obtidos nas primeiras medições, pode-se identificar possível ocorrência de chaveta.

Com as previsões de peso no gancho e de torque com a simulação de chaveta, figs. (53) e (54) e considerando fator de atrito igual a 0.30 até a profundidade de 914 m [3000 pés], foram calculados os fatores de atrito aparente correspondente ao restante do poço (fig. 55).

A influência da chaveta sobre o fator de atrito, mostra-se maior nas retiradas de colunas com relação às descidas de colunas e havendo menor influência sobre o torque.

FIG. 53: POÇO X - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
 Simulação de chaveta  
 Coluna de perfuração

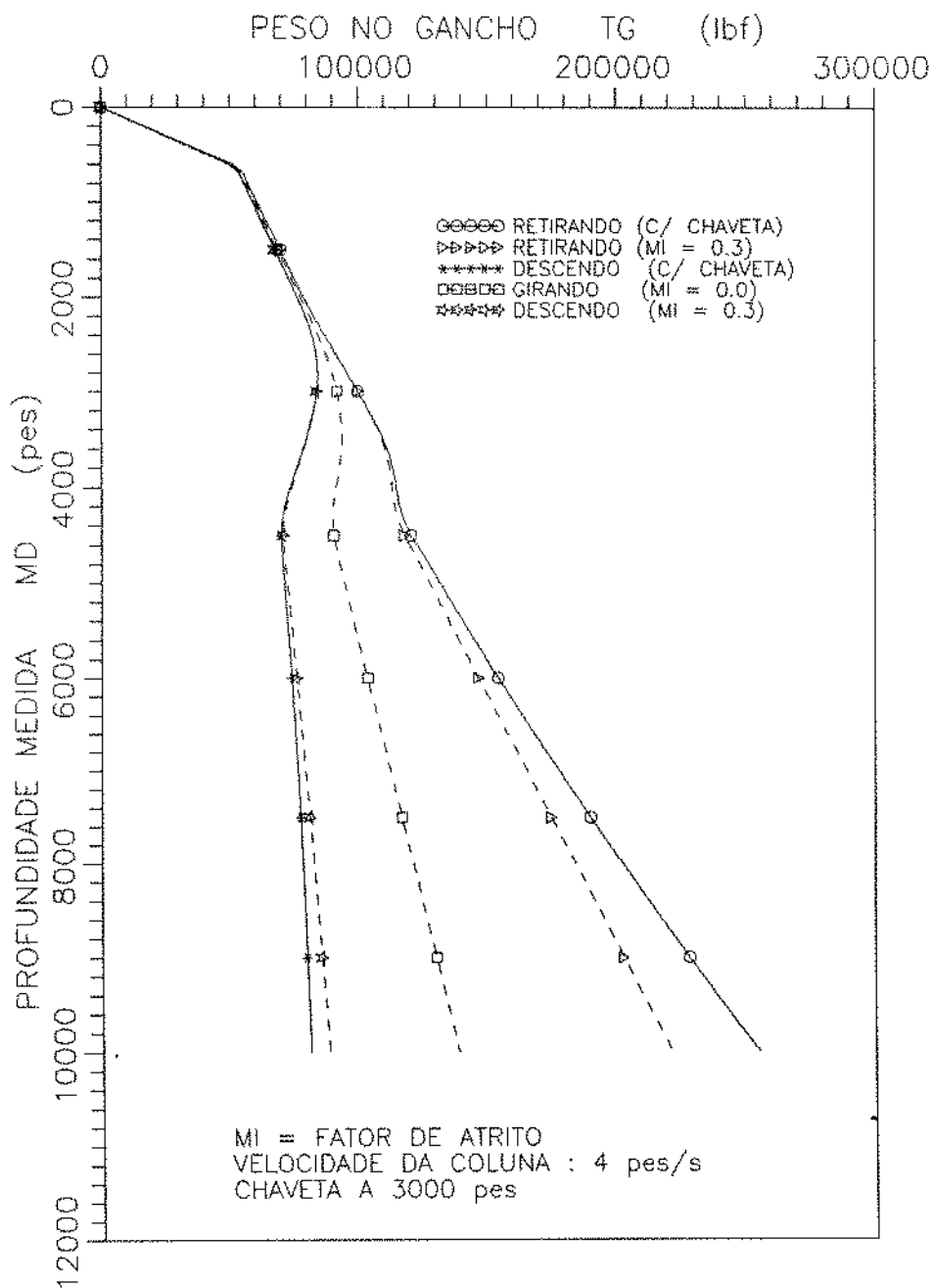


FIG. 54: POÇO X - PREVISÃO DE TORQUE NA SUPERFÍCIE  
Simulação de chaveta  
Coluna de perfuração

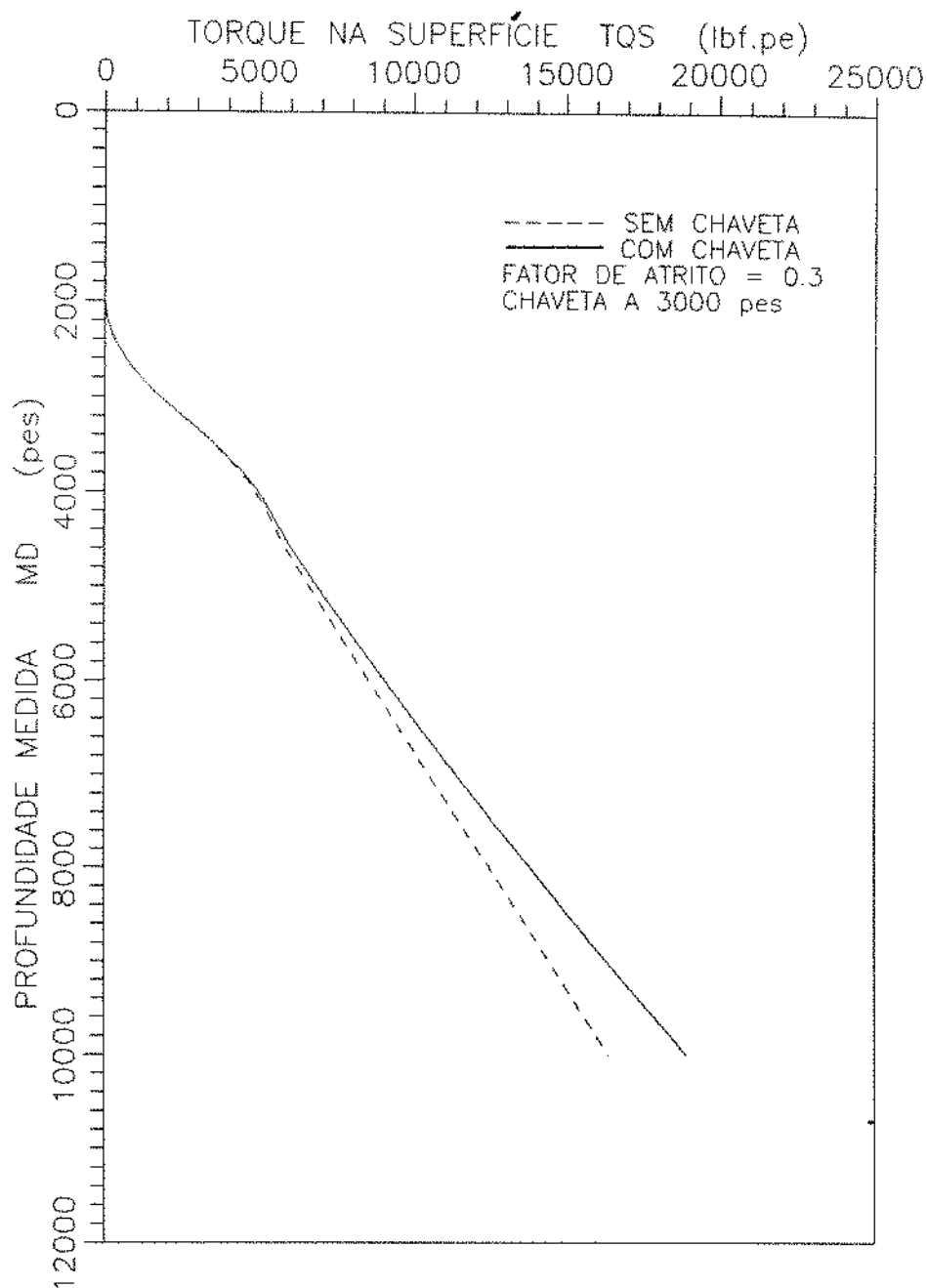
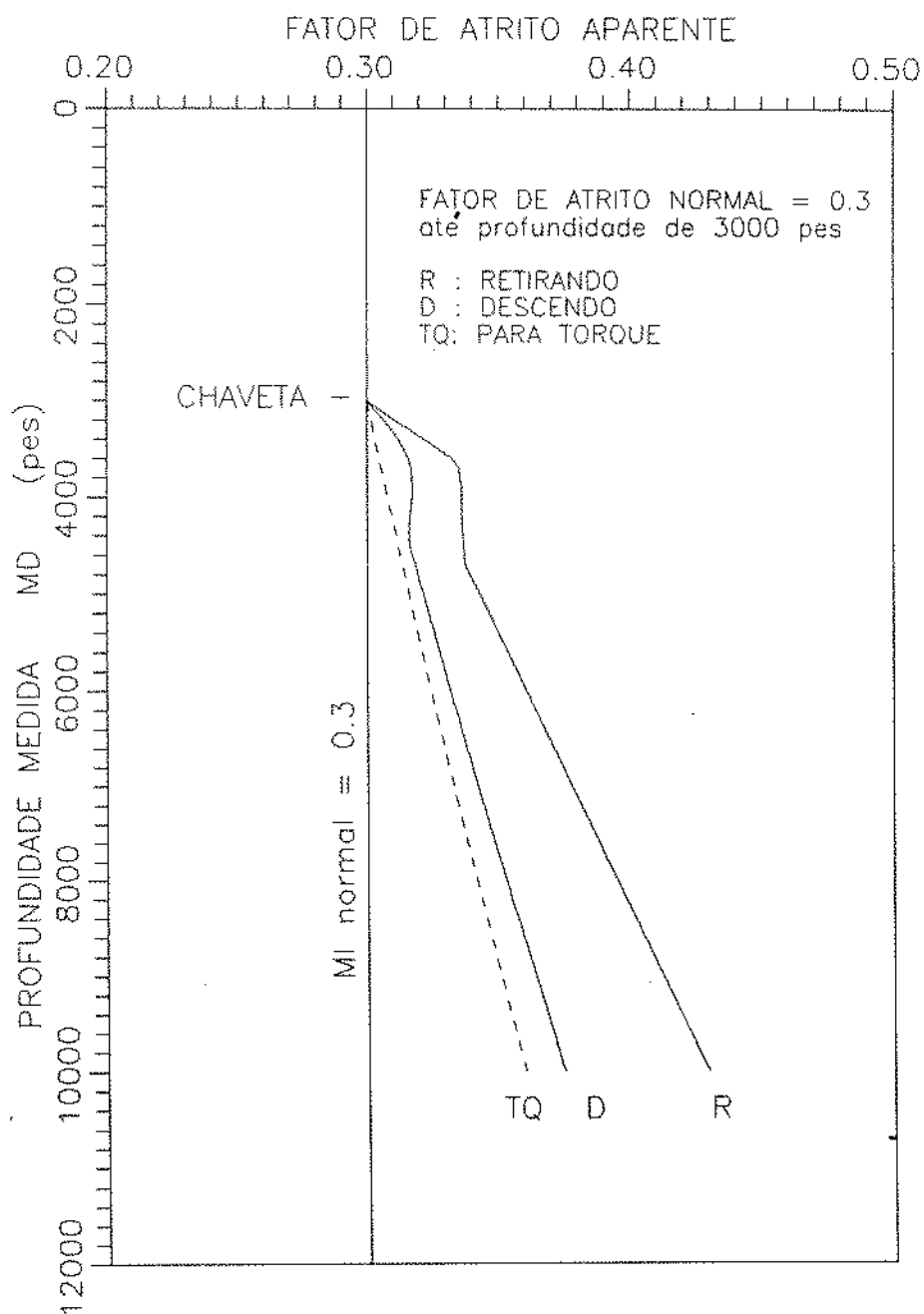


FIG. 55: POÇO X – FATORES DE ATRITO APARENTE  
 Coluna de perfuração  
 Simulação de chaveira



## 5.3.1.2 SIMULAÇÃO DE DESMORONAMENTO e PONTE

Supõe-se que o desmoronamento do poço é mais severo em profundidades maiores e que a sua interferência ocorra de forma localizada.

As funções adotadas para a simulação do desmoronamento, são :

$$\begin{aligned} \text{PARA A TRAÇÃO} : T &= T_0 + \frac{D_d}{D_r} \cdot K_d & p/ D > D_d \\ T &= T_0 & p/ D \leq D_d \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \text{PARA O TORQUE} : TQ &= TQ_0 + \frac{D_d}{D_r} \cdot K_{dtq} & p/ D > D_d \\ TQ &= TQ_0 & p/ D \leq D_d \end{aligned} \quad (55)$$

Onde :

T, T<sub>0</sub>, TQ, TQ<sub>0</sub> : Definidos anteriormente

D<sub>d</sub> : Profundidade vertical de desmoronamento

D<sub>r</sub> : Profundidade vertical de referência

D : Profundidade vertical da extremidade da coluna

K<sub>d</sub>, K<sub>dtq</sub> : Constantes que dependem da severidade do desmoronamento, da formação e do poço/coluna.

Nos exemplos, D, D<sub>d</sub> e D<sub>r</sub> são usados em profundidades medidas como simplificação.

K<sub>d</sub> e K<sub>dtq</sub> podem ser escolhidos em função da influência

desejada do desmoronamento. Nos exemplos, são adotados  $K_d = 266892 \text{ N}$  [60000 lbf] e  $K_{dtq} = 4067 \text{ N.m}$  [3000 lbf.pé] a 3048 m [10000 pés].

Figs. (56) e (57) mostram exemplos de um desmoronamento a 1524 m [5000 pés] no poço X.

Neste caso, o desmoronamento é mais evidente. A medida que se retira a coluna, a redução do peso no gancho é gradual até a profundidade do topo do desmoronamento. Nesta profundidade, ocorre uma redução brusca do peso no gancho.

Fig. (56), mostra uma obstrução no poço (ponte) que se manifesta nas descidas de colunas impedindo o prosseguimento da sua descida.

Considerando fator de atrito 0.30 até a profundidade de 1524 m [5000 pés], foram calculados os fatores de atrito aparente correspondente ao restante do poço para a simulação de desmoronamento (fig. 58).

Pela figura, nota-se que, para pequenos intervalos de desmoronamento, à medida que se retira a coluna, o fator de atrito aparente do poço aumenta gradativamente, havendo um pico no seu valor nas proximidades do local do desmoronamento e reduzindo para o seu valor normal quando a extremidade da coluna passar para a parte superior da zona do desmoronamento.

Devido o valor arbitrado para a constante  $K_{dtq}$ , a

influência do desmoronamento sobre o fator de atrito para o torque pode não ser necessariamente menor que para o peso no gancho como mostra a fig. (58).

Outro importante parâmetro para a análise, é a avaliação dos comportamentos das pressões e vazões de bombeio, que neste caso, espera-se que haja um aumento na pressão ou o bloqueio parcial ou total da vazão de circulação.

FIG. 56: POÇO X - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
 Simulação de desmoronamento e  
 ponte - Coluna de perfuração

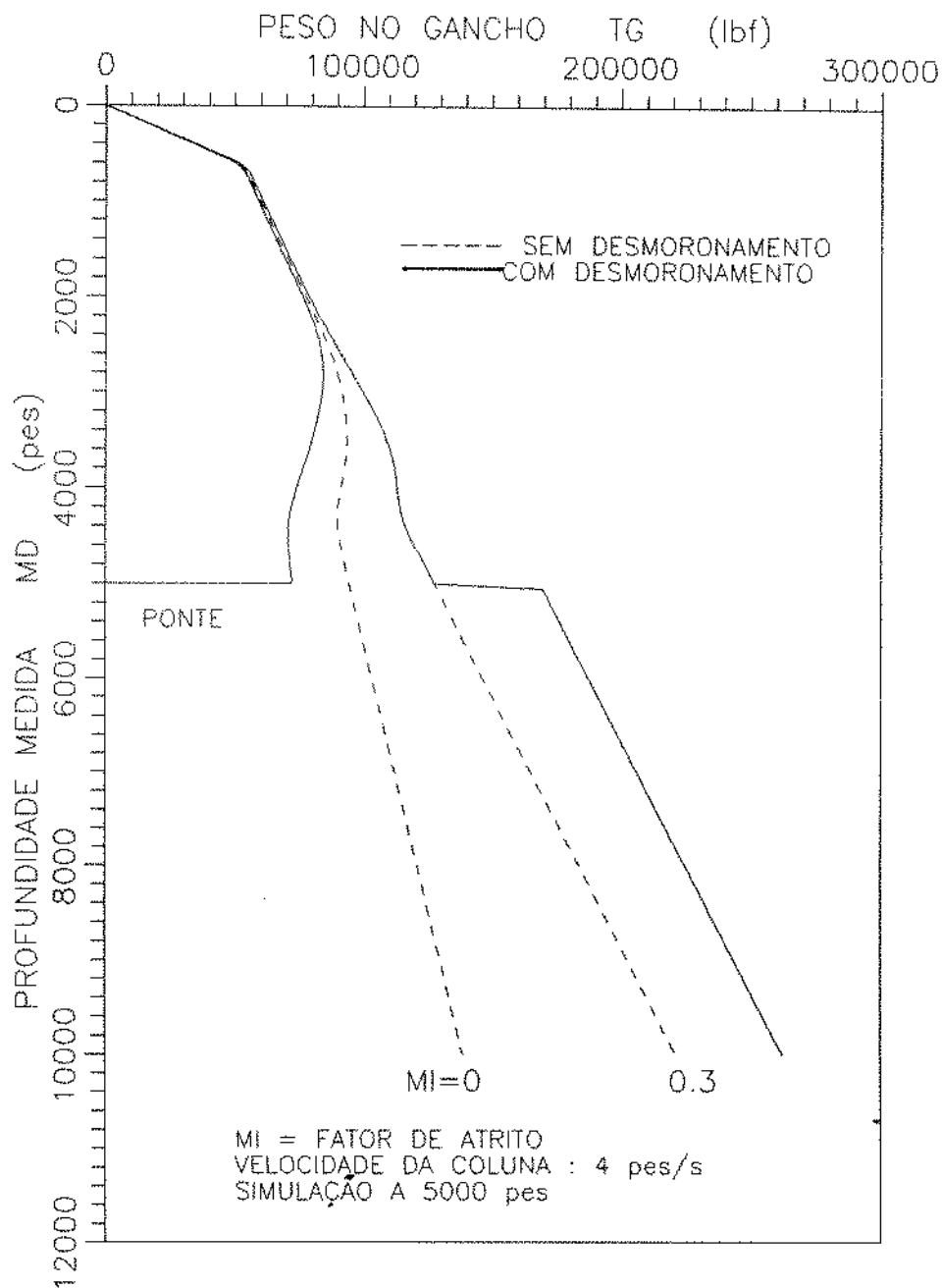




FIG. 57: POÇO X - PREVISÃO DE TORQUE NA SUPERFÍCIE  
Simulação de desmoronamento  
Coluna de perfuração

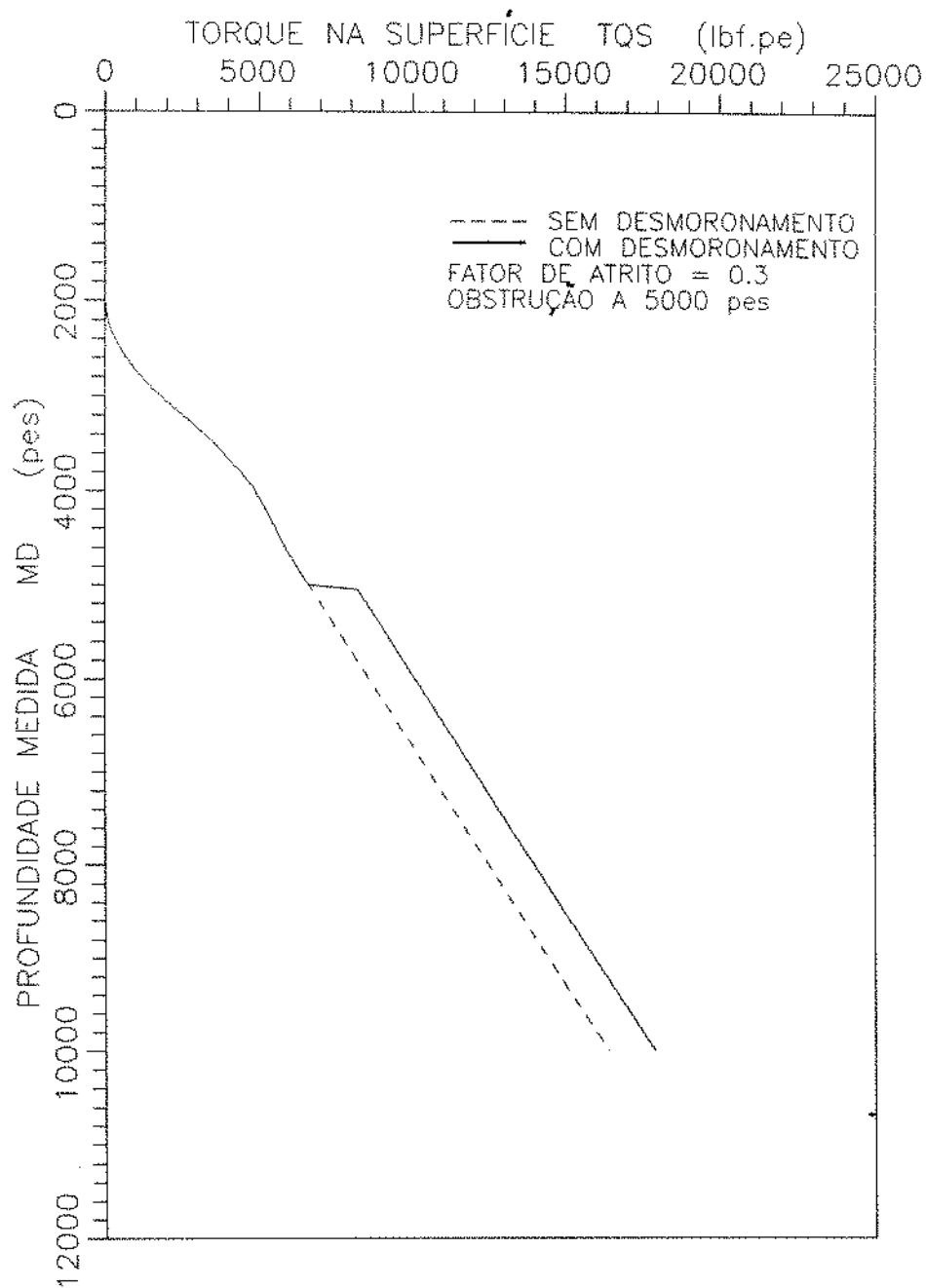
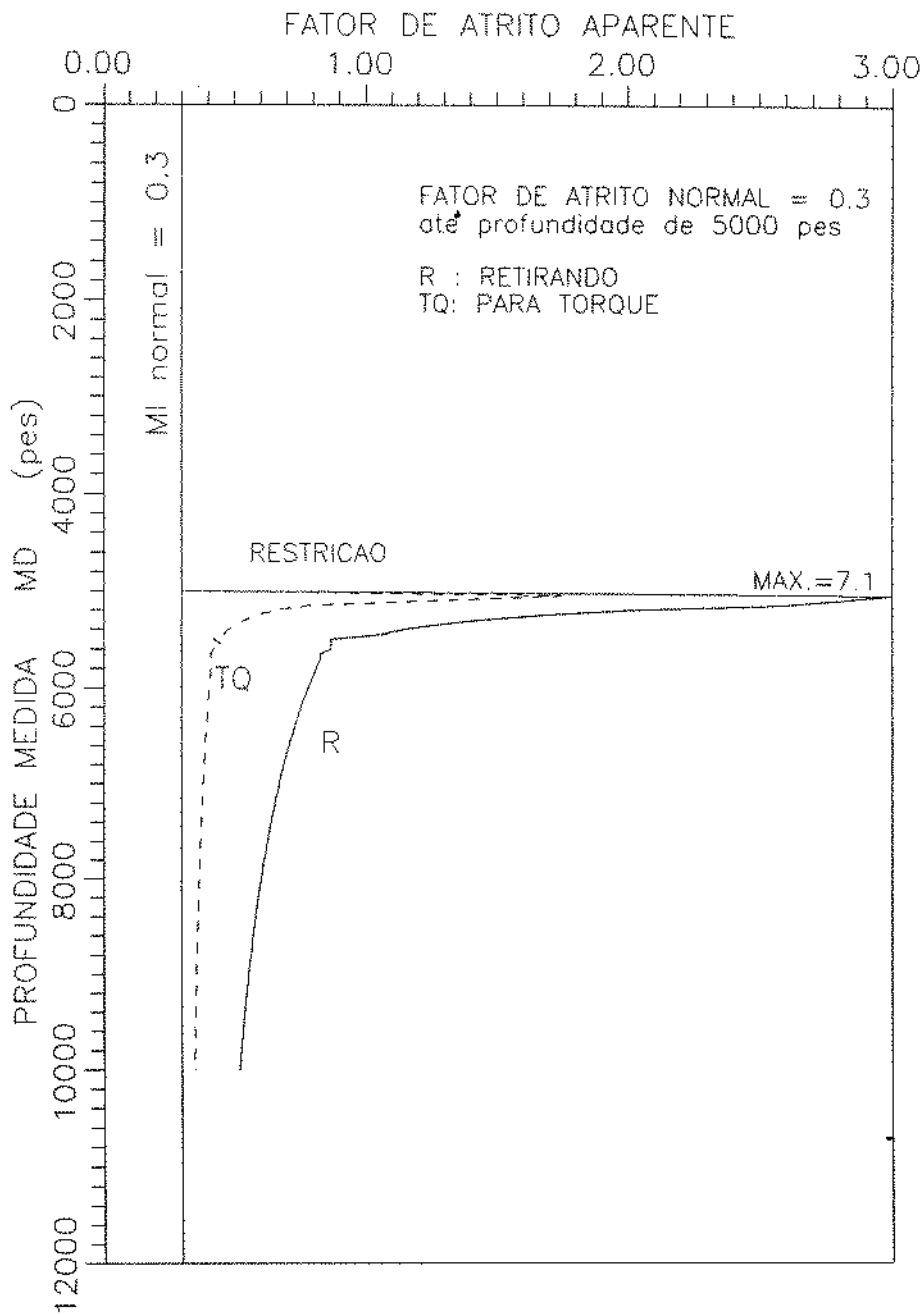


FIG. 58: POÇO X - FATORES DE ATRITO APARENTE  
 Coluna de perfuração  
 Simul. de desmoronamento



## 5.3.1.3 SIMULAÇÃO DE FECHAMENTO DE POÇO

Espera-se que, o fechamento de poço seja mais severo quando o mesmo ocorre em profundidades maiores e que a sua interferência sobre a movimentação da coluna seja proporcional à extensão da coluna sujeita a esse fechamento.

As funções adotadas para a simulação, são :

$$\begin{aligned} \text{PARA A TRAÇÃO} : \Delta T &= \Delta T_o + \frac{D_f(S)}{D_r} \cdot K_f \cdot \Delta S & p/ D > D_f \\ & & (56) \\ \Delta T &= \Delta T_o & p/ D \leq D_f \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PARA O TORQUE} : \Delta T_Q &= \Delta T_{Qo} + \frac{D_f(S)}{D_r} \cdot K_f \cdot R_t j \cdot \Delta S & p/ D > D_f \\ & & (57) \\ \Delta T_Q &= \Delta T_{Qo} & p/ D \leq D_f \end{aligned}$$

Onde :

T , T<sub>o</sub> , T<sub>Q</sub> , T<sub>Qo</sub> , D, D<sub>r</sub> : Definidos anteriormente

S : Comprimento

D<sub>f</sub> : Profundidade vertical de fechamento

K<sub>f</sub> : Constante que depende da severidade do fechamento , da formação, reboco, diferencial de pressão e do poço/coluna.

Nos exemplos, D, D<sub>f</sub> e D<sub>r</sub> são usados em profundidades medidas como simplificação.

Figs. (59) e (60), mostram exemplos de um fechamento de poço no intervalo de 1524 a 2133 m [5000 a 7000 pés] com  $D_r = 3048$  m [10000 pés] e  $K_f = 292$  N/m [20 lbf/pé] no poço X.

Em ambas as figuras, torques e pesos no gancho sofrem incrementos contínuos a partir do topo até a base do fechamento de poço. A partir daí, a coluna continua sujeita à máxima influência do fechamento de poço até a profundidade final.

Fig. (61), foi obtida calculando-se fatores de atrito aparente com os torques e pesos no gancho das figs. (59) e (60) e com fator de atrito 0.30 até a profundidade de 1524 m [5000 pés].

O ponto de inflexão A da fig. (61), significa que tubos de perfuração começa a entrar na zona de poço restrito. Como estes tubos são mais leves que os comandos, a taxa de crescimento do fator de atrito aparente é maior. O ponto B representa a base da zona de restrição.

Imediatamente no topo da zona crítica, o fator de atrito sofre um aumento repentino proporcional à severidade do fechamento de poço e continua aumentando até a profundidade em que o poço se encontra com o seu calibre normal. A partir daí, começa a diminuir gradualmente com o aumento da profundidade. Isto, devido o fator de atrito aparente resultar de uma "média" ponderada entre a extensão de poço ruim com a extensão de poço em boas condições e abaixo do intervalo de poço ruim.

Nota-se também que, tanto para o torque como para o arraste os comportamentos das curvas de fatores de atrito aparente são idênticos.

FIG. 59: POÇO X - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
 Simulação de fechamento de poço  
 Coluna de perfuração

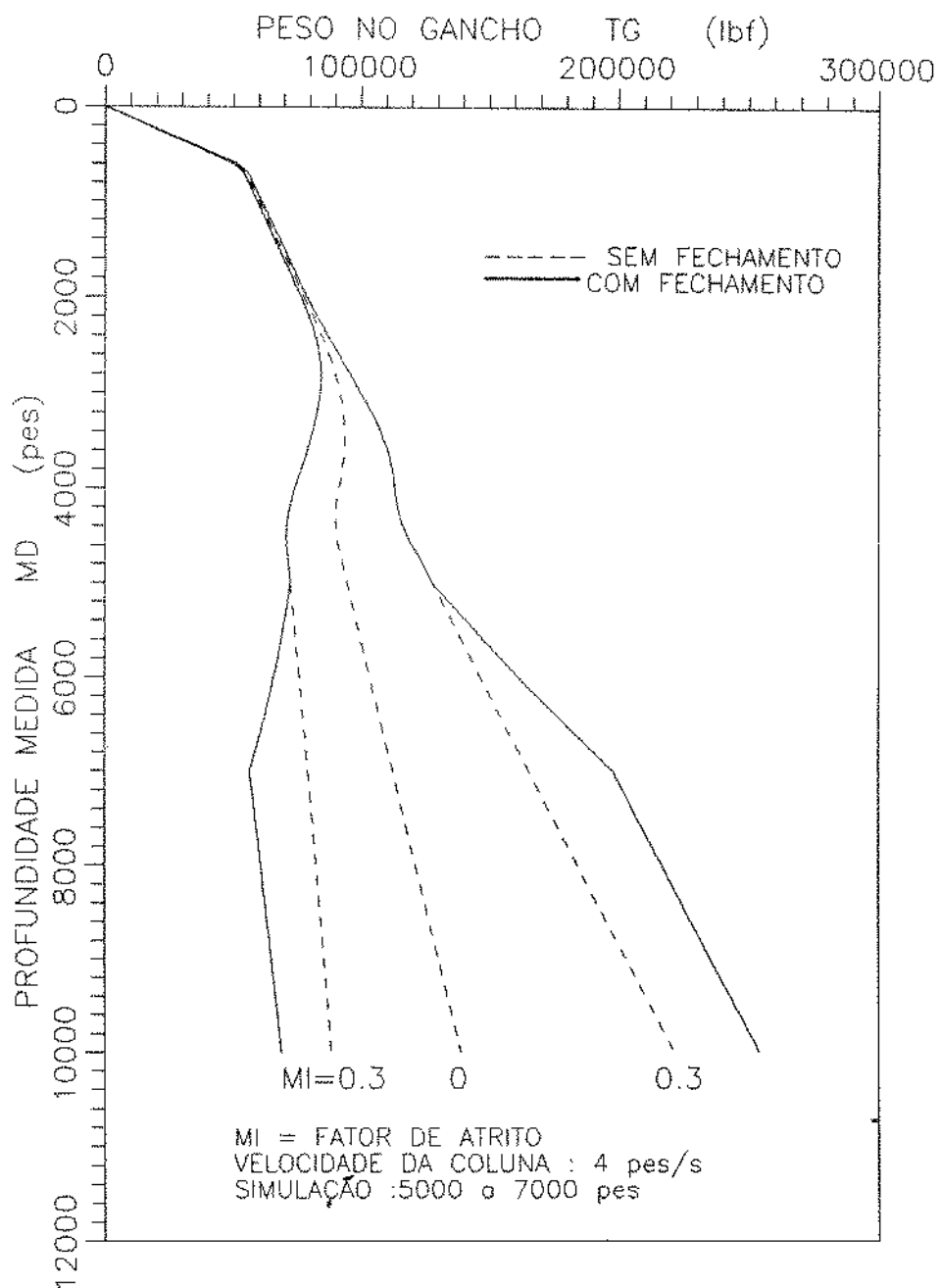


FIG. 60: POÇO X - PREVISÃO DE TORQUE NA SUPERFÍCIE  
Simulação de fechamento de poço  
Coluna de perfuração

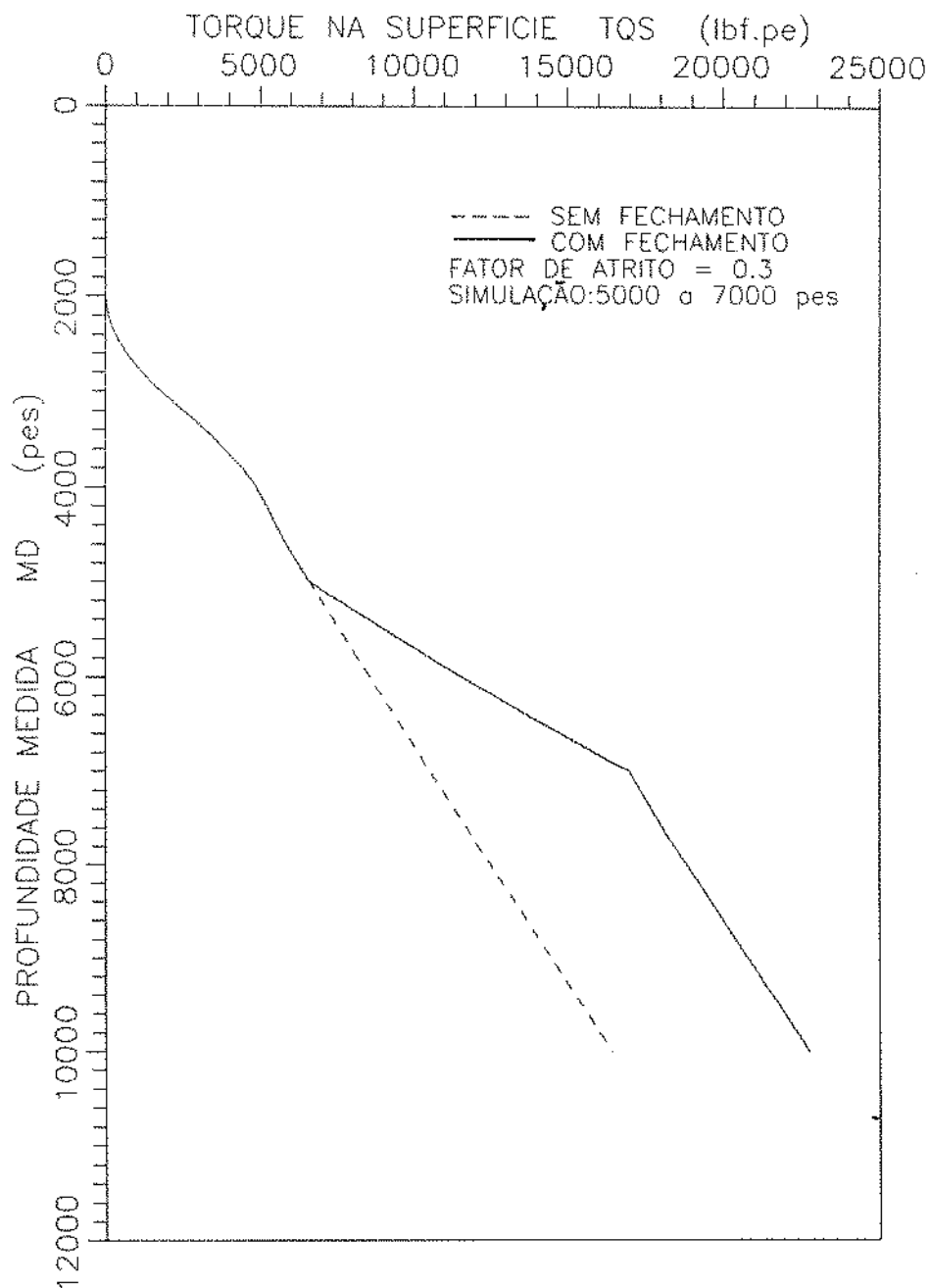
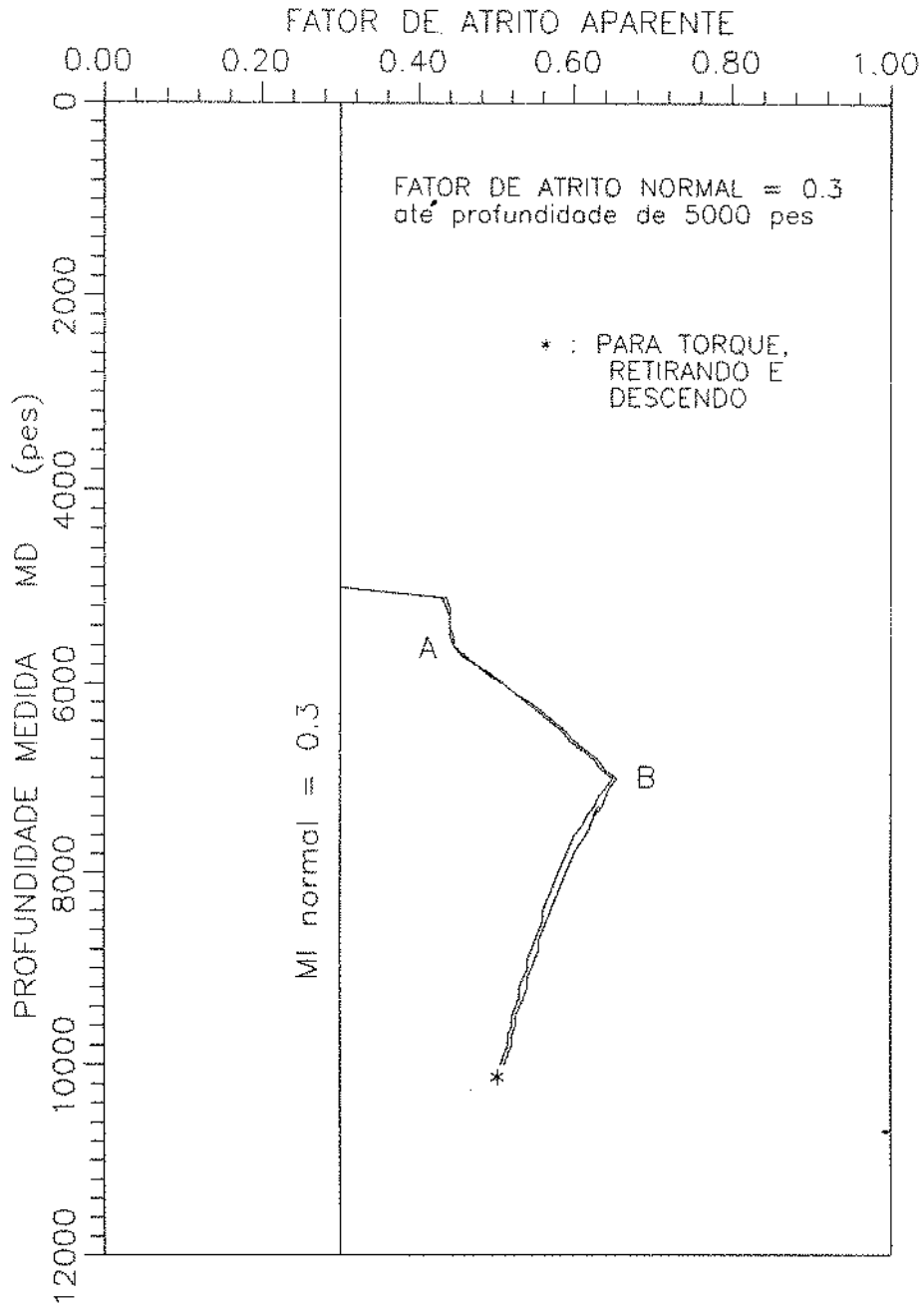


FIG. 61: POÇO X – FATORES DE ATRITO APARENTE  
 Coluna de perfuração  
 Simul. fechamento de poço



#### 5.3.1.4 SIMULAÇÃO DE AMEAÇA DE PRISÃO POR DIFERENCIAL DE PRESSÃO

Normalmente, quando ocorre uma prisão por diferencial de pressão, os esforços normais de contato entre a coluna e as paredes do poço são extremamente altos. Assim, as forças de arraste superam facilmente o limite de capacidade de tração da coluna. Nesta situação, a coluna fica sem os movimentos axiais e de rotação, não havendo porém alterações nas pressões e vazões de bombeio.

Supondo que, esse diferencial de pressão seja relativamente baixo, a tendência de haver uma prisão por diferencial de pressão pode ser simulada adotando-se as funções (56) e (57) do item anterior e com  $Df(S)/Dr = 1$ .

Assim, resultam perfis de peso no gancho, torque e fator de atrito aparente do poço semelhantes às figs. (59), (60) e (61).

#### 5.3.1.5 SIMULAÇÃO DE MÁ LIMPEZA DO POÇO

A simulação de má limpeza do poço pode ser feita adotando-se o mesmo procedimento proposto para a ameaça de prisão por diferencial de pressão (item 5.3.1.4).

Sugere-se para este caso, adotar como intervalo crítico, os trechos de espaços anulares maiores. Na suspeita da



decantação de cascalhos, os comportamentos dos esforços da coluna pode ser semelhante a um desmoronamento (item 5.3.1.2) na altura dos comandos e estabilizadores.

Para uma profundidade fixa da extremidade da coluna, as diminuições de pesos no gancho, torques e fatores de atrito aparente em função do tempo de circulação, podem indicar como possível causa do problema, a má limpeza do poço.

### 5.3.2 EXEMPLOS DE CAMPO

Figs. (62) a (65) são exemplos de previsões de pesos no gancho e de fatores de atrito aparente para o diagnóstico.

A título de exemplo, foi incluído o poço 2 embora o mesmo em toda sua extensão manteve-se com DWR inferior a 25 % para a coluna utilizada.

Figs. (63) e (65) foram elaboradas adotando-se 2 valores para o fator de atrito, um normal e outro que considera a interferência do poço.

As interferências do poço são mais evidentes nos perfis de fatores de atrito aparente se comparadas com os perfis de pesos no gancho.

No poço 2, os perfis de pesos no gancho e de fatores de atrito aparente sugerem a existência de um possível fechamento de poço de pequena gravidade. Para melhor avaliação, são necessários informações adicionais sobre o poço.

O poço 4, horizontal, apesar de poucos dados de medições, mostra também um possível problema a partir da profundidade de 670 m [2200 pés] nas operações de retiradas de coluna. Os comportamentos dos fatores de atrito aparente indicam como possível causa do problema, a má limpeza do poço, uma vez que, para a descida de coluna o poço mostra-se em boas condições.

FIG. 62: POÇO 2 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
 PARA DIAGNÓSTICO DE POÇO  
 Descida de revestimento

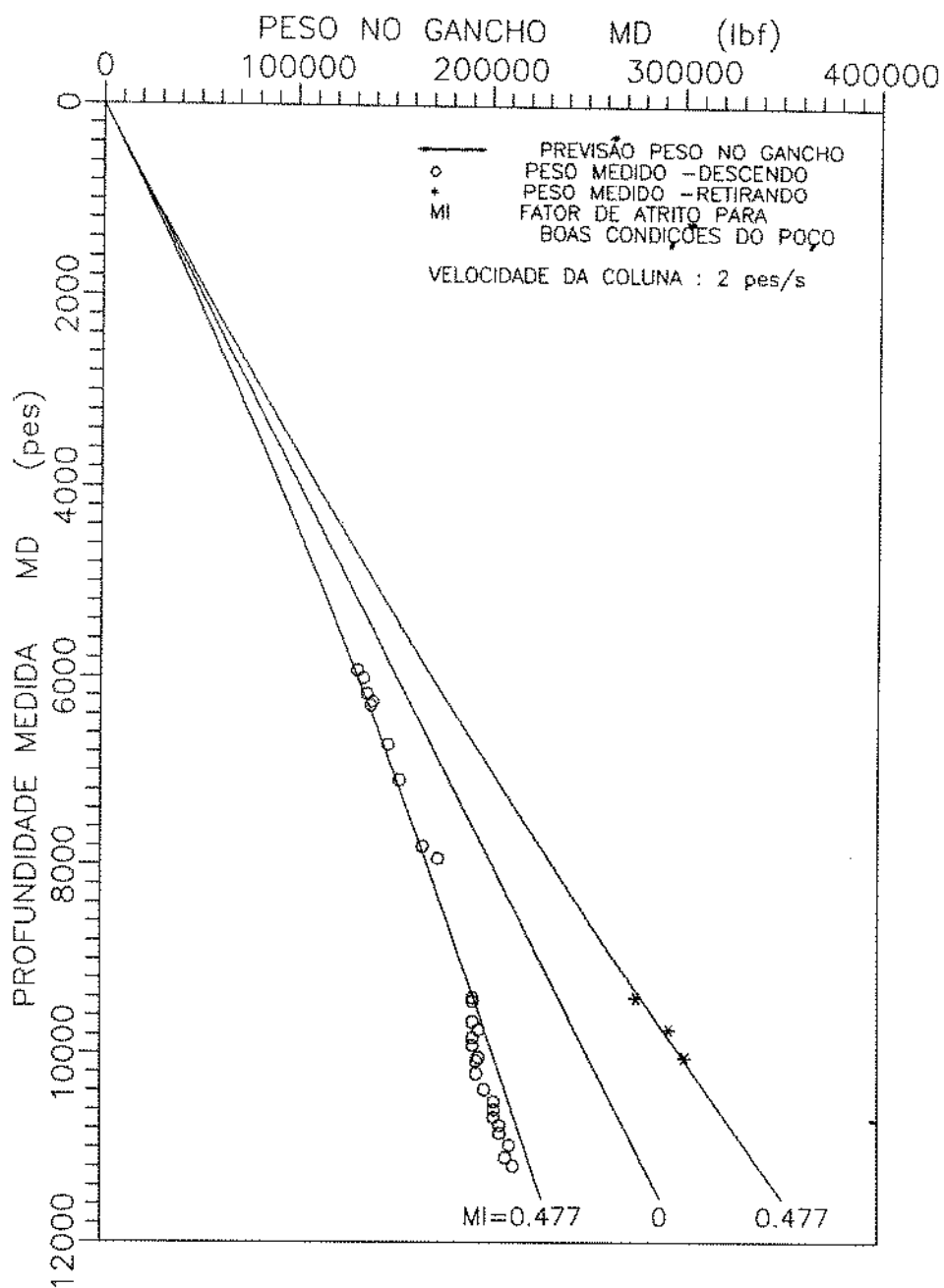


FIG. 63: POÇO 2 - FATORES DE ATRITO APARENTE  
 PARA DIAGNÓSTICO DE POÇO  
 Descida de revestimento

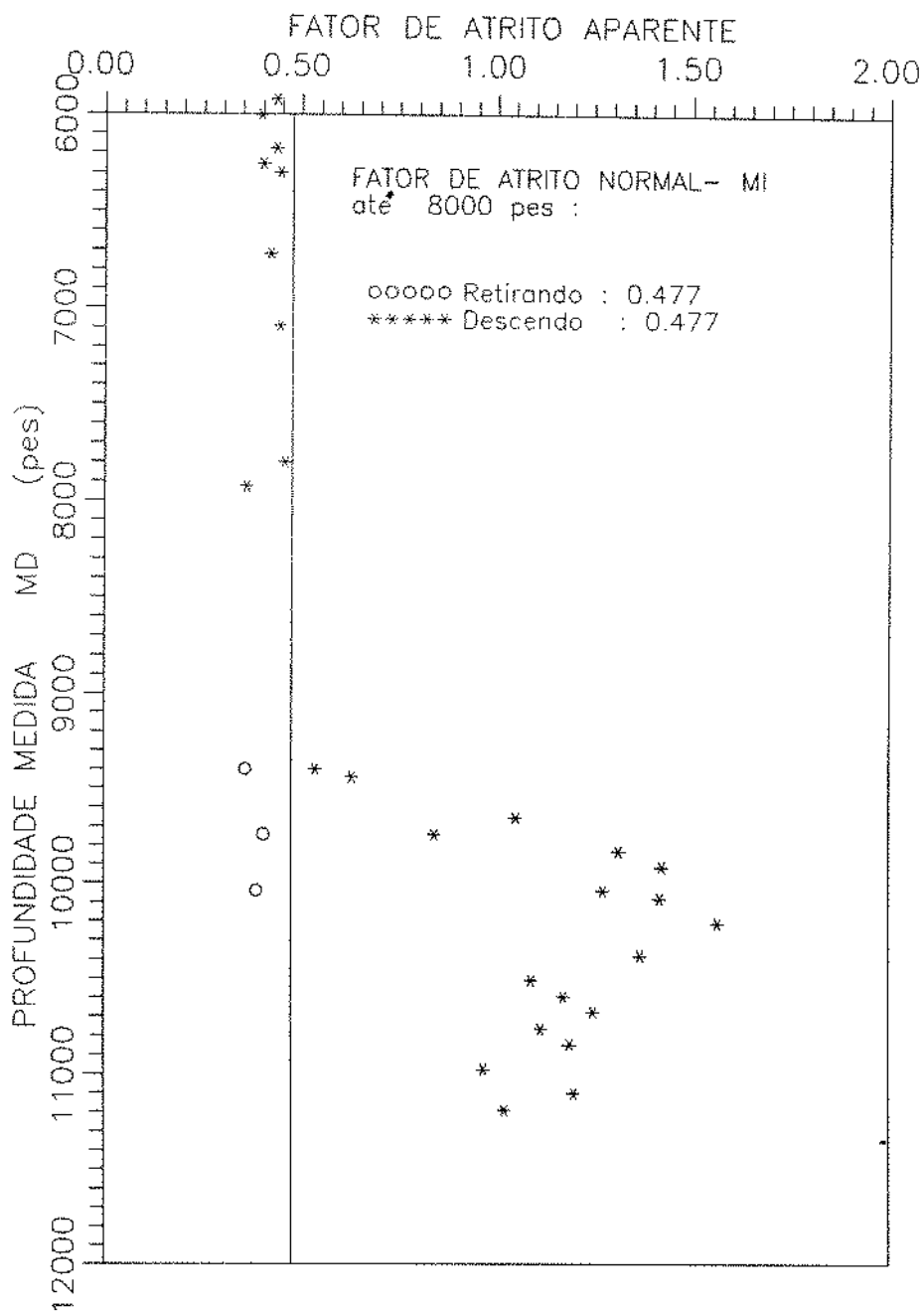


FIG. 64: POÇO 4 - PREVISÃO DO PESO NO GANCHO  
PARA DIAGNÓSTICO DE POÇO  
Coluna de perfuração

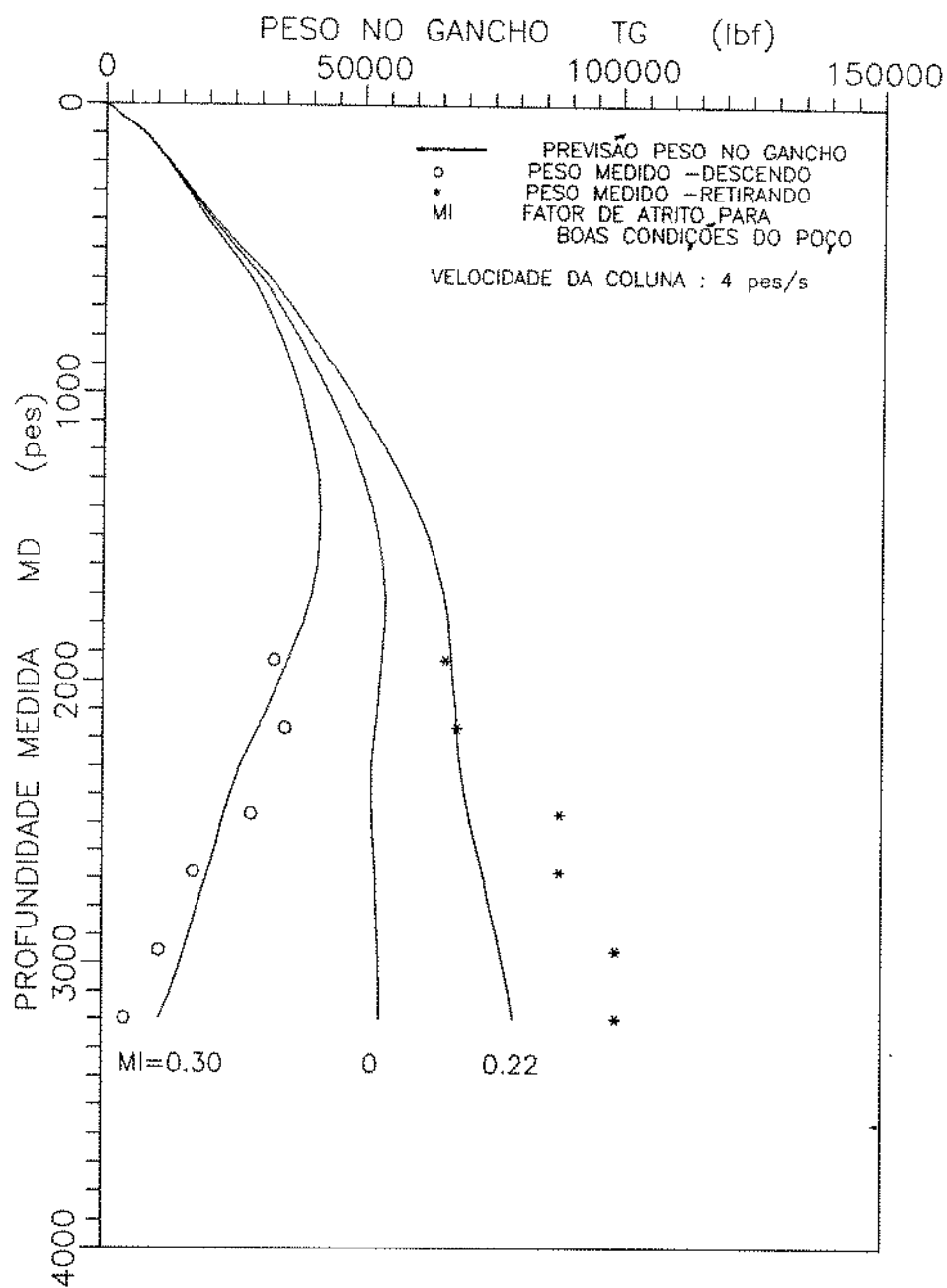
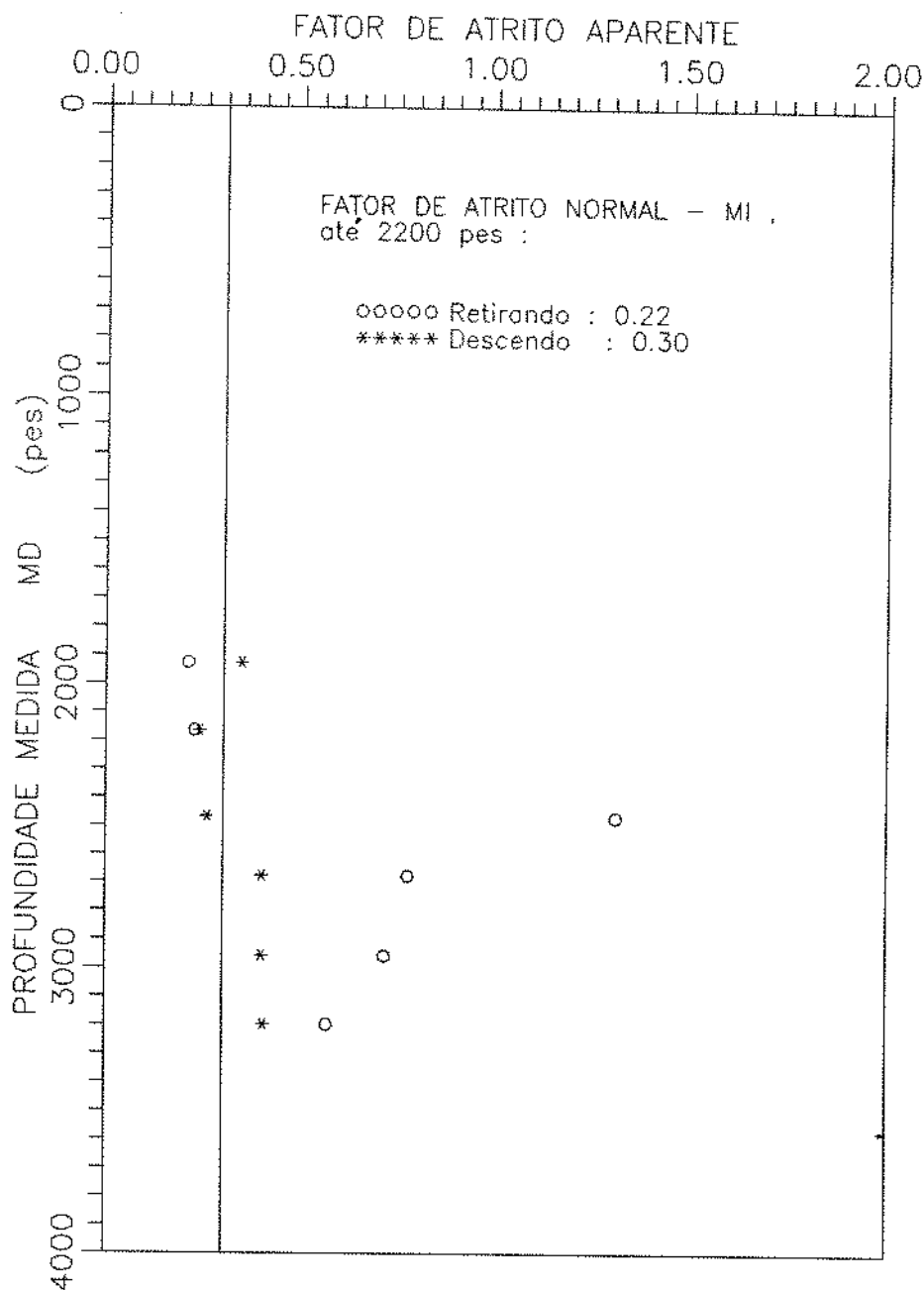


FIG. 65: POÇO 4 - FATORES DE ATRITO APARENTE  
 PARA DIAGNÓSTICO DE POÇO  
 Coluna de perfuração



## 6 CONCLUSÕES , RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

- 6.1.1 Os valores médios dos fatores de atrito calculados com os dados de 4 poços testados utilizando fluido base água, situou-se na faixa de 0.21 - 0.33 , consistente com os divulgados na literatura (0.26 - 0.31 para testes de campo e 0.25 - 0.34 para testes de laboratório).
- 6.1.2 Simulações com dados de testes em 4 poços de diferentes tipos de trajetória e composições de colunas, mostraram que :
- a) A rigidez da coluna influencia muito pouco sobre o fator de atrito, cerca de 1 % para revestimentos e praticamente nulo para colunas de perfuração. No poço horizontal, a influência da rigidez de coluna foi maior, cerca de 2 % para colunas de perfuração.
  - b) A influência do atrito hidrodinâmico sobre o fator de atrito foi cerca de 8 % para revestimentos e cerca de 3 % para colunas de perfuração em poços convencionais. No micro-poço horizontal , a sua influencia é bastante significativa, chegando a superar 50 % para a velocidade de manobra de 1.22 m/s [4 pés/s] no poço simulado.

- c) A influência global da rigidez de coluna e do atrito hidrodinâmico sobre o fator de atrito foi cerca de 9 % para revestimentos e cerca de 4 % para colunas de perfuração.
- d) A influência global da rigidez de coluna e do atrito hidrodinâmico sobre o peso no gancho foi cerca de 2 % para revestimentos e praticamente nula para colunas de perfuração. No poço horizontal, esta influência foi maior, cerca de 15 % para descidas e 2 % para retiradas de colunas de perfuração.
- No micro-poço, horizontal, a influencia do atrito hidrodinâmico sobre o peso no gancho foi mais significativa, chegando a superar os 25 % para velocidade de manobra de 1.22 m/s [4 pés/s] e fluido de 1030 kg/m<sup>3</sup> [8.6 lbm/gal].
- e) A influência da rigidez de coluna contribui muito pouco para os esforços de torque na superfície, inferior a 1 %, sendo maior no poço horizontal, cerca de 2 %.
- f) Quanto mais raso for o poço, maiores são as influências do atrito hidrodinâmico e da rigidez de coluna.
- g) As influências do atrito hidrodinâmico e da rigidez de coluna são mais significativas nas operações de descidas de colunas face às retiradas de colunas em poços convencionais.

6.1.3 Adotando-se 2 valores para o fator de atrito no poço (um normal, para o intervalo de poço em boas condições e um



outro valor a ser calculado e que considera a interferência do poço no intervalo restante), a existência de algum problema mecânico no poço fica mais evidente no perfil de fatores de atrito aparente em função da profundidade.

- 6.1.4 Os perfis de pesos no gancho, torques ou de fatores de atrito aparente do poço comportam-se diferentemente em alguns tipos diferentes de problemas no poço.
- 6.1.5 Com os procedimentos para o diagnóstico de problemas no poço sugeridos neste trabalho, é possível identificar e diferenciar alguns tipos de problemas mecânicos no poço.
- 6.1.6 O programa de computador elaborado para o diagnóstico de problemas no poço, pode auxiliar na otimização da composição de colunas de perfuração. Pode-se determinar também os efeitos de pistoneio ou de sobrepressão para o cálculo do peso de lama equivalente no anular poço/coluna.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES

- 6.2.1 Avaliar o modelo de torque e arraste proposto neste trabalho com mais testes em poços utilizando fluidos base água e base óleo e com colunas de perfuração. Sugere-se também, testes em micro-poços.

- 6.2.2 Avaliar os procedimentos de diagnóstico propostos com mais testes de campo.
- 6.2.3 É importante a constante comparação dos torques, pesos no gancho e fatores de atrito aparente que são obtidos num determinado intervalo de poço aberto e nas diversas manobras de colunas. Na avaliação das condições do poço, outros parâmetros convencionais da perfuração, tais como : pressões e vazões de circulação, litologia da formação, pressão de poros, etc; também devem ser considerados.

### 6.3 SUGESTÕES

- 6.3.1 Comparar as influências da rigidez de coluna sobre o torque e arraste de colunas considerados neste modelo através do método de elementos finitos.
- 6.3.2 Tornar possível o diagnóstico de problemas no poço em tempo real através da monitoração automática de torque e peso no gancho em função da profundidade e acoplados ao programa de computador para os cálculos de fatores de atrito aparente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) JOHANCSIK, C.A., FRIESEN, D.B. and DALSON, R., " Torque and Drag in Directional Wells - Prediction and Measurement" , SPE 11380, 1983.
- 2) SHEPPARD, M.C., WICK, C. and BURGESS, T. ," Designing Well Paths to Reduce Drag and Torque", SPE 15463, 1986.
- 3) MAIDLA, E.E. , " Borehole Friction Assessment and Application to Oilfield Casing Desing in Directional Wells" , Ph.D. Dissertation, LSU 1987.
- 4) MAIDLA, E. E. and WOJTANOWICZ, A. K., " Field Method of Assessing Borehole Friction for Directional Wells Casing" SPE 15696, 1987.
- 5) MAIDLA, E. E. and WOJTANOWICZ, A. K., " Field Comparison of 2-D and 3-D Methods for the Borehole Friction Evaluation in Directional Wells", SPE 16663, 1987.
- 6) GAZANIOL, D., " Field Data Analysis of Weight and Torque Transmition to the Drill Bit", OTC 5510, 1987, pg. 239-246.
- 7) CHILD, A.J. and WARD, A.L., " The Refinement of a Drillstring Simulator: Its Validation and Applications" SPE 18046, 1988.

- 8) HO, H.S., "An Improved Modeling Program for Computing the Torque and Drag in Directional and Deep Wells", SPE 18047 1988.
- 9) DYKSTRA, M.W., " Development and Field Verification of a Predictive Model for Tension, Torque and State of Stress in Drill and Casing Strings", Thesis Dissertation, Tulsa, 1989.
- 10) CORBETT, K.T. and DAWSON, R., " Drillstring Design for Directional Wells", Oil and Gas Journal (April 30, 1984) , pg. 61-66.
- 11) WHITTEN, R. G., " Application of Side-Force Analysis and MWD to Reduce Drilling Costs", SPE 16113, 1987.
- 12) LESAGE, M., FALCONER, I. G. and WICK, C., " Evaluating Drilling Practice in Deviated Wells With Torque and Weight Data", SPE 16114, 1987.
- 13) BRETT, J.F., BECKETT, A. D., HOLT, C.A. and SMITH , D.L., "Uses and Limitations of a Drillstring Tension and Torque Model to Monitor Hole Conditions", SPE 16664, 1987.
- 14) GARDEN, R.S., " Equations Determine Maximum Horizontal Wellbore Length", Oil and Gas Journal (Dec. 26, 1988), pg. 121-125.

- 22) MONDSHINE, T.C., " Drilling-Mud Lubricity : Guide to Reduced Torque and Drag", Oil and Gas Journal (Dec. 7, 1970), pg. 70-77.
- 23) ALFORD, S.E., " New Technique Evaluates Drilling Mud Lubricants", World Oil, July 1976, pg. 105-110.
- 24) BRATOVICH, M.W., BELL, W.T. and KAAZ, K.D., " Improved Techniques For Logging High-Angle Wells", SPE 6813, 1977.
- 25) WHITE, J.P. and DAWSON, R., " Casing Wear :Laboratory Measurements and Field Predictions", SPE 14325, 1985.
- 26) BOL, G.M., " Effect of Mud Composition on Wear and Friction of Casing and Tool Joints", SPE 13457, 1985.
- 27) CORBETT, K.T. and DAWSON, R. , " Rubber Drillpipe Protectors Reduce Rotary Torque", SPE 15565, 1986.
- 28) MAIDLA, E. E. and WOJTANOWICZ, A. K., " Laboratory Study of Borehole Friction Factor Using Dynamic Filtration Apparatus", SPE 18558, 1988.
- 29) QUIGLEY, M.S., " Advanced Technology for Laboratory Measurements of Drilling Fluid Friction Coefficient", SPE 19537, 1989.

- 30) QUIGLEY, M.S., DZIALOWSKI, A.K. and ZAMORA, M., " A Full-Scale Wellbore Friction Simulator", SPE 19958, 1990.
- 31) LESAGE, M., CASSO, C.G. and ZANKER, K.J., " A New Approach to Rig Sensors", SPE 19999, 1990.
- 32) PANTOJA, S.R.S., " Problemas de Poço", Petrobrás AGO-83.
- 33) TAYLOR, H.L. and Mason, C.M., "A Systematic Approach to Well Surveying Calculations", SPE 3362, 1971.
- 34) CRAIG JR., J.T. and RANDALL, B.V., " Directional Survey Calculation", Petroleum Engineer, March 1976.
- 35) LUBINSKI, A., " Maximum Permissible Dog-Legs in Rotary Boreholes", JPT - Dallas , Fev. 1961 , pg. 256-275.
- 36) PAI, S.I., " On Turbulent Flow Between Parallel Plates", Journal of Applied Mechanics, vol. 20, March, 1953, pg. 109-114.
- 37) SAVINS, J.G., " Generalized Mewtonian (Pseudoplastic) Flow in Stationary Pipes and Annuli", Petroleum Transaction, AIME, 1958, pg. 325-332.
- 38) BURKHARDT, J.A., " Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement", JPT, June 1961, pg. 595-605, Trans., AIME - vol. 222.

- 39) SCHUH, F.J., " Computer Makes Surge-Pressure Calculations Useful", Oil and Gas Journal, August 3, 1964, pg.96-104.
- 40) FONTENOT, J.E. and CLARK, R.K., " An improved Method for Calculating Swab and Surge Pressures and Circulating Pressures in Drilling Well", SPE 4521, 1973.
- 41) EDWARDS, M.F. and SMITH, R., " The Turbulent Flow of Non-Newtonian Fluids in the Absence of Anomalous Wall Effects", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 7, 1980, pg. 77-90 .
- 42) SZILAS, A.P., BOBOK E. AND NAVRATIL, L., " Determination of Turbulent Pressure Loss of Non-Newtonian Oil Flow in Rough Pipes", Rheol. Acta, vol. 20, no. 5, 1981, pg. 487-496.
- 43) BOURGOYNE JR, A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E. and YOUNG, F.S., " Applied Drilling Engineering", Society of Petroleum Engineers Text Book Series, vol. 2, 1986. pg. 129-169 , 477-483 .
- 44) KREYSZIG, E., " Advanced Engineering Mathematics", John Wiley and Sons, New York, 1983, pg. 375-377.
- 45) CRAFT, B.C., HOLDEN, W.R. and GRAVES JR, E.D. "Well Design : Drilling and Production", Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.

- 46) UGURAL, A.C., " Advanced Strenght and Applied Elasticity"  
Eighth Printing, 1984.
- 47) HIGDON, A., OHLSEN, E.H., STILES, W.B., WEESE, J.A. and  
RILEY, W.F., " Mecanica dos Materiais", Terceira Edição.
- 48) BYRON, R.B., WARREN, E.S. and EDWIN, N.L., " Fenomenos de  
Transporte", John Wiley and Sons, 1960, cap. 5.
- 49) WHITE, F.M., " Viscous Fluid Flow", MacGraw-Hill, Inc.,  
1974, pg. 453-463.
- 50) PRESS, W.H., FLANNERY, P.B., TENKOLSKY, S.A. and WETTERLING,  
W.T., " Numerical Recipes", 1986, pg. 550-560.
- 51) Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating  
Limits ", API - RP 7G, Twelfth Edition, 1987.
- 52) The Rheology of Oil-Well Drilling Fluids", API Bul. 13D,  
First Edition, 1980.



APÉNDICES

## APÊNDICE A

## CÁLCULO DA FORÇA NORMAL

Fig. 1.A ilustra uma coluna flexível sem rigidez e tracionada sobre uma superfície curva de raio  $R$ .

Como  $dS$  é infinitesimal, podemos assumir que  $T = T + dT$

Figs. 1.A e 2.A ==>

$$\begin{array}{l} 2\pi R \quad \rightarrow 2\pi \\ dS \quad \rightarrow \gamma \end{array} \quad \therefore \quad \gamma = dS / R = 2 \cdot \delta \quad \Rightarrow \quad \delta = dS / 2R$$

$$\text{sen } \delta = \overline{BC} / \overline{AB} \quad \therefore \quad \overline{BC} = \overline{AB} \cdot \text{sen } \delta = \overline{AB} \cdot \text{sen } (dS / 2R)$$

Da Fig. 2.A,  $F_n = 2 \cdot T \cdot \text{sen } (dS / 2R)$

Como :  $dS / 2R$  é muito pequeno ,  $\text{sen}(dS / 2R) \approx dS / 2R$  :

$$F_n = T \cdot dS / R$$

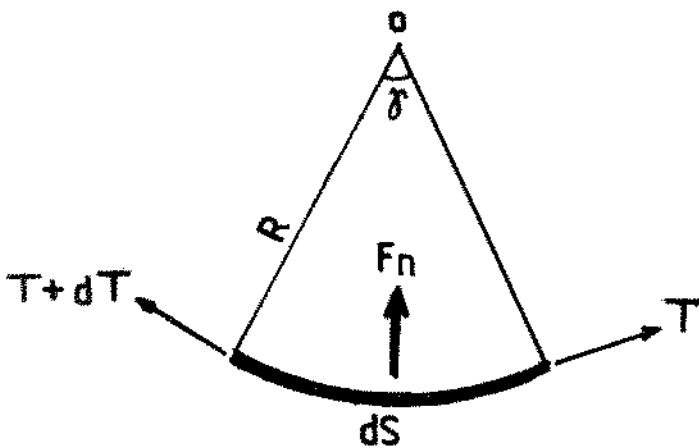


FIG. 1.A

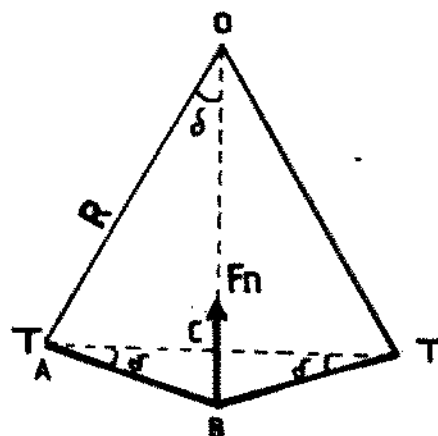


FIG. 2.A

## APÊNDICE B

## CURVATURA DO POÇO (DOG-LEG)

Os vetores unitários  $\vec{V}$  e  $\vec{U}$  tangentes à curva  $S$  em  $A$  e  $B$  na fig. 1.B, nos dão as seguintes expressões :

$$\begin{aligned} V_x &= \text{sen}(\alpha_0) \cdot \text{cos}(\phi_0) & U_x &= \text{sen}(\alpha_1) \cdot \text{cos}(\phi_1) \\ V_y &= \text{sen}(\alpha_0) \cdot \text{sen}(\phi_0) & U_y &= \text{sen}(\alpha_1) \cdot \text{sen}(\phi_1) \\ V_z &= \text{cos}(\alpha_0) & U_z &= \text{cos}(\alpha_1) \end{aligned}$$

O ângulo formado entre os vetores  $\vec{V}$  e  $\vec{U}$ , fig.2.B, nos dá a variação total na direção do poço entre os pontos  $A$  e  $B$ .

Com o produto escalar entre estes 2 vetores unitários, a curvatura do poço pode ser obtida.

$$\vec{V} \cdot \vec{U} = V_x \cdot U_x + V_y \cdot U_y + V_z \cdot U_z$$

$$\vec{V} \cdot \vec{U} = |\vec{V}| \cdot |\vec{U}| \cdot \text{cos } \beta = 1 \cdot 1 \cdot \text{cos } \beta = \text{cos } \beta$$

$$\beta = \text{arc Cos} ( V_x \cdot U_x + V_y \cdot U_y + V_z \cdot U_z )$$

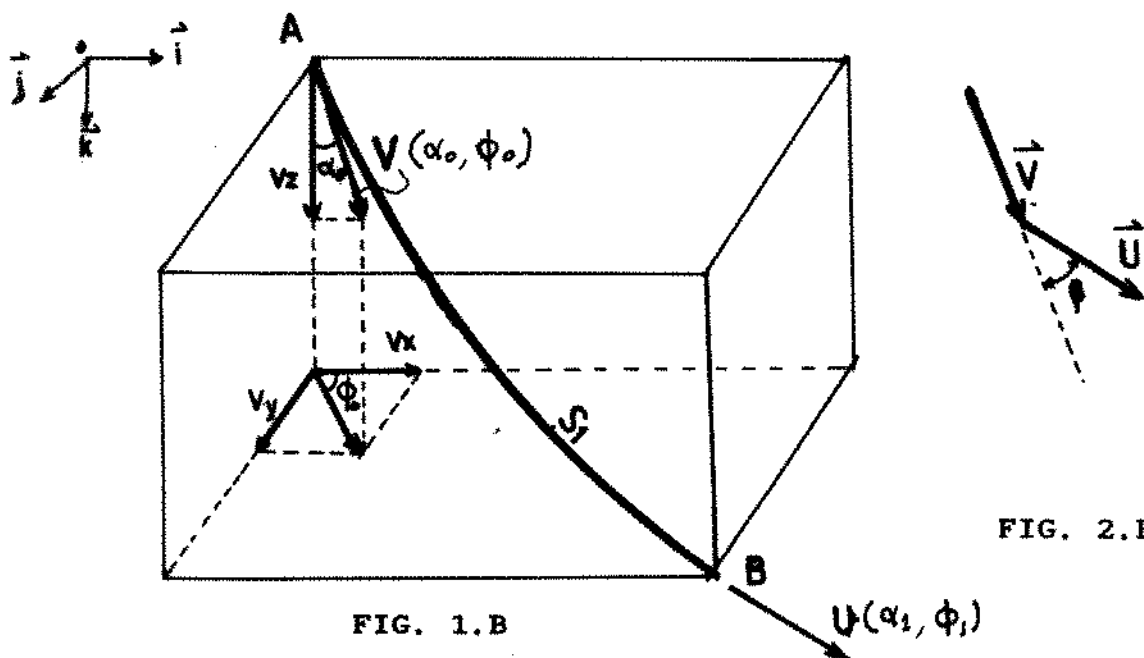


FIG. 1.B

FIG. 2.B

- 15) FALCONER, I.G., BELASKIE, J.P. and VARIAVA, F., " Applications of a Real Time Wellbore Friction Analysis", SPE 18649, 1989.
- 16) KERR, D. and CLAYTOR, S., "Proper Drillstem Design Is Key to Success", Drilling Contractor, Fev/Mar 1989, pg. 54-58.
- 17) KERR, D. and SWAN, D., " Many Factors Determine Optimum Well Profiles", Drilling Contractor, April/May 1989, pg. 35-37.
- 18) GUST, D.A. and MAC DONALD, R.R., " Rotation of a Long Liner in Shallow Long-Reach Well", JPT, April 1989, pg. 401-404
- 19) PLACIDO, J.C., " Previsão de Torque e Arraste e Desgaste de Revestimento em Poços Direcionais Utilizando Modelos Computacionais", Petrobrás-Cenpes/Sepef -III SRC, 1989.
- 20) LESSO. JR, W.G., MULLENS, E. and DAUDEY, J., " Developing a Plattform Strategy and Predicting Torque Losses for Modeled Directional Wells on the Amauligak Field the Beaufort Sea, Canada", SPE 19550, 1989.
- 21) BELASKIE, J.P., DUNN, M.D. and CHOO, D.K., " Distict Applications of MWD Weight-on-Bit and Torque", SPE 19968, 1990.

## APÊNDICE C

## PARÂMETROS REOLÓGICOS DO FLUIDO

O desenvolvimento completo das equações abaixo encontram-se na ref. (43) .

Considerando a fig. 1.C , para fluidos com modelo de potência  $\tau = Kp.\dot{\gamma}^n$  , temos a seguinte equação geral para viscosímetros rotatórios :

$$\Omega = \frac{2.\Pi.Nb}{60} = \frac{n}{2} \cdot \left[ \frac{Tb}{2.\Pi.Hb.Kp} \right]^{1/n} \cdot \left[ \frac{1}{Rb^{2/n}} - \frac{1}{Rr^{2/n}} \right] \quad (1.C)$$

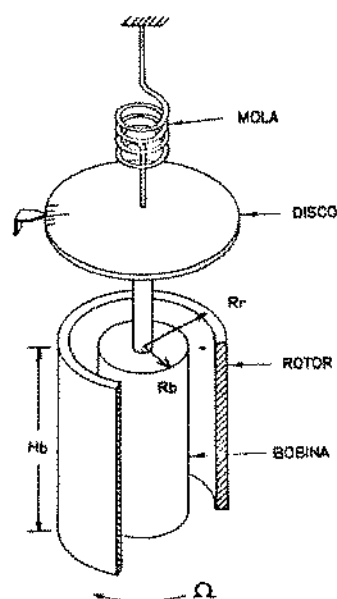
Para viscosímetros FANN VG-METER Mod.35-STD, a conversão de leituras  $\theta$  em unidades de torque é dada por (43):

$$Tb = 360,5.\theta \quad (2.C)$$

Portanto,

$$\tau_b = \frac{360,5.\theta}{(2.\Pi.Rb.Hb).Rb} \quad (3.C)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{0,209439.Nb.(1/Rb)^{2/n}}{n. \left[ (1/Rb)^{2/n} - (1/Rr)^{2/n} \right]} \quad (4.C)$$



VISCOSMETRO  
ROTATÓRIO  
FIG. 1.C

$$\begin{aligned} \text{Sendo (43) : } R_b &= 1,7245 \text{ cm} \\ R_r &= 1,8415 \text{ cm} \\ H_b &= 3,8000 \text{ cm} \end{aligned}$$

Substituindo estas dimensões nas eqs. (3.C) e (4.C),

$$\tau_b = 5,0771.\theta \quad (5.C)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{0,209439.N_b}{n} \cdot \frac{0,336259^{1/n}}{(0,336259^{1/n} - 0,294888^{1/n})} \quad (6.C)$$

Aplicando logaritmo no modelo reológico do fluido,

$$\text{LOG}_{10} \tau_b = n.\text{LOG}_{10} \dot{\gamma} + \text{LOG}_{10} K_p \quad (7.C)$$

Onde :  $\tau_b$  [dynas/cm<sup>2</sup>]  
 $N_b$  [rpm]  
 $K_p$  [dynas.s<sup>n</sup>/cm<sup>2</sup>] sendo: 1 dyna.s<sup>n</sup>/cm<sup>2</sup> = 100 eq.CP  
 $\dot{\gamma}$  [s<sup>-1</sup>]

Portanto, para várias leituras  $\theta$  e  $N_b$ ,  $n$  e  $K_p$  são obtidos com as eqs. (5.C), (6.C) e (7.C) aproximando LOG  $\tau_b$  x LOG  $\dot{\gamma}$  de cada leitura  $\theta$  x  $N_b$  para uma reta.

No campo, normalmente são tomadas apenas 2 leituras do viscosímetro com rotações  $N_{b1}$  e  $N_{b2}$  com respectivas leituras  $\theta_1$  e  $\theta_2$ . Assim,  $n$  e  $K_p$  podem ser determinados diretamente. Em unidades de campo,

$$n = 3,321928.\text{LOG}_{10} (\theta_2/\theta_1) \quad (8.C)$$

$$K_p = \frac{1509,8778 \cdot \theta_1}{\left[ 0,209439 \cdot Nb_1 / \left\{ n \cdot ( 0,336259^{1/n} - 0,294888^{1/n} ) \right\} \right]^n} \quad (9.C)$$

Se tiver somente os valores do limite de escoamento  $\tau_0$  e viscosidade plástica  $\mu_p$ , do modelo Binghamiano,  $\tau_0$  e  $\mu_p$  podem ser convertidos para  $n$  e  $K_p$ . Em unidades de campo,

$$n = 3,321928 \cdot \text{LOG}_{10} \left[ \frac{\tau_0 + 2 \cdot \mu_p}{\tau_0 + \mu_p} \right] \quad (10.C)$$

$$K_p = \frac{1509,8778 \cdot (\tau_0 + \mu_p)}{\left[ 62,831853 / \left\{ n \cdot ( 0,33625^{1/n} - 0,294888^{1/n} ) \right\} \right]^n} \quad (11.C)$$

Onde :  $\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$

$\tau_0 = \theta_{300} - \mu_p$

Sendo :  $\theta_{300}$       Leitura a  $Nb_1 = 300$  rpm

$\theta_{600}$       Leitura a  $Nb_2 = 600$  rpm

APÊNDICE D  
EFEITO HIDRODINÂMICO

1 VAZÕES E VELOCIDADES DO FLUIDO (43)

Figuras 1.D e 2.D, mostram respectivamente, uma coluna mista com extremidade fechada e extremidade aberta, sendo descida num poço com velocidade  $V_c$ .

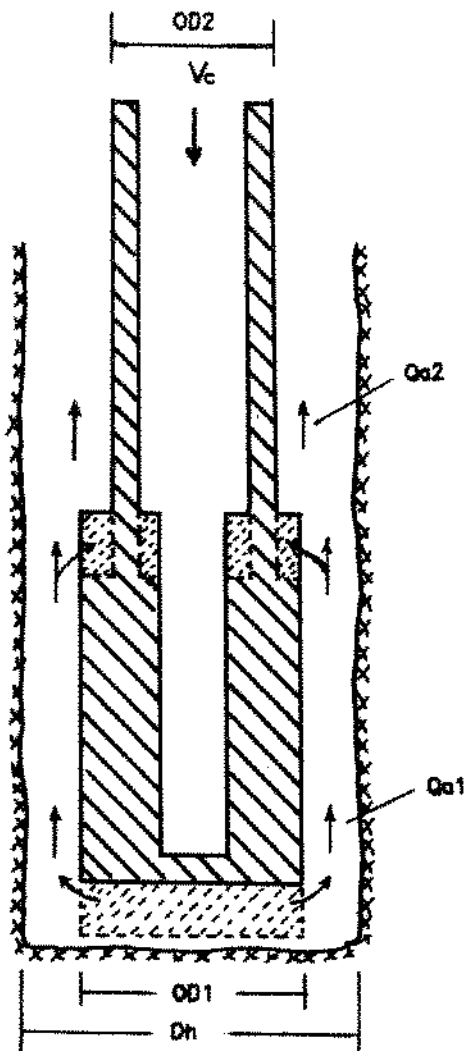


FIG. 1.D

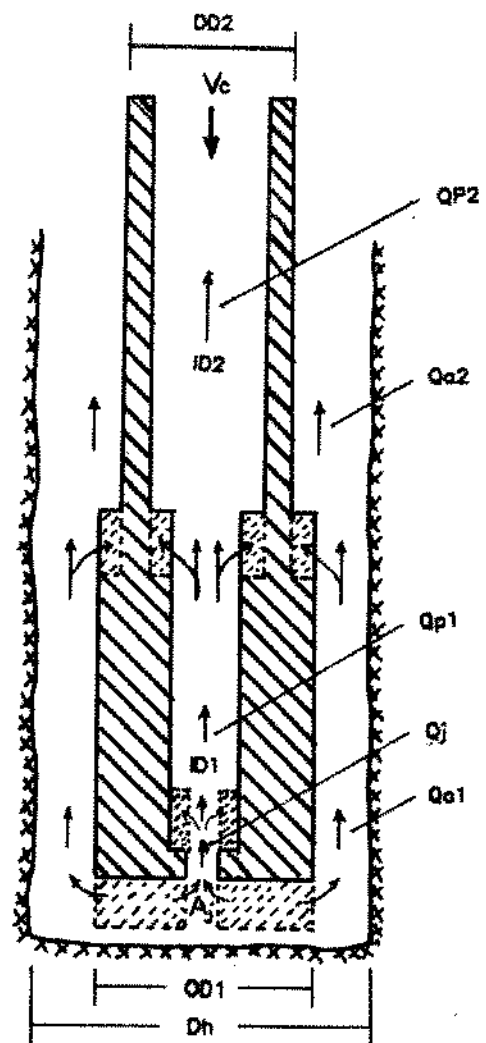


FIG 2.D



### 1.1 EXTREMIDADE DA COLUNA FECHADA

A vazão do fluido no interior da coluna é nula. A vazão na seção 1 (intervalo 1-2) é dada por :

$$Q_{a1} = \frac{\Pi}{4} \cdot OD_1^2 \cdot V_c \quad (1.D)$$

Na seção 2 (intervalo 2-3),

$$Q_{a1} = Q_{a2} + \Delta Q = Q_{a2} + \Pi/4 \cdot (OD_1^2 - OD_2^2) \cdot V_c$$

$$Q_{a2} = Q_{a1} - \Pi/4 \cdot (OD_1^2 - OD_2^2) \cdot V_c \quad (2.D)$$

Generalizando para "n" seções,

$$Q_{a_{i+1}} = Q_{a_i} - \Pi/4 \cdot (OD_i^2 - OD_{i+1}^2) \cdot V_c \quad (3.D)$$

(i = 1, ..., n-1)

E a velocidade média do fluido no anular,

$$\bar{V}_{a_i} = \frac{Q_{a_i}}{\Pi/4 \cdot (Dh_i^2 - OD_i^2)} \quad (4.D)$$

(i = 1, ..., n)

## 1.2 EXTREMIDADE DA COLUNA ABERTA

Baseado na fig. 2.D,

$$Q_t = \left( \frac{\pi}{4} \cdot OD_1^2 - A_j \right) \cdot V_c = Q_{a1} + Q_{p1} \quad (5.D)$$

Para os cálculos das vazões  $Q_{a1}$  e  $Q_{p1}$  é definido um fator de proporcionalidade, sendo :

$$Q_{a1} = f_a \cdot Q_t \quad (6.D)$$

$$Q_{p1} = (1-f_a)Q_t \quad (7.D)$$

O fator  $f_a$  é obtido mediante um processo iterativo. Igualando-se as perdas de pressão total no anular com as perdas de pressão total no interior da coluna (incluindo as perdas nos jatos da broca se for o caso) , obtém-se o valor de  $f_a$  . Significa que, a pressão atuante na extremidade da coluna é a mesma tanto pelo anular como pelo interior da coluna, ou seja :

$$\sum P_a = \sum P_p + P_b$$

Na seção 1, tem-se :

$$Q_{a1} = f_a \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot OD_1^2 - A_j \right) \cdot V_c \quad (8.D)$$

$$Q_{p1} = (1-f_a) \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot OD_1^2 - A_j \right) \cdot V_c \quad (9.D)$$

E na seção 2,

$$Q_{a2} = Q_{a1} - \frac{\pi}{4} \cdot (OD_1^2 - OD_2^2) \cdot V_c \quad (10.D)$$

$$Q_{p2} = Q_{p1} - \left( \frac{\pi}{4} \cdot ID_2^2 - A_j \right) \cdot V_c \quad (11.D)$$

Generalizando para "n" seções,

$$\begin{aligned} Qa_{i+1} &= Qa_i - \Pi/4. (OD_i^2 - OD_{i+1}^2). Vc & (i=1, \dots, n-1) \\ Qp_{i+1} &= Qp_i - \Pi/4. (ID_{i+1}^2 - ID_i^2). Vc & (i=2, \dots, n-1) \end{aligned} \quad (12.D)$$

$$\bar{v}_a_i = \frac{Qa_i}{\Pi/4. (Dh_i^2 - OD_i^2)} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (13.D)$$

$$\bar{v}_{p1} = \frac{Qp1}{Aj} \quad e \quad \bar{v}_{p_i} = \frac{Qp_i}{\Pi/4. ID_i^2} \quad (i = 2, \dots, n) \quad (14.D)$$

## 2 PERDAS DE PRESSÃO

Os cálculos das perdas de pressão, tanto no anular como no interior da coluna, são baseados nas equações constantes na ref. (43) .

### 2.1 VALORES CRÍTICOS DO NÚMERO DE REYNOLDS

De acordo com as refs. (40) e (52) ,

$$\circ \text{ Regime laminar} \quad : \text{ REYL} = 3470 - 1370.n \quad (15.D)$$

$$\circ \text{ Regime turbulento} : \text{ REYT} = 4270 - 1370.n \quad (16.D)$$

## 2.2 FATOR DE FRICÇÃO PARA O FLUIDO

Em regime de fluxo turbulento, tanto para o anular como para o interior da coluna, é adotada a equação de DODGE e METZNER .

$$\sqrt{1/f} = \frac{4}{n^{0,75}} \cdot \text{LOG}_{10} \left( \text{REY} \cdot f^{(1-0,5.n)} \right) - \frac{0,395}{n^{1,2}}$$

(17.D)

Para o fluxo laminar,

$$f = 16 / \text{REY}$$

(18.D)

Em regime transitório,  $\text{REYL} < \text{REY} < \text{REYT}$  , é adotada uma interpolação linear (40) (52) ,

$$f = \frac{16}{\text{REYL}} + \left[ \frac{\text{REY} - \text{REYL}}{800} \right] \cdot \left[ f_T - \frac{16}{\text{REYL}} \right]$$

(19.D)

$f_T$  é o valor de  $f$  para  $\text{REY} = \text{REYT}$  na eq.(17.D)

## 2.3 PERDA DE PRESSÃO NOS JATOS DA BROCA

Em unidades de campo,

$$P_b = \frac{\rho f \cdot Q_b^2}{10859 \cdot A_j^2}$$

(20.D)

## 2.4 PERDA DE PRESSÃO NO INTERIOR DA COLUNA

Em unidades de campo,

$$\frac{dP_p}{dS} = f \cdot \frac{\rho_f \cdot \bar{V}_{pe}^2}{25,81 \cdot ID} \quad (21.D)$$

A velocidade equivalente no interior da coluna é a soma da velocidade média do fluido com a velocidade da coluna.

$$\bar{V}_{pe} = \bar{V}_p + V_c \quad (22.D)$$

Número de Reynolds para o fluxo no interior da coluna, em unidades de campo,

$$REY = 89100 \cdot \frac{\rho_f \cdot \bar{V}_{pe}^{(2-n)}}{K_p} \cdot \left[ \frac{0,0416 \cdot n \cdot ID}{3 \cdot n + 1} \right]^n \quad (23.D)$$

## 2.5 PERDAS DE PRESSÃO NO ANULAR (SLOT APPROXIMATION)

Em unidades de campo,

$$\frac{dP_a}{dS} = f \cdot \frac{\rho_f \cdot \bar{V}_{ae}^2}{21,1 \cdot (D_h - OD)} \quad (24.D)$$

A velocidade equivalente no anular é função da velocidade média do fluido e das forças viscosas, proporcional à constante de aderência, provocadas pelo movimento axial da coluna (43) .

$$\bar{V}_{ae} = \bar{V}_a + C_c \cdot V_c \quad (25.D)$$

CONSTANTE DE ADERÊNCIA PARA REGIME LAMINAR (40) :

$$C_{cl} = \frac{\delta^2 - 2 \cdot \delta^2 \cdot \ln \delta - 1}{2 \cdot (1 - \delta^2) \cdot \ln \delta} \quad (26.D)$$

CONSTANTE DE ADERÊNCIA PARA REGIME TURBULENTO (43) :

$$C_{ct} = \frac{[ (\delta^4 + \delta) / (1 + \delta) ]^{0.5} - \delta^2}{1 - \delta^2} \quad (27.D)$$

$$\delta = OD / Dh$$

Inicialmente são calculados os números de Reynolds aplicando as eqs. (26.D) e (27.D). Se os 2 números de Reynolds resultarem inferiores ao valor crítico para regime laminar, a constante de aderência  $C_c$  para regime laminar é adotada. Caso contrário, se ambos resultarem superiores ao valor crítico para

regime turbulento,  $C_c$  para regime turbulento é adotada. Por outro lado, se nenhuma das condições acima não forem satisfeitas, é adotada uma interpolação linear para  $C_c$  em função dos números de Reynolds inicialmente calculados.

A equação para a interpolação de  $C_c$  é dada por :

$$C_c = C_{cL} + \left[ \frac{REY(C_c=C_{cT}) + REY(C_c=C_{cL}) - 2 \cdot REYL}{800} \right] \left[ \frac{C_{cT} - C_{cL}}{2} \right]$$

(28.D)

Como :  $C_{cL} \leq C_c \leq C_{cT}$  ,

Se :  $C_c > C_{cT}$  ----- >  $C_c = C_{cT}$

$C_c < C_{cL}$  ----- >  $C_c = C_{cL}$

Número de Reynolds para fluxo no anular, em unidades de campo,

$$REY = 109000 \cdot \frac{\rho_f \cdot \bar{V}_{ae}^{(2-n)}}{K_p} \cdot \left[ \frac{0,0208 \cdot n \cdot (D_h - OD)}{2 \cdot n + 1} \right]^n \quad (29.D)$$

## 2.6 PERDA DE PRESSÃO NO ANULAR DEVIDO AS CONEXÕES DA COLUNA

As conexões dos tubos de perfuração (Tool Joint) provocam perdas de pressão adicionais devido o seu maior

diâmetro externo com relação ao corpo do tubo. Esta perda de de pressão adicional causada pela restrição no fluxo, em unidades de campo, é dada por (39) :

$$\text{Patj} = \frac{\text{Ntj} \cdot \rho f \cdot \bar{V} \text{ae}^2}{1239,62} \cdot \left[ \left( \frac{\text{Dh}^2 - \text{OD}^2}{\text{Dh}^2 - \text{D}_{\text{tj}}^2} \right) - 1 \right] \quad (30.D)$$

A parcela  $d\text{Patj}/dS = \text{Patj}/S1$  é adicionada na eq. (24.D)

### 3 TENSÃO DE CIZALHAMENTO NA PAREDE EXTERNA DA COLUNA ( $\tau_{wa}$ )

#### 3.1 REGIME LAMINAR

A fig. 3.D mostra um perfil de velocidade no anular (poço x coluna) com a coluna se deslocando axialmente com velocidade  $-V_c$  e o anular representado, como aproximação, por 2 placas paralelas (slot approximation).

O balanço de forças num pequeno elemento de fluido em fluxo, resulta (43) :

$$\frac{d\tau}{dy} - \frac{dPa}{dS} = 0 \quad (31.D)$$

Como  $dPa/dS$  independe de  $y$ , integrando a equação acima,

$$\tau = (dPa/dS) \cdot y + \text{cte1} \quad (32.D)$$



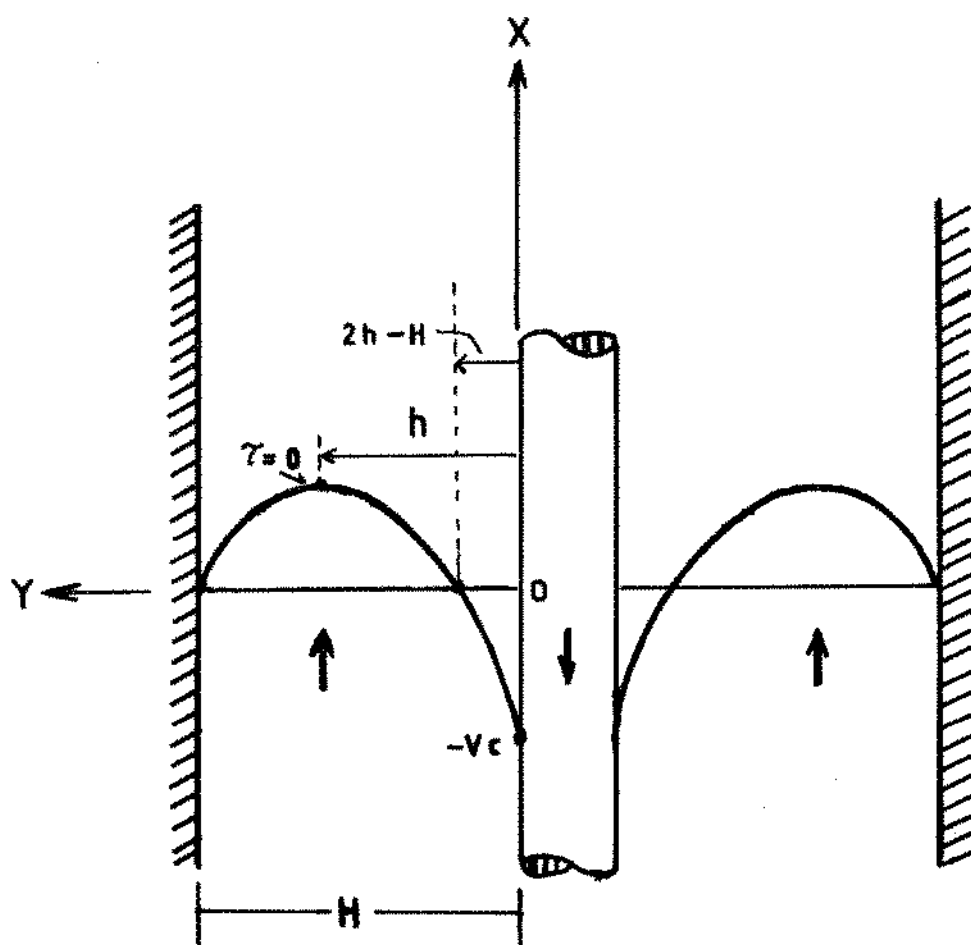


FIG. 3.D - PERFIL DE VELOCIDADE DO FLUIDO NO ANULAR  
REGIME LAMINAR - FLUIDO MODELO DE POTÊNCIA

Para :  $y = h \longrightarrow \tau = 0$  , ou seja ,  $dvf/dy = 0$   
 Substituindo na eq.(32.D), a cte1 é determinada, assim :

$$\tau = (dPa/dS).(y - h) \quad (33.D)$$

Considerando fluido modelo de potência, para  $0 \leq y \leq h$  ,  
 a velocidade do fluido possui derivada contínua e de valor  
 positivo, assim :

$$\tau = -k_p.(dvf/dy)^n = (dPa/dS).(y - h)$$

Explicitando a equação acima e integrando com relação a  
 $y$  , vem :

$$vf = cte2 - \left[ \frac{1}{K_p} \cdot \frac{dPa}{dS} \right]^{1/n} \cdot \left\{ \frac{n}{n+1} \right\} \cdot \left[ h - y \right]^{\frac{n+1}{n}} \quad (34.D)$$

$$\text{Para : } y = 0 \longrightarrow vf = -Vc$$

Substituindo na eq. (34.D), a cte2 é determinada,

$$cte2 = \left[ \frac{1}{K_p} \cdot \frac{dPa}{dS} \right]^{1/n} \cdot \left\{ \frac{n}{n+1} \right\} \cdot h^{1+1/n} - Vc \quad (35.D)$$

Substituindo eq. (35.D) na eq. (34.D), vem :

$$v_f = \left[ \frac{1}{K_p} \cdot \frac{dPa}{dS} \right]^{1/n} \cdot \left\{ \frac{n}{n+1} \right\} \cdot \left\{ h^{1+1/n} - (h-y)^{1+1/n} \right\} - v_c$$

(36.D)

Para :  $y = (2.h - H) \longrightarrow v_f = 0$

Substituindo na eq. (36.D) e explicitando para  $h$ , em unidades de campo, resulta :

$$h = \left\{ \frac{n+1}{n} \cdot 12 \cdot v_c \cdot \left[ \frac{cte \cdot K_p}{dPa/dS} \right]^{1/n} + (H-h)^{1+1/n} \right\} \frac{n}{n+1}$$

(37.D)

Onde :  $(dPa/dS)$  da eq. (24.D)

$$cte = 1/574593$$

A tensão de cisalhamento na parede externa da coluna ocorre para  $y = 0$ , portanto da eq. (33.D), em unidades de campo,

$$\tau_{wa} = | \tau(0) | = (dPa/dS) \cdot (h/12)$$

(38.D)

Onde:  $h$  da eq. (37.D)

### 3.2 REGIME TURBULENTO

O cálculo do perfil de velocidade e da tensão de cisalhamento em regime turbulento para fluidos não newtonianos

são baseados em teorias semi-empíricas, sendo alguns parâmetros ajustados com dados experimentais (36,49).

Para fluidos newtonianos, o perfil de velocidade no anular em regime turbulento (embora mais "achatada") é similar ao perfil de velocidade em regime laminar (48,49) .

Esta relação de velocidades pode-se estender também para fluidos não-newtonianos (38) . Experimentos mostram que em fluidos newtonianos o pico de velocidade em regime laminar ocorre na mesma posição  $y$  (Fig. 4.D) que em regime turbulento (48) .

Em regimes de fluxo turbulento, em regiões bem próximas das paredes da coluna (ou do poço) o regime de fluxo é laminar. White (49) , mostra que para  $y/h \approx 0,975$  (fig. 4.D), a relação  $\tau_{\text{laminar}}/\tau_{\text{turbulento}} = 1$  . Considerando  $dPa/dy = 0$ , a tensão de cisalhamento no regime turbulento varia linearmente com  $y$  tal como no regime laminar, ou seja :  $\tau = \tau_w \cdot y/h$ .

Schuh (39) adotando perfil de velocidade do fluido newtoniano em regime laminar, calculou a velocidade equivalente do fluido (modelo de potência) causada por pistoneio/sobreprensão tanto em regime laminar como em regime turbulento. Como a turbulência raramente ocorre nestas situações, esta aproximação conduz a pequenos erros.

Como aproximação, em regime de fluxo turbulento no anular, é adotado o perfil de velocidade em regime laminar do fluido modelo de potência para o cálculo da tensão de cisalhamento na parede externa da coluna, onde  $:(dPa/dS)$  nas eqs. (37.D) e (38.D) é o calculado na eq.(24.D) (para regime turbulento) somado com a eq. (30.D) .

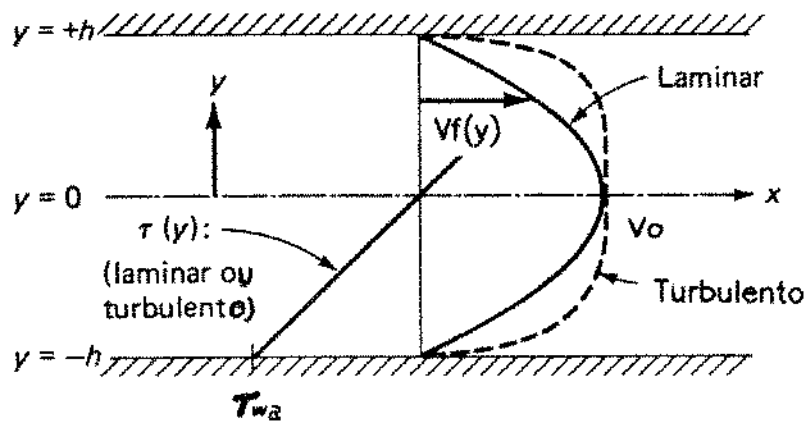
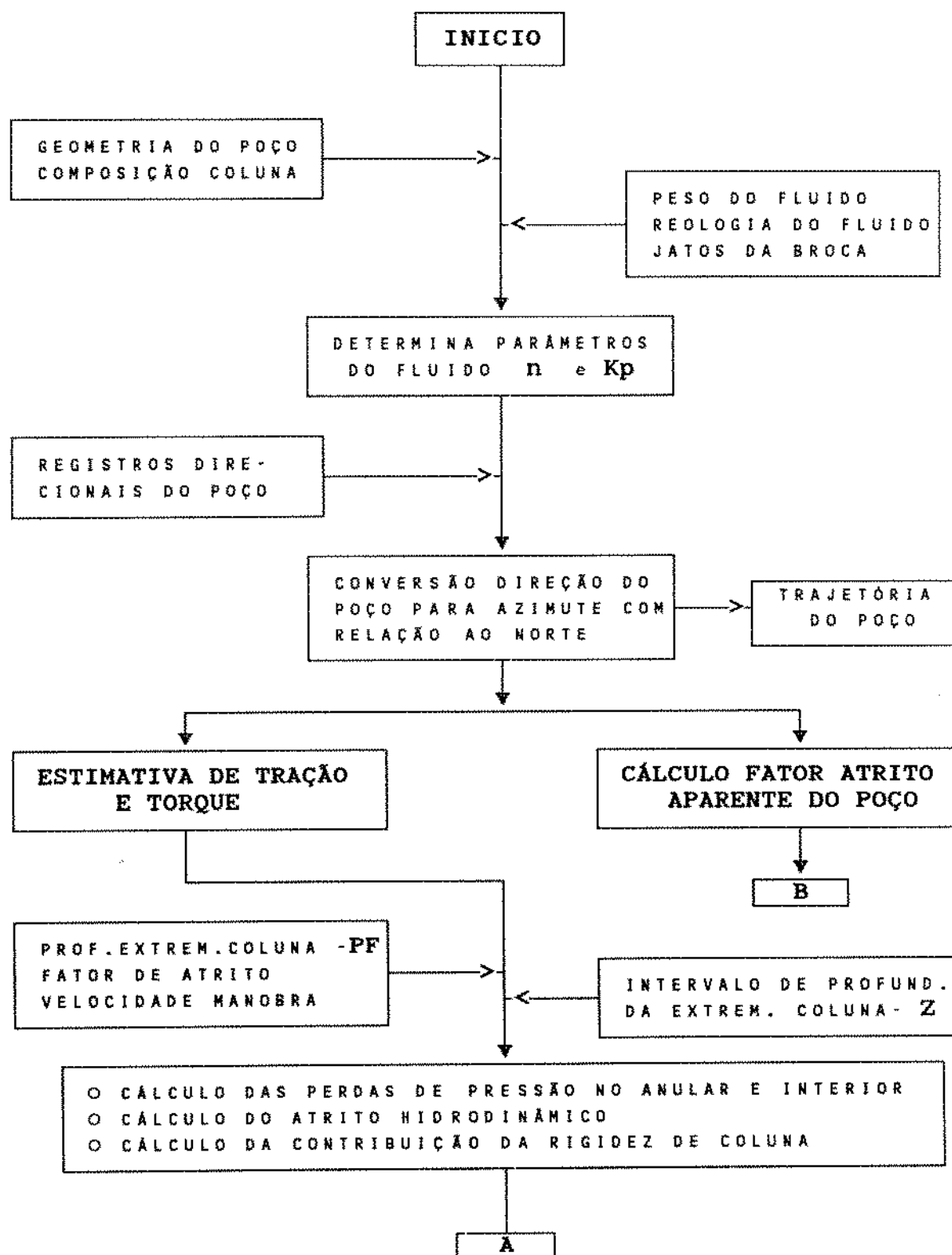
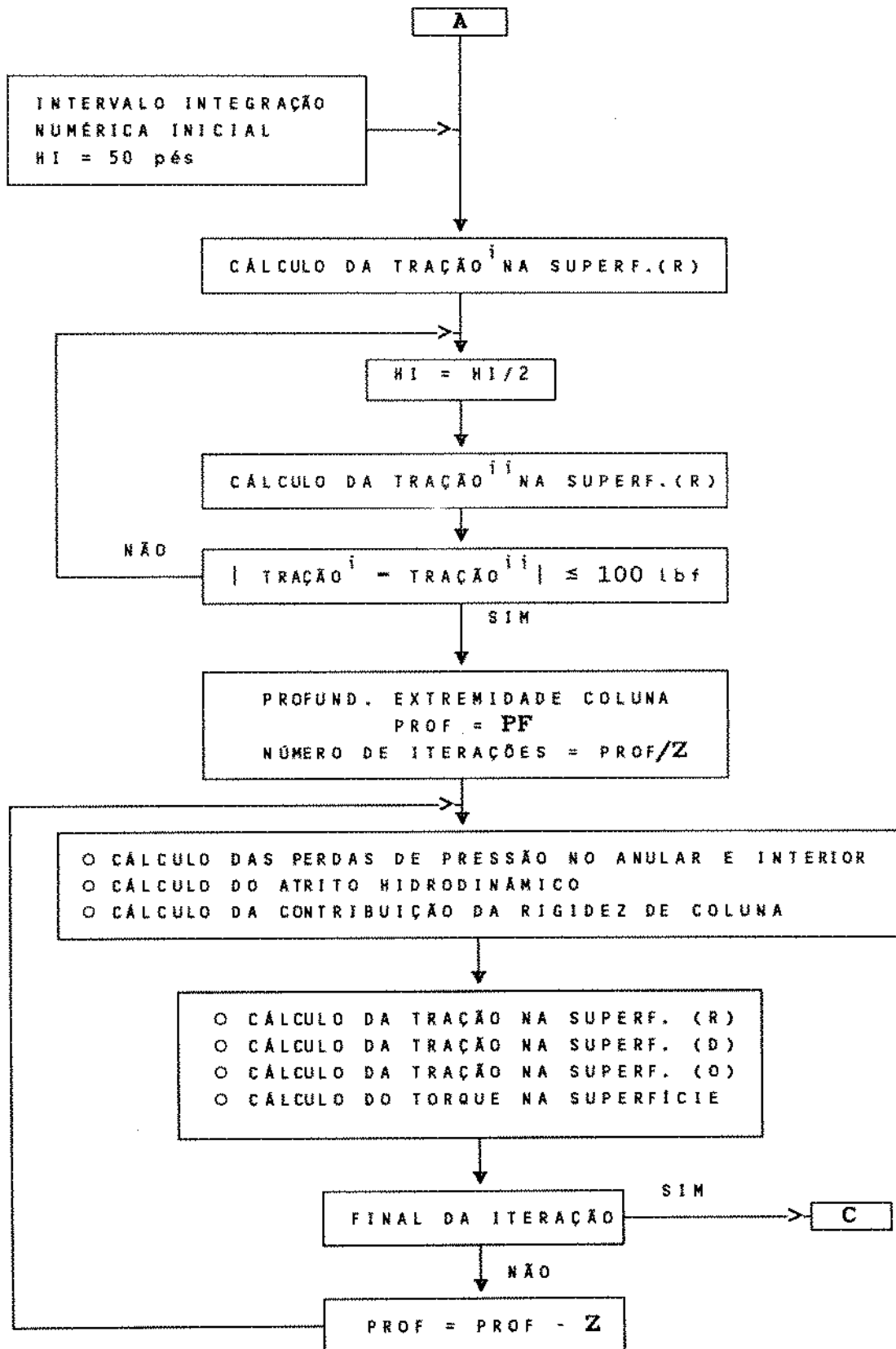


FIG. 4.D - PERFIS DE VELOCIDADES DO FLUIDO EM REGIME LAMINAR E TURBULENTO

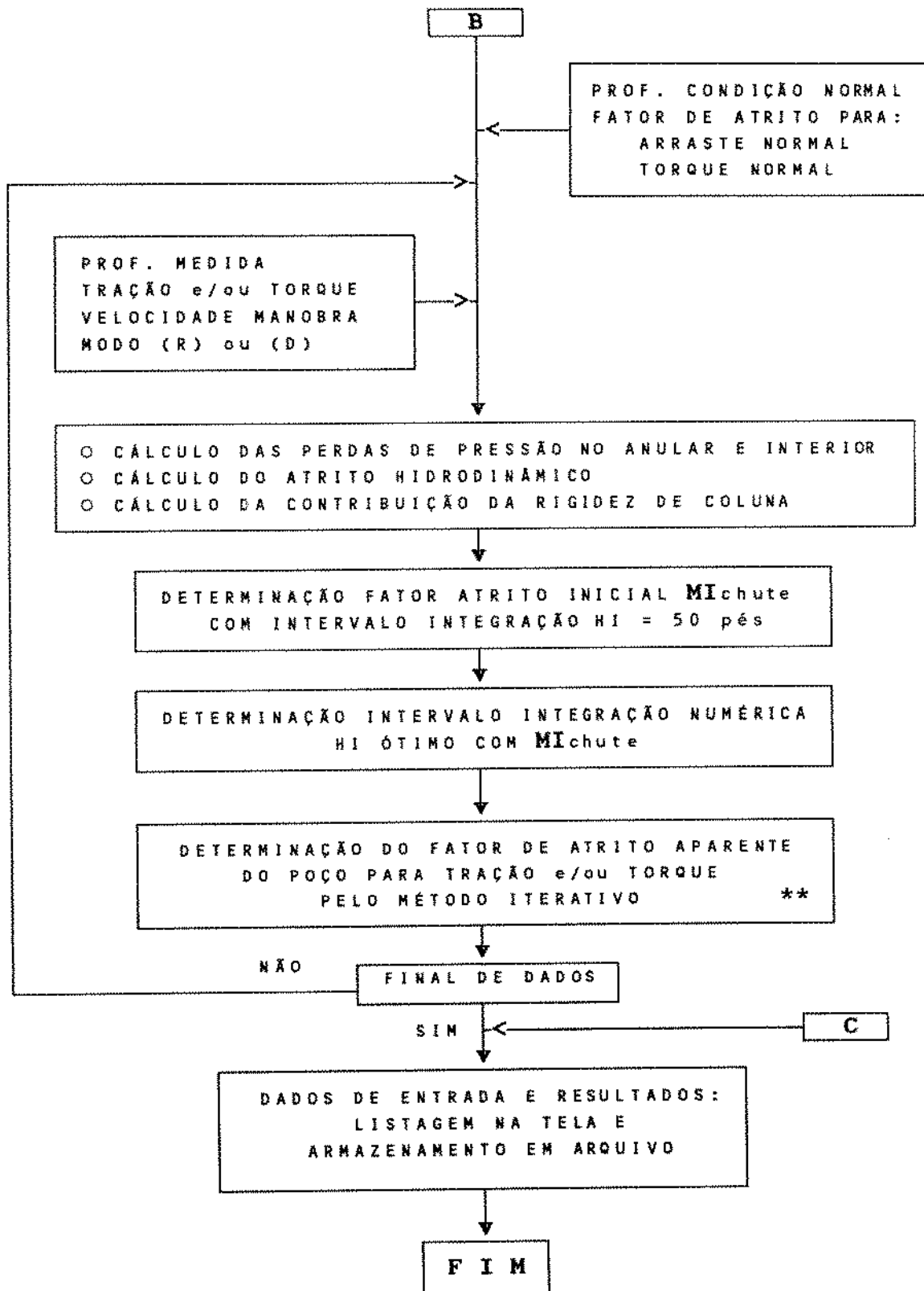
## ANEXO 1

## DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA DE COMPUTADOR "D.P.D."





OBS: (R) RETIRANDO COLUNA  
 (D) DESCENDO COLUNA  
 (O) GIRANDO COLUNA E SEM MOVIMENTO AXIAL



\*\* O FATOR DE ATRITO É O CORRESPONDENTE AO INTERVALO ABAIXO DA PROFUNDIDADE DAS CONDIÇÕES NORMAIS DE POÇO. ATÉ A PROFUNDIDADE DE CONDIÇÃO "NORMAL", SÃO CONSIDERADOS OS FATORES DE ATRITO PARA ARRASTE OU TORQUE "NORMAL" .



## ANEXO 2

## TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

UNIDADE DE CAMPO	=	SISTEMA	SI
1 pé	=	0,3048	m
1 pé/s	=	0,3048	m/s
1 pol	=	0,0254	m
1 grau	=	0,0175	rd
1 lbm	=	0,4536	kg
1 lbm/gal	=	119,8264	kg/m <sup>3</sup>
1 lbf	=	4,4482	N
1 lbf.pé	=	1,3558	N.m
1 lbf/pol <sup>2</sup> (psi)	=	6894,7591	Pa
1 lbf/100pé <sup>2</sup>	=	0,4788	Pa
1 lbf/pé	=	14,5938	N/m
1 CP	=	0,0010	Pa.s
1 eq.CP	=	0,0010	Pa.s <sup>n</sup>
1 gal/min.	=	6,3090 E-5	m <sup>3</sup> /s
1 rpm	=	0,1047	rd/s
1 dyna/cm <sup>2</sup>	=	0,1000	Pa