

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

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia de Campinas
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

MÉTODO DE ESCOLHA DO TIPO DE BROCA E SELEÇÃO
DO PESO SOBRE BROCA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
NA PERFURAÇÃO COM MÍNIMO CUSTO

Esse exemplar corresponde à redação final da Tese
defendida pelo Engenheiro Shiniti Ohara e aprovada
pela comissão julgadora em 30/3/89

Eric Maidla
Prof. Dr. Eric Edgar Maidla

Autor : Shiniti Ohara
Orientador : Eric Edgar Maidla

Março de 1989

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

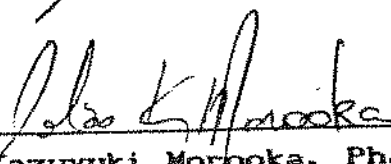
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

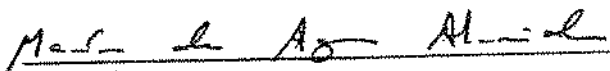
A dissertação "Método de Escolha do Tipo de Broca e Seleção do Peso Sobre broca e Velocidade de Rotação na Perfuração com Mínimo Custo" elaborado por Shinití Ohara e aprovado por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 30 de Março de 1989.

Banca Examinadora :


Eric Edgar Maidla, Ph.D.


Celso Kazuyuki Morooka, Ph.D.


Maurício de Aguiar Almeida, Ph.D.

RESUMO

A perfuração de um poço de petróleo envolve cifras de alguns milhões de dólares. Para se atingir o objetivo, isto é, as zonas portadoras de hidrocarbonetos são utilizadas brocas para se perfurar às formações. A escolha adequada do tipo de broca, assim como o peso aplicado e a velocidade de rotação, contribui muito para a redução de custo e aumento no rendimento da perfuração.

Para a escolha do tipo de broca, foi utilizada a proposta de Mason, que se baseia no cálculo da tensão de compressão da rocha, obtida através de perfis sônicos. O método para escolha de broca mostrou bons resultados, quando se comparou as brocas utilizadas para perfurar o poço com o perfil de tensão de compressão, obtida após o término do poço. E, também, obteve-se bons resultados na previsão das brocas, a serem utilizados num próximo poço a ser perfurado.

Para a seleção do peso sobre a broca e velocidade de rotação foi utilizado o modelo de perfuração de Bourgoyne & Young. Inicialmente foi verificado a confiabilidade do modelo em 4 poços, situados no litoral de Alagoas, que se mostrou satisfatório. Com dados destes 4 poços foi previsto para um quinto poço, na mesma área, a taxa de penetração com bons resultados. Depois, então, foi feita a seleção de peso e rotação para a perfuração do quinto poço, com ênfase em minimizar o custo por metro perfurado. O tipo de broca foi escolhido pelos perfis de tensão de compressão, dos poços de correlações.

Da verificação de que a tensão de compressão é um fator importante, na taxa de penetração da broca, é proposto um modelo de perfuração, com base em análise dimensional, incluindo este parâmetro. O modelo apresentou bons resultados.

AGRADECIMENTOS

A Petróleo Brasileiras S.A. - PETROBRAS, pela oportunidade oferecida de fazer o curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo.

Ao prof. Dr. Eric Edgar Maidla pela dedicação e orientação nesta tese.

Aos professores, funcionários e colegas da UNICAMP pelo agradável convívio universitário proporcionado.

Aos engenheiros da PETROBRAS José Ricardo de Toledo Montesanti e Eduardo Celso César dos Santos pelo incentivo e apoio recebido.

Aos colegas da Divisão de Técnicas de Perfuração - DIPERF, da PETROBRAS, especialmente aos engenheiros Luiz Alberto Santos Rocha e José Luiz Falcão pela colaboração na coleta de dados.

Ao geólogo Rogelio Miranda, da Baker Exlog do Brasil, pelos esclarecimentos na aquisição de dados através de unidade supervisora de perfuração.

*À minha esposa Neuza e aos meus
filhos Sara e Fábio pelo amor,
carinho e compreensão.*

NOMENCLATURA

Alfabeto romano

a	- coeficiente à determinar (Somerton)
ao	- leitura mínima no gamma ray
Af	- parâmetro de abrasividade da formação
aik	- coeficiente i do poço de correlação k
ai(i=1,8)	- coeficientes à determinar (Bourgoyne & Young)
ari(i=1,8)	- coeficientes à determinar (Reza & Alcocer)
At	- área dos jatos (pol^2)
B	- taxa de desgaste dos rolamentos
b	- constante do rolamento
bo	- leitura máxima no gamma ray
bw	- coeficiente em função do projeto da broca
b1	- expoente do desgaste dos rolamentos
b2	- expoente do desgaste dos rolamentos
bi(i=1,8)	- coeficientes à determinar do modelo proposto
br(i=1,8)	- coeficientes à determinar (Reza & Alcocer)
C	- coeficiente em função do projeto da broca Winters & Warren
co	- leitura do gamma ray no intervalo
C1	- parâmetro do tipo e diâmetro da broca
C2	- parâmetro de desgaste do dente
Cb	- custo da broca (US\$)
Cd	- coeficiente de descarga
Cf	- custo por pé perfurado (US\$/pé)
Cri(i=1,8)	- coeficientes à determinar
Cm	- custo por metro perfurado (US\$/m)
CR	- custo horário da sonda US\$/h
D	- profundidade (pés)
d	- diâmetro do rolamento da broca (pol)
D1	- parâmetro do tipo e diâmetro da broca
D2	- parâmetro do tipo e diâmetro da broca
Db	- diâmetro da broca (pol)
dB/dt	- taxa de desgaste dos rolamentos
dD/dt	- taxa de penetração
dh/dt	- taxa de desgaste do dente
Dk	- distância do poço de correlação k ao poço a ser perfurado
Dn	- diâmetro do jato (/32 pol)
dn	- diâmetro dos jatos (pol)
E	- dureza da rocha (lb/pol^2)
F	- força atuando na broca
Fo	- força necessária para iniciar a cratera
Fj	- força nos jatos da broca (lbs)

H	- coeficiente de transferência de calor (Btu/°F pol ² h)
h	- altura do dente normalizado (/8)
h	- taxa de desgaste do dente
H ₁	- expoente do desgaste do dente
H ₂	- expoente do desgaste do dente
H ₃	- expoente do desgaste do dente
IADC	- International Association of Drilling Contractors
I _m	- força de impacto modificado
K	- parâmetro de perfurabilidade da rocha
k	- constante de proporcionalidade
K ₁	- coeficiente de proporcionalidade
K ₂	- coeficiente de proporcionalidade
K ₃	- coeficiente de proporcionalidade
M	- parâmetro do peso sobre broca
N	- velocidade de rotação da broca (rpm)
n	- número de dentes
n _j	- número de jatos
n _k	- número de dados do poço k
n _{pc}	- número de poços de correlações
P	- parâmetro do tipo e diâmetro da broca
q	- parâmetro do tipo e diâmetro da broca
Q	- vazão de bombeio (gpm)
Sc	- tensão de compressão da rocha (lb/pol ²)
Sd	- resistência à perfuração (lb/pol ²)
Su	- índice de argilosidade
T	- tempo estimado para se desgastar o dente de 50% (horas)
t	- tempo
t _f	- temperatura no fundo do poço (°F)
T _r	- tempo de manobra (h)
T _b	- tempo de broca à fundo (h)
T _c	- tempo de conexão (min/9m)
V	- volume da rocha removido
V _c	- volume da cratera
X ₂	- parâmetro de compactação normal
X ₃	- parâmetro de subcompactação
X ₄	- parâmetro do diferencial de pressão
X ₅	- parâmetro do peso sobre a broca
X ₆	- parâmetro de rotação da broca
X ₇	- parâmetro do desgaste do dente
X ₈	- parâmetro hidráulico
W _d	- peso por diâmetro de broca (Klbs/pol)
W	- peso sobre broca (Klbs)
W _o	- peso sobre broca necessário para se iniciar a perfuração
(W/Db) _i	- peso sobre broca por diâmetro necessário para se iniciar a perfuração (Klbs/pol)
(w/Db) _{máx}	- peso sobre broca por diâmetro máximo (Klbs/pol)

Alfabeto grego

α	- expoente do peso sobre a broca
γ	- coeficiente da excentricidade dos cones da broca
ΔD	- intervalo perfurado pela broca (m ou pé)
ΔP	- diferencial de pressão (lb/pol ²)
ΔP_b	- perda de carga na broca (lb/pol ²)
Δt_c	- tempo de trânsito compressional (μ seg/pé)
Δt_f	- tempo de trânsito no fluido contido nos poros da rocha (μ seg/pé)
Δt_{ma}	- tempo de trânsito na matriz da rocha (μ seg/pé)
Δt_s	- tempo de trânsito cisalhante (μ seg/pé)
e	- ductibilidade da rocha (%)
λ	- expoente da velocidade de rotação da broca
μ	- viscosidade aparente a $10000^{-1} \text{ s}^{-1}$ (cp)
ν	- viscosidade do fluido de perfuração (cp)
$\pi, \mu=1, \theta$	- grupos adimensionais
ρ_c	- peso equivalente do fluido de perfuração em circulação - ECD (lb/gal)
ρ_m	- peso específico do fluido de perfuração (lb/gal)
σ	- tensão na rocha
T_B	- constante do rolamento (h)
T_H	- constante da abrasividade da formação (h)
ϕ	- porosidade

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMENTO	ii
RESUMO	iv
NOMENCLATURA	v
LISTA DE ANEXOS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
Capítulo	
I. O PROBLEMA	1
Introdução	
Formulação da Situação-Problema	
Objetivo do Estudo	
Justificativa	
Delimitação	
II. REVISÃO DA LITERATURA	8
Escolha do tipo de broca com perfis elétricos	
Modelos de Perfuração	
III. MÉTODO DE SELEÇÃO DO TIPO DE BROCA POR PERFIL ELÉTRICO	31
Escolha do Método	
Dados do Perfil Elétrico	
Cálculo do Tempo de Trânsito Cisalhante	
Determinação da Tensão de Compressão	
Análise dos Resultados	
Conclusão	
IV. MÉTODO DE SELEÇÃO DO PESO SOBRE A BROCA E ROTAÇÃO	54
Escolha do Método	
Dados de Perfuração	
Determinação dos Coeficientes $a_1 - a_8$ do Modelo de Bourgoyne & Young	
Limite Superior e Inferior dos Coeficientes $a_1 - a_8$	
Verificação do Modelo de Bourgoyne & Young	
Determinação dos Coeficientes $a_1 - a_8$ no Planejamento de um Poço a ser Perfurado	
Seleção do Peso e Rotação da Broca	
Conclusão	

V.	UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PARA ESCOLHA DO TIPO DE BROCA E SELEÇÃO DO PESO SOBRE A BROCA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO COM MÍNIMO CUSTO	85
	Utilização do Método	
	O Modelo de Bourgoyne & Young no Poço ALS E	
	Conclusão	
VI.	MODELO DE PERFURAÇÃO PROPOSTO	102
	Introdução	
	Desenvolvimento do Modelo por Análise Dimensional	
	Modificações na Equação Deduzida	
	Limites dos Coeficientes bi	
	Verificação do Modelo no Poço ALS E	
	Conclusão	
VII.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	118
	Conclusões	
	Recomendações	
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXOS	124

LISTA DE ANEXOS

Anexo	Página
A. Descrição do método de regressão múltipla ...	124
B. Listagem do programa SIGMAC para o cálculo da tensão de compressão	126
C. Listagem do programa BITREC para montagem do quadro de brocas	128
D. Listagem do programa PREPDADO para seleção dos dados de interesse à regressão múlti- pla	134
E. Listagem do programa LITOL para seleção dos dados por litologia	137
F. Listagem do programa REGRE que determina os coeficientes $a_1 - a_n$ do modelo de Bourgoy- ne & Young por regressão múltipla	142
G. Listagem do programa TAXAPEN que calcula a taxa de penetração	152
H. Listagem do programa MULTREG que determina os coeficientes $b_1 - b_n$ do modelo proposto ..	158
I. Listagem do programa ROP que calcula a taxa de penetração	166
J. Listagem do programa CMIN que seleciona peso e rotação com mínimo custo	172

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Seleção econômica das brocas para o campo de Blocker, Texas, EUA ref.[3]	14
2.	Perfil de seleção econômica da broca e seus limites ref[3]	15
3.	Guia para seleção de brocas tricônicas ref.[3]	15
4.	Curva de tensão de compressão x tempo de trânsito cisalhante para $V_{fluído}=4800\text{pés/s}$	35
5.	Curva de tensão de compressão x tempo de trânsito cisalhante para $V_{fluído}=5600\text{pés/s}$	36
6.	Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS A	38
7.	Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS B	39
8.	Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS C	40
9.	Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS D	41
10.	Relação entre a taxa de penetração x diferencial de pressão ref.[12]	65
11.	Efeito do desgaste do dente na taxa de penetração ref.[11]	65
12.	Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS A	68
13.	Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS B	69
14.	Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS C	70
15.	Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS D	71

Figura	Página
16. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS A	72
17. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS B	73
18. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS C	74
19. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS D	75
20. Abrasividade da formação x profundidade para Piaçabucu/Calumbi	81
21. Abrasividade da formação x Profundidade para Muribeca/Maceió	82
22. Constante do rolamento x profundidade para Piaçabuçu x Calumbi	83
23. Constante do rolamento x Profundidade para Muribeca/Maceió	84
24. Comparação entre a taxa de penetração prevista com a real para o poço ALS E	93
25. Taxa de penetração calculada da simulação x taxa de penetração real para o poço ALS E.	94
26. Tempo de trânsito x profundidade obtido do perfil BHC	96
27. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de brocas do poço ALS E.	97
28. Curva de isocusto em função do peso e rotação para a broca nº 6 recomendada	100
29. Curva de isotaxa em função do peso e rotação para a broca nº 6 recomendada	101
30. Comparação entre a taxa de penetração prevista, pelo modelo proposto, com a real para o poço ALS E. Considerando o poço ALS C... ..	114
31. Comparação entre a taxa de penetração prevista, pelo modelo proposto, com a real para o poço ALS E. Excluindo o poço ALS C.	117

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1. Código IADC das brocas tricônicas	3

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1. Relação do código IADC da broca como tempo de trânsito, argilosidade e litologia	10
2. Valores de $\Delta t_s/\Delta t_c$ e α em função da litologia	33
3. Quadro de broca do poço ALS A	42
4. Quadro de broca do poço ALS B	43
5. Quadro de broca do poço ALS C	44
5A. Quadro de broca do poço ALS C (continuação)...	45
6. Quadro de broca do poço ALS D	46
7. Valores de $(W/Db)_{\max}$ em função do tipo de broca e diâmetro	59
8. Coeficientes $a_1 - a_8$ do modelo de Bourgoyne & Young determinados (Calumbi).....	87
8A. Coeficientes $a_1 - a_8$ do modelo de Bourgoyne & Young determinados (Maceió).....	88
9. Topo das formações atravessadas e distâncias ao poço ALS E	89
10. Quadro de broca recomendado para o poço ALS E (12 1/4")	91
11. Quadro de broca recomendado para o poço ALS E (8 1/2")	92
12. Quadro de broca do poço ALS E	99
13. Coeficientes $b_1 - b_8$ do modelo proposto (Calumbi)	112
13A. Coeficientes $b_1 - b_8$ do modelo proposto (Maceió)	113
14. Comparação da soma dos quadrados dos erros entre o modelo de Bourgoyne & Young e o proposto	116

CAPÍTULO I

O PROBLEMA

Introdução

Do poço ao posto. Para que esta trajetória seja cumprida diversas etapas devem ser vencidas. Começando com a análise de perfis sísmicos, modelo de sedimentação e reservatório, é proposta a perfuração, de um poço. Aprovada a locação, é feito o projeto de perfuração e perfurado o poço. Após a completação e avaliação do poço caso este se mostre comercial, é posto a produzir. Há o transporte à refinaria, o refino e a distribuição, chegando finalmente ao consumidor.

Uma etapa importante e de custo elevado é a perfuração do poço, em que realmente se comprova a existência ou não de hidrocarbonetos. Nesta etapa são utilizadas brocas para atravessar as formações e atingir o objetivo pré estabelecido.

A escolha do tipo de broca tem sido feita com base em experiências passadas, isto é, em poços de correlações ou próximos à locação a ser perfurada, sem uma análise posterior eficaz para se saber se as brocas descidas foram adequadas ao tipo de formação e litologia. Este procedimento pode

acarretar em se repetir o erro, caso cometido, no próximo poço a ser perfurado.

Na perfuração rotativa convencional é necessário a aplicação de uma força sobre a broca (peso sobre a broca) e uma rotação para que a broca atue sobre a rocha. A escolha destes parâmetros mecânicos, peso sobre a broca e velocidade de rotação, de projeto, como recomendação antes de se perfurar o poço, também tem sido feita com poços de correlações. No campo, durante a perfuração do poço, tem sido feita através de teste de perfurabilidade (*drill off test*) que consiste em fixar uma rotação da mesa rotativa, colocar um peso sobre a broca e travar a alavanca do sondador. À medida que a broca vai penetrando na formação (cerca de 30cm) o peso vai diminuindo e anota-se o tempo e o peso a cada intervalo perfurado (por exemplo 10cm). O teste pode ser repetido para cerca de 5 rotações diferentes. Escolhe-se assim o par peso e rotação que proporcionou a melhor taxa de penetração. Com este procedimento maximiza-se a taxa de penetração mas não necessariamente minimiza-se os custos.

Formulação da situação-problema

Para a escolha da broca tem-se que associar o tipo de broca, caracterizado pelo seu código IADC*, mostrado no quadro 1, com as propriedades da rocha obtidas de ensaios e/ou perfis elétricos e acústicos.

* IADC = INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRILLING CONTRACTOR

CÓDIGO I A D C DAS BROCAS TRICÔNICAS

BROCA DE DENTE DE AÇO				
FORMAÇÃO	CÓDIGO IADC	ROLAMENTOS		
		NÃO SELADA	SELADA	JOURNAL
		1	4	6
MOLE	1 - 1			
	1 - 2			
	1 - 3			
MÉDIA	2 - 1			
	2 - 2			
DURA	3 - 1			
	3 - 2			
	3 - 4			

BROCA COM INSERTOS DE CARBONETOS DE TUNGSTÊNIO				
FORMAÇÃO	CÓDIGO IADC	ROLAMENTOS		
		AR	SELADA	JOURNAL
		2	5	7
MOLE	4 - 3			
	5 - 1			
	5 - 3			
MÉDIA	6 - 1			
	6 - 2			
	6 - 3			
DURA	7 - 3			
EXTRA DURA	8 - 3			

Quadro 1. Código I A D C para brocas tricônicas

Para a seleção dos melhores parâmetros mecânicos, na perfuração, é preciso se ter um modelo de perfuração capaz de efetuar previsões realísticas. Hoje, no Brasil, não se utiliza nenhum modelo de perfuração que não seja dedicado ao cálculo da pressão de poros, principalmente, durante a perfuração.

Para se ajustar um modelo de perfuração e depois escolher a melhor broca e parâmetros mecânicos, na fase de projeto de um poço, deve se ter dados de poços de correlações ou vizinhos, já perfurados.

Objetivo do estudo

As metas a serem atingidas são: (1) Com dados obtidos de 4 poços já perfurados numa mesma área e próximos a um quinto poço prever, neste último, a taxa de penetração e compará-la com a taxa de penetração real medida durante a sua perfuração. Verificando-se com este procedimento a precisão do modelo de perfuração adotado ou desenvolvido. (2) Selecionar as brocas a serem utilizadas baseando-se na tensão de compressão das rochas dos poços de correlações, obtidos através dos perfis sônicos Escolhe-se com este procedimento os dois primeiros dígitos do código IADC da broca. (3) Confirmada a confiabilidade do modelo de perfuração e

escolhido a broca por perfil de tensão de compressão, determinar o terceiro dígito do código IADC da broca e o peso e rotação ótimos que proporcione o mínimo custo por metro perfurado. Mostrar que maximizar a taxa de penetração não significa necessariamente minimizar custos. (4) Desenvolver e verificar a confiabilidade de um modelo de perfuração baseado em análise dimensional, considerando -se a tensão de compressão como uma das variáveis envolvidas.

Justificativa

A perfuração de um poço de petróleo envolve custos elevados: 3 a 4 milhões de dólares para um poço marítimo de aproximadamente 3000 metros de profundidade. A escolha adequada do tipo de broca e parâmetros mecânicos, contribui para a redução destes custos.

Sendo a perfuração de um poço um constante aprendizado, com base em experiências passadas, tem-se que possuir um método para avaliar e criticar se as brocas utilizadas foram adequadas ou não, para que os erros não se propaguem ao longo do desenvolvimento do campo petrolífero.

Os parâmetros peso e rotação da broca, são facilmente controláveis da superfície. A escolha destes parâmetros irá ditar a vida útil da broca, o intervalo perfurado e o custo por metro perfurado. É desejável que este custo seja o mínimo possível.

Para o presente estudo foi escolhido a área marítima de Alagoas, nordeste do Brasil, caracterizada por ser uma região portadora de zonas de pressões anormalmente

altas, com consequente dificuldades de perfuração devido ao elevado peso do fluido de perfuração e constantes riscos de influxo da formação (kicks), e onde as brocas utilizadas tem tido um baixo rendimento, principalmente na Formação Muribeca, membro Maceió por ser sua idade geológica muito antiga e ter tido uma descontinuidade na sua sedimentação. Devido a presença de pressões de formações altas, os poços são monitorados com o sistema supervisor de sonda, para cálculo das pressões de poros durante a perfuração, e os dados armazenados metro à metro. Dados estes que se utilizou no desenvolvimento deste estudo.

Delimitação

O estudo limita-se a (1) poços verticais, pois em poços direcionais a escolha dos parâmetros mecânicos, peso e rotação são adotados pelo técnico do direcional para se atingir a trajetória de projeto do poço. A escolha da broca por perfil pode ser adotada mesmo em poços não verticais. (2) perfuração rotativa convencional com brocas tricônicas de dentes de aço fresados ou inserto de tungstênio. Para brocas dragas, PDC ou diamantadas dever-se-á estudar o seu desgaste não abordado neste estudo. (3) minimizar o custo por metro perfurado para cada broca a ser descida. Não se minimiza os custos para uma fase (mudança de diâmetro de broca), ou mesmo para o poço, como um todo.

Parte-se do pressuposto que (1) os parâmetros hidráulicos como escolha dos jatos da broca, vazão e pressão

de bombeio são as ótimas. (2) Haja pelo menos um poço, na área, com dados gravados metro a metro por um supervisor de sonda (*mud logging*).

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados revisões da literatura sobre (1) escolha do tipo de broca com perfis elétricos dos poços de correlações (2) modelos de perfuração.

Escolha do tipo de broca com perfis elétricos

Dernbach¹ em 1982, apresentou um método de seleção do tipo de broca com auxílio dos perfis sônico e gamma ray dos poços de correlação. A porosidade total (efetiva mais a não efetiva) obtida do perfil sônico tem uma estreita relação com a tensão da rocha. Aliada com o cálculo do índice de argilosidade obtido do perfil de gamma ray o autor desenvolve uma relação empírica entre a tensão da rocha e seleção do tipo de broca.

Dernbach divide os tipos de rocha em 3 grupos: folhelho, arenito e carbonatos (calcáreo, dolomita, anidrita ou suas combinações). O índice de argilosidade, em porcentagem, é calculado como:

$$SH = \frac{(cg - ag)}{(bg - ag)} \cdot 100 \quad (1)$$

onde:

SH = índice de argilosidade (%)

ag = leitura mínima no gamma ray

(arenito limpo ou calcáreo)

bg = leitura máxima no gamma ray

(folhelho limpo)

cg = leitura do gamma ray no intervalo

de interesse.

A escolha da broca (código IADC) é feita em função da porosidade, tempo de trânsito e litologia. Pinheiro & Linhares², utilizaram este método, no Brasil, na Bacia de Campos com ótimos resultados, e uma tabela proposta por estes autores é mostrada na tabela 1.

Mason³ em 1987, correlacionou a tensão de compressão da rocha, com o tempo de trânsito cisalhante, calculado através do tempo de trânsito compressional obtido do perfil sônico. O autor afirma que tipos de formações diferentes podem ter o mesmo tempo de trânsito compressional, mas são melhores perfuradas com tipos de brocas diferentes. O uso do tempo de trânsito compressional para a seleção de broca requer o desenvolvimento do método para cada tipo de broca ou combinações de litologias. Para evitar o efeito da litologia Mason propõe calcular o tempo de trânsito

CÓDIGO IADC EM FUNÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO
ARGILOSIDADE E LITOLOGIA

LEITURA SÔNICO (μ seg/pé)	CÓDIGO BROCA (I. A. D. C.)	ARGILOSIDADE/LITOLOGIA
65 - 75 75 - 85 85 - 95 95 +	2 1 ou 5 1 1 3 1 2 1 1	Formações superficiais pouco consolidadas: Are- nito, Calcáreo, Folhelho, Argilito, Marga.
70 - 80 + 60 - 70	5 1 5 3	0 - 20%
65 + 55 - 65	5 1 5 3	20 - 30%
90 + 65 - 90 55 - 65	4 3 ou 1 1 5 1 5 3	30 - 40%
45 - 50 50 - 60 60 +	6 1 5 3	Calcáreo/Dolomita/Ani- drita.
60 + 55 - 60	5 1 5 1	Basalto

Tab. 1 Relação do código IADC da broca com o tempo de trânsito, argilosidade e litologia ref.[2]

cisalhante (Δt_s) à partir do tempo de trânsito compressional com a expressão proposta por Gstalder & Raynal⁴ em 1966:

$$\Delta t_s = \Delta t_c (\Delta t_s / \Delta t_c) \quad (2)$$

onde:

Δt_s = tempo de trânsito cisalhante ($\mu\text{seg}/\text{pé}$)

Δt_c = tempo de trânsito compressional ($\mu\text{seg}/\text{pé}$)

A razão $\Delta t_s / \Delta t_c$ entre parênteses da equação (2) são valores tabelados.

Mason verificou que a tensão varia com a mudança do tamanho dos grãos do mineral e propôs uma relação empírica com a introdução do fator α na equação (2):

$$\Delta t_s = \Delta t_c [(\Delta t_s / \Delta t_c)^\alpha] \quad (3)$$

onde:

α = fator em função do tamanho do grão do mineral da rocha (tabelado).

Para a correlação entre o tempo de trânsito cisalhante e a tensão da rocha, Mason utilizou as tabelas de propriedades de rocha proposta por Wuerker⁵. Nestas tabelas há uma relação entre velocidade compressional (inverso do tempo de trânsito compressional) com a tensão da rocha. Mason observou que as velocidades compressionais, constante das tabelas de Wuerker são excessivamente baixas devido à, provavelmente, medidas em amostras secas de rocha. Desta maneira, o tempo de trânsito compressional foi calculada a partir da porosidade da rocha com a expressão:

$$\Delta t_c = [\Delta t_{ma} (1 - \phi)] + [\Delta t_f (\phi)] \quad (4)$$

onde:

Δt_{ma} = tempo de trânsito na matriz da
rocha ($\mu\text{seg}/\text{pé}$)

ϕ = porosidade

Δt_f = tempo de trânsito no fluido
contido nos poros da rocha ($\mu\text{seg}/\text{pé}$)

O tempo de trânsito compressional obtido na equação (4) foi utilizado na equação (1), tendo assim a relação entre tempo de trânsito cisalhante e tensão de compressão.

Para a escolha econômica da broca em função do tempo de trânsito cisalhante, Mason escolheu o campo de Blocker no leste do estado do Texas nos EUA, onde há uma intensa perfuração de poços, com topos de formações relativamente uniformes, uma larga gama de tipo de litologias são encontradas e onde a otimização hidráulica, de fluido de perfuração e operação foi atingido.

Com dados das várias brocas utilizado para desenvolver o campo, eliminando-se as brocas que perfuraram cimento, ferros caídos no poço e repassamentos, calculou-se o custo por pé perfurado com a expressão:

$$C_F = \frac{C_R (T_T + T_B) + C_B}{AD} \quad (5)$$

onde:

C_F = custo por pé perfurado (US\$/pé)

C_R = custo horário da sonda (US\$/h)

T_T = tempo de manobra (horas)

T_B = tempo de broca à fundo (horas)

C_B = custo da broca (US\$)

AD = intervalo perfurado pela broca (pés)

Traçou-se um gráfico Custo por pé x Profundidade das brocas identificadas pelo seu código IADC e determinou-se intervalos e códigos IADC que proporcionaram o menor custo (figura 1).

Mantendo-se o intervalo e códigos IADC da broca Mason construiu um gráfico de Tempo de trânsito cisalhante x Profundidade correlacionando-se assim o tempo de trânsito cisalhante com o tipo de broca recomendado (figura 2).

Finalmente Mason montou um gráfico correlacionando, o tempo de trânsito cisalhante em função do tempo de trânsito do fluido contido nos poros da formação, com as retas inclinadas de tensão de compressão dividindo os vários códigos IADC da broca recomendado (figura 3).

Mason testou o método em outros campos na Flórida, Wyoming e Michigan com ótimos resultados.

Modelos de perfuração

Somerton⁶, em 1959, em estudos de laboratório, determinou a correlação entre a taxa de penetração e as variáveis que a controlam, com a igualdade entre dois grupos adimensionais:

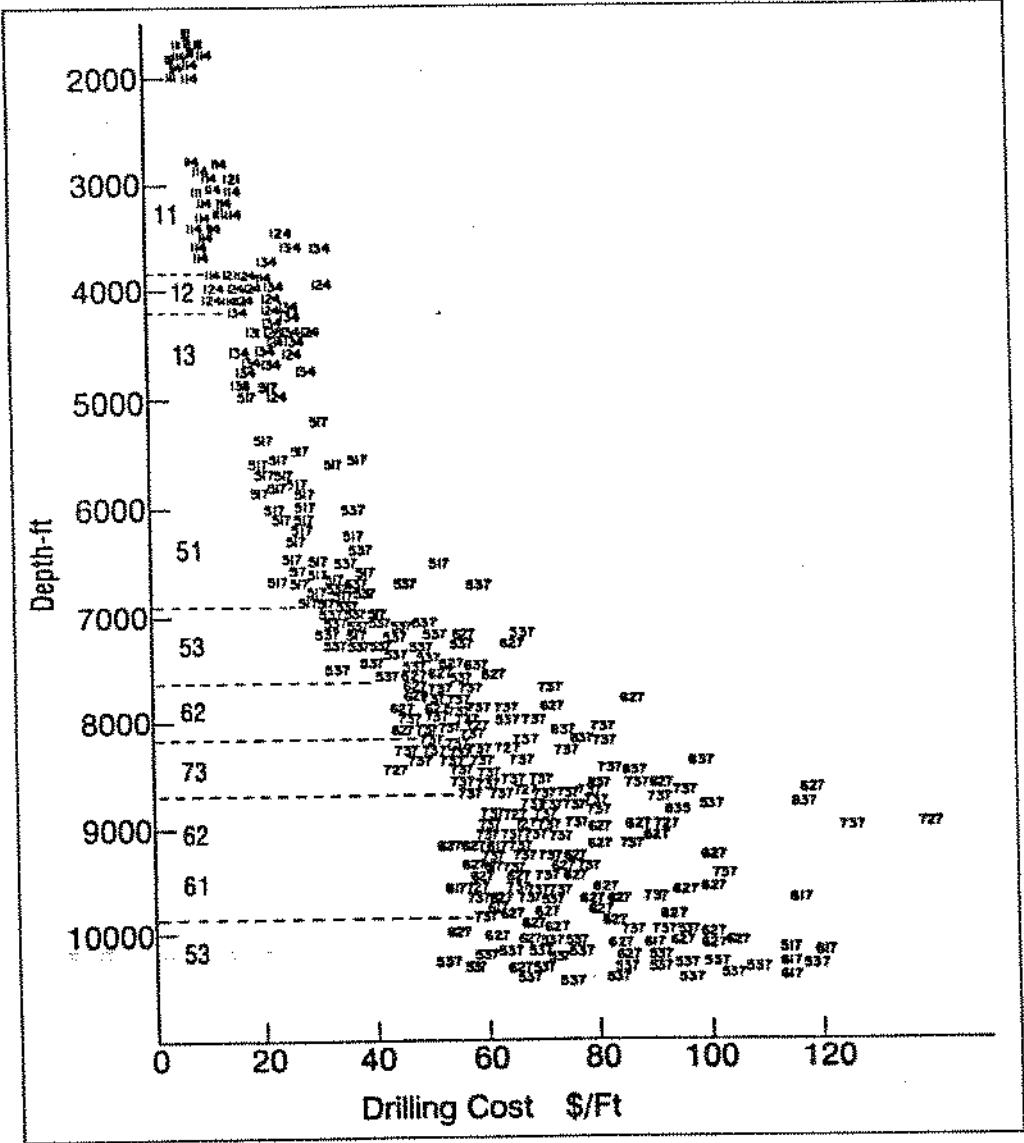


Figura 1. Seleção econômica das brocas para o campo de Blocker, Texas, EUA ref.[3]

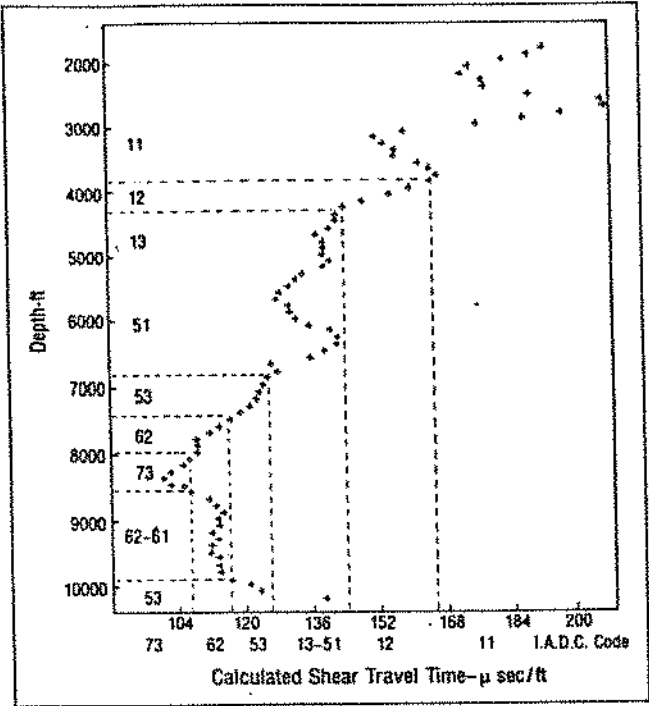


Figura 2. Perfil de seleção econômica da broca e seus limites ref[3]

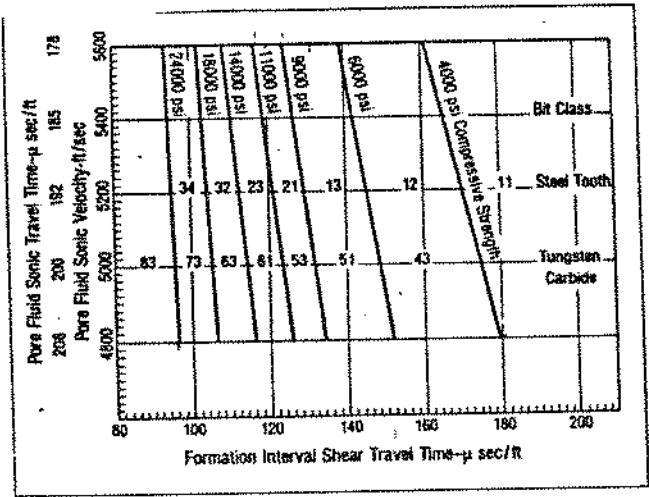


Figura 3. Guia para seleção de brocas tricônicas ref.[3]

$$\frac{\frac{dD}{dt}}{D_b N} = f \left[\frac{W}{D_b^2 S_d} \right]$$

ou

$$\frac{dD}{dt} = C D_b N \left[\frac{W}{D_b^2 S_d} \right]^a \quad (6)$$

onde:

$$\frac{dD}{dt} = \text{taxa de penetração} \quad (\text{pol/min})$$

C = constante de proporcionalidade

D_b = diâmetro da broca (pol)

N = rotação da coluna (rpm)

W = peso sobre broca (lb)

S_d = resistência à perfuração (lb/pol²)

a = coeficiente a determinar

Após as experiências em laboratório com broca de 1,25 pol de 2 cones, o autor chegou à expressão:

$$\frac{dD}{dt} = 1,5 D_b N \left[\frac{W}{D_b^2 S_d} \right]^2 \quad (7)$$

Maurer⁷ em 1962, derivou uma equação para a taxa de penetração, estudando o mecanismo de formação da cratera, na rocha, devido a ação dos dentes da broca, e supondo a perfeita remoção dos cascalhos da cratera formada, à partir da a expressão:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{4}{\pi D_b^2} \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

onde:

V = volume da rocha removido

t = tempo

Quando toda a rocha é removido da cratera entre dois dentes da broca:

$$V = n V_c \quad (9)$$

onde:

n = número de dentes

V_c = volume da cratera

Como o volume total de cada cratera é independente do tempo, a derivada da equação (9) em relação ao tempo é:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dn}{dt} V_c \quad (10)$$

A razão em que o dente atinge a formação é dado por:

$$\frac{dn}{dt} = I N \quad (11)$$

onde:

I = número de impactos na rocha por revolução

A força efetiva atuando na rocha é dada por:

$$F - F_o = \frac{(W - W_o)}{nT} \quad (12)$$

onde:

F = força atuando na broca

F_o = força necessária para iniciar a cratera

W_o = peso sobre a broca necessário para iniciar a cratera

nr = número de dentes em contato com a rocha quando ocorre a máxima força por dente.

O volume da cratera é proporcional a força aplicada e a tensão da rocha:

$$V_c \propto \frac{(F - F_o)^2}{S_d^2} \quad (13)$$

onde:

S_d = resistência à perfuração da rocha

Combinando as equações (8) a (13) tem-se

$$\frac{dD}{dt} \propto \frac{I N (W - W_o)^2}{nr^2 Db^2 S_d^2} \quad \text{para } W \gg W_o \quad (14)$$

$$\frac{dD}{dt} = 0 \quad \text{para } W < W_o \quad (15)$$

A imposição da equação (15) é uma aproximação desde que a rocha pode ser removida por abrasão e dD/dt torna-se realmente zero somente para $W = 0$.

O termo I/nr^2 pode ser assumida como independente do diâmetro da broca e a equação (14) torna-se:

$$\frac{dD}{dt} \propto \frac{N (W - W_o)^2}{Db^2 S_d^2} \quad \text{para } W \gg W_o \quad (16)$$

Como $W \gg W_o$ a equação (16) se reduz em:

$$\frac{dD}{dt} = k \frac{N W}{Db^2 S_d^2} \quad (17)$$

onde:

k = constante de proporcionalidade.

Young⁸, em 1969 escreveu um artigo sobre controle da perfuração por computador, utilizando o modelo de perfuração proposto por Galle & Wood⁹ e também estudado por Gomes¹⁰, no Brasil. O modelo de Galle & Wood descrito por Gomes é:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K (W-M) N^\lambda}{(1+C_2 h)} \quad (18)$$

onde:

dD/dt = taxa de penetração (pé/h)

K = parâmetro de perfurabilidade da rocha

W = peso sobre a broca (Klbs)

M = parâmetro do peso sobre a broca

N = velocidade de rotação da broca (rpm)

λ = expoente da velocidade de rotação da broca

C_2 = parâmetro de desgaste do dente

h = altura do dente normalizado (=1 para dente novo e =0 para dente totalmente desgastado)

A taxa de desgaste do dente é expressa por:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Af (PN + qN^2) 10^{-9}}{(D_1 - D_2 W) (1 + C_1 h)} \quad (19)$$

onde:

$\frac{dh}{dt}$ = taxa de desgaste do dente

Af = parâmetro de abrasividade da formação

P, q, D_1, D_2 e C_1 = parâmetros do tipo e do diâmetro da broca (valores tabelados)

A taxa de desgaste dos rolamentos é dado pela equação:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{N W^\alpha}{b} \quad (20)$$

onde:

$\frac{dB}{dt}$ = taxa de desgaste do rolamento

α = expoente do peso sobre a broca

b = constante dos rolamentos

A integração da equação (18) fornece o intervalo perfurado (AD) e da integração das equações (19) e (20) obtém-se o tempo até o desgaste total, ou desejado, do dente e rolamento, respectivamente. Devido à broca falhar por desgaste dos dentes ou do rolamento, deve-se adotar o menor tempo (T_B) entre os dois casos. Conhecido AD e T_B pode-se calcular o custo por metro (C_F) na equação (5), pois os outros parâmetros são conhecidos.

Um algoritmo que varie peso (W) e rotação (N) pode ser elaborado, para um mesmo tipo de broca e diâmetro, de modo a determinar o peso W e rotação N que minimize o custo C_F.

Dividindo-se a equação (18) pela (19) obtém-se uma equação diferencial que relaciona avanço com o desgaste de dente (dD/dh). Integrando-se esta equação resulta em uma equação de avanço quando o limitante da vida útil da broca é o dente.

$$ADh = \frac{k N^\lambda (W-MD) (D_1-D_2W)}{A_f (PN+qN^3) 10^{-3}} \left[\frac{C_1}{C_2} h + \frac{C_2-C_1}{C_2^2} \ln (1+C_2h) \right] \quad (21)$$

Com o mesmo procedimento entre as equações (18) e

(20) obtém-se a relação entre o avanço (ΔD_B) e o desgaste da broca quando o desgaste dos rolamentos é o limitante na vida útil da broca.

$$\Delta D_B = \frac{K N^\lambda (W-M)(D_1-D_2 W)}{A_f (PN+qN^3) 10^{-9} C_2} \left\{ \left[1 + \frac{2C_1 b A_f (PN+qN^3) 10^{-9}}{N W^\alpha (D_1-D_2 W)} B \right]^{1/2} - 1 + \frac{C_2-C_1}{C_2} \ln \left[\frac{C_1-C_2}{C_1} + \frac{C_2}{C_1} \left[1 + \frac{2C_1 b A_f (PN+qN^3) 10^{-9}}{N W^\alpha (D_1-D_2 W)} B \right]^{1/2} \right] \right\} \quad (22)$$

O tempo de perfuração é calculado integrando-se a equação (19) ou (20) a depender do limitante da vida útil da broca, dente ou rolamento.

A determinação dos parâmetros b , K , C_2 , A_f , M e λ baseia-se em dados da broca anterior.

A constante do rolamento b pode ser obtido à partir da equação (20).

$$b = \frac{T_B N W^\alpha}{B} \quad (23)$$

O parâmetro de perfurabilidade da formação K é determinado calculando-se a perfurabilidade média da formação, impondo-se um desgaste médio dos dentes à partir da equação (18)

$$K = \frac{\Delta D (1 + C_2 \frac{h}{2})}{T (W - M) N^\lambda} \quad (24)$$

onde:

T = tempo estimado para se desgastar o dente de 50% (horas)

O parâmetro de desgaste do dente C_z é obtido à partir da taxa de penetração inicial (R_o) quando o desgaste do dente é zero ($h = 0$) e da taxa final (R_f) com o desgaste h da broca anterior. Impondo-se estas duas condições na equação (18) e dividindo-se as equações obtém-se:

$$C_z = \frac{R_o - R_f}{R_f h f} \quad (25)$$

O parâmetro de abrasividade da formação A_f é calculado à partir da equação (19)

$$A_f = \frac{(D_1 - D_2 W)}{T_B (P_N + q N^3) 10^{-9}} \left(h + \frac{C_1 h^2}{2} \right) \quad (26)$$

O parâmetro M de peso sobre a broca exige um teste de 5 pontos, efetuado na broca anterior que consiste em aplicar um peso W_1 e uma rotação N_1 e perfurar um certo intervalo (30cm) e anotar a sua taxa de penetração R_1 . Repetir o teste com o mesmo peso W_1 e mudar a rotação para N_2 anotando a taxa R_2 . Mudar o peso para W_2 mantendo a rotação N_2 com a taxa R_3 . Mantendo o peso W_2 voltar a rotação N_1 e anotar R_4 . Para se certificar, voltar ao peso W_1 e N_1 e anotar a taxa R_1 . Se não houver mudança brusca de litologia R_4 deve-se aproximar de R_1 .

Colocando-se os dados obtidos num sistema cartesiano de $R \times W$ e unindo-se R_2 com R_3 (reta M_1) e R_1 com R_4 (reta M_2) e sendo por definição

$$M = \frac{M_1 + M_2}{2}$$

Por construção geométrica chega-se a:

$$M = \frac{1}{2} \left[\frac{R_2 W_2 - R_3 W_1}{R_2 - R_3} + \frac{R_1 W_2 - R_4 W_1}{R_1 - R_4} \right] \quad (27)$$

O expoente λ da velocidade de rotação da broca é obtido também do teste de 5 pontos fazendo:

$$\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\lambda_1} = \frac{R_1}{R_2} \quad e \quad \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\lambda_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (28)$$

Definindo:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (29)$$

Obtemos:

$$\lambda = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2} \frac{R_4}{R_3}}{\ln \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2} \quad (30)$$

Os valores de P , q , c_1 , D_1 e D_2 são tabelados em função do tipo e diâmetro da broca.

Bourgoyne & Young^{11,12} em 1974, desenvolveram um modelo de perfuração com base em sete parâmetros que afetam a taxa de penetração.

$$\frac{dD}{dt} = e \left(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j \right) \quad (31)$$

onde:

$$\frac{dD}{dt} = \text{taxa de penetração (pé/h)}$$

a_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) = coeficientes a determinar

X_j ($j = 2, 3, \dots, 8$) = parâmetros de perfuração

Os coeficientes a_i são determinados a partir de uma regressão múltipla apresentada no anexo A.

Os parâmetros X_j serão definidos adiante.

$$X_2 = 10000 - D \quad (32)$$

onde:

X_2 = parâmetro de compactação normal

D = profundidade (pés)

$$X_3 = D^{0,69} (gp - 9,0) \quad (33)$$

onde:

X_3 = parâmetro de subcompactação

gp = equivalente em pressão de poros (lb/gal)

$$X_4 = D (gp - \rho_c) \quad (34)$$

onde:

X_4 = parâmetro do diferencial de pressão

ρ_c = peso equivalente do fluido de perfuração em
circulação - ECD (lb/gal)

$$X_5 = \ln \left[\frac{\frac{W}{Db} - \left(\frac{W}{Db} \right)_t}{4,0 - \left(\frac{W}{Db} \right)_t} \right] \quad (35)$$

onde:

X_5 = parâmetro de peso sobre a broca

W = peso sobre a broca (Klbs)

Db = diâmetro da broca (pol)

$(W/Db)_t$ = peso sobre broca por pol necessário para
se começar a perfurar (Klbs)

$$X_6 = \ln \left[\frac{N}{100} \right] \quad (36)$$

onde:

X_6 = parâmetro de rotação da broca

N = rotação da broca (rpm)

$$X_7 = -h \quad (37)$$

onde:

X_7 = parâmetro de desgaste de dente

h = fração do desgaste de dente variando de 0
(dente novo) a 1 (desgaste total)

$$X_8 = \ln \left(\frac{\rho Q}{350 \mu dn} \right) \quad (38)$$

onde:

X_8 = parâmetro hidráulico da broca

ρ = peso específico do fluido de perfuração
(lb/gal)

Q = vazão de bombeio (gpm)

μ = viscosidade aparente à $10000^{-1} \text{ s}^{-1}$ (cp)

dn = diâmetro dos jatos da broca (pol)

O parâmetro hidráulico X_8 pode ser, também, calculado pela equação (57), apresentada no capítulo IV, da referência [12].

Os autores também propõe um modelo para o desgaste do dente e dos rolamentos de uma broca tricônica.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H_1}{\tau_H} \left[\frac{N}{100} \right]^{H_1} \left[\frac{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\text{máx}} - 4}{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\text{máx}} - \frac{W}{Db}} \right] \left[\frac{1 + \frac{H_2}{2}}{1 + H_2 h} \right] \quad (39)$$

onde:

$\frac{dh}{dt}$ = taxa de desgaste dos dentes da broca

$H_1, H_2, H_3, (W/Db)_{\text{máx}}$ = valores tabelados em
função do tipo de broca

τ_H = constante de abrasividade
da formação (horas)

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{\tau_b} \left[\frac{N}{100} \right]^{b_1} \left[\frac{W}{4Db} \right]^{b_2} \quad (40)$$

onde:

$\frac{dB}{dt}$ = taxa de desgaste dos rolamentos

τ_b = constante da vida útil dos rolamentos (horas)

b_1, b_2 = constante tabelada em função do tipo de fluido de perfuração e tipo de rolamento

Os autores propõem também uma otimização do peso sobre a broca e rotação da broca com mínimo custo.

A expressão do custo por pé foi definida anteriormente na equação (5). Para minimizar C_F tem-se que calcular ΔD e T_b uma vez que os outros parâmetros já são conhecidos.

O intervalo perfurado ΔD pode ser calculado como:

$$\frac{dD}{dt} = e^{\left[a_1 + \sum_{j=2}^6 a_j X_j + a_8 X_8 \right]} e^{-a_7 h} \quad (41)$$

Representando por J_1 todo o termo antes do parâmetro de desgaste de dente, $\exp(-a_7 h)$, na equação (41) temos:

$$dD = J_1 e^{-a_7 h} dt \quad (42)$$

A equação de desgaste do dente (39) pode ser rearranjada para:

$$dt = \frac{\tau_H}{Hs} \left[\frac{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\max} - \frac{W}{Db}}{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\max} - 4} \right] \left(\frac{100}{N} \right)^{H_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{H_2}{2}} \right) (1 + H_2 h) dh \quad (43)$$

Representando por J_2 todo o termo antes de $(1 + H_2 h) dh$ na equação (43) tem-se:

$$dt = J_2 (1 + H_2 h) dh \quad (44)$$

Substituindo (44) em (42) vem:

$$dD = J_1 J_2 e^{-a_7 h} (1 + H_2 h) dh \quad (45)$$

Integrando a equação (45) tem-se:

$$\Delta D = J_1 J_2 \left[\frac{1 - e^{-a_7 h_f}}{a_7} + \frac{H_2 (1 - e^{-a_7 h_f} - a_7 h_f e^{-a_7 h_f})}{a_7^2} \right] \quad (46)$$

A equação (46) pode ser utilizada diretamente, para o caso em que o dente falha antes que o rolamento. Caso a vida útil do rolamento é atingida antes que a do dente, tem-se que calcular t_b a partir da integração da equação (40):

$$t_b = \tau_b \left[\frac{100}{N} \right]^{b_1} \left[\frac{4Db}{W} \right]^{b_2} b_f \quad (47)$$

Com t_b calculado estima-se o desgaste do dente integrando-se a equação (44):

$$t_b = J_2 \left(h_f + \frac{H_2 h_f^2}{2} \right) \quad (48)$$

Resolvendo-se a equação quadrática (44) tem-se:

$$h_f = \sqrt{\left(\frac{1}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{2tb}{H_2 J_2}\right)^2} - \frac{1}{H_2} \quad (49)$$

O h_f calculado na equação (49) deve ser utilizado na equação (46) para o cálculo de ΔD no caso de falha do rolamento antes do desgaste total do dente (ou no caso de h_f estipulado previamente).

Reza & Alcocer^{13,14} em 1986, desenvolveram um modelo de perfuração à partir de análise dimensional:

$$\frac{dD}{N d} = K_1 \left[\frac{N d^2}{v} \right]^{aR1} \left[\frac{N d^3}{Q} \right]^{aR2} \left[\frac{E d}{Wd} \right]^{aR3} \left[\frac{\Delta P d}{Wd} \right]^{aR4} \quad (50)$$

onde:

$\frac{dD}{dt}$ = taxa de penetração (pé/min)

N = rotação da broca (rpm)

d = diâmetro do rolamento da broca (pol)

v = viscosidade do fluido de perfuração (cp)

Q = vazão de bombeio (gpm)

E = dureza da rocha (lb/pol²)

Wd = peso por diâmetro da broca (Klbs/pol)

ΔP = diferencial de pressão (lb/pol²)

K_1 = coeficiente de proporcionalidade

$aRi(i=1,2,...4)$ = coeficiente a determinar

Com análise dimensional os autores desenvolveram ainda as expressões da taxa de desgaste do dente e dos rolamentos

$$\frac{\dot{h}}{N D} = K_2 \left[\frac{Q}{N D^3} \right]^{bR1} \left[\frac{W}{E D b^2} \right]^{bR2} \left[\frac{v D}{Q} \right]^{bR3} \quad (51)$$

onde:

\dot{h} = taxa de desgaste do dente

D_b = diâmetro da broca (pol)

K_2 = coeficiente de proporcionalidade

$b_{Ri}(i=1,2,3)$ = coeficientes a determinar

$$\frac{\dot{B}}{N} = K_3 \left[\frac{t_f H d}{W d N} \right]^{CR1} \left[\frac{v}{N d^2} \right]^{CR2} \left[\frac{Q}{N d^3} \right]^{CR3}$$

onde:

\dot{B} = taxa de desgaste dos rolamentos

t_f = temperatura no fundo do poço ($^{\circ}F$)

H = coeficiente de transferência de calor
(Btu/ $^{\circ}F$ pol² h)

K_3 = coeficiente de proporcionalidade

$c_{Ri}(i=1,2,3)$ = coeficientes a determinar

Tomando-se os logaritmos das equações (50) a (52) determina-se os coeficientes a_{Ri} , b_{Ri} e c_{Ri} através de uma regressão múltipla.

Winters & Warren¹⁵ em 1987 apresentaram um modelo de perfuração para brocas tricônicas relacionando a taxa de penetração com os parâmetros de perfuração, desenho da broca e mecânica das rochas:

$$\frac{1}{\frac{dD}{dt}} = \frac{\sigma D^2}{N W} \left[\frac{a \sigma D \epsilon}{W} + \frac{\gamma}{\epsilon} \right] + \frac{b w}{N D} + \frac{C \rho \mu D}{I_m} \quad (53)$$

onde:

$\frac{dD}{dt}$ = taxa de penetração (pé/h)

σ = tensão da rocha (lb/pol²)

D = diâmetro da broca (pol)

- N = velocidade de rotação da broca (rpm)
 W = peso sobre a broca (Klbs)
 ϵ = ductibilidade da rocha (%)
 γ = coeficiente da excentricidade dos cones da broca [L^{-1}]
 b_w, C = coeficiente em função do projeto da broca
 ρ_m = peso específico do fluido de perfuração (lb/gal)
 μ = viscosidade da lama (cp)
 I_m = força de impacto modificado

O modelo proposto é um prosseguimento do modelo de perfuração proposto por Warren^{16,17} em 1981 e 1984, em que foi adicionado o efeito da excentricidade (*offset*) da broca, e a ductibilidade da rocha em que os autores afirmam ser a propriedade de maior influência no desempenho da rocha. A excentricidade é reconhecida como importante dado de projeto da broca para se perfurar rochas dúcteis.

CAPÍTULO III

MÉTODO DE SELEÇÃO DO TIPO DE BROCA POR PERFIL ELÉTRICO

Neste capítulo são descritos o método de seleção de broca proposto por Mason, a aplicação do método para 4 poços da área marítima de Alagoas e comentados os bons resultados obtidos.

Escolha do Método

Dos dois métodos para seleção do tipo de broca, constante da literatura e apresentados no capítulo II, adotou-se o proposto por Mason². A escolha se deve à dificuldade de se automatizar o processo de escolha da broca, proposto por Dernbach¹, apesar da simplicidade do método.

Como a tensão de compressão da rocha independe da área de estudo e, como Mason próprio afirma que a figura 3 é um guia universal para seleção de brocas tricônicas, desenvolveu-se o método à partir desta figura.

Dados do perfil elétrico

Todos perfis elétricos corridos nos poços, na Petrobrás, são armazenados em fitas magnéticas, com a

respectiva profundidade e código de litologia, facilitando a utilização dos dados e eliminando-se o trabalho de identificação da litologia, exaustivo e difícil para quem não é da área.

Para o cálculo do tempo de trânsito cisalhante utilizou-se dados de tempo de trânsito do perfil BHC (*bore hole compensated*), com um intervalo adotado de 1 metro, isto é, calculou-se metro a metro.

Cálculo do tempo de trânsito cisalhante

Como visto no capítulo II a equação (3) correlaciona o tempo de trânsito cisalhante (Δt_s) em função do tempo de trânsito compressional (Δt_c) da relação $\Delta t_s/\Delta t_c$ tabelada e do fator α do tamanho dos grãos:

$$\Delta t_s = \Delta t_c [(\Delta t_s/\Delta t_c)^\alpha]$$

O fator $\Delta t_s/\Delta t_c$ e α foram tabelados (tabela 2), com adaptações, a partir da tabela proposta por Mason e em função do código de litologia usado pela Petrobrás, assumindo-se alguns valores (identificados por *).

Existe um perfil LSS (*long space sonic*) de raio de investigação mais profundo, que fornece diretamente o tempo de trânsito cisalhante e compressional, mas está em fase experimental e foi pouco utilizado até o dia de hoje. Caso o

VALORES DE $\Delta t_s/\Delta t_c$ e α

CÓDIGO LITOLOGIA	$\Delta t_s/\Delta t_c$	Vs (pe/s)	Δt_m (us/pe)	α
02 CALCAREO CRISTALINO	1.90	21000.	47.6	1.00
04 COQUINA	2.00	21000.	47.6 *	* 1.00
06 CALCISSILTITO	2.10	21000.	47.6 *	* 1.00
08 CALCARENITO	2.00	21000.	47.6 *	* 1.05
10 CALCIRUDITO	1.90	21000.	47.6 *	* 1.10
30 DOLOMITA	1.80	25000.	40.0	1.15
40 BRECHA		22200.	45.0 *	* 1.15
42 CONGLOMERADO		18000.	55.6 *	* 1.20
44 DIAMICTITO	1.85	19000.	52.6	* 1.05
46 TILITO		22200.	45.0 *	* 1.00
48 AREIA	1.50	18000.	55.6 *	* 1.15
49 ARENITO	1.60	19500.	51.3	1.00
54 SILTITO	1.80	23000.	43.5	1.00
55 ARGILA	3.20	6000.	166.7	* 0.95
56 ARGILITO	1.90	19000.	52.6	* 0.95
57 FOLHELHO	1.72	19500.	51.3	1.00
58 MARGA	2.30	21000.	47.6	* 0.95
64 IGNEA NAO IDENTIFIC.		22200.	45.0 *	* 1.00
65 DIABASIO	1.70	22700.	44.0	1.00
66 BASALTO	1.55	20150.	49.6	1.00
67 GRANITO	1.70	21350.	46.8	1.00
70 METAMORFICA N IDENTI		22200.	45.0 *	* 1.00
71 GNAISSE	1.80	25000.	40.0	1.00
72 FILITO		22200.	45.0 *	* 1.00
73 XISTO		22200.	45.0 *	0.95
74 QUARTZITO	1.50	21500.	46.5	* 1.00
75 META-ARENITO		22200.	45.0 *	* 1.00
76 META-SILTITO		22200.	45.0 *	* 1.00
77 ARDOSIA		22200.	45.0 *	* 1.00
78 ULTRABASICA		22200.	45.0 *	* 1.00
81 TAQUIDRITA		15000.	66.7 *	* 1.00
82 ANIDRITA	2.45	20000.	50.0	* 1.00
83 GIPSITA	2.45	19050.	52.5	* 1.00
84 SAL NAO IDENTIFICADO	2.15	15000.	66.7 *	* 1.00
85 HALITA	2.15	15000.	66.7 *	* 1.00
86 SILVINITA		15000.	66.7 *	* 1.00
87 CARNALITA		15000.	66.7 *	* 1.00
91 CHAMOSITO		22200.	45.0 *	* 1.00
92 CARVAO		22200.	45.0 *	* 1.00
94 SILEX		22200.	45.0 *	* 1.00

Tabela 2 Valores de $\Delta t_s/\Delta t_c$ e α em função da litologia

uso deste tipo de perfil se torne rotineiro e confiável, o cálculo da tensão de compressão será quase que imediato. Pode-se calcular com Δt_s e Δt_c , segundo Campos¹⁸ e Kowalski¹⁹, o módulo de rigidez ou módulo de elasticidade angular (G), o módulo de Young (E) e o módulo de Poisson (μ) com grande aplicação na previsão de gradiente de fratura, facilitando o correto posicionamento das sapatas dos revestimentos, peso máximo de fluido de perfuração permitido durante a perfuração, auxílio no combate ao influxo de fluidos da formação (kick) e na completação do poço.

Determinação da tensão de compressão

Devido serem retas os vários valores de tensão de compressão, que delimitam o uso de cada tipo de broca, na figura 3 e para facilidade computacionais, à partir da velocidade de 4800 pés/s (208 μ seg/pé) no fluido dos poros determinou-se os vários pares ordenados de tempo de trânsito cisalhante e tensão de compressão. Colocando estes pontos num gráfico (figura 4) obtém-se a equação da curva:

$$Sc = \left[e^{(-0,021465 \Delta t_c)} \right] \times 171069,79 \quad (54)$$

onde:

Sc = tensão de compressão (lb/pol²)

Δt_c = tempo de trânsito cisalhante (μ seg/pé)

O mesmo procedimento (figura 5) foi feito para a velocidade de 5600 pés/s, determinando-se a equação:

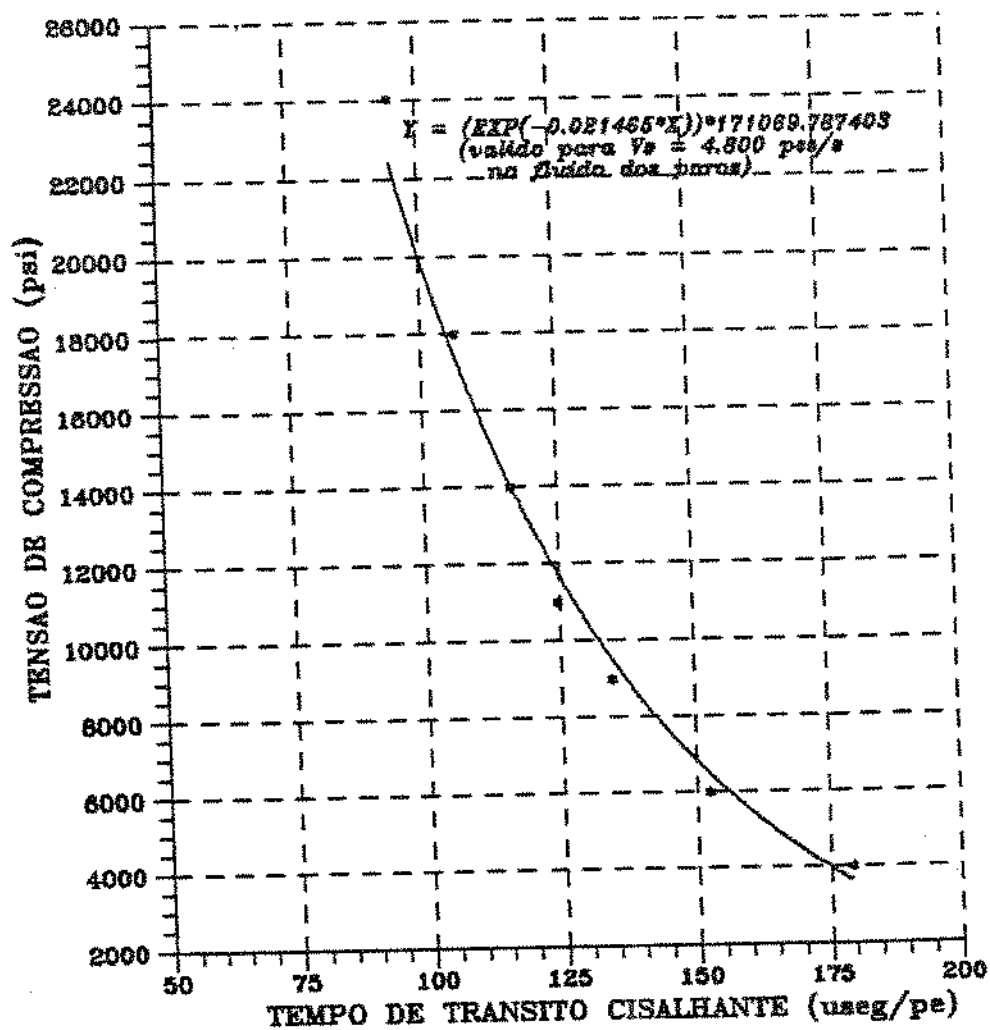


Figura 4. Curva de tensão de compressão x tempo de trânsito cisalhante para $V_{\text{fluido}}=4800\text{ps/s}$

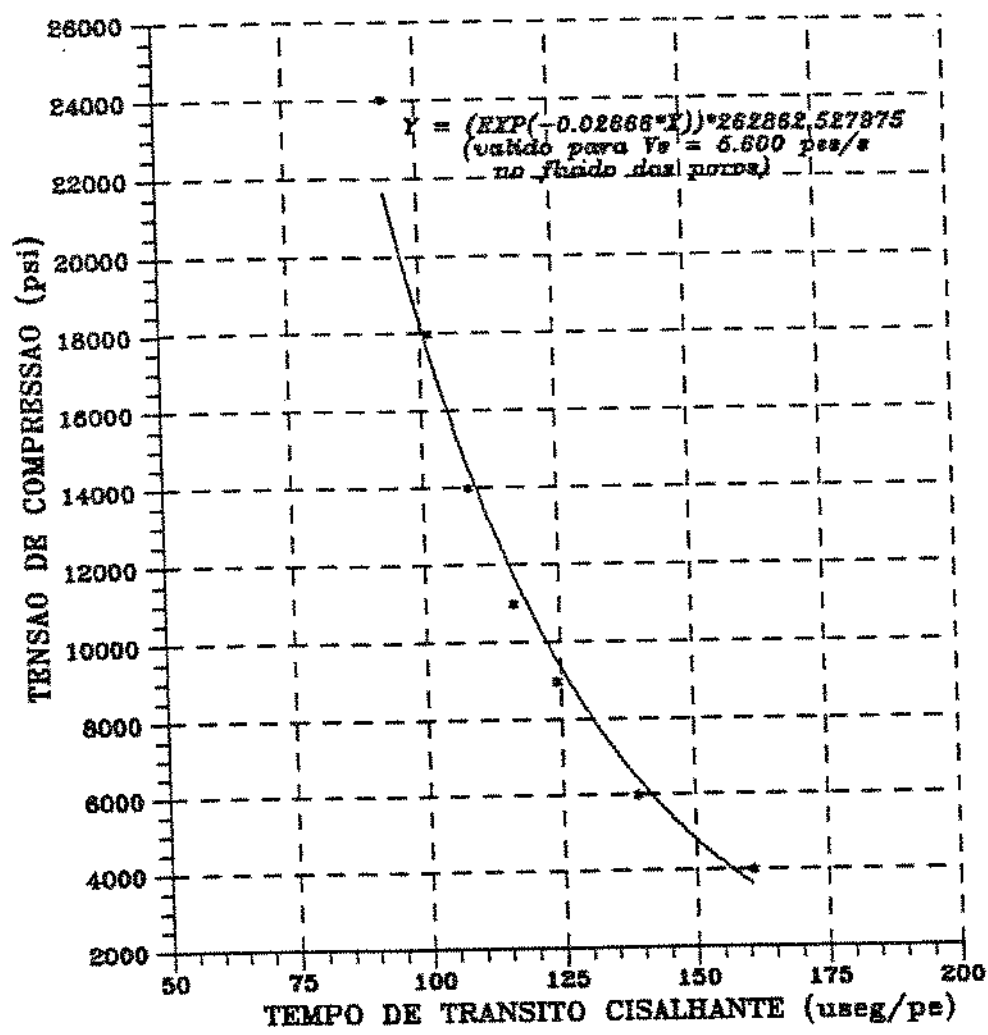


Figura 5. Curva de tensão de compressão x tempo de trânsito cisalhante para $V_{\text{fluido}}=5600\text{pés/s}$

$$S_c = \left[e^{(-0,02666 \Delta t_c)} \right] \times 262862,53 \quad (55)$$

Com este procedimento pode-se calcular a tensão de compressão em função do tempo de trânsito cisalhante, para qualquer tempo de trânsito no fluido dos poros, bastando para tanto, interpolar linearmente entre as duas equações.

Para o cálculo da tensão de compressão em função do tempo de trânsito compressional obtido do perfil BHC e auxílio da tabela 2 foi feito o programa SIGMAC (anexo B).

Para os 4 poços de correlação da área de estudo, situado no litoral de Alagoas, foi adotado um tempo de trânsito no fluido dos poros de $\Delta t_f = 183 \mu\text{seg/pé}$, constante em todo o poço. Como nesta área o fluido dos poros é água salgada (excessão às zonas portadoras de hidrocarbonetos), e tendo a água do mar um $\Delta t_f = 189 \mu\text{seg/pé}$, aliada a pouca inclinação das retas de tensão de compressão na figura 3, o erro cometido com este procedimento é pequeno.

Os resultados da tensão de compressão x profundidade para os poços em questão são mostrados nas figuras 6 a 9. Para melhor análise foram colocadas as retas verticais divisórias e entre elas o tipo de broca recomendado (os dois primeiros dígitos do código IADC).

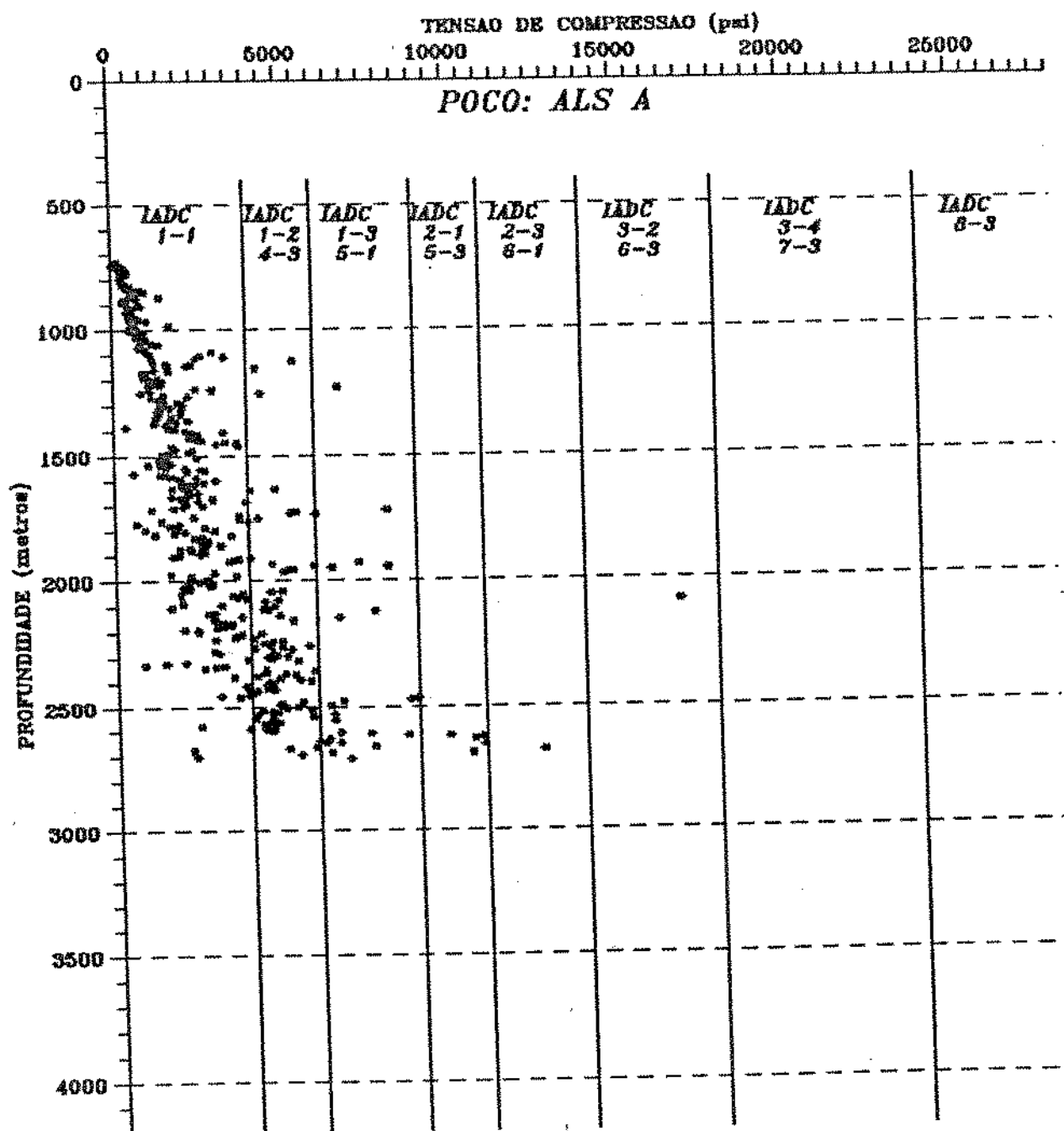


Figura 6. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS A

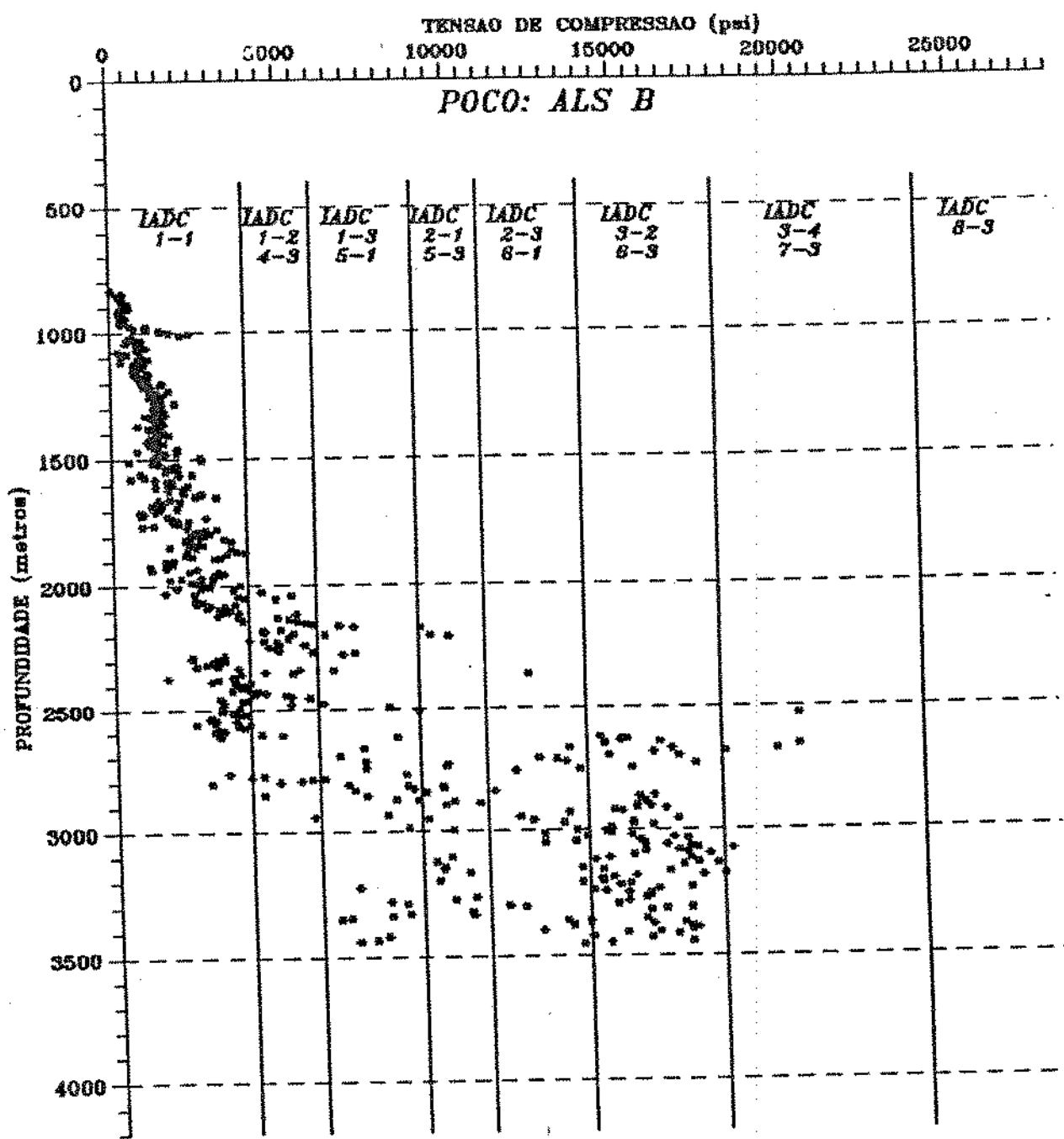


Figura 7. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS B

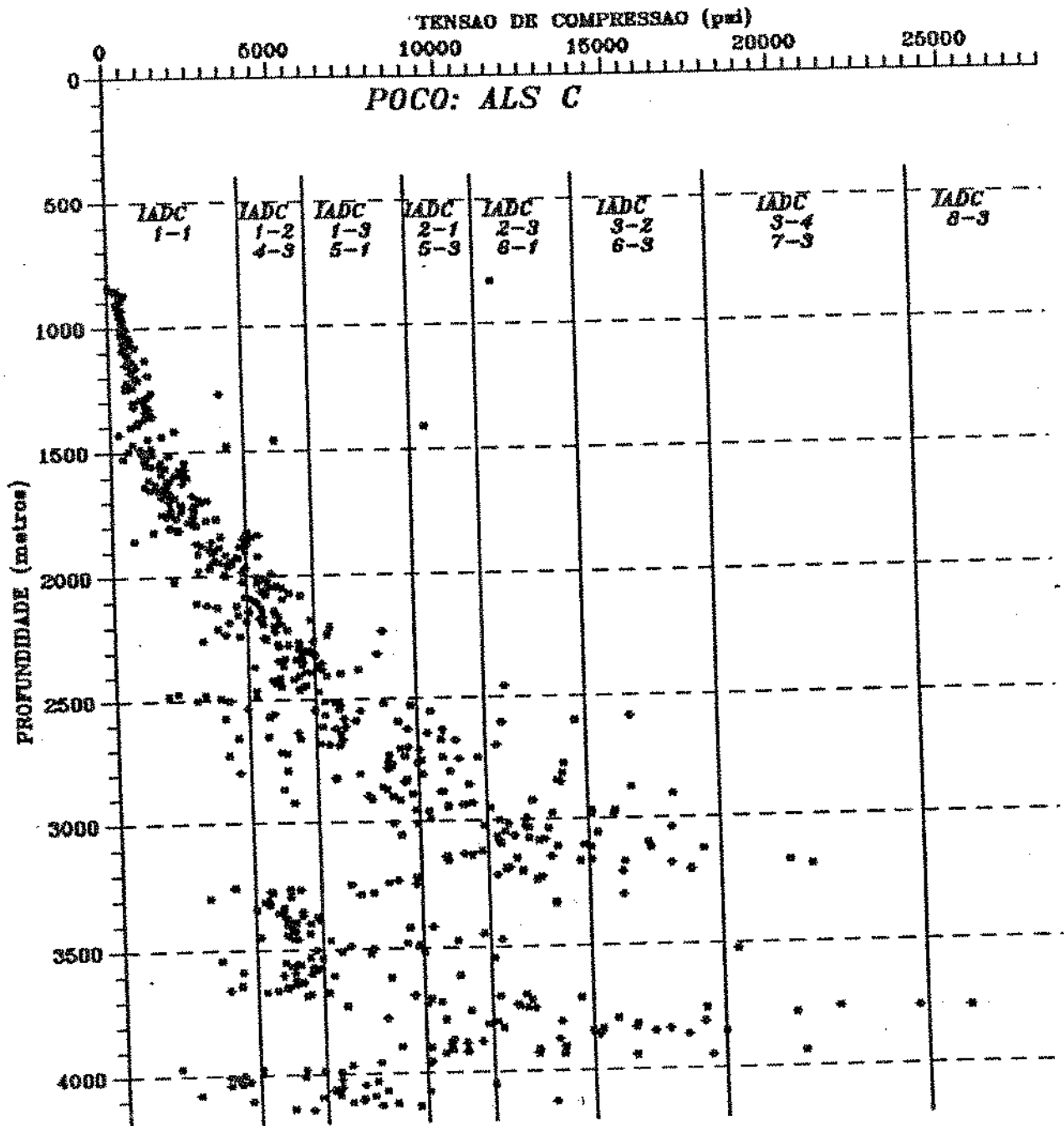


Figura 8. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS C

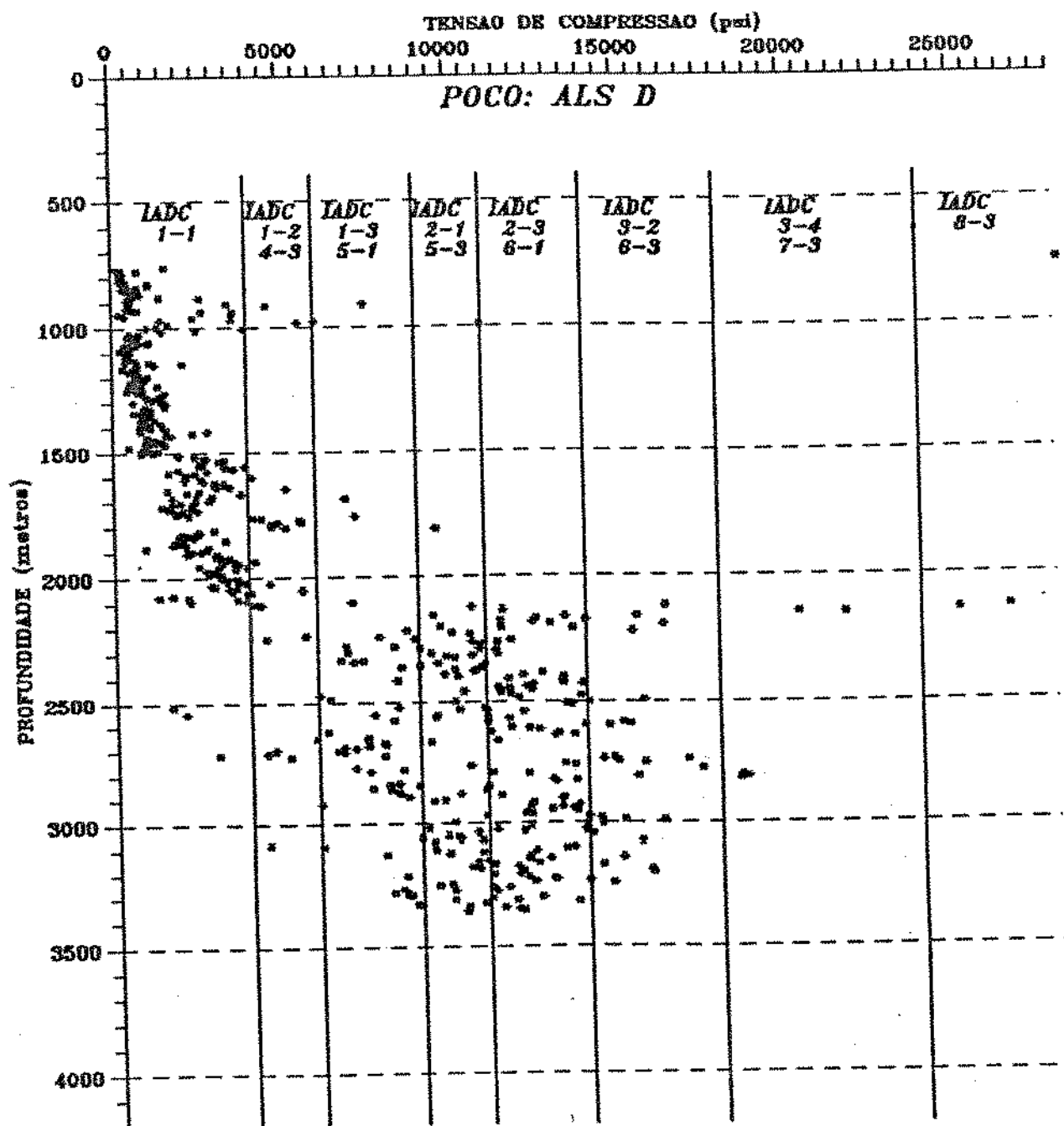


Figura 9. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de broca do poço ALS D

POÇO ALS A

QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS

Nº BROCA	DIAM. (pol)	COD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
2	17 1/2	1 1 1	350	180	35	120	20,0	2 2 0
3		1 3 4	530	220	40	120	13,3	-
4	12 1/4	1 1 4	750	836	40	130	20,1	6 8 1
5		1 1 4	1586	157	40	125	7,0	7 3 1
6		5 1 7	1743	15	35	70	1,8	0 0 0
7		1 3 6	1758	85	60	120	3,7	5 5 1
8		4 3 7	1843	123	50	110	5,7	6 3 1
9		1 1 1	1966	107	60	100	5,5	5 5 0
6R		5 1 7	2073	173	60	60	3,5	4 3 1
10		1 3 6	2246	122	60	90	3,2	4 6 1
11		2 1 4	2368	32	70	70	3,3	3 3 0
12		5 1 7	2400	95	55	90	2,8	3 8 1
13	8 1/2	1 3 4	2495	6	30	90	3,0	2 2 0
14		4 3 7	2501	95	35	70	3,8	1 1 0
16		2 1 4	2614	33	50	80	2,3	6 6 0
14R		4 3 7	2647	62	42	65	2,3	-
17	6 1/8	2 1 1	2709	7	12	80	1,0	6 6 0
18		5 3 7	2716	21	12	45	1,3	1 4 0
19		5 3 7	2737	60	25	60	1,6	2 5 1
20		5 3 7	2797	3	30	50	1,2	1 2 0

Tabela 3. Quadro de broca do poço ALS A

DESGASTE: D = DENTE R = ROLAMENTO C = CALIBRE

POÇO ALS B

QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS

Nº BROCA	DIAM. (pol)	COD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
4	17 1/2	1 1 1	845	312	44	170	14,5	1 6 1
5		1 1 1	1157	290	48	170	6,0	3 8 8
6		1 1 1	1447	129	60	150	3,9	4 7 1
7		1 1 1	1576	25	60	150	2,0	-
11		1 1 1	1620	25	55	150	1,8	7 7 0
13		1 1 1	1654	100	40	100	2,5	3 8 1
14		1 1 1	1754	58	70	130	2,2	7 8 1
15		1 1 1	1812	35	62	150	1,9	3 8 1
16		1 3 1	1847	10	53	130	1,8	4 3 1
17		1 3 1	1857	54	66	130	1,6	4 7 1
18		1 1 1	1911	37	48	170	1,6	8 3 1
19		1 1 1	1948	48	48	165	1,6	8 8 1
20		1 1 1	1996	21	55	160	1,3	8 8 1
21		1 1 1	2017	61	66	160	1,5	6 8 1
22		1 1 1	2078	44	66	110	1,5	7 7 1
23		1 1 1	2122	51	66	125	1,4	7 8 1
24		1 3 4	2173	39	66	110	1,4	5 7 1
25		1 1 4	2212	35	70	150	1,5	1 5 1
28	12 1/4	1 3 6	2247	107	50	95	4,4	7 2 1
29		5 1 7	2354	214	55	50	3,4	7 3 1
30		5 1 7	2568	26	68	50	1,5	0 0 0
33	8 1/2	1 3 6	2598	71	44	80	3,0	7 2 3
34		5 1 7	2669	175	40	60	2,6	3 4 2
35		5 1 7	2844	168	42	65	1,8	2 8 1
36		5 1 7	3012	109	44	55	1,5	0 4 0
37		5 1 7	3121	108	44	55	1,2	0 8 0
38		5 3 7	3229	61	48	55	1,1	0 8 0
39		5 1 7	3290	9	44	55	0,8	0 0 0
39R		5 1 7	3349	50	44	55	1,2	3 3 1
41		5 1 7	3399	40	44	55	0,8	4 3 1
42		2 1 6	3439	22	55	70	1,1	7 4 1
43		5 3 7	3461	21	46	55	0,7	0 3 0

Tabela 4. Quadro de broca do poço ALS B

DESGASTE D = DENTE R = ROLAMENTO C = CALIBRE

POÇO ALS C
QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS

Nº BROCA	DIÂM. (pol)	CÓD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
5	17 1/2	1 1 1	850	282	40	110	8,3	351
6		1 1 1	1132	260	65	180	10,2	671
7		1 1 1	1392	84	70	180	4,7	884
8		1 3 1	1476	133	70	120	3,9	671
9		1 3 1	1609	188	80	120	5,2	350
10		1 1 1	1797	180	70	180	2,6	661
11		1 3 1	1854	21	80	100	1,4	770
12		1 3 1	1875	60	80	140	1,9	770
13		1 1 1	1935	51	75	160	2,3	680
14		1 1 1	1986	63	57	130	2,1	770
15		1 1 1	2049	49	80	180	2,1	781
16		1 3 1	2098	32	80	110	1,6	730
17		1 1 1	2130	35	75	180	2,5	-
18		1 1 1	2165	31	80	100	1,1	550
19		1 1 1	2196	35	80	100	1,9	840
20		1 3 1	2231	30	75	55	1,7	470
21		5 1 5	2261	63	78	55	1,3	060
22		5 3 5	2340	12	-	-	0,7	-
23		1 1 1	2352	46	75	80	1,4	571
24		1 1 1	2398	45	80	100	1,5	470
25		1 1 1	2443	16	-	-	1,6	-
26		1 1 1	2459	28	85	90	1,2	570
27	12 1/4	4 3 7	2487	31	60	120	2,1	774
28		4 3 7	2518	19	55	65	0,9	830
29		1 1 1	2537	30	55	100	1,9	780
30		5 1 7	2567	45	60	60	1,4	720
31		1 3 6	2612	28	60	80	1,4	530
32		1 3 6	2640	32	60	80	1,2	530
33		5 3 7	2672	48	50	60	1,1	780
34		1 3 6	2723	26	60	80	1,6	630
35		5 1 7	2749	13	40	60	1,2	210
36		2 1 6	2762	12	60	80	0,8	741
37		5 3 7	2774	99	60	45	1,5	521
38		5 3 7	2873	17	60	45	0,9	220
39		2 1 6	2890	30	65	60	1,7	430
40		5 1 7	2920	86	56	60	1,2	220

TABELA 5 - QUADRO DE BROCA DO POÇO ALS C

DESGASTE D = DENTE R = ROLAMENTO C = CALIBRE

POÇO ALS C
QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS
(continuação)

Nº BROCA	DIAM. (pol)	COD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
42	8 1/2	1 2 4	3006	25	25	90	1,2	5 5 0
43		5 1 7	3031	98	42	65	1,6	8 6 1
44		2 1 6	3129	20	45	65	1,3	7 2 1
45		5 3 7	3149	58	40	55	1,2	2 5 0
46		5 3 7	3207	71	40	55	1,1	1 5 0
47		5 3 7	3278	18	40	50	0,9	1 1 0
47R		5 3 7	3365	26	40	55	1,5	1 3 0
49		5 1 7	3391	98	40	60	1,6	3 8 2
50		5 1 7	3489	87	40	55	1,5	-
51		5 1 7	3577	56	42	55	0,8	2 3 1
52		5 1 7	3633	74	40	55	0,9	2 7 0
53		5 1 7	3707	59	42	55	0,9	5 8 1
55		5 1 7	3769	69	40	55	1,0	4 8 0

Tabela 5A. Quadro de broca do poço ALS C

POÇO ALS D

QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS

Nº BROCA	DIAM. (pol)	COD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
4	17 1/2	1 1 1	768	14	26	180	2,6	1 0 0
5		1 1 1	782	154	33	180	12,8	1 3 0
4R		1 1 1	936	148	33	180	6,3	4 7 0
6		1 1 1	1084	303	33	180	8,2	2 8 0
7		1 1 1	1387	39	44	200	2,8	1 5 0
8		1 1 1	1426	82	44	170	2,8	5 8 0
9		1 1 1	1508	20	48	180	1,4	8 4 0
10		1 1 1	1528	71	33	200	2,5	8 8 0
11		1 1 1	1599	38	44	200	1,8	8 8 0
12		1 3 1	1637	91	55	150	2,5	-
13		1 1 1	1728	75	53	140	3,3	5 8 0
14	12 1/4	1 1 4	1803	283	33	140	7,0	6 7 1
15		1 1 4	2086	24	33	140	4,4	7 3 2
17		1 3 6	2128	13	45	110	2,9	-
18		5 1 7	2141	182	39	100	2,9	8 8 1
22		2 1 4	2375	81	49	180	4,0	6 5 0
23		1 3 4	2456	96	50	190	5,0	3 7 1
24		5 3 7	2552	92	60	105	1,7	1 7 0
25		5 1 7	2644	155	50	130	2,2	7 3 1
21R		2 1 4	2799	19	53	100	2,1	3 3 1
26	8 1/2	1 3 6	2818	15	20	160	1,4	8 2 0
27		5 1 7	2833	158	40	75	3,3	2 8 0
28		5 1 7	2991	108	37	65	2,4	7 2 0
30		5 3 7	3120	34	33	80	1,9	2 1 0
32		2 1 6	3163	27	29	80	1,8	7 3 0
33		5 3 7	3190	21	33	135	0,7	1 2 0
34		2 1 6	3211	30	31	95	1,8	6 5 0
35		5 1 7	3241	51	29	95	1,8	2 1 0
36		5 3 7	3292	36	44	80	1,4	2 2 0
37		2 1 6	3328	49	46	90	3,1	5 3 0

Tabela 6. Quadro de broca do poço ALS D

DESGASTE D = DENTE R = ROLAMENTO C = CALIBRE

Análise dos Resultados

Para verificar se foram utilizadas as brocas corretas na perfuração do poço, comparou-se a tensão de compressão obtida (figuras 6 a 9), com o quadro de brocas utilizados (tabelas 3 a 6).

A análise foi feita partindo do pressuposto que as condições de perfuração foram as melhores possíveis (parâmetros mecânicos, hidráulicos e operação), portanto, dependendo apenas do tipo de broca.

Como a perfilagem do poço é feita, geralmente, à partir da fase III, poço de 44cm (17½"), fez-se a análise abaixo da sapata do revestimento de 51 cm (20"). Nas fases anteriores, normalmente, a formação é inconsolidada (tensão de compressão baixa), o uso da broca de código IADC 1-1 é correta, além de não ter-se muita opção em brocas de 66cm (26").

Poço ALS A - comparação entre a figura 6 e tabela 3

A broca nº3, IADC 1-3 não é a recomendada por Mason, cujo método indica a broca de código IADC 1-1, como a mais adequada. A escolha resultou em taxa de penetração baixa, como se pode verificar comparando o valor obtido por esta broca de 13.3 m/h, e a broca anterior de nº2 de 20 m/h, com o mesmo diâmetro de 44 cm.

A mesma observação é válida para a broca nº6, IADC

5-1, sendo o recomendado IADC 1-1. Sua taxa foi de 1,8 m/h enquanto a anterior obteve um rendimento de 7 m/h e a posterior de 3,7 m/h. A broca foi retirada por baixo rendimento após, somente, 8,5 horas de broca a fundo.

A broca nº7, IADC 1-3 foi também mal escolhida, segundo o método, quando o recomendado seria IADC 1-1. Como a broca anterior (nº 6) foi descida errada se compararmos sua taxa de 3,7 m/h apenas com a broca posterior (nº 8) de taxa 5,7 m/h o erro é notável.

A broca nº8, IADC 4-3 está numa região em que metade do intervalo perfurada por ela deveria ser IADC 1-1 e a parte inferior IADC 4-3. Teve uma taxa de 5,7 m/h.

A broca nº9, IADC 1-1 está numa região abrangida tanto pela IADC 1-1 como IADC 1-2 (ou 4-3). Sua taxa foi de 5,5 m/h.

A broca nº6R, IADC 5-1 está também numa região de código IADC 1-1 ou IADC 1-2 e, portanto, foi mal escolhida. Sua taxa foi de 3,5 m/h.

O que ocorre nas próximas brocas, desta fase de 31cm (12 1/4"), é que como a broca 6R teve uma baixa taxa de penetração, pensou-se que a formação tornara-se mais dura, quando na realidade foi feita uma escolha errada.

As brocas 10 e 11 de código IADC 2-1 foram mal escolhidas, como exposto anteriormente, quando o recomendado é IADC 1-2 (ou 4-3). Suas taxas foram de 3,2 e 3,3 m/h respectivamente.

A broca 12, IADC 5-1, última desta fase de 31cm, também foi descida errada pois o recomendado seria IADC 1-2

(ou 4-3).

As brocas da fase de 22cm (8½") foram usadas corretamente, segundo o método, sendo recomendado nesta fase IADC 1-2 (4-3) a IADC 1-3 (5-1)

Poço ALS B - comparação entre a figura 7 e tabela 4

Na perfuração da fase III de 44cm (17½") a escolha da broca foi correta à exceção das brocas:

Broca nº16 e 17 de IADC 1-3 quando o recomendado é IADC 1-1.

Broca nº25, IADC 1-1 quando o recomendado é IADC 1-2

Na fase IV de 31cm (12¼") as brocas de nº29 e 30, IADC 5-1 foram mal escolhidas quando o recomendado é IADC 1-1 ou IADC 1-2.

Na fase V de 22cm (8½"), por ser a formação Muribeca membro Maceió muito intercalada de folhelho, siltito e arenido, a partir de 2621m observa-se uma variação muito grande na tensão de compressão, dificultando a análise. Como, para perfurar esta fase, foram utilizadas brocas de IADC 5-1 e IADC 5-3 não se tem crítica a fazer, apenas que a broca de código IADC 5-3 seja uma escolha mais adequada por se situar na região média inferior.

Poço ALS C - comparação entre a figura 8 e tabela 5

Na fase de 44cm (17½") algumas brocas foram mal escolhidas :

Broca nº8, IADC 1-3 quando o recomendado é IADC 1-1. Para uma mesma litologia de folhelho a broca obteve uma taxa de 3,9 m/h com a anterior e posterior obtendo uma taxa de 4,7 e 5,2 m/h respectivamente.

Broca nº9, IADC 1-3 recomendado de 1-1. Esta broca apesar de mal escolhida obteve um bom rendimento de 5,2 m/h, se comparada com os demais (anterior de 3,9 e posterior de 2,6 m/h), com um tempo de broca à fundo de 36 horas.

As brocas 11 e 12, IADC 1-3 também não foram bem escolhidas, com IADC recomendado de 1-1.

Da profundidade de 2000m até o final da fase de 17½" a 2487m, a broca recomendada é do tipo IADC 1-2 (ou 4-3) mas foram utilizadas IADC 1-1, 1-3, 5-1, ou 5-3.

Na fase de 31cm (12¼") a primeira broca a ser descida de nº27 e a segunda de nº 28 foram de IADC 4-3 quando o recomendado seria de IADC 5-1 (ou 1-3). A broca de nº 28 apresentou uma taxa muito baixa de 0,9 m/h.

A broca nº29, IADC 1-1 e recomendada de 5-1 apresentou uma taxa de 1,9 m/h melhor que a anterior devido haver uma variação na tensão de compressão com intercalações de folhelho e calcilutito.

Até o final desta fase as brocas usadas foram de código 5-1 (1-3) ou 5-3 (2-1), adequadas segundo a fig (8).

A fase de 22cm (8½") foi iniciada com a broca

nº42, IADC 1-1 quando o recomendado é IADC 6-1 (ou 2-3). A taxa obtida foi de 1,2 m/h quando a posterior atingiu 1,6 m/h (esta também mal escolhida). Esta escolha, provalvemente, foi em função do corte do cimento, após a descida do revestimento de 24 cm (9 5/8")

A broca 43, IADC 5-1 foi mal escolhida quando o recomendado é IADC 5-3 embora tenha perfurado por 61,5 horas.

As brocas 45, 46 e 47, IADC 5-3 perfuraram folhelho e nota-se a diminuição da tensão de compressão neste intervalo perfurado por estas brocas (3207 a 3320m). O recomendado é IADC 5-1. As taxas destas brocas foram respectivamente 1,2 , 1,1 e 0,9 m/h.

Foi utilizada a broca á diamante (nº48) que aumentou a taxa para 1,4 m/h, em relação às 3 últimas anteriores. Aqui pode-se questionar se esta taxa não teria sido atingida se as brocas corretas fossem utilizadas anteriormente.

A broca 49, IADC 5-1, bem escolhida segundo o método, e na mesma litologia das 4 anteriores, atingiu uma taxa de 1,6 m/h a uma profundidade maior.

Até o final desta fase foram utilizadas brocas com código IADC 5-1 e para as 2 últimas brocas de nº53 e 54 o recomendado seria de 5-3.

A fase de 15cm (6 1/8") foi perfurado com broca á diamante e turbina. Como o método é válido somente para brocas tricônicas nada se pode avaliar.

Poço ALS D - comparação entre a figura 9 e tabela 6

A fase de 44cm (17½") foi perfurada com brocas adequadas e taxa média em torno de 10 m/h.

A fase de 31cm (12¼") e 21cm (8½"), na formação Muribeca, membro Maceió devido a intercalações de folhelho, arenito, calcilutito e anidrita a tensão de compressão varia muito dificultando a análise, mas pode-se dizer que a escolha das brocas foram adequadas.

Conclusão

O método proposto por Mason, mostrou-se consistente e prático. Verificou-se nos poços analisados, que quando uma broca não correspondia à aquela de sua recomendação, o seu rendimento medido através de sua taxa de penetração média foi mais baixa, em relação às brocas descida anteriormente e posteriormente, dentro de uma mesma litologia.

O método se mostra útil para uma análise das brocas utilizadas, feita após o poço ser perfurado. Desta análise, à medida que o campo vai se desenvolvendo e mais dados vão sendo adquiridos, pode-se chegar à uma utilização ótima de tipos de broca. Desta maneira, pode-se abandonar o procedimento de escolha de broca baseados apenas em experiências passadas, sem uma metodologia de análise. Com este procedimento pode-se reduzir os custos da perfuração reduzindo-se o número de manobras e melhorando o rendimento da perfuração.

O método proposto por Mason, fornece os dois primeiros dígitos do código IADC, mas não o terceiro dígito que é relacionado com o tipo de rolamento. Para se determinar realmente o tipo de broca mais econômico propõem-se, neste estudo, calcular o custo por metro perfurado para todas as combinações possíveis de código IADC (normalmente 4 combinações) e escolher o tipo de broca que proporcionou o menor custo.

A verificação do método, para seleção das brocas para um poço a ser perfurado (ALS E) e baseados nos 4 poços ALS A, ALS B, ALS C e ALS D já perfurados, será mostrado no capítulo V.

CAPÍTULO IV

MÉTODO DE SELEÇÃO DO PESO SOBRE A BROCA E ROTAÇÃO

Neste capítulo é justificado a escolha e a maneira de utilização do modelo de Bougoyne & Young. É explicado o modelo de desgaste dos dentes ou inserto da broca, apresentado o método de cálculo da pressão de poros e a origem dos dados de perfuração. O modelo de Bourgoyne & Young foi utilizado com ótimos resultados, tendo sido adotado para a determinação do peso e velocidade de rotação da broca usando o critério de mínimo custo de perfuração.

Escolha do Método

O critério de escolha do modelo de perfuração, utilizado neste estudo, foi feito com base em que o mesmo deve prever, satisfatoriamente, o intervalo a ser perfurado e o tempo da vida útil do dente e rolamento. Com esta restrição, foram encontradas na literatura, os modelos de Galle & Woods⁹, Bourgoyne & Young^{11,12} e Reza & Alcocer¹⁴, apresentados no capítulo II.

O modelo de Galle & Woods necessita de um teste de 5 pontos efetuado na broca anterior, e não há valores tabelados para os parâmetros P, Q, D₁, D₂ e C₁ em função do tipo e diâmetro da broca para brocas tricônicas de dentes de inserto de tungstênio, amplamente utilizado atualmente. Como

a proposta do estudo é uma previsão dos parâmetros mecânicos para um poço a ser perfurado, baseado em poços de correlação, o modelo de Galle & Woods se mostra insatisfatório.

O modelo de Reza necessita de dados de dureza da rocha, não disponíveis, atualmente.

Desta maneira o modelo de Bourgoyne & Young será adotado para o desenvolvimento do método.

Dados de perfuração

Para a utilização do modelo de Bourgoyne & Young necessita-se de dados de profundidade (D), Taxa de penetração (dD/dt), peso sobre a broca (W), velocidade de rotação da broca (N), vazão de bombeio (Q), diâmetros dos jatos da broca (D_n), peso do fluido de perfuração (ρ_m), pressão de poros (ρ_c) e desgaste do dente (h).

Alguns poços são monitorados com o sistema supervisor de sonda (*mud logging*), principalmente, para cálculo da pressão de poros durante a perfuração em áreas com pressões de formações anormalmente altas. O sistema supervisor de sonda consiste em monitorar os parâmetros de perfuração como taxa de penetração, velocidade de rotação da broca, peso sobre a broca, peso específico do fluido de perfuração, temperatura na entrada da coluna e saída no *flow line*, volume nos tanques de fluido de perfuração assim como a detecção de gás sulfídrico (H_2S) e gases (metano, etano, propano, butano, etc) incorporados ao fluido de perfuração. Os dados são enviados a um microcomputador, em

tempo real, através de sinais elétricos provenientes dos sensores ou transdutores de pressão. Além dos dados serem analisados e dar suporte ao cálculo da pressão de poros, são também gravadas metro a metro, em fitas magnéticas para posterior utilização. Os dados a serem utilizados, neste estudo, foram gravados pelo sistema supervisor de sonda e armazenados num banco de dados.

De todos os dados necessários para utilização do modelo escolhido dois não são disponíveis no banco de dados: (1) pressão de poros (2) desgaste do dente a cada metro.

No banco de dados há a pressão de poros calculada durante a perfuração do poço, mas não se mostra muito confiável. Para obtenção deste dado será utilizado o método proposto por Ohara²⁰ & alii, que consiste em determinar a pressão de poros, fratura e sobrecarga à partir do perfil sônico e densidade, litologia e idade da formação.

Quanto ao desgaste do dente, só se tem dados do desgaste final da broca, quando esta é retirada do poço, e avaliada em termos de oitavo da altura original do dente, isto é, zero é atribuído para nenhum desgaste e 8 para desgaste total. Procedimento semelhante é feito para os rolamentos.

A seguir é mostrado o procedimento para cálculo do desgaste do dente metro a metro.

A equação (39) relaciona a taxa de desgaste do dente com o peso sobre a broca, velocidade de rotação, diâmetro da broca (D_b), abrasividade da formação (τ_H) e os parâmetros da broca como H_1 , H_2 , H_3 e $(W/D_b)_{\text{máx}}$. Se

integrarmos esta equação entre 0 e h_f (desgaste final) e isolarmos τ_H obtemos:

$$\tau_H = \frac{t_b H_a}{\left[h_f + \frac{H_z}{2} h_f^2 \right]} \left(\frac{N}{100} \right)^{H_1} \left[\frac{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\text{máx}} - 4}{\left(\frac{W}{Db} \right)_{\text{máx}} - \frac{W}{Db}} \right] \left(1 + \frac{H_z}{2} \right) \quad (56)$$

Calculando-se uma rotação média -aritmética- (N_{med}) e peso sobre broca médio -aritmético- (W_{med}), à partir de N e W , para uma mesma broca, do banco de dados, uma vez que estes dois últimos valores, geralmente, variam muito e substituir W por W_{med} e N por N_{med} , juntamente com h_f conhecido e os parâmetros da broca na equação (56) obtém-se τ_h (abrasividade da formação), necessário para cálculo do desgaste do dente a cada metro.

A equação (46) relaciona o desgaste do dente com o tempo de perfuração.

Como nem todas companhias de *mud logging* gravam o tempo de perfuração acumulado a cada metro perfurado, o t_b final (tempo de broca à fundo final) pode ser calculado somando-se o inverso da taxa de penetração, obtido a cada metro. E para determinar h_f a cada metro perfurado pode-se, desde o início da perfuração, para cada broca, ir acumulando o inverso da taxa de penetração, tendo assim o t_b (tempo de broca à fundo) até a profundidade desejada. Desta maneira, obtém-se o desgaste do dente a cada metro perfurado.

Os valores tabelados de $(W/Db)_{\text{máx}}$ para brocas de insertos de tungstênio, no artigo de Bourgoyne & Young, e proposto por Estes²¹ em 1971 são baixos, se compararmos com

as tabelas de peso máximo por diâmetro recomendado pelos fabricantes de broca. Como o termo $(W/Db)_{\text{máx}}$ é definido como sendo, o peso por diâmetro de broca máximo, em que desgaste do dente seria instantâneo conclui-se que este termo não pode ser menor que o peso máximo recomendado para se utilizar no campo. Montesanti²² propôs a consideração do valor 2,5 ao invés de 4 na equação (39) pois o termo $[(W/Db)_{\text{máx}} - 4]/[(W/Db)_{\text{máx}} - W/Db]$ pode se tornar negativo. Neste estudo, para cálculo do desgaste dos insertos, adotou-se a sugestão de Montesanti e optou-se por substituir o valor de $(W/Db)_{\text{máx}}$ pelos valores máximos recomendados pelos fabricantes de broca [23] e são apresentados na tabela 7. Alguns diâmetros de brocas não constante da tabela original foram interpolados ($8\frac{1}{2}$ " e $17\frac{1}{2}$ ").

Outra consideração à discutir é o desgaste do inserto de tungstênio. Acredita-se que a falha dos insertos se dê mais por quebra do que por abrasão, e quando se quebra um dente a tendência é a quebra de todos os insertos da fileira e a broca se desgastar rapidamente. Observa-se no entanto, no campo, que em formações abrasivas como arenito e siltito há um desgaste nos insertos por abrasividade. Desta maneira optou-se por calcular o desgaste dos insertos a cada metro perfurado, uma vez que há valores de H_1 , H_2 , H_3 e $(W/Db)_{\text{máx}}$ para este tipo de broca.

No cálculo de X_s (parâmetro hidráulico da broca), adotou-se a equação :

TABELA DE PESO SOBRE BROCA POR DIÂMETRO MÁXIMO

DIAM.	DENTES FRESADOS									TUNGSTENIO				
IADC	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	3	3-4	4-3	5	6	7	8
6.125		5.6	6.0	6.6	6.9	6.9		7.9						
6.750		5.7	6.1	6.6	7.1	7.1	7.2	8.5						
7.875	6.0	6.2	6.6	7.0	7.5	7.5	7.6	8.7	9.4					
8.500	6.1	6.4	6.7	7.1	7.7	7.7	7.9	9.3	9.8	4.5	4.9	5.4	5.4	7.4
8.750	6.2	6.5	6.8	7.2	7.8	7.8	8.0	9.5	10.0					
9.875	6.5	6.7	7.1	7.0	7.6	7.6	7.7	8.9						
10.625		6.4		7.0				8.8						
12.250	5.9	6.1	6.4	6.7	7.3	7.3	7.4	8.5		4.5	5.0	5.5	6.0	7.4
14.750		5.3		5.8			6.3	7.4						
15.000		5.3		5.8			6.3	7.4						
17.500		5.0		5.7				7.0		4.5	5.0	5.5	6.0	7.4

Tabela 7. Valores de $(W/Ds)_{max}$ em função do tipo e diâmetro da broca

$$X_s = \ln \left[\frac{F_j}{1000} \right] \quad (57)$$

onde:

F_j = força nos jatos da broca

da referência [12] pela dificuldade de obtenção do dado de viscosidade aparente (μ) à $10000^{-1} \text{ s}^{-1}$, caso use a equação (38) e da experiência em laboratório com brocas em tamanho real de Tibbitts²⁴ que mostrou que a influência na taxa de penetração são similares para as duas equações propostas. Almeida²⁵, propõe o cálculo deste parâmetro, pela potência hidráulica da broca, devido a força do jato depender do tipo e características da broca.

A força do jato (F_j) da equação (57) pode ser calculada como:

$$F_j = 0,01823 \times C_d \times Q \sqrt{\rho_m \Delta P_b} \quad (58)$$

$$\Delta P_b = \frac{8,311 \times 10^{-5} \rho_m Q^2}{C_d^2 A_t^2} \quad (59)$$

$$A_t = \frac{\pi}{4(32^2)} \left[\sum_{n_j=1}^{n_j} D_n n_j^2 \right] \quad (60)$$

onde:

F_j = força nos jatos da broca (lbs)

C_d = 0,95 - coeficiente de descarga

Q = vazão de bombeio (gpm)

ρ_m = peso do fluido de perfuração (lb/gal)

ΔP_b = perda de carga na broca (lb/pol²)

A_t = área dos jatos (pol²)

n_j = número de jatos

D_n = diâmetro do jato ($\sqrt{32}$ pol)

No cálculo de X_4 , parâmetro do diferencial de pressão, utilizou-se o peso específico do fluido de perfuração, ao invés do peso específico de circulação (*Equivalent Circulation Density- ECD*), devido às perdas de carga nos anulares para poços até 22cm (8 1/2") serem pequenas e, da dificuldade de obtenção dos dados de propriedades físicas do fluido de perfuração metro à metro.

Determinação dos coeficientes a_1 - a_8 do modelo de Bourgoyne & Young

Bourgoyne & Young em seu artigo determinaram os coeficientes a_1 - a_8 , através de uma regressão múltipla, utilizando dados de broca que perfuraram somente folhelho. Como o artigo estuda também a detecção de pressão anormalmente alta se justifica o estudo apenas em folhelho. Os autores usaram dados esparsos, isto é, dados de quadro de broca (*bit record*), onde são anotados dados somente quando a broca é trocada.

No presente estudo utiliza-se dados de perfuração, disponíveis metro a metro, e é considerada qualquer litologia não se restringindo somente a folhelho.

Inicialmente com os dados de todo o poço é montado um quadro de broca, em que consta todos os dados da broca utilizada como: nº da broca, se usada ou nova, diâmetro da broca, diâmetros dos jatos, código IADC, código do fabricante

(nome da broca), coeficientes H_1 , H_2 , H_3 , $(W/Db)_{\max}$, W_{med} , N_{med} e τ_H . A confecção desta tabela é feita pelo programa BITREC, exposto no anexo C. Os dados de W_{med} , N_{med} e τ_H são calculados e H_1 , H_2 , H_3 , $(W/Db)_{\max}$ obtidos de uma tabela auxiliar em função do tipo de broca e diâmetro.

Após montado o quadro de broca, para maior facilidade de trabalho, separa-se apenas os dados necessários à regressão como profundidade, taxa de penetração, peso sobre a broca, velocidade de rotação da broca, força no jato, desgaste do dente, peso equivalente do fluido de perfuração e pressão de poros através do programa PREPDADO mostrado no anexo D. Neste programa é calculado a força do jato e o desgaste do dente, com auxílio do quadro de brocas.

Com os dados prontos para a regressão divide-se os dados por formação. Esta divisão se faz necessário porque as características de perfuração de cada formação são bem distintas, influenciada pela litologia, tipo de deposição dos sedimentos, descontinuidade da deposição, compactação e idade geológica. Na área em estudo são atravessadas as formações: (1)Piaçabuçu membros Marituba e Calumbi (2)Riachuelo membro Taquari e (3)Muribeca membro Maceió.

Separado os dados por formações e como a proposta é não se restringir à litologia, somente em folhelho, tem-se que separar os dados ainda em tipo de litologia. Esta separação se torna fácil devido ao arquivo de perfil elétrico, que a cada profundidade além dos dados de perfis haver a identificação litológica codificada. Esta separação é feita pelo programa LITOL mostrado no anexo E.

Finalmente, pode-se efetuar a regressão múltipla por formação e para cada tipo de litologia. Os tipos de litologia foram reunidas em grupos:

- (1) Calcáreo - calcáreo cristalino, coquina,
calcilutito, calcissiltito, calcarenito.
- (2) Arenito - tilito, areia, arenito.
- (3) Folhelho - siltito, argila, argilito, folhelho,
marga.
- (4) Ignea - ignea não identificada e diabásio
- (5) Basalto - basalto e granito
- (6) Xisto - gnaiss, filito, xisto, quartzo, ardósia
meta-arenito, meta-siltito, ultrabásica.
- (7) Sal - anidrita, gipsita, sal não identificado
halita, silvinita, carnalita

Litologias como calcirudito, dolomita, brecha, conglomerado, granito, metamórfica não identificada, chamosita, carvão e sílex não foram agrupadas e são consideradas independentes.

Com este procedimento determina-se os coeficientes $a_1 - a_8$ para cada formação e litologia. Na área de estudo foram encontrados coeficientes para arenito, calcáreo, folhelho e sal. Algumas dolomitas que apareceram não foram consideradas por haver muito pouco dados (menor que 8).

O programa REGRE faz a regressão múltipla e determina os coeficientes $a_1 - a_8$ e está exposto no anexo F.

Limite superior (LS) e inferior (LI) dos coeficientes $a_1 - a_8$

Durante os testes do programa REGRE foi observado que alguns coeficientes assumiam valores negativos, sem sentido físico. Devido ao método da regressão múltipla minimizar o erro quadrático, matematicamente é correto o aparecimento de coeficientes negativos mas fisicamente incorreto. Daí a necessidade de impor um limite superior e inferior para cada coeficiente individualmente.

O algoritmo montado é: cada vez que um coeficiente se torna negativo impõe-se o valor de limite inferior (LI) (se $a_i < LI$) ou de limite superior (LS) (se $a_i > LS$) passa-se o termo $a_i X_i$ para o primeiro membro e se efetua a regressão com os termos restante. No caso extremo de todos a_i ($i = 1$) serem impostos, a_i é uma mera média aritmética obtida.

Bourgoyne & Young propõe que a_5 (parâmetro de peso sobre broca) varie de 0,6 a 2,0 e para o parâmetro de rotação $a_6 = 0,4$ para formações duras e $a_6 = 0,9$ para formações moles. O coeficiente a_4 (parâmetro do diferencial de pressão) pode ser retirada da figura 10, influência do diferencial de pressão na taxa, traçando-se uma reta para limite superior e outra para limite inferior, chegando-se a $a_4 = 30 \times 10^{-6}$ como LI e $a_4 = 100 \times 10^{-6}$ para LS. Os limites para a_7 (parâmetro de desgaste de dente) foram adotados da observação da figura 11 chegando-se a $a_7 = 0,1$ para LI e $a_7 = 1,5$ para LS. Eckel²⁶ propôs o expoente 0,5 para o termo $(\rho Q / \mu d n)$ de seu

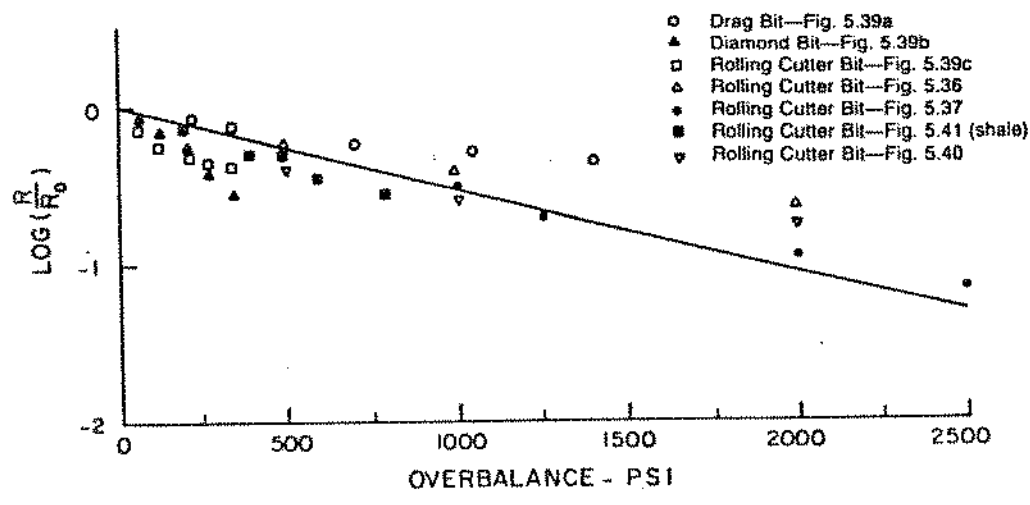


Figura 10. Relação entre a taxa de penetração x diferencial de pressão ref.[12]

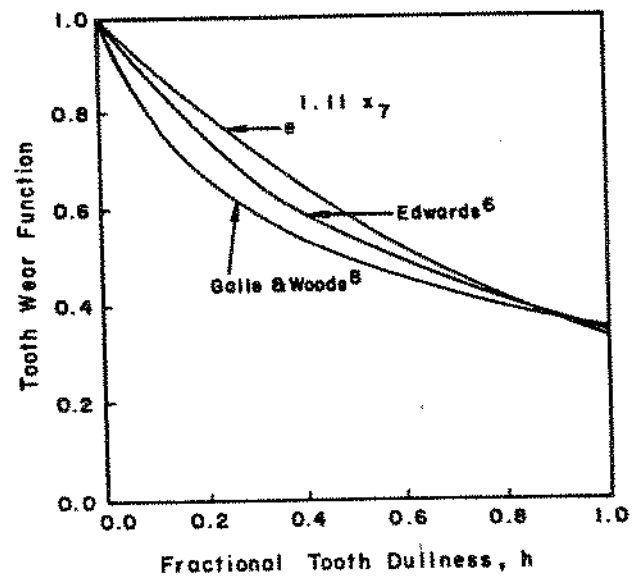


Figura 11. Efeito do desgaste do dente na taxa de penetração ref.[11]

estudo com micro brocas do efeito da hidráulica na taxa de penetração. Deste estudo, da observação dos resultados obtidos por Bourgoyne & Young e testes com o programa REGRE adotou-se para o parâmetro hidráulico $a_s = 0,1$ como LI e $a_s = 0,3$ como LS para formações compactadas (tempo de trânsito no folhelho adjacente $< 100 \mu\text{seg/pé}$) e $a_s = 0,1$ como LI e $a_s = 0,6$ como LS para formações não compactadas ($\Delta t_{rlh} > 100 \mu\text{seg/pé}$), pois o efeito da hidráulica em formações inconsolidadas são mais pronunciadas. Os limites para a_2 (parâmetro de compactação normal) e a_3 (parâmetro de subcompactação) foram determinados da observação dos dados obtidos por Bourgoyne & Young, e das simulações com o programa REGRE, chegando-se a $a_2 = 100 \times 10^{-6}$ (LI), $a_2 = 250 \times 10^{-6}$ (LS), $a_3 = 0$ (LI) e $a_3 = 100 \times 10^{-6}$ (LS).

Todas as considerações aqui citadas estão contidas no programa REGRE. Estas imposições foram necessárias devido ao objetivo intermediário a ser atingido que é a previsão da taxa de penetração num poço a ser perfurado com coeficientes dos poços de correlações. Caso assumisse valores negativos, para os coeficientes, seria obtido um resultado melhor no poço em questão, mas não seriam adequados para o planejamento da perfuração, para um próximo poço.

Verificação do modelo de Bourgoyne & Young

Antes de se chegar a seleção de peso e rotação, verificou-se a confiabilidade do modelo. Essa verificação foi feita da seguinte maneira: (1) com os coeficientes obtidos no

poço calculou-se, para o mesmo poço, a taxa de penetração e depois (2) comparou-se a taxa calculada com a taxa de penetração real.

Este procedimento é feito com o programa TAXAPEN (anexo G) e os resultados obtidos mostrados nas figura 12 a figura 15. Nas figura.16 a figura 19 são mostrados gráficos de taxa de penetração real x taxa de penetração calculado em que a máxima correlação se situa na reta à 45°.

Pela observação das figuras nota-se os excelentes resultados obtidos, mostrando-se o modelo confiável para o estudo proposto.

No poço ALS C na fase de 15 cm (6 1/8"), foi utilizado broca à diamante e turbina(intervalo de 3861 a 4149 m). Foi adotado, para a determinação dos coeficientes, um desgaste de dente de $h = 0$, com uma rotação de 900 rpm, e os resultados obtidos foram satisfatórios.

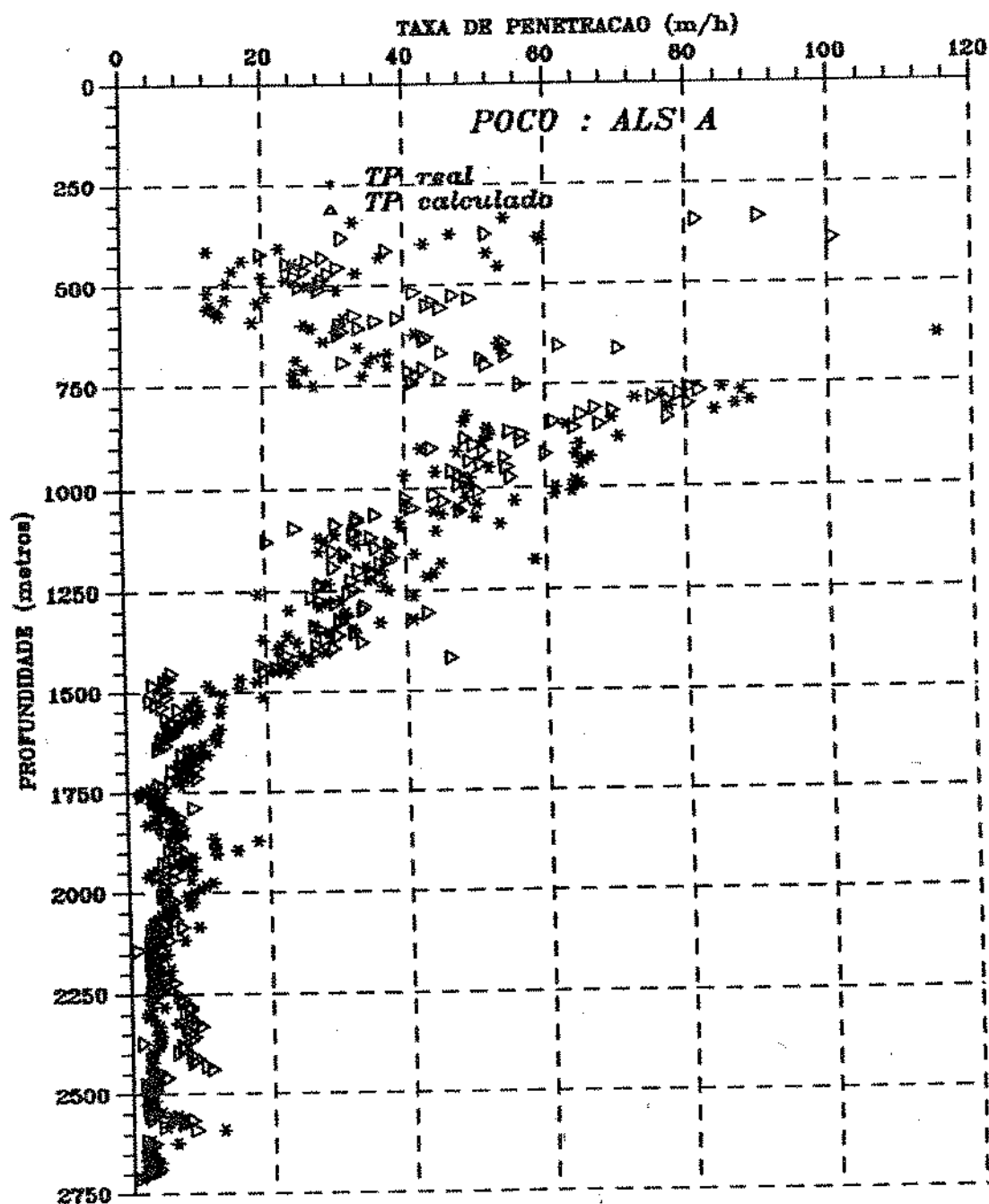


Figura 12. Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS A

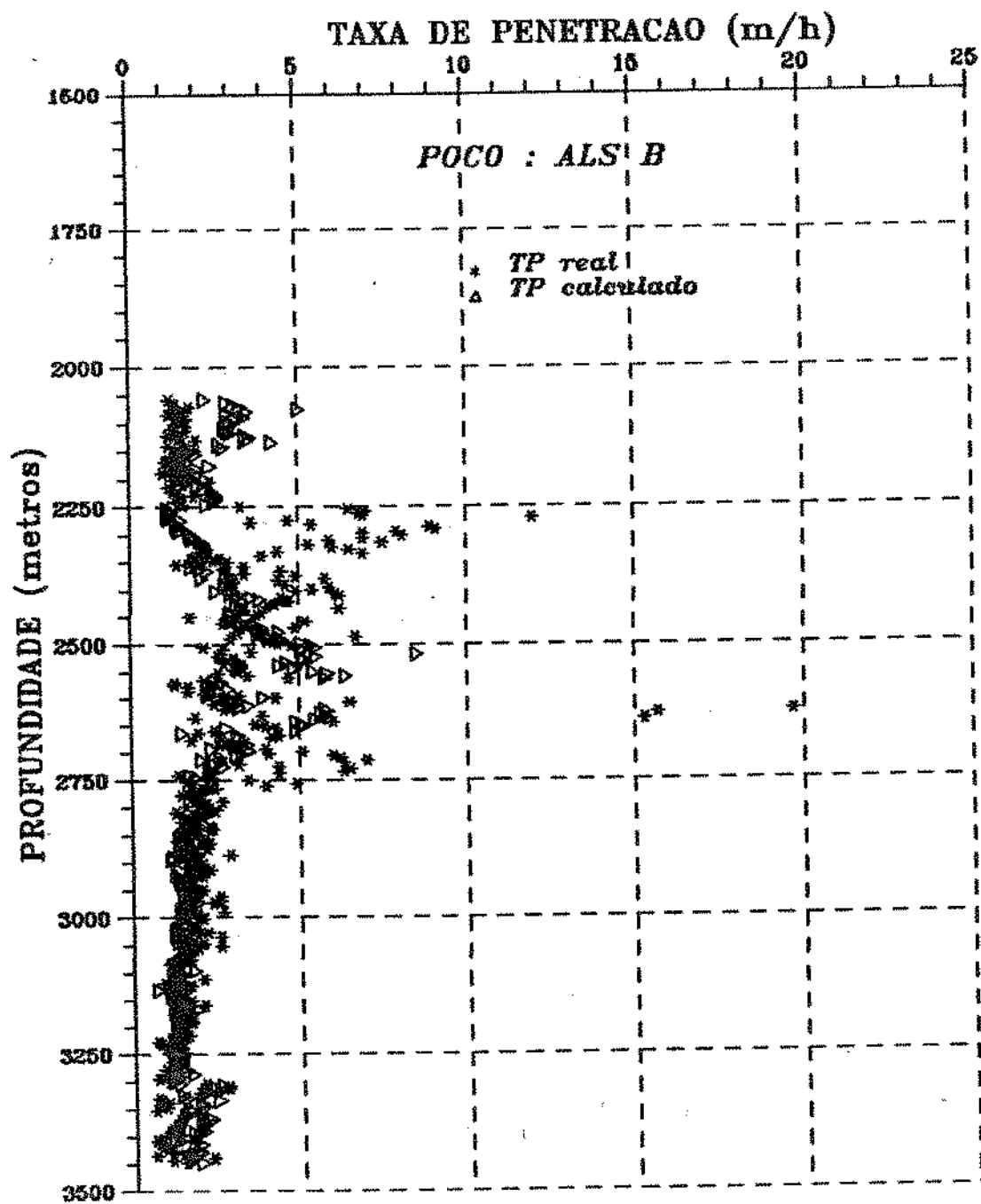


Figura 13. Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS B

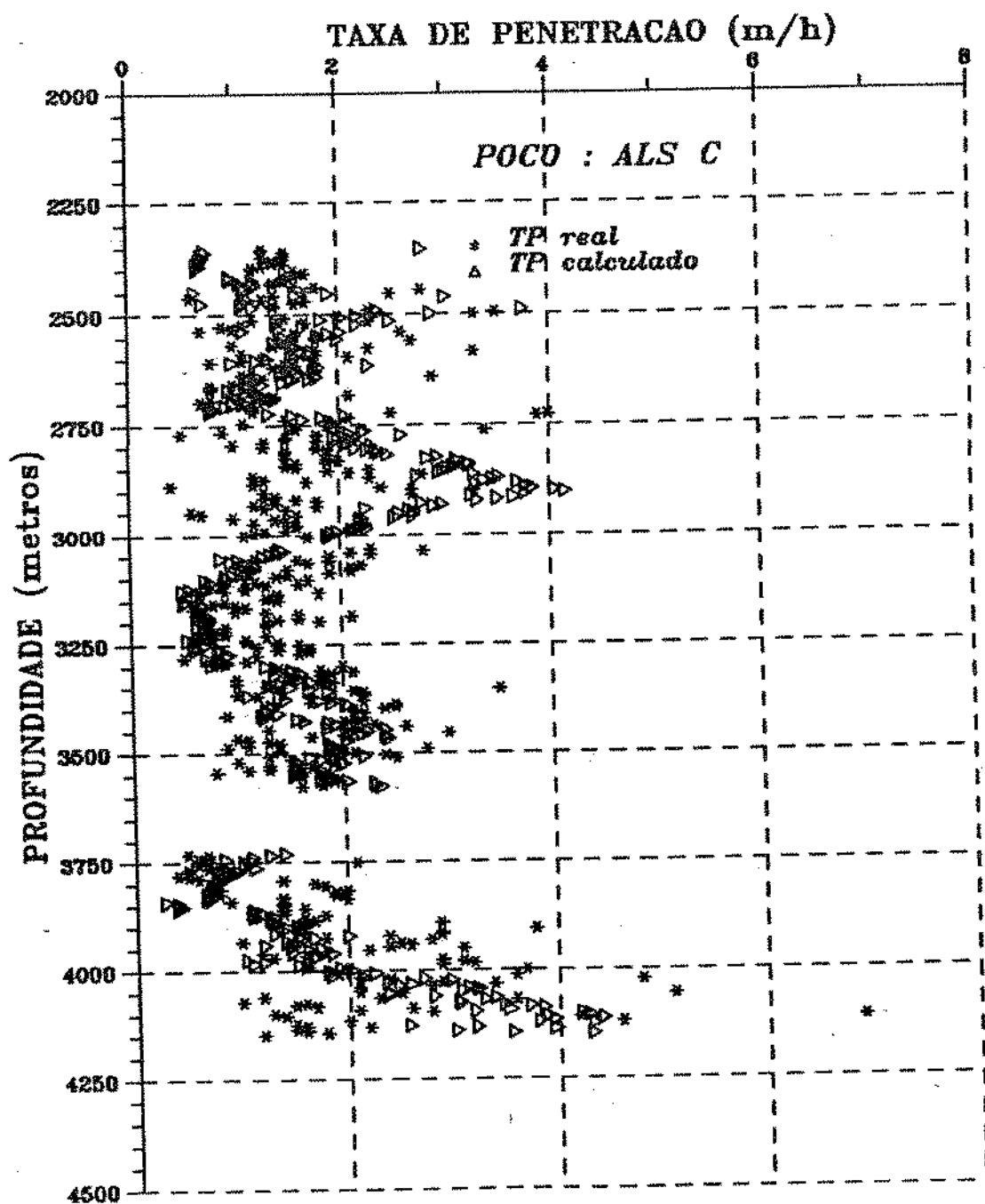


Figura 14. Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS C

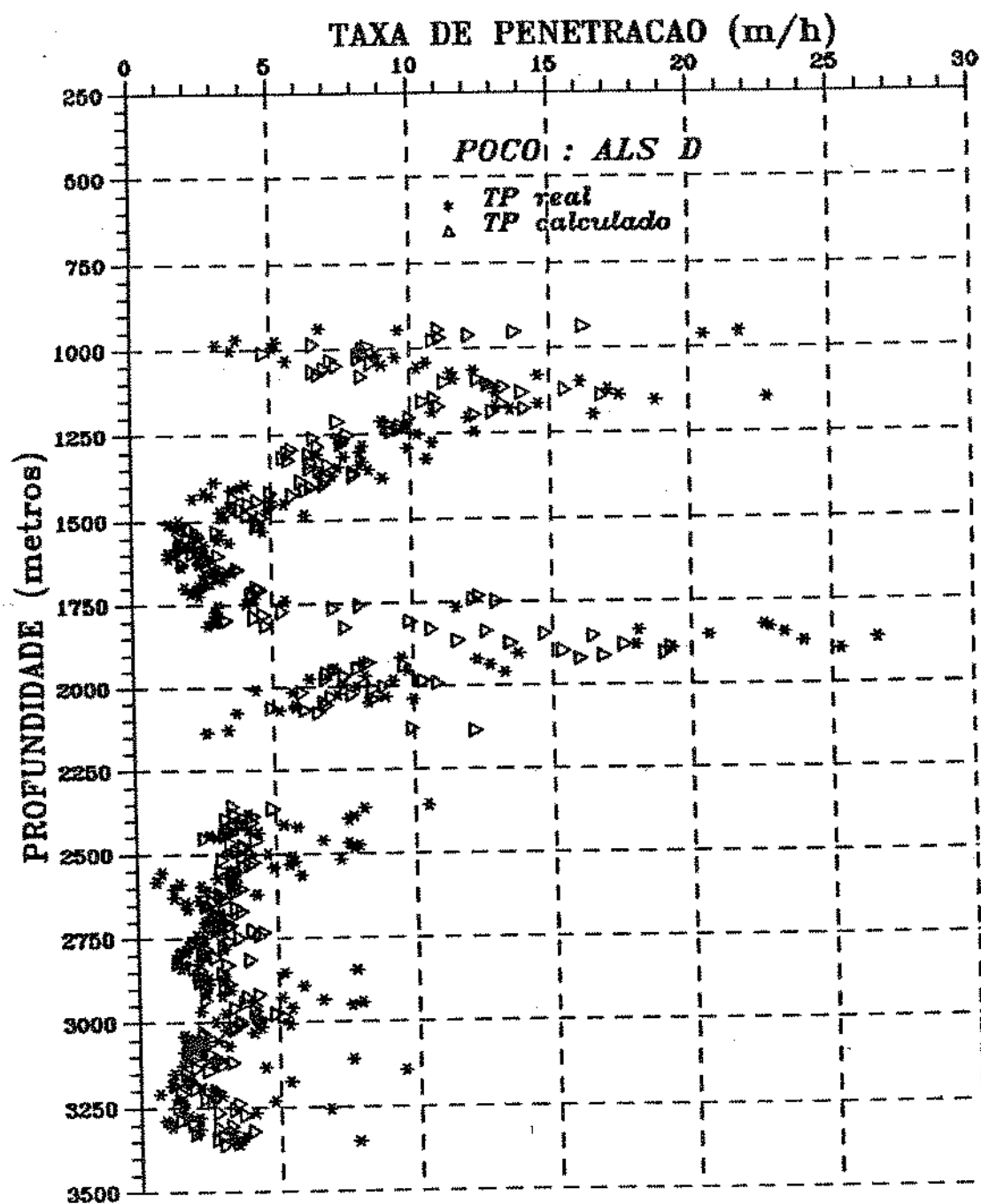


Figura 15. Taxa de penetração x profundidade para o poço ALS D

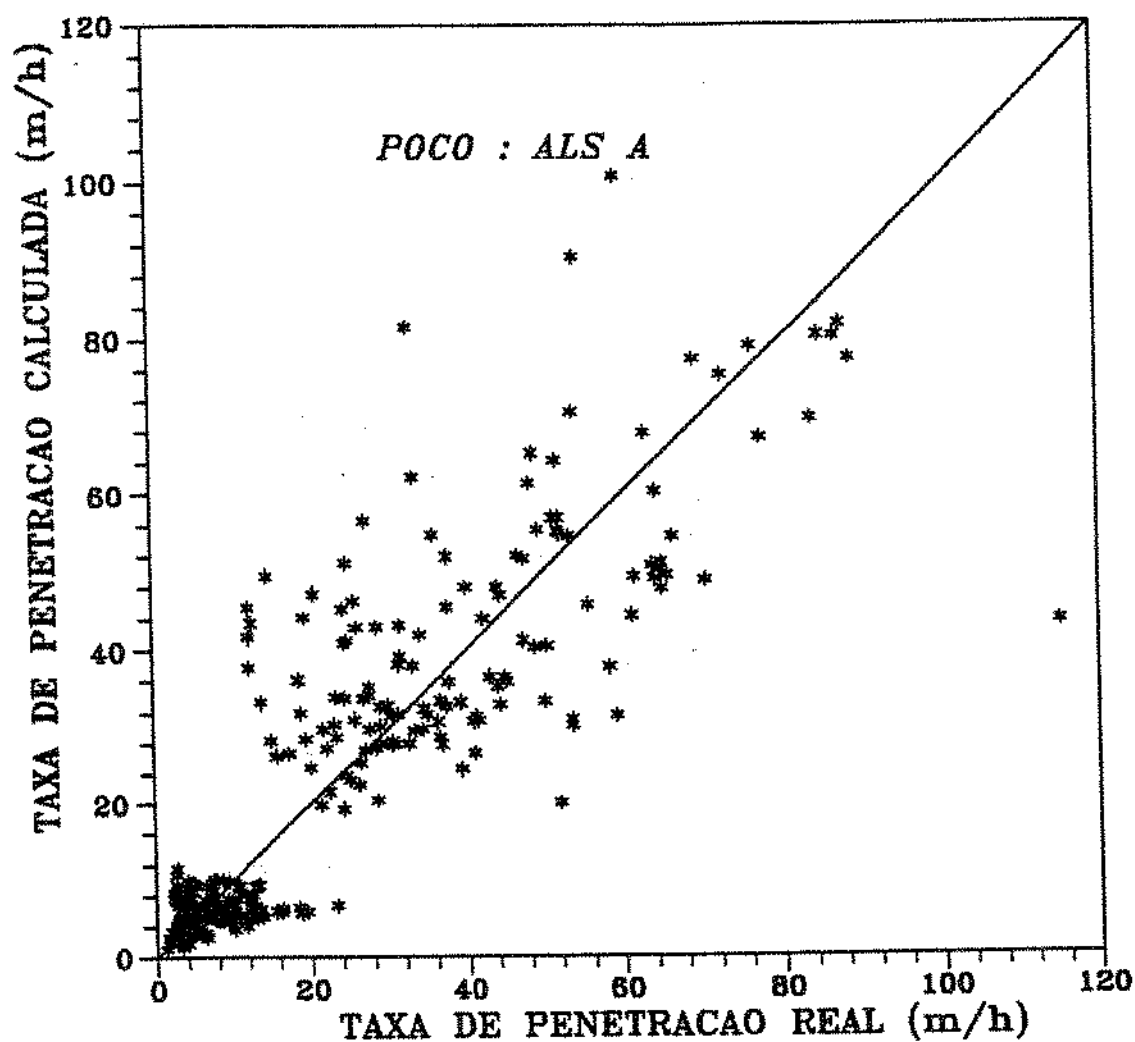


Figura 16. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS A

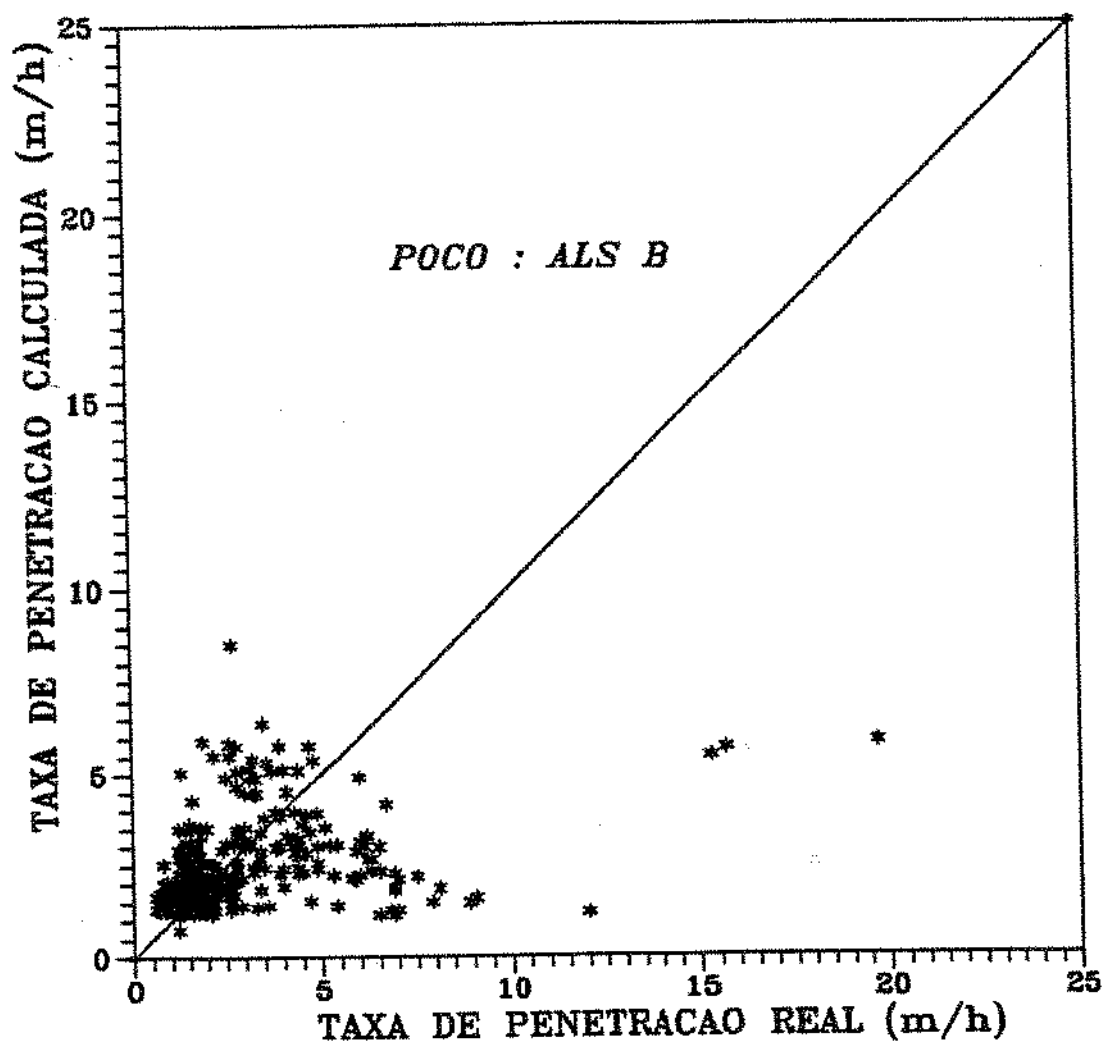


Figura 17. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS B

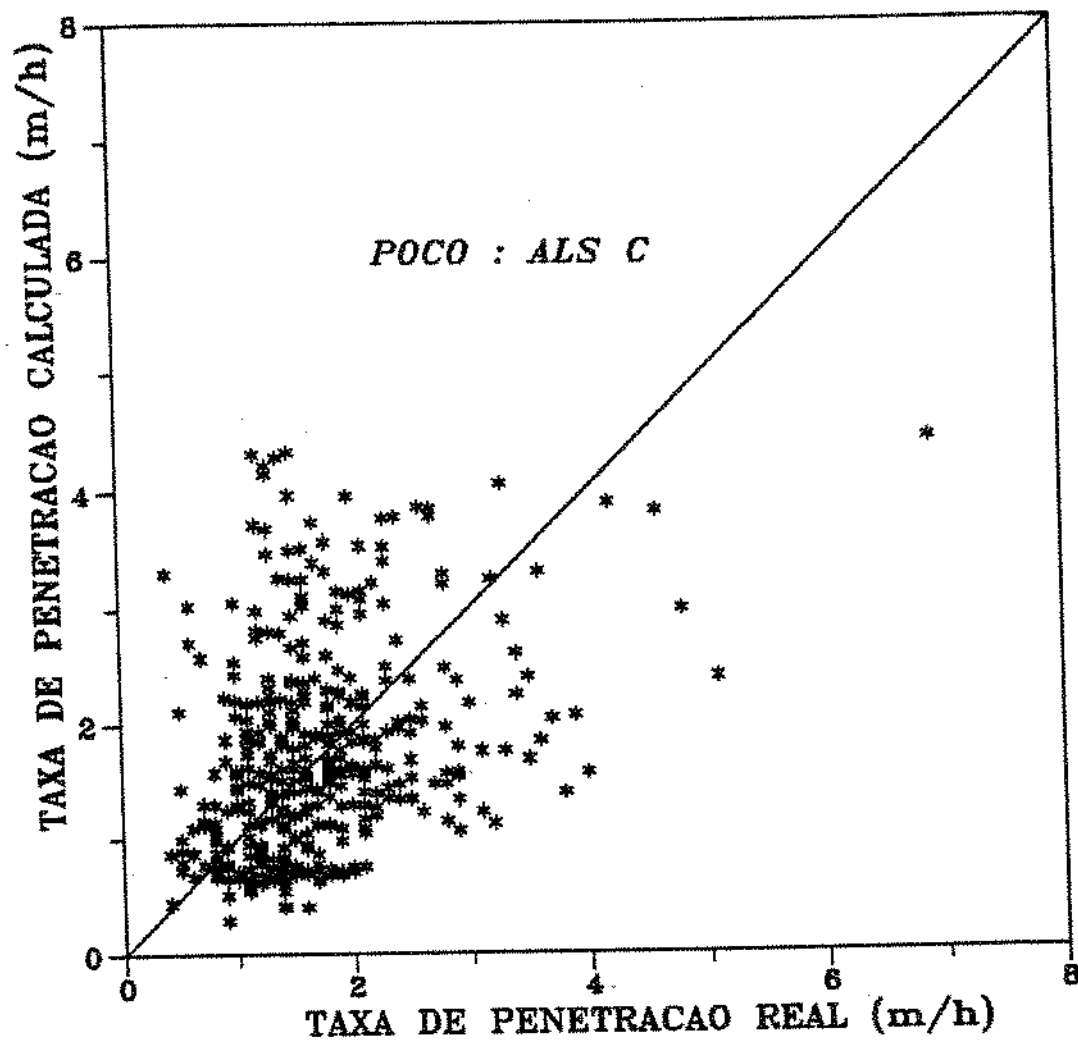


Figura 18. Taxa de penetração calculada x taxa de penetração real para o poço ALS C

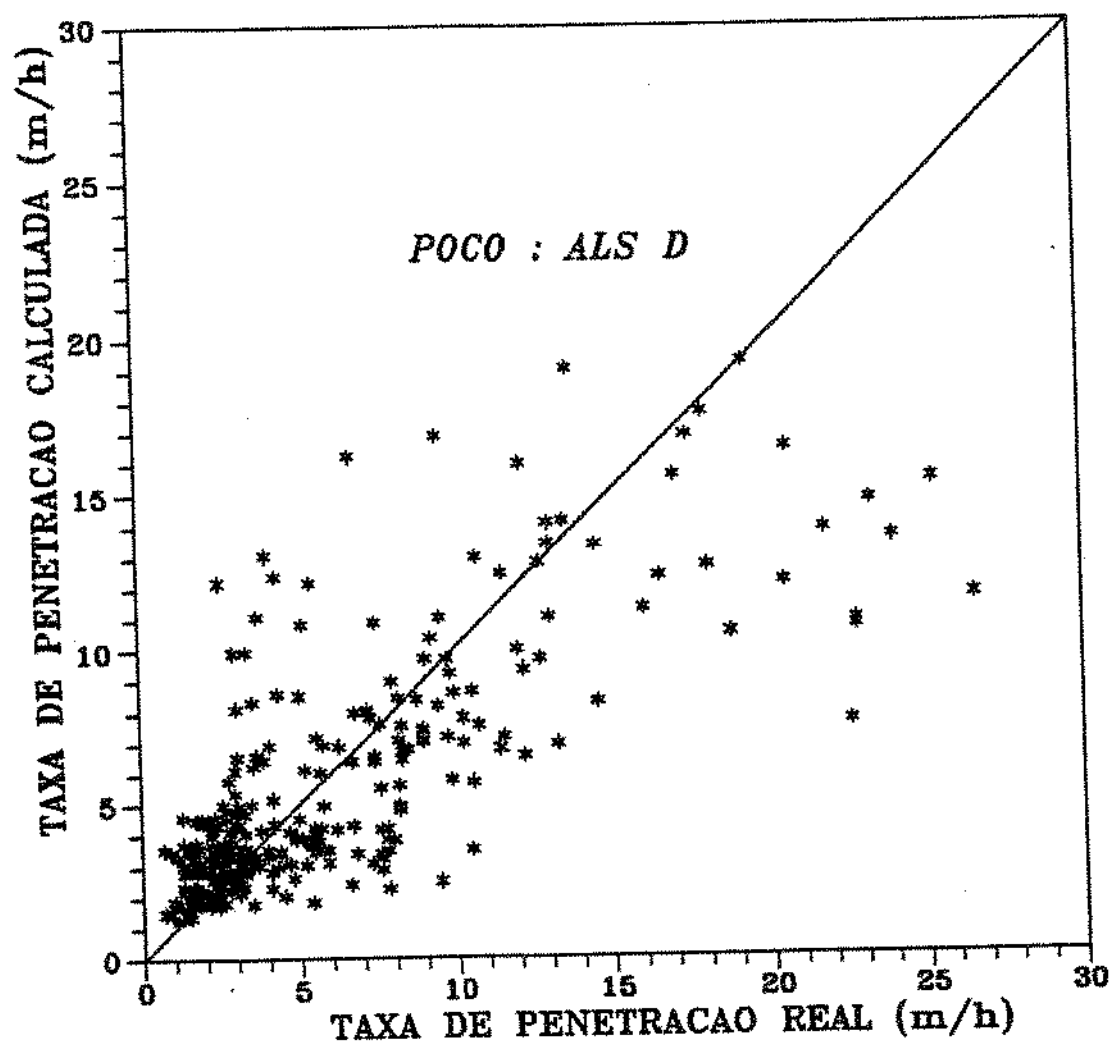


Figura 19. Taxa de penetração calculada x taxa de tração real para o poço ALS D

Determinação dos coeficientes $a_1 - a_n$ no planejamento de um poço a ser perfurado

Para uma mesma formação e mesma litologia, o coeficiente é função da distância do poço ao de correlação e intervalo ou números de dados da correlação:

$$a_i = f(d, n_p) \quad (61)$$

onde:

$a_i (i=1, 2, \dots, n)$ = coeficientes do poço a ser perfurado

d = distância do poço ao poço de

correlação (m)

n_p = número de dados do poço de

correlação

O coeficiente é diretamente proporcional a n_p quanto maior o número de dados mais confiável é o coeficiente obtido no poço de correlação e inversamente proporcional distância. Tratamento semelhante foi proposto por Codling² em seu programa eurístico para prever o comportamento d coluna de perfuração em um poço direcional.

A equação empírica proposta é:

$$a_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_{pc}} \frac{a_{ik} \cdot n_k}{d_k}}{\sum_{k=1}^{n_{pc}} \frac{n_k}{d_k}} \quad (62)$$

onde:

a_{ik} = coeficiente i do poço de correlação k

n_k = número de dados do poço k

d_k = distância do poço de correlação k ao poço
a ser perfurado

n_{pc} = número de poços de correlações

A utilização dos coeficientes a_i , assim
determinados será mostrado no capítulo V.

Seleção do peso e de rotação da broca

Como o peso e rotação a serem propostos é o
projeto, isto é, como recomendação e orientação para serem
utilizados no campo, são considerados peso e rotação
constantes. No campo, com uma otimização dos parâmetros e
tempo real poderá ser calculados peso e rotação variáveis
cada instante.

Determinados os coeficientes a_i para o poço,
intervalo a ser perfurado pela broca (ΔD) é dado pela equação
(46) para o caso do dente limitar a vida útil da broca.

$$\Delta D = J_1 J_2 \left[\frac{1 - e^{-a_7 h_f}}{a_7} + \frac{H_2 (1 - e^{-a_7 h_f} - a_7 h_f e^{-a_7 h_f})}{a_7^2} \right]$$

Caso o limitante seja a vida útil dos rolamentos
calcula-se o tempo do rolamento com a equação (47):

$$t_b = \tau_b \left[\frac{100}{N} \right]^{b_1} \left[\frac{4Db}{W} \right]^{b_2} b_f$$

Os valores de b_1 e b_2 para uma broca com rolamentos selados, são menores que 1 (0,7 e 0,85 respectivamente). Analisando o termo $(100/N)^{b_1}$ da equação (47), quando a rotação N é menor que 100, esta assume valores menores que $(100/N)^1$, que é o caso do rolamento não selado ($b_1=1$), para fluido de perfuração com baritina. Isto implica que a broca não selada tem uma vida útil maior que a selada, contrariando o projeto da broca (supondo que o selo do rolamento selado não se rompa). O mesmo ocorre com o termo $(4Ds/W)^{b_2}$ da mesma equação, quando $4Ds > W$. Neste estudo optou-se por fazer $b_1=1.3$ quando $N < 100$ e $b_2 = 1.15$ para $W < 4Ds$.

Calcula-se o desgaste final do dente (h_f) a ser utilizado na equação (44) para determinar ΔD com a equação (49):

$$h_f = \sqrt{\left(\frac{1}{H_2}\right)^2 + \left(\frac{2 \text{ } t b}{H_2 \text{ } J_2}\right)^2} - \frac{1}{H_2}$$

Pode-se assim, variar W e N e calcular o custo por metro perfurado pela fórmula:

$$C_M = \frac{C_R (T_r + T_c + T_b) + C_b}{\Delta D} \quad (63)$$

onde:

C_M = custo por metro perfurado (US\$/m)

C_R = custo horário da sonda (US\$/h)

T_r = tempo de manobra (horas)

T_c = tempo de conexão	(min/9m)
T_b = tempo de perfuração efetiva	(horas)
C_b = custo da broca	(US\$)
ΔD = intervalo perfurado	(m)

Construindo-se um algoritmo para variar peso e rotação, calculando-se o custo por metro perfurado, pode-se escolher o peso W e N que proporcione o mínimo custo. Este algoritmo é o programa CMIN apresentado no anexo (J).

A escolha da broca é feito pelo método apresentado no capítulo III. Nesta seleção pode-se chegar a 5 tipos de brocas comerciais recomendadas : (1) broca de dente fresado com rolamento não selado (2) broca com dente fresado e rolamento selado (3) broca de dente fresado com rolamento journal (4) broca com insertos de tungstênio e rolamento journal e (5) broca com inserto de tungstênio e rolamento selado. Utilizando-se o programa CMIN para estes 5 tipos de broca, além da determinação de W e N com menor custo seleciona-se, também, o tipo de broca com minimização de custos.

Para utilização do programa CMIN vários dados de entrada devem ser fornecidos: (1) profundidade de entrada da broca (2) código IADC da broca (3) diâmetro da broca (4) peso máximo na broca (5) rotação máxima (6) custo da broca (7) tipo de fluido de perfuração (8) tempo de manobra (9) custo horário da sonda (10) vazão de bombeio (11) diâmetros de jatos da broca (12) peso da lama (13) pressão de poros (14) coeficientes a_1 - a_8 (15) abrasividade da formação (16) constante do rolamento.

A abrasividade da formação (τ_H) e constante do rolamento (τ_B) são dois dados que devem ser retirados dos quadros de brocas da área ou dos poços vizinhos à locação a ser perfurada. O τ_H pode ser obtido pela fórmula(56) e τ_B à partir da equação (4).

Para a área em estudo, foi colocado num gráfico τ_H e τ_B em função da profundidade de saída da broca obtidos dos poços ALS A, ALS B, ALS C e ALS D, figura 20 a figura 23 para os membros Calumbi e Maceió.

Conclusão

O modelo de Bourgoyne & Young se mostrou plenamente satisfatório, mesmo com as restrições impostas aos coeficientes, quando se comparou a taxa de penetração calculada pelo modelo e a taxa de penetração real, para um mesmo poço.

A utilização do método para seleção do peso e rotação será apresentada no capítulo V.

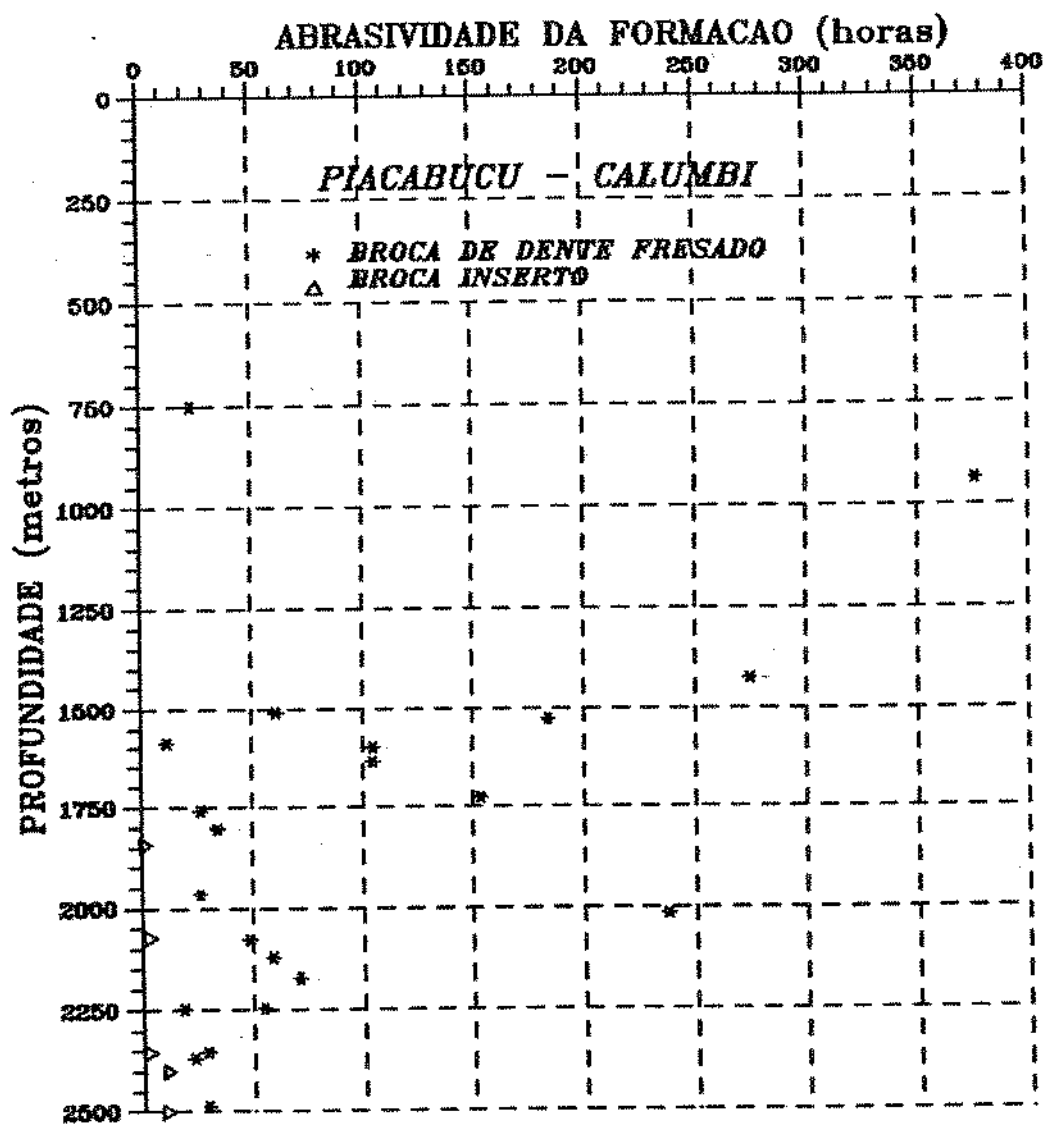


Figura 20. Abrasividade da formação x profundidade para Piaçabucu/Calumbi

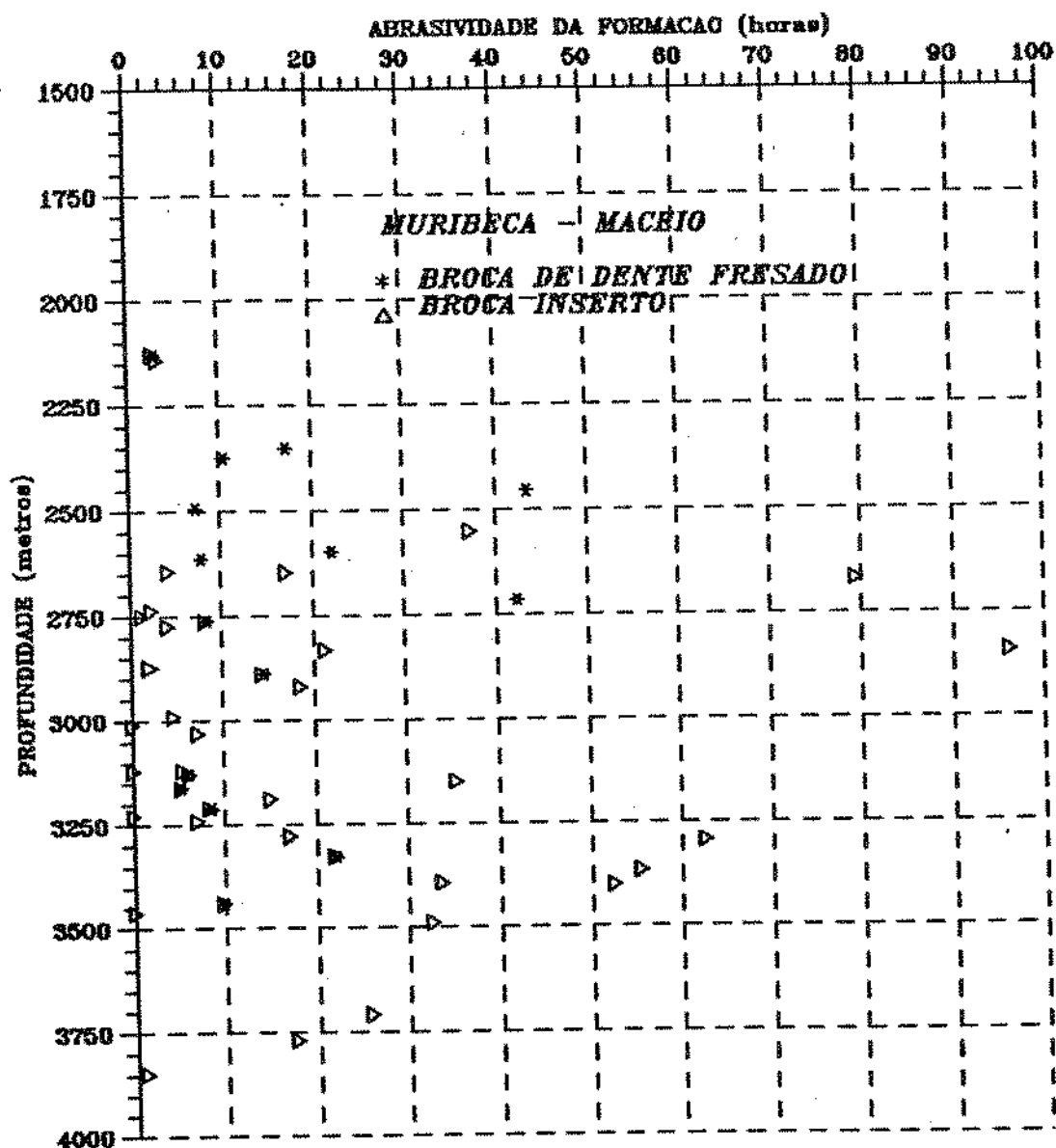


Figura 21. Abrasividade da formação x Profundidade para Muribeca/Macelo

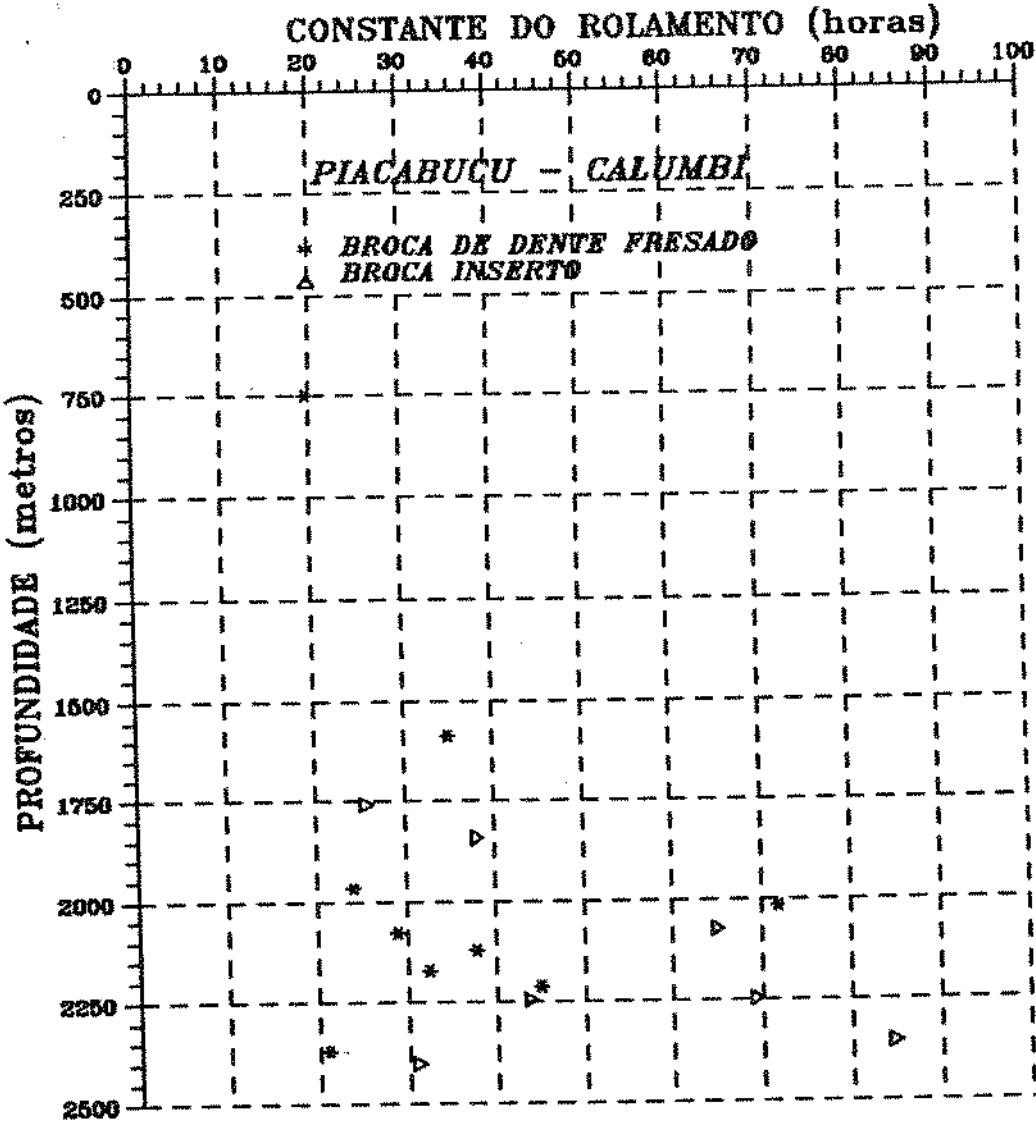


Figura 22. Constante do rolamento x profundidade para Piaçabuçu x Calumbi

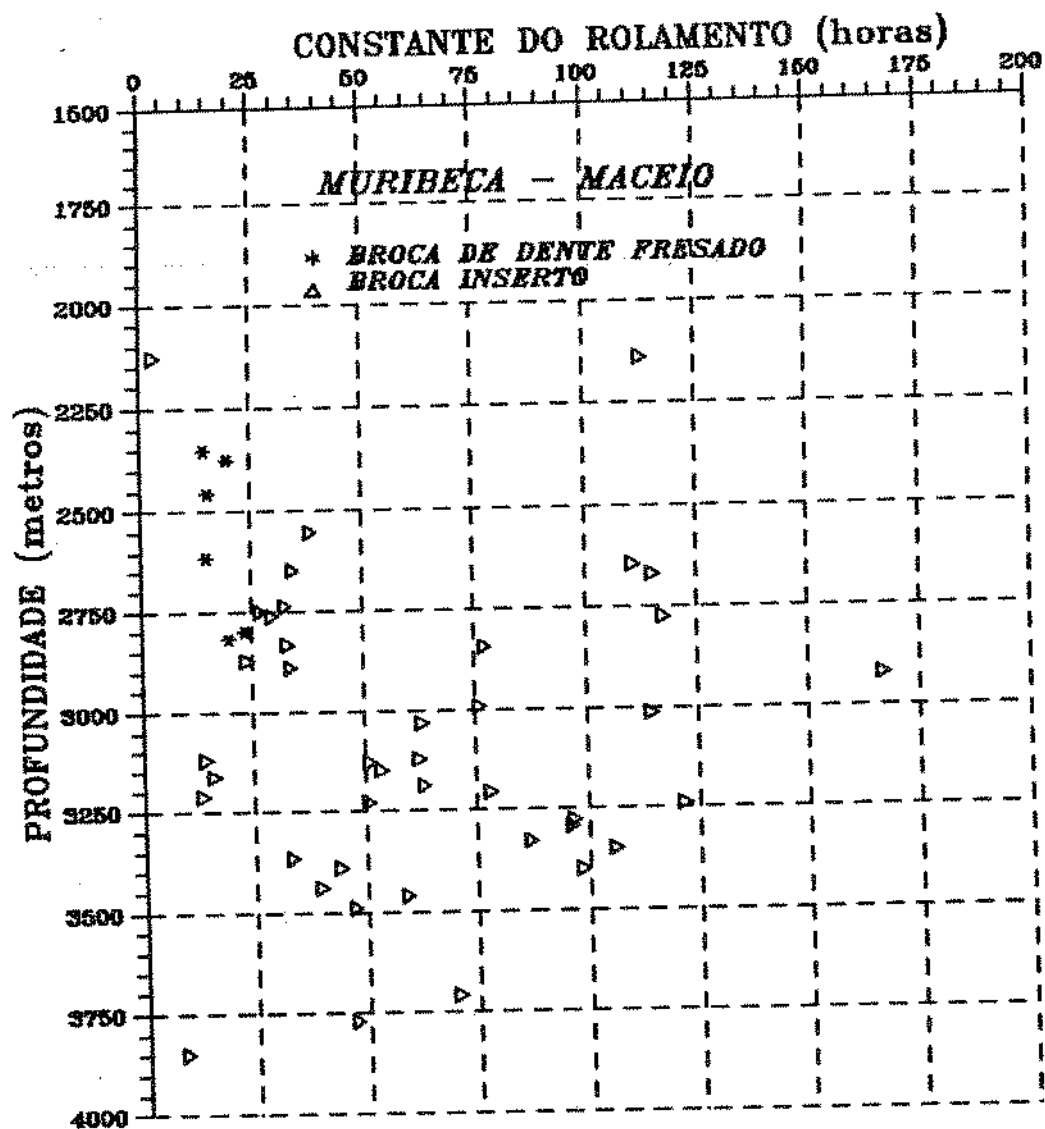


Figura 23. Constante do rolamento x Profundidade para Muribeca/Maceio

CAPÍTULO V

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO PARA ESCOLHA DO TIPO DE BROCA E SELEÇÃO DE PESO SOBRE A BROCA E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO COM MÍNIMO CUSTO

Com os dados obtidos dos poços ALS A, ALS B, ALS C e ALS D escolheu-se o tipo de broca, peso e rotação para se perfurar o poço ALS E, com bons resultados. É feita uma comparação entre a taxa de penetração calculada, e a real, obtida após a perfuração do ALS E. É realizada uma comparação entre as brocas previstas, com dados dos poços de correlações e, as brocas recomendadas à partir da tensão de compressão do poço ALS E com excelentes resultados. Compara-se também as brocas previstas com as utilizadas no poço.

Utilização do método

Por falta de dados nas fases de 66cm (26") e 44cm (17½") restringiu-se à utilização do método às fases de 31cm (12¼") e 22cm (8½").

Os coeficientes a_1 - a_8 para o poço ALS E, foram determinados à partir dos poços ALS A, ALS B, ALS C e ALS D em função da distância destes poços ao ALS E e número de

dados pela equação (62), e são mostrados na tabela 8 e 8A.

A escolha do código IADC da broca (dois primeiros dígitos), para o poço simulado, foi feita com base nos gráficos de tensão de compressão x profundidade dos 4 poços de correlação, considerando-se as respectivas distâncias ao poço ALS E e os topos de formações. Os topos de formações de todos os poços e as distâncias ao poço ALS E estão na tabela 9. O poço ALS C que dista cerca de 23km do ALS E tem peso pequeno na escolha em relação ao demais: ALS A (8km), ALS B (5km) e ALS D (7km).

Iniciando-se o método a 2000m, início previsto pelo projeto de perfuração da fase de 31cm (12 $\frac{1}{4}$ ") escolheu-se o código IADC baseados nas tensões de compressões dos 4 poços (figura 6 a figura 9).

Escolhido o código IADC de broca pode-se escolher entre 4 tipos de broca (1) dente fresado e rolamento não selado (2) dente fresado e rolamento selado (3) dente fresado e rolamento journal (4) dente de tungstênio e rolamento journal. Vale ressaltar que existe no mercado, no momento, um quinto tipo apenas para diâmetros de 44cm (17 $\frac{1}{2}$ ") que é dente de inserto e rolamento selado.

Como os 4 tipos diferentes de broca, tem preços diferentes, apesar do rolamento selado e não selado terem uma diferença mínima, tem-se que considerar estes 4 tipos.

Utilizando-se o programa CMIN para cada tipo de broca obtém-se o peso sobre a broca, velocidade de rotação,

COEFICIENTES $a_1 - a_8$ DO MODELO DE BOURGOYNE & YOUNG
PIAÇABUÇU/CALUMBI

CALUMBI - ARENITO					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
a1	2.52905	2.90736	5.12872	3.39698	2.39192
a2	0.00025	0.00010	0.00025	0.00010	0.00013
a3	0.00005	0.00005	0.00025	0.00005	0.00020
a4	0.00015	0.00005	0.00025	0.00005	0.00006
a5	0.60000	0.60000	0.60000	0.60000	0.60000
a6	0.90000	0.53915	0.40000	0.40000	0.40000
a7	0.95949	0.59020	1.50000	1.50000	0.77390
a8	0.14609	0.10000	0.10000	0.30000	0.17342
Nº dados	21	52	9	9	

CALUMBI - FOLHELHO					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
a1	1.97112	2.66060	2.35874	3.57009	2.49280
a2	0.00025	0.00010	0.00025	0.00017	0.00015
a3	0.00005	0.00015	0.00015	0.00005	0.00005
a4	0.00005	0.00005	0.00005	0.00010	0.00005
a5	0.60000	0.60000	0.60000	0.60000	0.60000
a6	0.90000	0.40000	0.65000	0.40000	0.56640
a7	0.10000	0.47550	0.10000	1.50000	0.63687
a8	0.30000	0.10000	0.30000	0.20000	0.16656
Nº dados	441	442	119	150	

Tabela 8. Coeficientes $a_1 - a_8$ do modelo de Bourgoyne & Yong determinados - Calumbi

COEFICIENTES $a_1 - a_8$ DO MODELO DE BOURGOYNE & YOUNG
MURIBECA/MACEIÓ

MACEIÓ - FOLHELHO					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
a1	1.65141	2.15988	2.36212	2.24709	2.11827
a2	0.00010	0.00025	0.00010	0.00025	0.00021
a3	0.00025	0.00005	0.00005	0.00005	0.00008
a4	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
a5	1.69053	0.60000	0.60000	1.53011	0.89615
a6	0.90000	0.40000	0.48178	0.43154	0.56783
a7	0.10000	0.48650	0.24933	0.10000	0.15478
a8	0.10000	0.30000	0.10000	0.10000	0.20299
Nº dados	24	267	713	173	

MACEIÓ - ARENITO					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
a1	1.90666	2.59641	2.42930	2.93495	2.56885
a2	0.00010	0.00025	0.00010	0.00015	0.00021
a3	0.00025	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
a4	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
a5	0.79291	0.60000	0.60000	0.60000	0.79514
a6	0.90000	0.90000	0.51373	0.90000	0.87065
a7	0.10000	0.52026	0.10000	0.39888	0.17357
a8	0.10000	0.30000	0.10000	0.10000	0.23540
Nº dados	8	539	294	320	

Tabela 8A. Coeficientes $a_1 - a_8$ do modelo de Bourgoyne & Young determinados - Maceió

TOPO DAS FORMAÇÕES ATRAVESSADAS E DISTÂNCIAS AO POÇO ALS E

TOPOS DAS FORMAÇÕES DOS POÇOS					
FORMAÇÃO/MEMBRO	TOPO (metros)				
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E
PIAÇABUÇU/MARITUBA	51	49	45	50	50
PIAÇABUÇU/CALUMBI	628	674	407	673	493
RIACHUELO/TAQUARI	2443	2566	2490	2084	-
MURIBECA/MACEIÓ	2557	2621	2730	2113	2516

DISTÂNCIA AO POÇO ALS E	
POÇO	DISTÂNCIA (metros)
ALS A	7950
ALS B	4859
ALS C	22833
ALS D	7411

Tabela 9 Topos das formações atravessadas e distância dos poços de correlações ao poço ALS E

intervalo perfurado e custo por metro perfurado. Escolhe-se, desta maneira, o tipo de broca que proporcionou o menor custo por metro perfurado.

Sabendo-se quantos metros a broca anterior perfurou, soma-se esta metragem à profundidade de saída da broca anterior ou início da simulação. Escolhe-se o código IADC da broca e repete-se o processo, até o fim da fase considerada no projeto de perfuração.

Os resultados obtidos deste procedimento estão mostrados nas tabelas 10 e 11.

O modelo de Bourgoyne & Young no poço ALS E

Com os coeficientes obtidos de 4 poços calculou-se a taxa de penetração e comparou-se com a taxa real obtida após a perfuração do poço ALS E. Estes valores são mostrados nas figuras 24 e 25.

Observando estas duas figuras conclui-se que a previsão da taxa de penetração, para o objetivo a ser atingido, é satisfatória na maior parte do trecho perfurado.

O modelo falha na previsão, na profundidade aproximada de 2000m, onde altas taxas reais são observadas. Este fato deve-se possivelmente, ao aumento da pressão de poros e ter-se perfurado com diferencial de pressão poço-formação negativo (*under balance*). Como a litologia é folhelho não houve nenhum influxo da formação ao poço. O programa de cálculo da pressão de poros deve ter falhado neste trecho pois são observados altos tempos de trânsito

QUADRO DE BROCA RECOMENDADO (12 1/4")

Nº Broca	IADC	lito- logia	Prof. entr. (m)	Prof. saíd. (m)	Peso (Klbs)	Rot. (rpm)	Taxa (m/h)	Custo (US\$/m)
1	1 1 1	FLH	2000	2121	50	195	7,5	249
	1 1 4	FLH	2000	2125	50	190	7,4	254
	1 1 6	FLH	2000	2189	55	120	6,0	271
2	1 1 1	FLH	2121	2241	50	190	7,1	265
	1 1 4	FLH	2121	2245	50	185	7,0	269
	1 1 6	FLH	2121	2302	55	120	5,8	286
3	1 1 1	FLH	2241	2357	50	185	6,5	289
	1 1 4	FLH	2241	2366	50	175	6,3	293
	1 1 6	FLH	2241	2410	55	120	5,4	310
4	1 1 1	FLH	2357	2471	50	180	6,0	310
	1 1 4	FLH	2357	2480	50	170	5,8	315
	1 1 6	FLH	2357	2517	55	120	5,1	331
5	1 2 1	FLH	2471	2539	60	75	3,5	530
		ARN	2471	2543	40	165	6,9	347
	1 2 4	FLH	2471	2528	55	100	3,7	555
		ARN	2471	2545	40	160	6,7	355
	1 2 6	FLH	2471	2567	60	60	3,2	536
		ARN	2471	2562	45	120	5,6	370
	4 3 7	FLH	2471	2660	50	85	3,7	482
6	1 3 1	FLH	2660	2725	65	45	2,6	666
		ARN	2660	2710	45	120	4,9	498
	1 3 4	FLH	2660	2742	60	50	2,6	665
		ARN	2660	2712	60	65	3,3	533
	1 3 6	FLH	2660	2744	60	45	2,5	674
		ARN	2660	2714	45	110	4,6	523
	5 1 7	FLH	2660	2825	55	65	3,1	573
		ARN	2660	2824	50	100	5,6	393

FLH = folhelho

ARN = arenito

Tab 10. Quadro de broca recomendado para o poço ALS E (12 1/4")

QUADRO DE BROCA RECOMENDADO (8 1/2")

Nº Broca	IADC	lito- logia	Prof. entr. (m)	Prof. said. (m)	Peso (Klbs)	Rot. (rpm)	Taxa (m/h)	Custo (US\$/m)
7	1 3 1	FLH	2700	2746	45	65	2,6	736
		ARN	2700	2752	35	125	4,4	517
	1 3 4	FLH	2700	2754	45	60	2,5	721
		ARN	2700	2753	35	125	4,4	515
	1 3 6	FLH	2700	2270	45	55	2,4	704
		ARN	2700	2753	35	125	4,4	522
	5 1 7	FLH	2700	2841	35	100	2,9	573
		ARN	2700	2913	35	100	4,4	384
8	2 1 1	FLH	2841	2885	55	55	2,6	757
		ARN	2841	2886	45	100	4,0	592
	2 1 4	FLH	2841	2900	55	45	2,4	740
		ARN	2841	2888	40	100	3,8	606
	2 1 6	FLH	2841	2912	40	100	3,5	546
		ARN	2841	2916	50	60	2,4	695
	5 3 7	FLH	2841	2944	35	90	2,6	686
		ARN	2841	2979	35	100	4,1	458
9	2 1 1	FLH	2912	2967	50	55	2,3	792
		ARN	2912	2958	40	100	3,4	651
	2 1 4	FLH	2912	2984	50	45	2,1	792
		ARN	2912	2958	40	100	3,4	658
	2 1 6	FLH	2912	2958	40	100	3,4	665
		ARN	2912	2984	50	45	2,1	797
	5 3 7	FLH	2912	3037	35	100	2,6	655
		ARN	2912	3101	35	100	3,9	438
10	2 1 1	FLH	3037	3099	50	40	1,8	905
		ARN	3037	3074	35	100	2,9	787
	2 1 4	FLH	3037	3099	50	40	1,8	910
		ARN	3037	3074	35	100	2,9	795
	2 1 6	FLH	3037	3099	50	40	1,8	915
		ARN	3037	3074	35	100	2,9	804
	5 3 7	FLH	3037	3215	35	80	2,1	711
		ARN	3037	3279	35	80	2,9	525

FLH = folhelho

ARN = arenito

Tab 11. Quadro de broca recomendado para o poço ALS E (8 1/2 ")

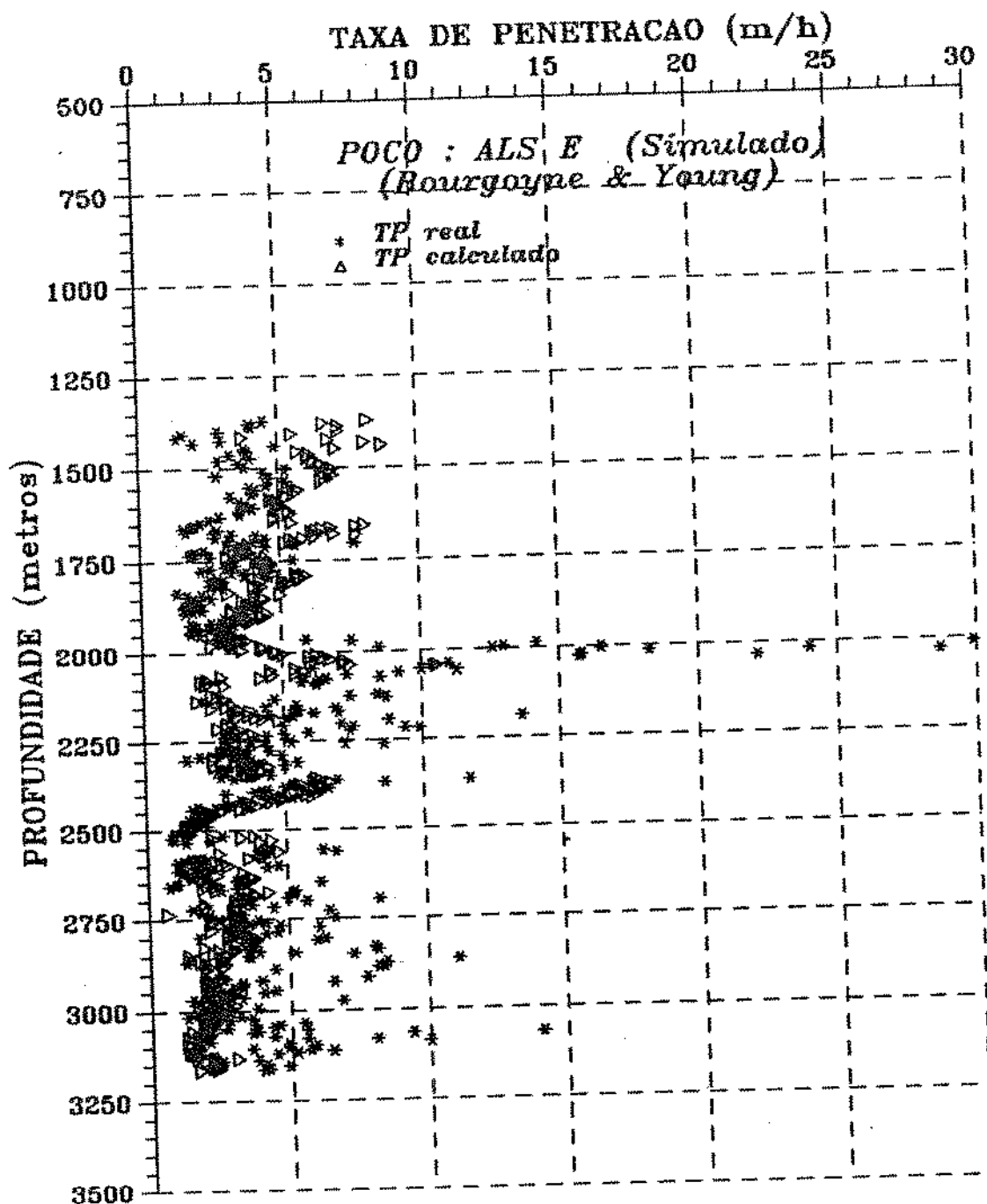


Figura 24. Comparação entre a taxa de penetração prevista com a real para o poço ALS E.

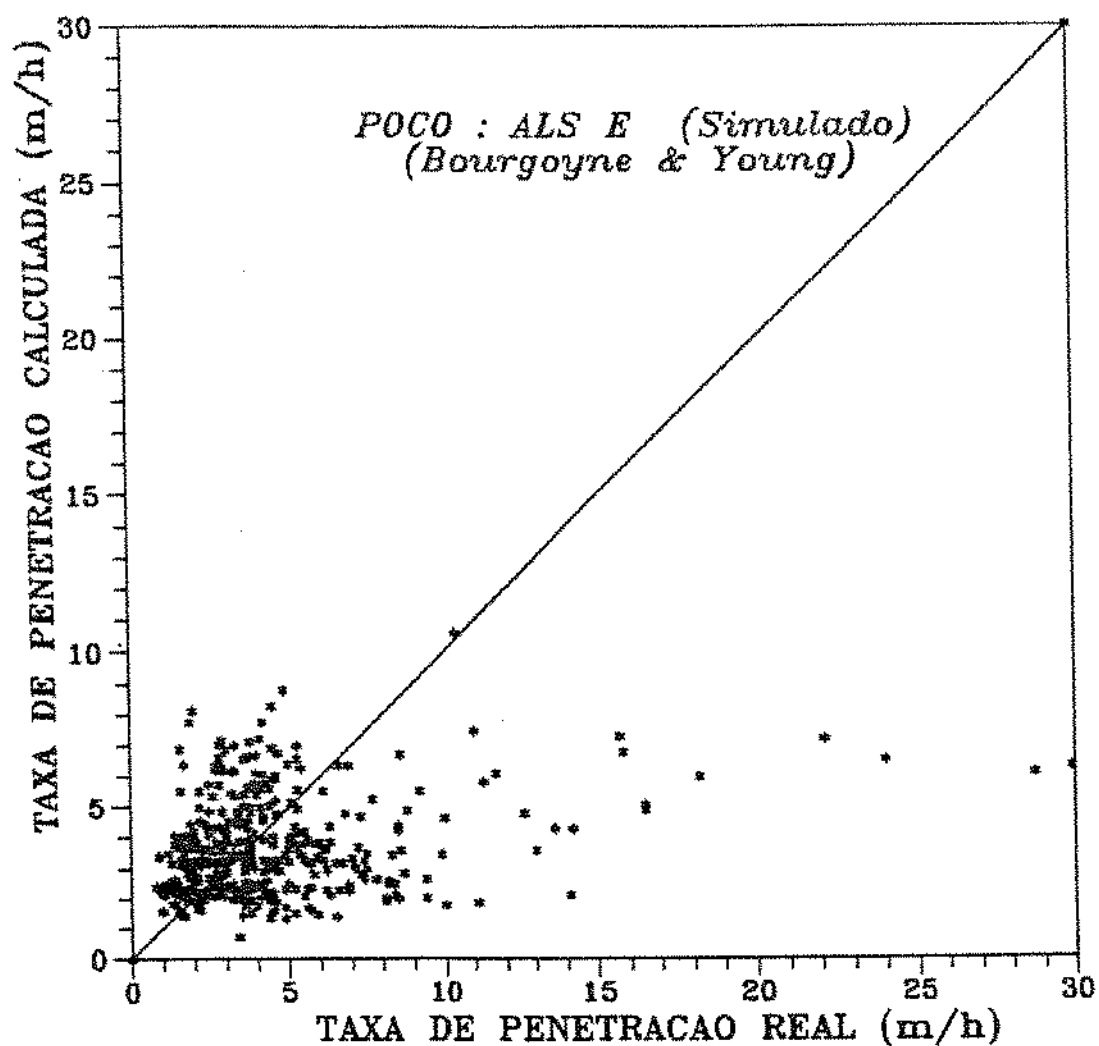


Figura 25. Taxa de penetração calculada da simulação x taxa de penetração real para o poço ALS E.

nesta região como mostra a figura 26. A partir de 2700 m o modelo também não acompanha os picos altos de taxa. Todavia, estas falhas não invalidam nem o modelo e nem o método, à meta que se quer atingir.

Cálculo da tensão de compressão para o poço ALS E

Foi traçado a tensão de compressão x profundidade, figura 27 para o poço ALS E. A escolha do código IADC feita com base nos 4 poços se mostraram boas ao se comparar o código IADC da tabela 10 e 11 (brocas recomendadas) com a figura 27.

Conclusão

O método proposto teve bons resultados na previsão de peso e rotação a ser utilizado e na escolha do tipo de broca. A previsão da taxa de penetração, comparada com a real mostrou-se satisfatório com falhas devido ao provável aumento da pressão de poros na profundidade de 2000m e não previsão dos picos de taxa à partir de 2700m.

Na escolha do código IADC obteve-se excelente resultados com nenhum erro que se pudesse criticar. Como a maioria dos poços são perfilados, este tipo de procedimento, método de escolha de broca por perfil deve ser implantado em todos os Distritos de Perfuração.

A avaliação do método de seleção de parâmetros mecânicos deve ser feita quando realmente for utilizado no

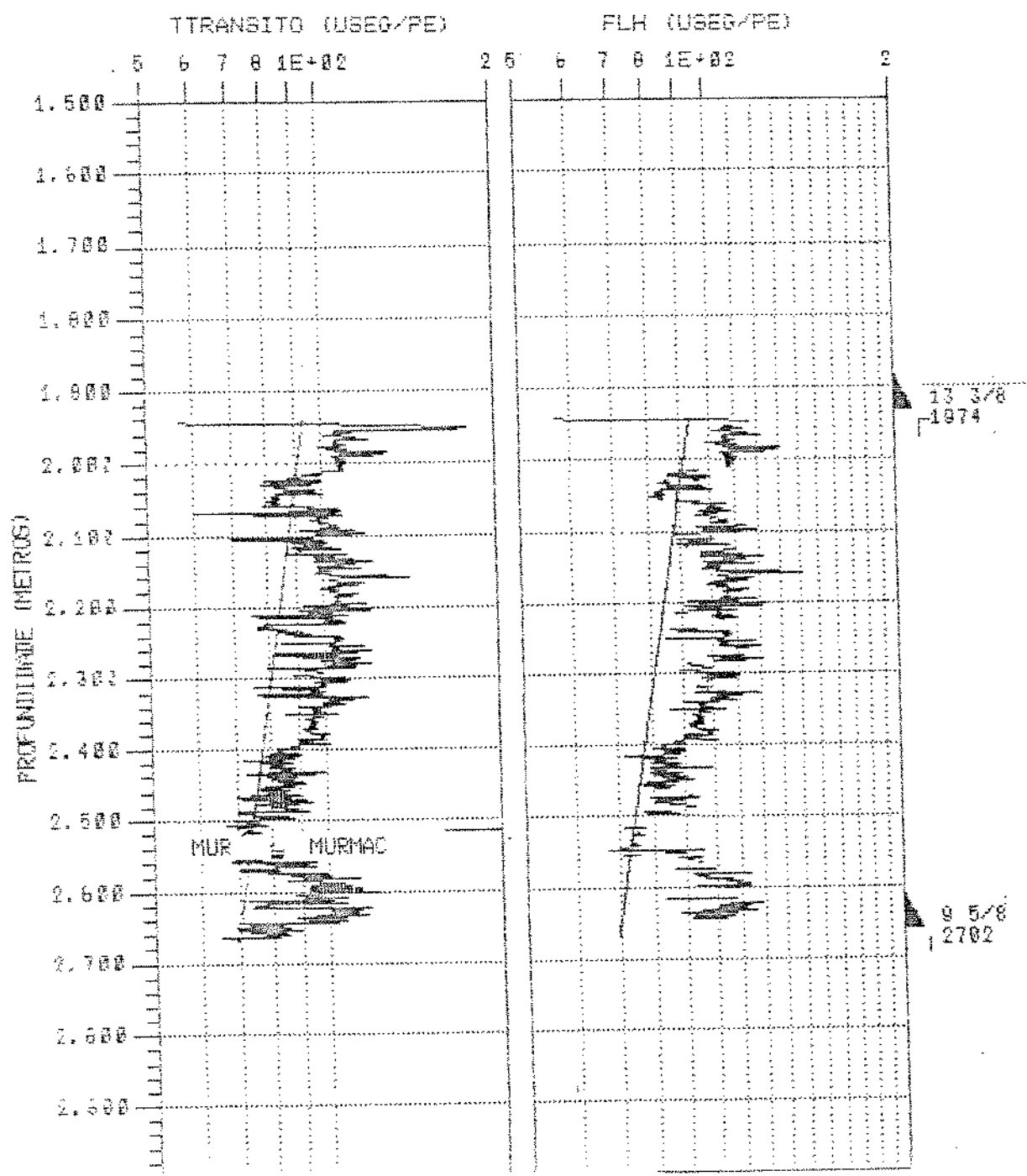


Figura 26. Tempo de trânsito x profundidade obtido do perfil BHC

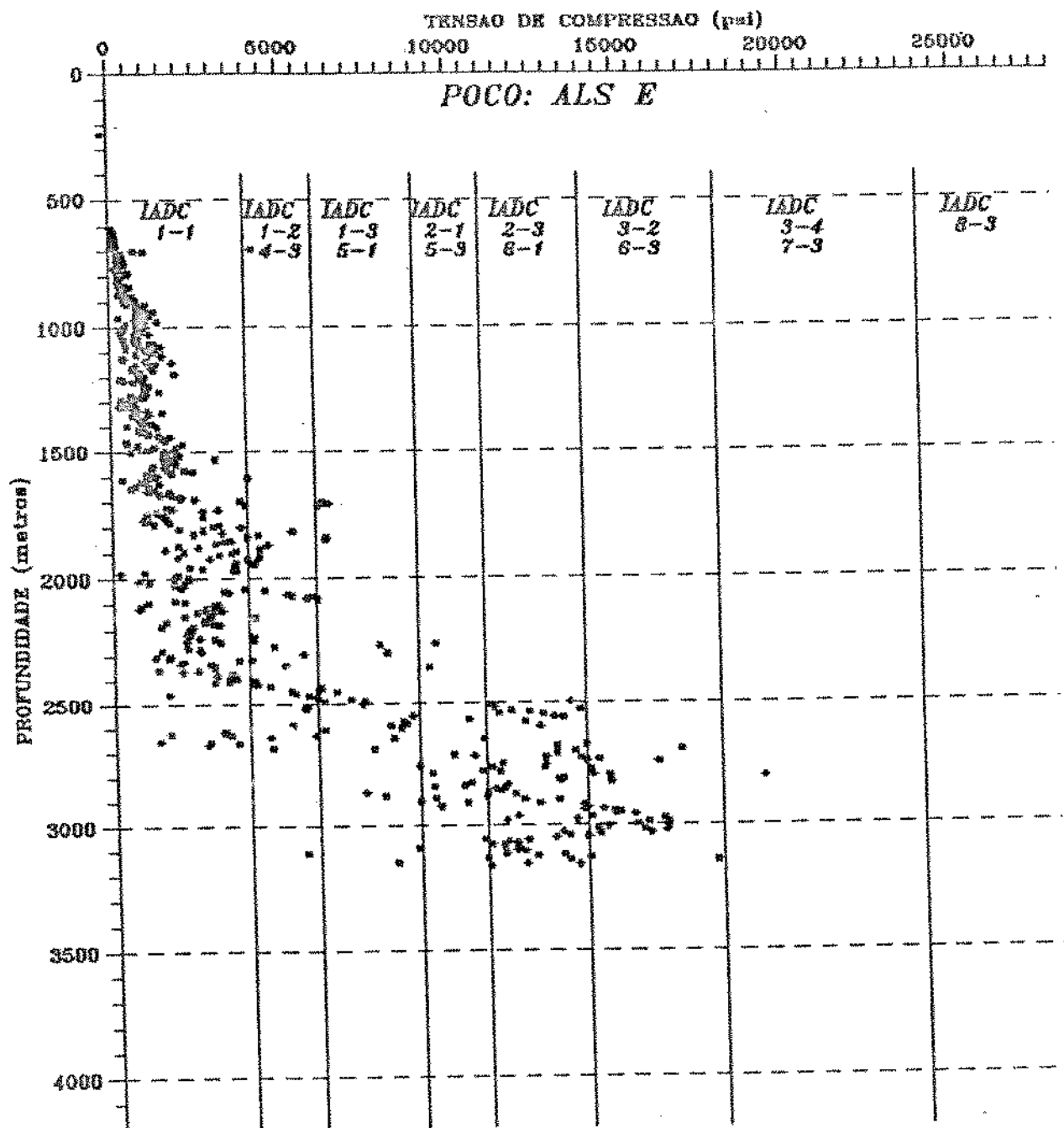


Figura 27. Tensão de compressão x profundidade com limites para os tipos de brocas do poço ALS E.

campo, isto é, quando for utilizado o recomendado, para se ter dados comparativos. Apesar disso o método mostrou-se coerente com as brocas utilizadas mesmo sem as recomendações de peso e rotação e escolha do tipo de broca, caso se compare o quadro de brocas recomendadas (tabela 10 e 11) com o quadro de broca utilizado no poço ALS E (tabela 12).

Pelo gráfico de isocusto em função de peso e rotação, (figura 28), e o gráfico de isotaxa em função dos mesmos parâmetros (figura 29), traçados para a broca nº 6 recomendada, pode-se concluir que : (1) há uma região de mínimo custo, onde os parâmetros peso e rotação são os ótimos. (2) a região de máxima taxa de penetração situa-se nas coordenadas de máximo peso e rotação recomendados pelos fabricantes. (3) desta maneira maximizar a taxa de penetração, não significa necessariamente minimizar custos. Felizmente há uma concientização geral em ponderar estes parâmetros, isto é, quando se usa o máximo peso coloca-se a mínima rotação e vice-versa.

POÇO ALS E

QUADRO DE BROCAS UTILIZADAS

Nº BROCA	DIAM. (pol)	COD. I A D C	PROF. ENTR. (m)	METRA- GEM (m)	PESO (Klbs)	ROT. (rpm)	TAXA (m/h)	DESG. D R C
16	12 1/4	1 1 4	1984	129	50	150	6,8	8 8 2
18		1 3 6	2116	25	41	120	4,5	3 3 0
20		1 1 1	2146	94	40	150	4,9	5 4 0
21		1 3 6	2240	59	55	120	3,6	8 8 0
22		1 3 6	2299	54	55	90	2,8	8 5 1
23		1 3 4	2353	81	50	120	4,1	6 8 0
24		5 1 7	2434	93	50	90	1,6	-
25		5 1 7	2527	10	50	80	2,2	0 0 0
27		1 3 4	2555	45	50	125	2,1	8 7 3
25R		5 1 7	2600	64	50	80	1,5	1 3 1
28		1 3 4	2664	45	50	125	3,5	3 4 1
29	8 1/2	1 3 6	2709	16	20	100	3,2	3 1 1
30		5 1 7	2725	165	35	70	3,9	5 5 2
31		5 1 7	2909	214	35	70	2,9	7 4 1
32		5 3 7	3123	52	35	70	3,0	1 1 1

Tabela 12. Quadro de broca do poço ALS E

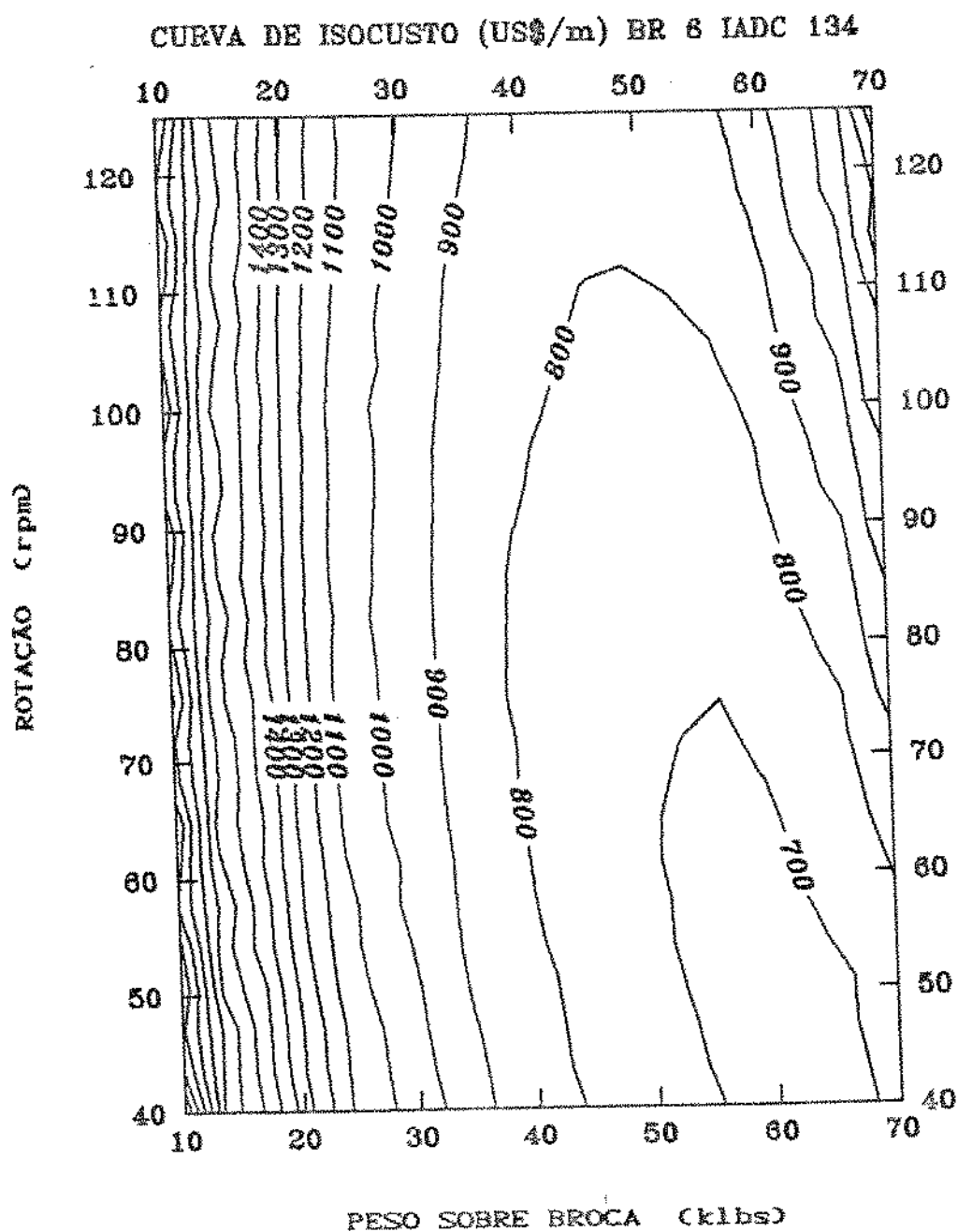


Figura 28. Curva de isocusto em função do peso e rotação para a broca 6 recomendada.

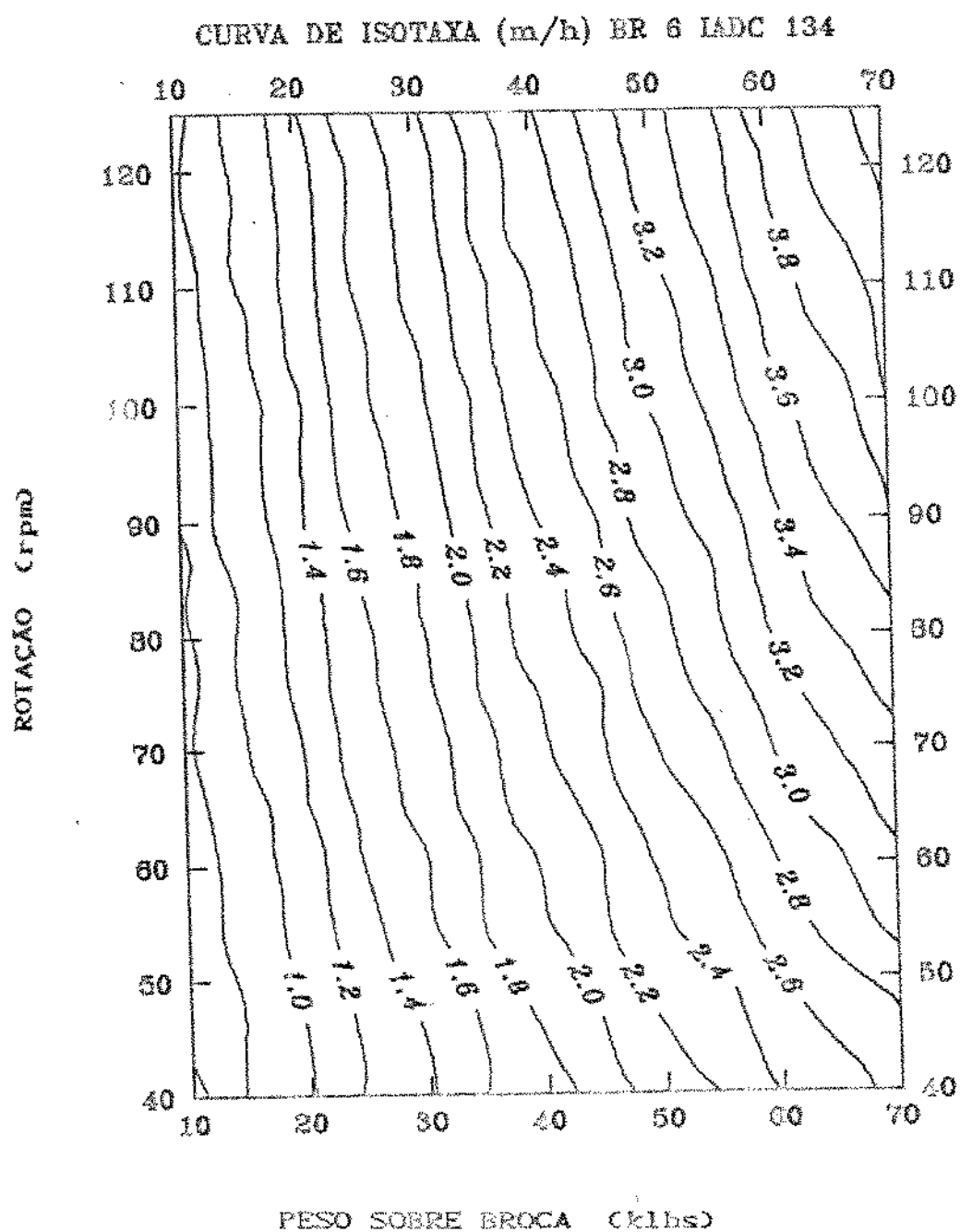


Figura 29. Curva de isotaxa em função de peso e rotação para a broca 6 recomendada.

CAPÍTULO VI

MODELO DE PERFURAÇÃO PROPOSTO

Neste capítulo é proposto o desenvolvimento de um modelo de perfuração através de análise dimensional. Foi incluído o termo de tensão na rocha além dos termos considerados por Bourgoyne & Young¹¹. Nos grupos adimensionais obtidos são feitas considerações de modo a se tornarem fisicamente compatíveis com a taxa de penetração. Com dados de 4 poços é calculado a taxa de penetração em um quinto poço e comparado com a real. O modelo apresenta bons resultados se comparado com o modelo de Bourgoyne & Young.

Introdução

O modelo de Bourgoyne & Young não considera a tensão na rocha ou a dureza da rocha, como Somerton⁵, Maurer⁶, Reza & Alcocer e Winters & Warren¹⁵ a consideram. O modelo considera ainda o fator e^{21} (perfurabilidade da rocha) como uma constante.

O uso dos modelos de Somerton, Maurer, Reza & Alcocer e Winters & Warren são dificultados pela obtenção de dados da tensão na rocha ou dureza da formação, como alguns autores citados a consideram.

A proposta é de se considerar a tensão da

compressão na rocha (S_c) utilizada no capítulo III, para seleção do tipo de broca, como um dos fatores que influenciam a taxa de penetração no desenvolvimento de um modelo à partir de análise dimensional.

Desenvolvimento do modelo por análise dimensional

Escrevendo a expressão da taxa de penetração como sendo:

$$\frac{dD}{dt} = f(W, N, \Delta P, D, F_j, S_c, H, D_b) \quad (64)$$

onde:

$$\frac{dD}{dt} = \text{taxa de penetração} \quad [LT^{-1}]$$

$$W = \text{peso sobre a broca} \quad [F]$$

$$N = \text{velocidade de rotação da broca} \quad [T^{-1}]$$

$$\Delta P = \text{diferencial de pressão poço-formação} \quad [FL^{-2}]$$

$$D = \text{profundidade} \quad [L]$$

$$F_j = \text{força nos jatos da broca} \quad [F]$$

$$S_c = \text{tensão de compressão na broca} \quad [FL^{-2}]$$

$$H = \text{altura do dente} \quad [L]$$

$$D_b = \text{diâmetro da broca} \quad [L]$$

Colocando-se o termo dependente dD/dt como independente tem-se:

$$g\left(\frac{dD}{dt}, W, N, \Delta P, D, F_j, S_c, H, D_b\right) = 0 \quad (65)$$

Escolhendo-se o sistema de dimensão F (força), L (comprimento) e T (tempo), pelo teorema de Buckingham Pi, cada parâmetro pode ser elevado a um expoente e a equação

(65) torna-se:

$$g\left\{[LT^{-1}]^a[F]^b[T^{-1}]^c[FL^{-2}]^d[L]^e[F]^f[FL^{-2}]^g[L]^h[L]^i\right\} = F^0L^0T^0 \quad (66)$$

Em termos de expoentes o somatório de F, L e T torna-se:

$$\sum F = 0, \text{ então: } b+d+f+g = 0 \quad g = -b-d-f \quad (67)$$

$$\sum L = 0, \text{ então: } a-2d+e-2g+h+i = 0 \quad (68)$$

$$\sum T = 0, \text{ então: } -a-c = 0 \quad c = -a \quad (69)$$

O teorema de Buckingham Pi requer o conhecimento prévio do número de grupos adimensionais (n). Neste caso:

$$m = 9 \quad (\text{número de parâmetros})$$

$$k = 3 \quad (\text{número de dimensões, F, L e T})$$

$$n = 9-3 = 6 \quad (\text{número de grupos adimensionais})$$

Para a determinação dos 6 grupos adimensionais tem-se que resolver o sistema de equação formado por (67) (68) e (69).

Substituindo-se (67) em (68) obtém-se:

$$a-2d+e-2(-b-d-f)+h+i = 0$$

$$a-2d+e+2b+2d+2f+h+i = 0$$

$$a+2b+e+2f+h+i = 0$$

$$i = -a-2b-e-2f-h \quad (70)$$

Substituindo-se (67), (69) e (70) em (66) tem-se:

$$g\left\{\left[\frac{dD}{dt}\right]^a [W]^b [N]^{-a} [\Delta P]^d [D]^e [F_j]^f [Sc]^{-b-d-f} [H]^h [Db]^{-a-2b-e-2f-h}\right\} = 0 \quad (71)$$

Separando-se os termos com expoentes comuns determina-se os 6 grupos adimensionais:

$$\pi_1 = \left[\frac{\frac{dD}{dt}}{N Db}\right]^a \quad (72)$$

$$\pi_2 = \left[\frac{W}{Sc Db^2}\right]^b \quad (73)$$

$$\pi_3 = \left[\frac{\Delta P}{Sc}\right]^d \quad (74)$$

$$\pi_4 = \left[\frac{D}{Db}\right]^e \quad (75)$$

$$\pi_5 = \left[\frac{F_j}{Sc Db^2}\right]^f \quad (76)$$

$$\pi_6 = \left[\frac{H}{Db}\right]^h \quad (77)$$

Substituindo-se os grupos adimensionais na equação (71) tem-se:

$$g\left\{[\pi_1]^a [\pi_2]^b [\pi_3]^d [\pi_4]^e [\pi_5]^f [\pi_6]^h\right\} = 0 \quad (78)$$

Passando para o primeiro membro o termo independente dD/dt e seu grupo adimensional, renomeando-se os expoentes e adicionando-se um coeficiente de proporcionalidade (b_1), a equação (78) torna-se:

$$\frac{dD}{N Db} = \left\{ b_1 \left[\left(\frac{W}{Sc Db^2} \right)^{b_2} \left(\frac{\Delta P}{Sc} \right)^{b_3} \left(\frac{D}{Db} \right)^{b_4} \left(\frac{F_j}{Sc Db^2} \right)^{b_5} \left(\frac{H}{Db} \right)^{b_6} \right] \right\} \quad (79)$$

Modificações na equação deduzida

Da equação deduzida (79), fez-se algumas modificações, para se tornar alguns grupos adimensionais fisicamente compatíveis com a taxa de penetração.

Como a taxa de penetração decai com aumento da diferencial de pressão (ΔP), da observação da figura 10, o grupo π_3 é proposto como:

$$\pi_3 = \left[- \frac{\Delta P}{Sc} \right] \quad (80)$$

A taxa de penetração decai com aumento da profundidade, então:

$$\pi_4 = - \frac{D}{Db} \quad (81)$$

Como o diâmetro da broca é menor que 1m, o termo π_4 pode crescer muito, com conseqüente b_4 pequeno, além do que traçando-se um gráfico $dD/dt \times \text{EXP}(-D/Db)$, é notado que para uma profundidade de apenas 1m e broca de 0,31m (12 1/4") o termo $\text{EXP}(-D/Db)$ é praticamente nulo.

Considerando-se dois extremos: broca de 50 e 10cm e profundidade de 0 e 6000m obtemos valores de D/Db .

Valores de D/Db		
<div>DC(m) Db(m)</div>	0	6000
0,50	0	$1,2 \times 10^{-4}$
0,10	0	$6,0 \times 10^{-4}$

Pela tabela notamos que o termo 10^{-4} é predominante, então, foram feitas tentativas para se chegar a uma função em que a influência do termo D/Db seja consistente:

D/Db	$e \left[- \frac{D}{D_b} 10^{-4} \right]$	$e \left[- \frac{D}{D_b} 5 \times 10^{-5} \right]$	$e \left[2 - \frac{D}{D_b} 5 \times 10^{-5} \right]$
$1,2 \times 10^{-4}$	0,301	0,549	4,055
$6,0 \times 10^{-4}$	0,002	0,050	0,368

Desta maneira obteve-se uma relação de diminuição na taxa de penetração de aproximadamente 10 vezes ($4,055 / 0,368$), para o caso estudado e a equação se torna:

$$\pi_4 = \left[2 - \frac{D}{D_b} 5 \times 10^{-5} \right]$$

(82)

O termo 2 da equação (82) foi obtido, considerando-se a média dos valores extremos considerados da seguinte maneira:

$$\frac{1,2 \times 10^{-4} \cdot 5 \times 10^{-5} + 6,0 \times 10^{-4} \cdot 5 \times 10^{-5}}{2} = 1,8 \sim 2$$

Como o peso sobre a broca influencia muito a taxa de penetração será considerada:

$$\pi_2 = \ln \left(\frac{W}{S_c D_b^2} \right) \quad (83)$$

Desta maneira quando tomar-se os logarítimos neperianos dos dois membros da equação (79) para regressão múltipla, o peso sobre a broca ficará diretamente proporcional ao logarítmo de π_1 .

Como o peso sobre a broca, a hidráulica influencia muito no rendimento da taxa de penetração e desta maneira:

$$\pi_5 = \ln \left(\frac{F_j}{S_c D_b^2} \right) \quad (84)$$

Conforme o dente da broca vai se desgastando a taxa de penetração diminui, então:

$$\pi_6 = - \frac{H}{D_b} \quad (85)$$

Como as considerações feitas, a equação final do modelo proposto é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{N D_b} = \text{EXP} \left\{ b_1 + \left[\ln \left(\frac{W}{S_c D_b^2} \right) \right]^{b_2} + \left(- \frac{\Delta P}{S_c} \right)^{b_3} + \left(2 - \frac{D}{D_b} 5 \times 10^{-5} \right)^{b_4} + \right. \\ \left. + \left[\ln \left(\frac{F_j}{S_c D_b^2} \right) \right]^{b_5} + \left(- \frac{H}{D_b} \right)^{b_6} \right\} \quad (86) \end{aligned}$$

Para as determinações dos coeficientes b_i o procedimento é o mesmo do adotado para determinar os a_i do modelo de Bourgoyne & Young apresentado no anexo A, isto é,

através de uma regressão múltipla.

Limites dos coeficientes b_i

Como não se tem experiências de laboratório, para basearmos a influência de cada termo encontrado na taxa de penetração, limitou-se apenas o coeficiente b_3 por se ter uma relação entre taxa de penetração e ΔP , baseado na figura 10 da seguinte maneira: o termo que considera o diferencial de pressão no modelo de Bourgoyne & Young é dado pela equação (34) isto é:

$$K_4 = D(g_p - \rho_c)$$

No modelo proposto é dado pela equação (80), igualando-se as duas equações temos:

$$e^{D(g_p - \rho_c) a_4} = e^{\left(-\frac{\Delta P}{S_c}\right) b_3}$$

ou

$$D(g_p - \rho_c) a_4 = \left(-\frac{\Delta P}{S_c}\right) b_3 \quad (87)$$

Sendo:

$$-\Delta P = D(g_p - \rho_c) \quad (88)$$

Substituindo-se a equação (88) em (87) vem:

$$D(g_p - \rho_c) a_4 = \frac{D(g_p - \rho_c)}{S_c} b_3$$

Como estão em unidades diferentes transformando-se o 1º membro para unidades S.I.

$$\frac{D}{3,281} (g_p - \rho_c) \times 119,9 a_4 = \frac{D(g_p - \rho_c)}{S_c} b_2 \quad (89)$$

Cancelando-se os termos comuns obtém-se:

$$b_2 = 36,54 S_c a_4 \quad (90)$$

Para cálculo dos limites inferior e superior de b_2 , calcula-se S_c médio (S_{cm}) no intervalo a ser feito a regressão múltipla e multiplica-se pelo a_4 mínimo ou máximo:

$$b_{2mín} = 36,54 S_{cm} a_{4mín} \quad (91)$$

$$b_{2máx} = 36,54 S_{cm} a_{4máx} \quad (92)$$

Para os demais coeficientes, não foram impostos restrições, aceitando-se mesmo os coeficientes negativos.

Verificação do modelo no poço ALS E

Para os poços ALS A, ALS B, ALS C e ALS D foram determinados os coeficientes b_i com os mesmos dados utilizados no modelo de Bourgoyne & Young, mais a tensão de compressão calculada para escolha da broca, com o programa MULTREG mostrado no anexo H.

Os dados foram divididos em formações, mas não por litologia, pois no cálculo da tensão de compressão a litologia já é considerada. Dividiu-se a formação por diâmetro de broca utilizado, devido ao modelo proposto não se

comportar bem quando da mudança de fase dentro de uma mesma formação.

Os coeficientes b_i para o poço ALS E, foram determinados do mesmo modo proposto no método utilizando o modelo Bourgoyne & Young, dada pela expressão (62), isto é, em função da distância e número de dados.

Com os coeficientes b_i obtidos nos 4 poços vizinhos ao ALS E (tabelas 13 e 13A), calculou-se a taxa de penetração através do programa ROP (anexo I). A comparação entre a taxa de penetração calculado e a real medida é mostrada na figura 30. Observando esta figura, nota-se a boa correlação obtida na fase 44cm ($17\frac{1}{2}$ ") de 1369 a 1984 metros quando termina esta fase no membro Calumbi.

Na fase de 31cm ($12\frac{1}{4}$ "), ainda no mesmo membro Calumbi, de 1369 a 2516 m observa-se uma ótima correlação, com a taxa calculada acompanhando o aumento da taxa real. Este desempenho se deve à consideração da tensão de compressão no modelo, que nesta profundidade de aproximadamente 2000 m é baixo. O modelo de Bourgoyne & Young não se mostrou satisfatório nesta mesma profundidade.

A fase de 31cm de 2516 a 2709m, já dentro da formação Muribeca/Maceió o modelo proposto superestimou as taxas de penetrações. Este fato se deve à dispor-se de apenas dois poços que perfuraram esta fase nesta formação, ALS C e ALS D. Sendo que o ALS C dista cerca de 23km do poço considerado e no cálculo dos coeficientes tem um peso de 27%. Desprezando-se os dados do ALS C e calculando a taxa somente

COEFICIENTES $b_1 - b_6$ DO MODELO PROPOSTO

CALUMBI 17 1/2"					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
b1	-138.0993	-10.8648	-67.0255	-10.8521	-10.3178
b2	0.2617	-0.1192	-0.1265	-0.1741	-0.0618
b3	0.0803	3.8510	4.3044	1.8179	1.1981
b4	75.2162	7.0549	41.6294	7.5876	6.9172
b5	-0.2404	0.1035	0.6550	0.1279	0.1771
b6	7.2859	0.1338	-0.2291	0.3813	0.3486
Nº dados	11	178	128	431	

CALUMBI - 12 1/4"					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
b1	-15.2395	-37.6625	-	-75.3668	-28.9718
b2	-0.2966	-0.6475	-	0.0735	0.0666
b3	1.9019	3.3533	-	2.4615	2.4615
b4	11.2393	26.9019	-	48.3084	20.3413
b5	0.2817	0.1565	-	0.6283	0.2729
b6	0.2385	0.1079	-	-0.3325	0.1365
Nº dados	832	317	-	139	

TABELA 13. Coeficientes $b_1 - b_6$ do modelo proposto (Calumbi)

COEFICIENTES b₁ - b₆ DO MODELO PROPOSTO

MACEIÓ 12 1/4"					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
b1	-	-	-15.5594	-8.4402	-4.1731
b2	-	-	-0.0536	0.1507	0.0297
b3	-	-	7.5226	8.6656	0.8455
b4	-	-	12.2947	8.3247	4.8154
b5	-	-	0.2270	0.2489	-0.0662
b6	-	-	0.2689	-0.0713	0.1155
Nº dados	-	-	275	235	

MACEIÓ - 8 1/2"					
	ALS A	ALS B	ALS C	ALS D	ALS E calculado
b1	57.9586	-6.2144	2.5102	-6.8815	-2.8846
b2	-0.3012	-0.0158	0.2007	0.3014	-0.0520
b3	4.4327	9.8643	7.7246	8.7194	7.3407
b4	-40.5653	8.4735	3.2878	6.7978	5.5687
b5	-0.0153	0.3202	0.5007	-0.2572	0.2644
b6	0.0391	0.2023	0.0438	0.1030	0.1695
Nº dados	67	813	646	266	

TABELA 13A Coeficientes b₁ - b₆ do modelo proposto (Maceió)

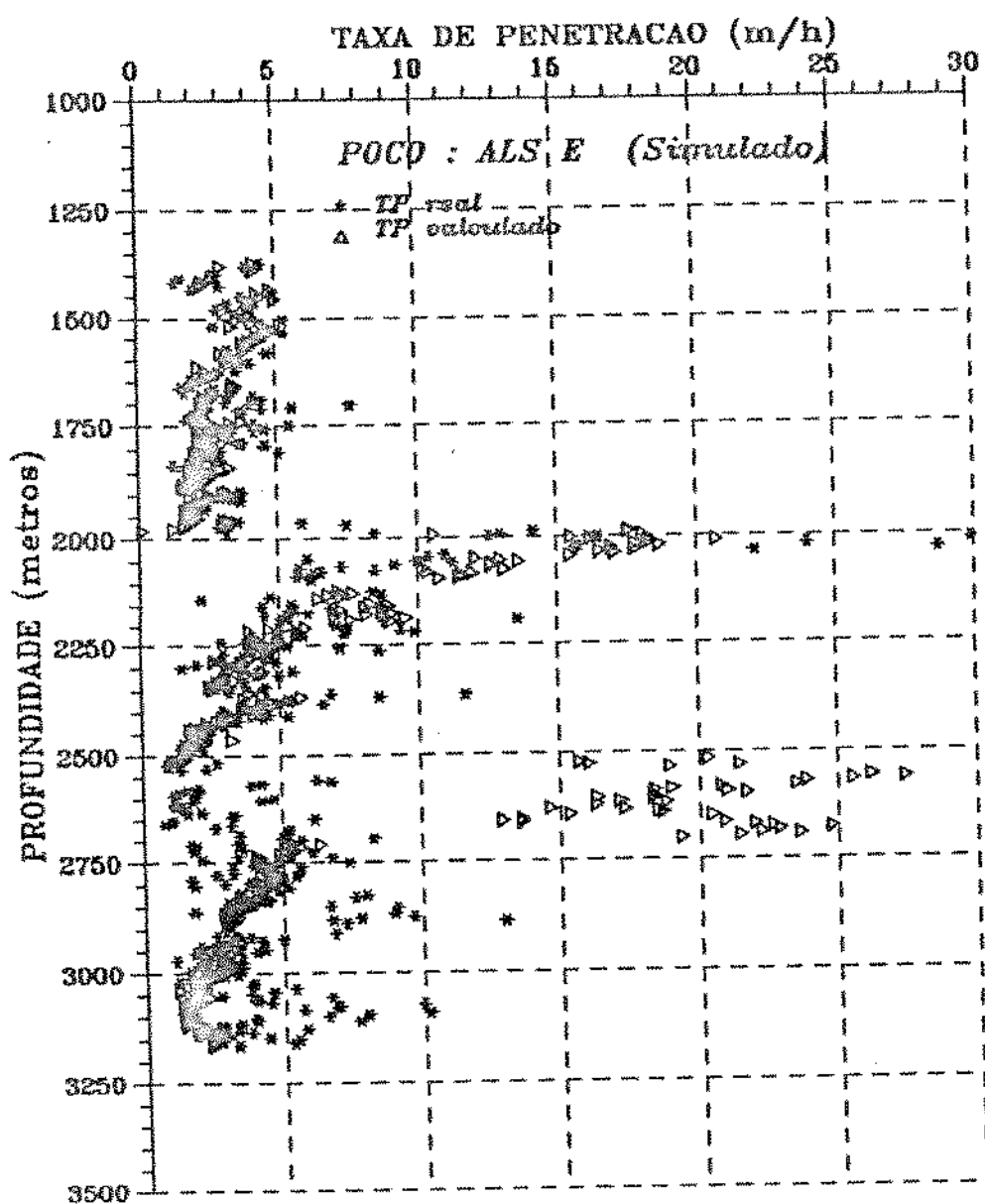


Figura 30. Comparação entre a taxa de penetração prevista pelo modelo proposto, com a real para o poço ALS E, considerando o poço ALS C.

com os coeficientes do poço ALS D (7km do ALS E) obtém-se o gráfico mostrado na figura 31, com bons resultados. Este tipo de análise, considerar ou não os coeficientes de um determinado poço, deve ser feita sempre, antes de se utilizar o modelo para qualquer fim, simulando-se e observando os resultados.

A fase de 22cm, na mesma formação anterior, mostrou-se apenas razoável, não prevendo os picos ocorridos no poço real.

Conclusão

A tensão na rocha é um fator importante que influi e muito na taxa de penetração.

O modelo proposto que difere, quanto aos dados considerados, apenas do acréscimo da tensão de compressão, em relação ao modelo de Bourgoyne & Young, obteve bons resultados.

A dificuldade do modelo proposto está na obtenção da tensão de compressão. Esta pode ser obtida através de uma média ponderada das tensões de compressão, em função da distância ao poço em estudo, litologia e números de dados obtidos de perfis elétricos.

Uma comparação simples, em termos de soma dos quadrados dos erros, entre o modelo de Bourgoyne & Young e o modelo proposto, para uma mesma formação, é mostrado na tabela 14.

MEMBRO	SOMA DOS QUADRADOS DOS ERROS	
	Bourgoyne & Young	Modelo Proposto
Calumbi	106.425	5.299
Maceió	5.223	5.046
Total	111.648	10.345

Tab. 14 Comparação da soma dos quadrados dos erros entre o modelo proposto e o de Bourgoyne & Young.

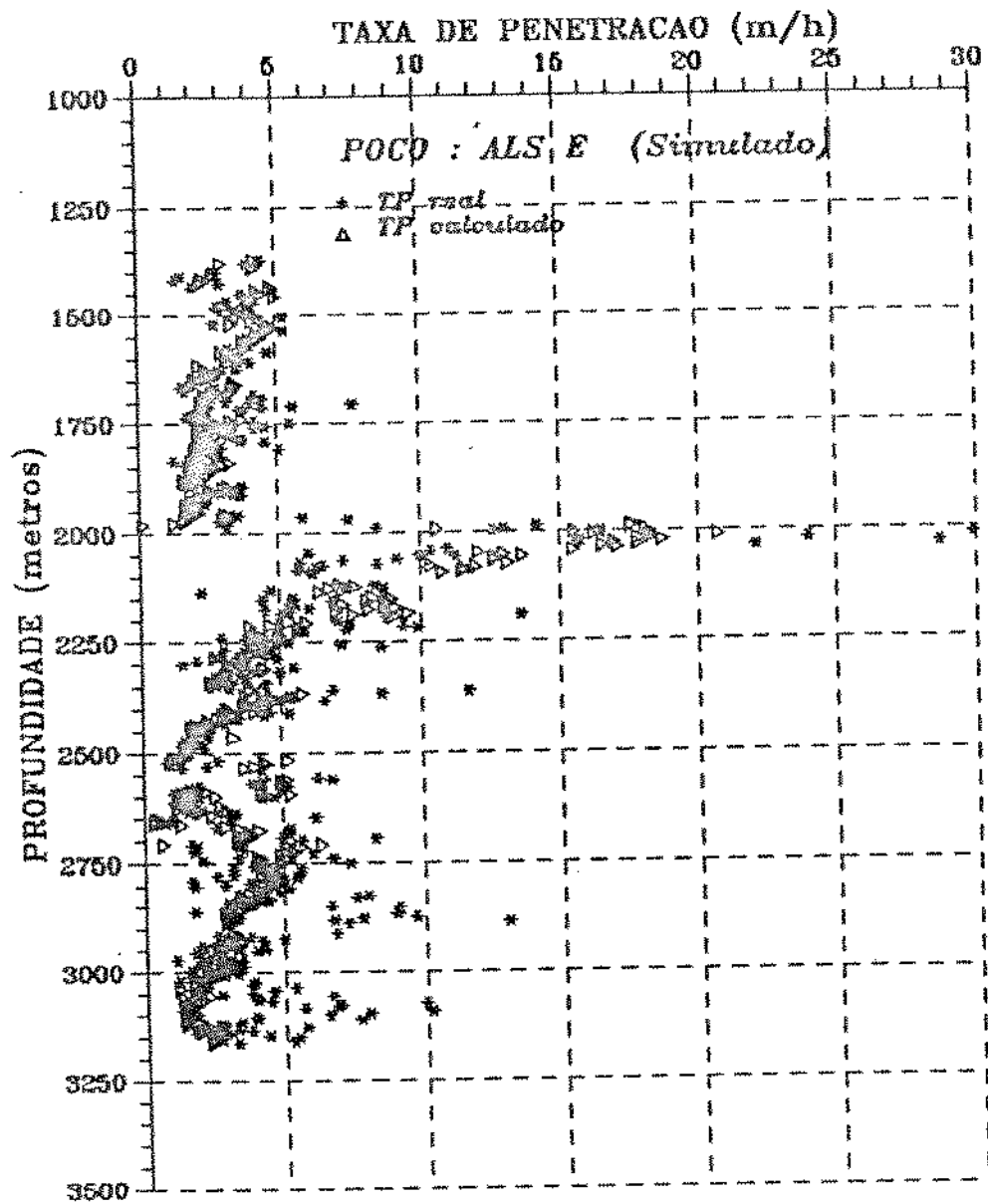


Figura 31. Comparação entre a taxa de penetração prevista pelo modelo proposto, com a real para o poço ALS E, excluindo o poço ALS C.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são feitas as conclusões finais e recomendações.

Conclusões

O método proposto para escolha do tipo de broca e seleção dos parâmetros mecânicos, peso e rotação da broca se mostrou consistente e confiável, para a elaboração da programação de brocas a serem utilizados num poço a ser perfurado, dentro de um mesmo campo.

O método de seleção do tipo de broca por perfil sônico, proposto por Mason, comprovou ser uma boa maneira para se avaliar, após o poço perfurado, as brocas utilizadas. E também, para previsão de programação do tipo de broca, com perfis dos poços de correlação. Como a engenharia de perfuração é um constante aprendizado, baseados em experiências passadas, a correta avaliação das brocas utilizadas é um excelente meio para se reduzir custos, pois dessa análise criteriosa evita-se repetir o erro no próximo poço.

O modelo de perfuração de Bourgoyne & Young

demonstrou ser um modelo satisfatório, para a área estudada. O uso do modelo para otimização ou outros fins tornar-se-á simples com a implantação dos programas desenvolvidos associados ao banco de dados implantado à partir de dados de *mud logging*, num computador de grande porte.

A tensão na rocha é um fator importante, que influencia muito a taxa de penetração, como foi demonstrado pelo modelo proposto.

O modelo proposto, para área em estudo, mostrou-se também confiável, principalmente devido à inclusão da tensão de compressão da rocha, como um dos parâmetros que influenciam na taxa de penetração.

O método para seleção de peso e rotação, ainda deve ser avaliado, no campo, mas com os dados simulados mostrou-se ser compatível com os dados reais.

Maximizar a taxa de penetração, não implica necessariamente em redução de custo, como se verificou na comparação entre as curvas de isocusto e isotaxa, traçadas para a broca nº 6 recomendada.

Recomendações

Continuar o estudo para brocas dragas, PDC e diamantadas. Nestes casos deverão ser estudados os mecanismos de desgastes destas brocas e substituir no modelo proposto, ou de Bourgoyne & Young, o parâmetro de desgaste de dente. O método para seleção de brocas por perfil, também deverá ser

método para seleção de brocas por perfil, também deverá ser estudado para estes tipos de broca.

Para o modelo proposto, há o estudo do desgaste do dente e dos rolamentos à fazer. Pode-se adicionar as equações de Bourgoyne & Young de desgaste de dente e rolamentos, ao modelo proposto, ficando assim um modelo mais completo. Pode-se ainda derivar fórmulas à partir de análise dimensional como proposto por Reza & Alcocer.

O estudo da inclusão da tensão de compressão como mais uma variável a ser acrescida no modelo de Bourgoyne & Young deve ser considerado.

O uso do modelo de Bourgoyne & Young na otimização em tempo real, através do supervisor de sonda também deve ser considerado. O modelo proposto pode ser utilizado se houver o equipamento de MWD (*measurement while drilling*) com sônico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dernbach, L A. *Sonic-gamma ray analysis improves bit selection.* Oil & Gas Journal, 14 junho 1982, pág. 90-101.
2. Pinheiro, Cesar & Linhares, T X Saulo. *Utilização de perfis geológicos para elaboração de programas de broca.* Quarto Congresso Latino-Americano de Perfuração, 1984.
3. Mason, L Kenneth. *Three-cone bit selection with sonic logs.* SPE Drilling Engineering, Junho 1987, pág. 135-142.
4. Gstalder, S & Raynal, J. *Measurement of some mechanical properties of rocks and their relation ship to rock drillability.* Journal of Petroleum Technology, Agosto 1966, pág. 991-996, Trans. AIME, 237.
5. Wuerker, R G. *Annotated tables of strength and elastic properties of rocks.* SPE 663-G, 1963.
6. Somerton, H Wilbur. *A laboratory study of rock breakage by rotary drilling.* Petroleum Transactions, AIME, vol. 216, 1959.
7. Maurer, W C. *The "perfect-cleaning" theory of rotary drilling.* Journal of Petroleum Technology, Novembro 1962, pág. 1270-1274.
8. Young, F S Jr. *Computerized drilling control.* Journal of Petroleum Technology, Abril 1969, pág. 483-494.
9. Galle, E M & Woods, H B. *How to calculate bit weight and rotary speed for lowest-cost drilling Parte 1.* Oil and Gas Journal, 14 de Novembro 1960, pág. 167-176.
10. Gomes, A D Fernando. *Parâmetros mecânicos de perfuração (método OWN).* Apostila do Centro de Ensino do Nordeste, Petrobrás.
11. Bourgoyne, A T Jr. & Young, F S Jr. *A multiple regression aproach to optimal drilling and abnormal pressure detection.* Society of Petroleum Engineer Journal, agosto, 1974.

12. Bourgoyne, A T Jr & Millhein, K K & Chenevert, M E & Young F S Jr. *Applied drilling engineering*. SPE textbook series, vol.2, 1986, 1ª edição.
13. Reza, M R & Alcocer, C F. *A unique computer simulation model well drilling: Part I - The Reza Drilling Model*. Society of Petroleum Engineers nº 15108, 1986.
14. Reza, M R & Alcocer, C F. *A unique computer simulation model well drilling: Part II - The Drilling Model Evaluation*. Society of Petroleum Engineers nº 15109, 1986.
15. Winters, W J & Warren, T M. *Roller bit model with rock ductility and cone offset*. Society of Petroleum Engineers nº 16696, 1987.
16. Warren, M T. *Drilling model for soft-formation bits*. Journal of Petroleum Technology, June 1981, pág. 963-970.
17. Warren, M T. *Penetration rate performance of roller cone bits*. Society of Petroleum Engineer nº 13259, 1984.
18. Campos, J C B. *Tensões na parede de um poço circular segundo a teoria da elasticidade*. Boletim Técnico Petrobrás, julho/setembro 1983, pág. 209-216.
19. Kowalski, J. *Formation strength parameters from well logs*. SPWLA sixteenth annual logging symposium, June 1975.
20. Ohara, S & Hering, M & Rocha, L A S & Dumans, C F F & Falcão, J L. *Avaliação da Formação com recursos computacionais*, 5º Congresso Latino americano de Perfuração, Buenos Aires, Argentina, novembro 1986.
21. Estes, J C. *Selecting the proper rotary rock bit*. Journal of Petroleum Technology, novembro 1971, pág. 1359-1367.
22. Montesanti, J R T. *Well cost analysis through computer aided data acquisition*. General Examination for a Ph.D. Louisiana State University, EUA, fevereiro 1986.
23. *Tabela Comparativa Peso e Rotação . Hughes Tool do Brasil*.
24. Tibbitts, G A et al. *Effects of bit hydraulics on full scale laboratory drilled shale*. Journal of Petroleum Technology, julho 1981, pág. 1180-1188.

25. Almeida, Mauricio A. *Drilling information log for computer-aided rig management*. General Examination for a Ph. D. in Petroleum Engineering, Louisiana State University, EUA, fevereiro 1986.
26. Eckel, R J. *Microbit studies of the effect of fluid properties and hydraulics on drilling rate, II*. Society of Petroleum Engineering nº 2244.
27. Codling, J. *Heuristic program - a guide to directional drilling*. 8th Annual ASME Energy Sources Tech. Conf. Drilling & Production Symposium. Dallas, fevereiro 1985, pág. 127-137.

ANEXO A

Regressão Múltipla

A equação do modelo de perfuração proposto por Bourgoyne & Young é:

$$\frac{dD}{dt} = e^{(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j)} \quad (A1)$$

Tomando-se os logaritmos neperianos de ambos os lados da equação temos:

$$\ln \frac{dD}{dt} = a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j \quad (A2)$$

Se definirmos o erro residual do i ésimo dado como sendo:

$$r_i = (a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j X_j) - \ln \frac{dD}{dt} \quad (A3)$$

então o problema é determinar-se a_1 até a_8 para n dados ($n > 8$) de maneira que a soma dos quadrados dos resíduos seja o mínimo, isto é:

$$\sum_{i=1}^n r_i^2 \text{ seja mínimo} \quad (A4)$$

Isto implica que:

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n r_i^2 \right)}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^n 2r_i \frac{\partial r_i}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^n 2r_i X_j = 0 \quad (A5)$$

para $j = 1, 2, 3, \dots, 8$

As constantes a_1 a a_8 são obtidas resolvendo-se o sistema de equação obtida, pela expansão de $\sum_{i=1}^n r_i X_j$ ($j=1, 2, 3, \dots, 8$), neste estudo resolvido pelo método de eliminação de Gauss.

A expansão do termo $\sum_{i=1}^n r_i X_j$ é:

$$\begin{aligned} a_1 \ln &+ a_2 \sum x_2 &+ a_3 \sum x_3 &+ \dots + a_8 \sum x_8 &= \sum \ln \frac{dD}{dt} \\ a_1 \sum x_2 &+ a_2 \sum x_2^2 &+ a_3 \sum x_2 x_3 &+ \dots + a_8 \sum x_2 x_8 &= \sum x_2 \ln \frac{dD}{dt} \\ a_1 \sum x_3 &+ a_2 \sum x_3 x_2 &+ a_3 \sum x_3^2 &+ \dots + a_8 \sum x_3 x_8 &= \sum x_3 \ln \frac{dD}{dt} \\ &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot \\ &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot \\ &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot &\cdot \\ a_1 \sum x_8 &+ a_2 \sum x_8 x_2 &+ a_3 \sum x_8 x_3 &+ \dots + a_8 \sum x_8^2 &= \sum x_8 \ln \frac{dD}{dt} \end{aligned}$$

A montagem e resolução do sistema de oito equações a oito incógnitas é feita pelo programa REGRE no modelo de Bourgoyne & Young e pelo programa MULTREG no modelo proposto (6 equações e 6 incógnitas).

ANEXO B

```

*   PROGRAMA PARA CALCULO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO
*   PELO SONICO
*
*   V 1.4

IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2
CHARACTER*1 RESP

C.... LEITURA DOS NOMES DOS ARQUIVOS
5  WRITE (*, '(A\)' ) ' NOME DO ARQUIVO PERFIL SONICO ----->'
    READ  (*, '(A15)')  ARQ
    WRITE (*, '(A\)' ) ' NOME DO ARQUIVO DOS RESULTADOS ----->'
    READ  (*, '(A15)')  ARQ1
    WRITE (*, '(A\)' ) ' NOME DO ARQUIVO PARA GRAFICO ----->'
    READ  (*, '(A15)')  ARQ2
    WRITE (*,*)          ' TEMPO DE TRANSITO DO SONICO NO FLUIDO'
    WRITE (*, '(A\)' ) ' DOS POROS (Agua do mar = 189 useg/pe)---->'
    READ  (*, '(F5.2)')  Y1
    WRITE (*, '(A\)' ) ' DADOS DE ENTRADA CORRETOS (S/N) ? ----->'
    READ  (*, '(A1)')    RESP
    IF (RESP.NE. 'S'.AND. RESP.NE. 's' ) GOTO 5
    OPEN (1,FILE = 'ROCHA.ARQ',STATUS = 'OLD',ERR=99)
    OPEN (2,FILE = ARQ,STATUS = 'OLD',ERR=99)
    OPEN (3,FILE = ARQ1,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=99)
    OPEN (4,FILE = ARQ2,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=99)
    Y1 = (1/Y1)*1. E6
    LIT1 = 0
    J5 = -1
20  READ (2,12,END=88) PROF,DTC,LIT
    IF(DTC.LT. 0. 0) GOTO 20
    IF (LIT.EQ. LIT1) GOTO 40
30  READ (3,11) LITO,TSTC,ALFA
    IF (LITO.NE. LIT) GOTO 30
C.... CALCULO DO TEMPO DE TRANSITO CISALHANTE (useg/pe)
40  DTS = DTC*(TSTC**ALFA)
    IF (DTS.LE. 0.) THEN
        REWIND 1
        GOTO 20
    END IF
C.... CALCULO DA VELOCIDADE CISALHANTE (pe/seg)
    VS = (1./DTS)*1. E6
C.... CALCULO DA TENSÃO DE COMPRESSÃO (1000 psi)
    X1 = EXP(-0.02666 *DTS)*262862.527975
    X2 = EXP(-0.021565*DTS)*171069.787409
    SC = -(5600.-Y1)*(X1-X2)/800. + X1
    WRITE (9,13) PROF,DTS,VS,SC,LIT
    LIT1 = LIT
    J5 = J5 + 1
    IF (J5.EQ. 5. OR. J5.EQ. 0) THEN
        WRITE (4,13) PROF,DTS,VS,SC,LIT
        J5 = 0
    END IF

```

```
J5 = 0
END IF
REWIND 1
GOTO 20
11  FORMAT (1X,I2,20X,F4.2,41X,F4.2)
12  FORMAT (2X,F5.1,3X,F5.1,I2)
13  FORMAT (4(F10.2),3X,I2)
88  CLOSE (1)
    CLOSE (2)
    CLOSE (3)
    CLOSE (4)
99  STOP
    END
```

ANEXO C

```

*   PROGRAMA PARA MONTAGEM DO QUADRO DE BROCA ('BIT RECORD')
*
*   A. BUSCA AUTOMATICA DOS PARAMETROS DE :
*       1. PESO SOBRE BROCA MAXIMO / DIAMETRO (PSBROCA.ARQ)
*       2. COEFICIENTES H1,H2,H3 DE B&Y          (BROCPAR.ARQ)
*       SEGUNDO O CODIGO IADC DA BROCA
*   B. CALCULO DE TH (ABRASIVIDADE DA FORMACAO)
*       TB (CONSTANTE DO ROLAMENTO DA BROCA)
*
PROGRAM BITREC
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON PROF(1000),PSBM(1000),ROTM(1000),TP(1000)
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2
CHARACTER*1 RESP
C.... LEITURA DOS NOMES DOS ARQUIVOS DE DADOS
2  WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS -->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DO "BIT RECORD" ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ1
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DE TH E TB ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ2
C.... PERGUNTA SE OS NOMES DOS ARQUIVOS ESTAO CORRETOS
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DE ARQUIVO CORRETO (S/N) ----->
    READ (*, '(A1)' ) RESP
    IF (RESP.NE. 'S'. AND. RESP.NE. 'S') GOTO 2
C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
    OPEN (3, FILE = ARQ2, STATUS = 'UNKNOWN', ERR=99, RECL=80)
    OPEN (4, FILE = ARQ ,STATUS = 'OLD', ERR=99, RECL=180)
    OPEN (5, FILE = ARQ1, STATUS = 'UNKNOWN', ERR=99, RECL=180)
    OPEN (6, FILE ='BROCPAR.ARQ', STATUS = 'OLD', ERR=99, RECL=80)
    OPEN (7, FILE ='PSBROCA.ARQ', STATUS = 'OLD', ERR=99, RECL=80)
    CALL BROCA
    CLOSE (3)
    CLOSE (4)
    CLOSE (5)
    CLOSE (6)
    CLOSE (7)
99  STOP
    END

C
C....
C
SUBROUTINE BROCA
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
DIMENSION A(12,3),B(11,15)
COMMON PROF(1000),PSBM(1000),ROTM(1000),TP(1000)
REAL MF
CHARACTER*4 IADC

```

```

      CHARACTER*4  IADC
      CHARACTER*10 NOME
      INTEGER FLAG

C.... LEITURA DOS PARAMETROS DE DESGASTE DE DENTE ( H1,H2,H3 )
      DO 10 I=1,12
10      READ(6,16) (A(I,J),J=1,3)
C.... LEITURA DO PESO MAXIMO SOBRE BROCA
      DO 20 I=1,11
20      READ(7,17) (B(I,J),J=1,15)
      I=0
      TBS=0.0
C.... ZERANDO OS VETORES
      DO 30 K = 1,1000
      PROF(K) = 0.0
      PSBM(K) = 0.0
      ROTM(K) = 0.0
      TP (K) = 0.0
30      CONTINUE
C.... LEITURA DOS DADOS DE BROCA
      READ (4,12,END = 999) PROFE,NE,ND,DB,JA,JB,JC,JD,TFA,IADC,
1      NOME,CB,TR,EFD,ABF,TT,TBC,MP,IDD,IDR,IDC
      PROF(0) = PROFE
      TP (0) = 1.
      CALL POSICAO (DB,IADC,IL,JI,JJ,IFLAG)
      IF(IFLAG.NE.0) THEN
      CALL ASSUME (NE,DB,IADC,NOME,IFLAG,WDBM,H1,H2,H3)
      GOTO 3
      END IF
      WDBM = B(JI,JJ)
      H1 = A(IL,1)
      H2 = A(IL,2)
      H3 = A(IL,3)
      3      CALL FATOR (IADC,FAT)
      WDBM = WDBM*FAT
      H1 = H1*FAT
      H2 = H2*FAT
      H3 = H3*FAT
      5      I=I+1
C.... LEITURA DOS DADOS DE PERFURACAO
      READ (4,13,END = 999) PROF(I),TP(I),PSB,ROT,PSBM(I),ROTM(I)
      READ (4,14,END = 999) FLAG,IOP
C.... VERIFICA SE HA VALORES MEDIOS NO INTERVALO PERFURADO
      IF (PSBM(I).LT.2.) PSBM(I) = PSB
      IF (ROTM(I).LT.90.) ROTM(I) = ROT
C.... VERIFICA SE OS VALORES SAO ACEITAVEIS
      IF (I.EQ.1) THEN
      IF (TP(I).EQ.0.0) TP(I) = 1.0
      TBS = (1./TP(I))*(PROF(I)-PROFE)
      GOTO 5
      END IF
      IF (PSBM(I).LT.2. .OR. PSBM(I).GT.60. ) PSBM(I) = PSBM(I-1)
      IF (ROTM(I).LT.90. .OR. ROTM(I).GT.200. ) ROTM(I) = ROTM(I-1)
C.... CALCULO DO TEMPO DE BROCA FUNDO SEM CONECCAO
      7      IF (TP(I).EQ.0.0. .OR. TP(I).GT.150. ) TP(I) = TP(I-1)
      TBS= TBS + (1./TP(I))*(PROF(I)-PROF(I-1))
      IF (FLAG.NE.1) THEN
      GOTO 5

```



```

ELSE
  GOTO 40
END IF
40  N = 1
C.... CALCULA A MEDIA
      CALL MEAN (PSBM, N, PSBMED)
      CALL MEAN (ROTM, N, ROTMED)
      WDB = PSBMED/DB
C.... CALCULO DA ABRASIVIDADE DA FORMACAO
      CALL TALHUIADC,IDD,TBS,WDBM,H1,H2,H3,WDB,ROTMED,TH
C.... CALCULO DA CONSTANTE DO ROLAMENTO
      CALL TALB(ROTMED,WDB,IDR,TBS,IOP,TB)
      WRITE (3,11) PROFE,NOME,IADC,TH,TB
      WRITE (5,15) PROFE,NE,ND,DB,JA,JB,JC,JD,TFA,IADC,NOME,
1  H1,H2,H3,WDBM,CB,TR,TB,TH,TT,TBS,TBC,MP,IDD,IDR,IDC,WDB,
2  ROTMED
      GOTO 4
11  FORMAT (2X,F6.1,2X,A8,A4,2X,F7.2,2X,F7.2)
12  FORMAT (2X,F5.1,I3,I1,F6.4,4I2,F3.2,A4,2X,A10,21X,F6.0,
1  F5.2,F4.1,F5.2,F4.2,5X,F5.2,F5.1,3I1)
13  FORMAT (2X,F5.1,14X,2F4.1,F4.0,80X,2F4.0)
14  FORMAT (159X,I1,4X,I1)
15  FORMAT (F6.1,I4,I2,F7.4,4I3,F4.2,A5,A10,3F7.4,F4.1,F7.0,
1  F6.2,F5.1,F6.2,F5.2,F8.2,F6.2,F7.1,3I3,2F6.1)
16  FORMAT (6X,3(9X,F3.2))
17  FORMAT (8X,8(1X,F2.1),1X,F3.1,8(1X,F2.1))
999  RETURN
      END
C
C.... CALCULA A MEDIA DE N DADOS NO ARRAY X
C
      SUBROUTINE MEAN (X,N,XMEAN)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(N)
      SOMA = 0.0
      DO 10 I = 1,N
      SOMA = SOMA + X(I)
10  CONTINUE
      XMEAN = SOMA/FLOAT(N)
      RETURN
      END
C
C.... DETERMINA A POSICAO DA MATRIZ PARA PSBmax e H1,H2,H3
C
      SUBROUTINE POSICAO (DB,IADC,I1,I,J,IFLAG)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      CHARACTER*5 IADC
      I = 0
      J = 0
      IFLAG = 0
      JFLAG = 0
      IF (IADC(2:3).EQ.'11') J = 1
      IF (IADC(2:3).EQ.'12') J = 2
      IF (IADC(2:3).EQ.'13') J = 3
      IF (IADC(2:3).EQ.'14') J = 4
      IF (IADC(2:3).EQ.'21') J = 5
      IF (IADC(2:3).EQ.'22') J = 6

```

```

IF (IADC(2:3).EQ.'23') J = 7
IF (IADC(2:3).EQ.'31') J = 8
IF (IADC(2:3).EQ.'32') J = 9
IF (IADC(2:3).EQ.'39') J = 10
IF (IADC(2:3).EQ.'34') J = 11
IF (IADC(2:2).EQ.'4') J = 12
IF (IADC(2:2).EQ.'5') J = 13
IF (IADC(2:2).EQ.'6') J = 14
IF (IADC(2:2).EQ.'7') J = 15
IF (IADC(2:2).EQ.'8'.AND.IADC(2:3).NE.'83') J = 16
IF (IADC(2:3).EQ.'89') J = 17
IF (J.EQ.0) THEN
  IFLAG=1
  RETURN
END IF
IF (DB.EQ. 6.125) I=1
IF (DB.EQ. 6.750) I=2
IF (DB.EQ. 7.875) I=3
IF (DB.EQ. 8.500) I=4
IF (DB.EQ. 8.750) I=5
IF (DB.EQ. 9.875) I=6
IF (DB.EQ.10.625) I=7
IF (DB.EQ.12.250) I=8
IF (DB.EQ.14.750) I=9
IF (DB.EQ.15.000) I=10
IF (DB.EQ.17.500) I=11
IF (I.EQ.0) THEN
  IFLAG=2
  RETURN
END IF
I1 = J
IF (I1.GT.11) I1 = 12
IF (J.GE.8.AND.J.LE.10) J = 6
IF (J.GT.10.) J = J - 2
RETURN
END

```

```

C
C.... CALCULA FATOR: NAO SELADA = 1;SELADA = 0.9;INSERTO =1.1
C

```

```

SUBROUTINE FATOR (IADC,FAT)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
CHARACTER*4 IADC
FAT = 1.0
IF (IADC(4:4).EQ.'1'.OR.IADC(4:4).EQ.'3') FAT = 1.0
IF (IADC(4:4).EQ.'4'.OR.IADC(4:4).EQ.'5') FAT = 0.9
IF (IADC(4:4).EQ.'6'.OR.IADC(4:4).EQ.'7') FAT = 1.0
20 RETURN
END

```

```

C
C.... ASSUME VALORES NAO TABELADOS DE WDBmax, H1,H2,H3
C

```

```

SUBROUTINE ASSUME(NB,DB,IADC,NOME,IFLAG,WDBM,H1,H2,H3)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
CHARACTER*4 IADC
CHARACTER*10 NOME
CHARACTER*1 RESP
IF (IFLAG.EQ.1) THEN

```

```

WRITE (*,*) ***** CODIGO IADC NAO TABELADO *****
END IF
IF (IFLAG.EQ.2) THEN
WRITE (*,*) ***** DIAMETRO DE BROCA NAO TABELADO*****
END IF
WRITE (*,11) NB,DB,IADC(2:5),NOME
10 WRITE (*,(A\)) VALOR PARA WDBM (klbs/pol)----->
READ (*,12) WDBM
WRITE (*,(A\)) VALOR PARA H1 (COEF. B&Y)----->
READ (*,12) H1
WRITE (*,(A\)) VALOR PARA H2 (COEF. B&Y)----->
READ (*,12) H2
WRITE (*,(A\)) VALOR PARA H3 (COEF. B&Y)----->
READ (*,12) H3
WRITE (*,(A\)) VALORES ACIMA CORRETOS (S/N)? ->
READ (*,(A1)) RESP
IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'N') GOTO 10
11 FORMAT (//5X,'Nr broca : ',I4,/,
1      5X,'Diametro : ',F7.4,' (pol)',/,
2      5X,'IADC      : ',A3,/,
3      5X,'TIPO      : ',A10,/)
12 FORMAT (F4.1)
RETURN
END

```

C
C.... CALCULO DA ABRASIVIDADE DA FORMACAO (TH)
C

```

SUBROUTINE TALH(IADC,IDD,TSC,WDBM,H1,H2,H3,W,N,TH)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
REAL N,J2,NC
CHARACTER*4 IADC
IF (IDD.EQ.0) THEN
TH = 0.0
RETURN
END IF
HF = FLOAT(IDD/8.)
IF (IADC(2:2).EQ.'1'.OR.IADC(2:2).EQ.'2'.OR.IADC(2:2).EQ.'3'.
1 OR.IADC(2:2).EQ.'4'.AND.IADC(2:3).NE.'49') THEN
WDBC = 4.0
NC = 100.
ELSE
WDBC = 2.5
NC = 60.
END IF
W1=W*2.205
J2 = (WDBM-W1)/(WDBM-WDBC)*(NC/N)**H1*(1./(1.+H2/2.))
TH = (TSC*H3)/(J2*(HF+H2*HF*HF/2.))
RETURN
END

```

C
C.... CALCULO DA CONSTANTE DE ROLAMENTO (TB)
C

```

SUBROUTINE TALBN(W,IDR,TBC,IOP,TB)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
REAL N,J3
CHARACTER*4 IADC
IF (IDR.EQ.0) THEN

```

```

TB = 0.0
RETURN
END IF
HB = FLOAT(IDR/8.)
IF (IADC(4:4).EQ.'4'.OR.IADC(4:4).EQ.'5') THEN
  B1 = 0.70
  B2 = 0.65
  GOTO 10
ELSE
  IF (IADC(4:4).EQ.'6'.OR.IADC(4:4).EQ.'7') THEN
    B1 = 1.00
    B2 = 1.00
    GOTO 10
  END IF
  END IF
  IF (IOP.GE.3) THEN
    IF (IOP.EQ.3) B2 = 1.2
    IF (IOP.EQ.4) B2 = 1.5
    IF (IOP.EQ.5) B2 = 2.0
    B1 = 1.0
    GOTO 10
  ELSE
    B1 = 1.0
    B2 = 1.0
    GOTO 10
  END IF
10  W1 = W*2.205
    JS = (100./N)**B1*((4/W1)**B2)
    TB = TBC/(JS*HB)
    RETURN
  END

```

ANEXO D

```

*      PROGRAMA PARA PREPARACAO DE DADOS PARA A REGRESSAO
*
*      OBTENCAO DOS COEFICIENTES  $a_1$  -  $a_8$  DO MODELO DE
*      PERFURACAO DE BOURGOYNE & YONG
*
*
PROGRAM PREPDADO
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON PROF(1000),PSEBM(1000),ROTM(1000),TP(1000),PLM(1000),
1  PP(1000),FJ(1000)
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2
CHARACTER*1 RESP
C.... LEITURA DO NOME DO ARQUIVO PRINCIPAL DE DADOS
2  WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS -->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DE "BIT RECORD " ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ1
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO PARA REGRESSAO ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ2
C.... PERGUNTA SE O NOME DO ARQUIVO ESTA CORRETO
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DOS ARQUIVOS CORRETOS (S/N) ? ---->
    READ (*, '(A1)' ) RESP
    IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 2
C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
    OPEN (4,FILE = ARQ ,STATUS = 'OLD',RECL=180)
    OPEN (5,FILE = ARQ1,STATUS = 'OLD',RECL=180)
    OPEN (8,FILE = ARQ2,STATUS = 'UNKNOWN',RECL=80)
    CALL TABELA
    CLOSE (4)
    CLOSE (5)
    CLOSE (8)
    STOP
    END
C
C.... PREPARA TABELA PARA REGRESSAO
C
SUBROUTINE TABELA
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON PROF(1000),PSEBM(1000),ROTM(1000),TP(1000),PLM(1000),
1  PP(1000),FJ(1000)
CHARACTER*4 IADC
INTEGER FLAG
5  I = 0
    TBS = 0.0
C.... ZERANDO OS VETORES
    DO 7 K = 1,1000

```

```

DO 7 K = 1,1000
PROF(K) = 0.0
PSBM(K) = 0.0
ROTM(K) = 0.0
TP (K) = 0.0
PLM (K) = 0.0
PP (K) = 0.0
FJ (K) = 0.0
7 CONTINUE
10 READ (4,12,END=999) PROFE
20 READ (5,15) PRF,DB,JA,JB,JC,JD,IADC,H1,H2,H3,WDBM,TSC,
1 IDD,IDR,IDC,WDB,ROTMED
IF (PROFE.NE.PR) GOTO 20
WDB = WDB*2.205
C.... CALCULO DA AREA DO JATO
AT = .00076699*FLOAT(JA*JA+JB*JB+JC*JC+JD*JD)
C.... CALCULO DA ABRASIVIDADE DA FORMACAO
IF (IADC(1).EQ.'D') GOTO 30
CALL TALH(DB,IADC,IDD,TSC,WDBM,H1,H2,H3,WDB,ROTMED,TH,RC,WDBC)
30 I = I + 1
C.... LEITURA DOS DADOS DE PERFURACAO
READ (4,13) PROF(I),TP(I),PSB,ROT,PLE,VZE,PSBM(I),ROTM(I),
1 PLM(I)
READ (4,14) PP(I),FLAG
C.... VERIFICA SE HA VALORES MEDIOS NO INTERVALO PERFURADO
IF (PSBM(I).LT.3.) PSBM(I) = PSB
IF (ROTM(I).LT.30.) ROTM(I) = ROT
IF (PLM (I).LT.0.6) PLM (I) = PLE
C.... VERIFICA SE OS VALORES SAO ACEITAVEIS
IF (I.EQ.1) THEN
IF (TP(1).EQ.0.0) TP(1) = 1.0
TBS = (1./TP(1))*(PROF(1)-PROFE)
GOTO 40
END IF
IF (PSBM(I).LT.3..OR.PSBM(I).GT.60.) PSBM(I) = PSBM(I-1)
IF (ROTM(I).LT.30..OR.ROTM(I).GT.200.) ROTM(I) = ROTM(I-1)
IF (PLM (I).LT..6..OR.PLM (I).GT.3.) PLM (I) = PLM (I-1)
IF (PP (I).LT..6..OR.PP (I).GT.3.) PP (I) = PP (I-1)
C.... CALCULO DO TEMPO DE BROCA FUNDO SEM CONECCAO
IF (TP(I).EQ.0.0..OR.TP(I).GT.200.) TP(I) = TP(I-1)
TBS= TBS + (1./TP(I))*(PROF(I)-PROF(I-1))
C.... CALCULO DO DESGASTE DO DENTE
40 IF (IDD.EQ.0..OR.IADC(1).EQ.'D') THEN
H = 0.0
GOTO 45
END IF
CALL DENTE (TH,H1,H2,H3,RC,WDBC,WDBM,WDB,DB,ROTMED,TBS,H)
C.... CALCULO DA FORCA NO JATO
45 VZE = VZE*0.264183
FJD= .001385052*PLM(I)*VZE*VZE/AT
IF (I.EQ.1) GOTO 50
IF (FJ(I).LT.100..OR.FJ(I).GT.4000.) FJ(I) = FJ(I-1)
50 PESO = PSBM(I)/DB
WRITE (8,16) TP(I),PROF(I),PESO,ROTM(I),H,FJ(I),PLM(I),
1 PPI(I)
IF (FLAG.NE.1) THEN
GOTO 30

```

```

      ELSE
      GOTO 5
      END IF
12  FORMAT (2X,F5.1)
13  FORMAT (2X,F5.1,14X,2F4.1,F4.0,F9.2,45X,F4.0,28X,2F4.0,F9.2)
14  FORMAT (53X,F3.2,103X,I1)
15  FORMAT (F6.1,6X,F7.4,413,4X,A5,10X,3F7.4,F4.1,20X,F8.2,13X,
1  313,2F6.1)
16  FORMAT (8F10.2)
888  RETURN
      END

```

C
C.... CALCULO DA ABRASIVIDADE DA FORMACAO (TH)

```

C
      SUBROUTINE TALH(DB,IADC,IDD,TSC,WDBM,H1,H2,H3,W,N,TH,NC,WDBC)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      REAL N,J2,NC
      CHARACTER*4 IADC
      IF (IDD.EQ.0) THEN
      TH = 0.0
      RETURN
      END IF
      WDBC = 2.5
      NC = 60.
      HF = FLOAT(IDD/B.)
      IF (IADC(2:2).EQ.'1'.OR.IADC(2:2).EQ.'2'.OR.IADC(2:2).EQ.'3'.
1  OR.IADC(2:2).EQ.'4'.AND.IADC(2:3).NE.'42') THEN
      WDBC = 4.0
      NC = 100.
      END IF
      J2 = (WDBM-(W/DB))/(WDBM-WDBC)*(NC/N)**H1*(1./(1.+H2/2.))
      TH = (TSC*H3)/(J2*(HF+H2*HF*HF/2.))
      RETURN
      END

```

C
C.... CALCULO DO DESGASTE DO DENTE

```

C
      SUBROUTINE DENTE (TH,H1,H2,H3,NC,WDBC,WDBM,W,DB,N,TFI,H)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      REAL N,K,J2,NC
      IF (TH.EQ.0) THEN
      H = 0.0
      RETURN
      END IF
      J2 = (WDBM-W/DB)/(WDBM-WDBC)*(NC/N)**H1*(1./(1.+H2/2.))
      K = TH*J2/H3
      DELTA = 4.*H2*H2 + 8*H2*K*TFI
      H = (-2.*K + SQRT(DELTA))/(2*K*H2)
      IF (H.LT.0.0) H = 0.0
      IF (H.GT.1.0) H = 1.0
      RETURN
      END

```

ANEXO E

SEPARACAO DOS DADOS GERADOS PELO PROGRAMA REGRESSAO
EM DIFERENTES TIPOS DE LITOLOGIA

```

IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
DIMENSION K(20)
CHARACTER*15 ARQ1,ARQ2
CHARACTER*12 LIT3,LIT4,LIT5,LIT6,LIT7,LIT8,LIT9,LIT10,LIT11,
* LIT12,LIT13,LIT14,LIT15,LIT16,LIT17,ARQ3
CHARACTER*5 ARQ
CHARACTER*2 LITO
CHARACTER*1 RESP
LOGICAL FLAG

C.... LEITURA DO NOME DO ARQUIVO PRINCIPAL DE DADOS
2  WRITE (*,*) ' DE AS INICIAIS DO POÇO (ex. ALS27)
    WRITE (*, '(A\'))' (com 5 caracteres)
    READ (*, '(A5)') ARQ
    WRITE (*, '(A\'))' NOME DO ARQUIVO DOS DADOS
    READ (*, '(A15)') ARQ1
    WRITE (*, '(A\'))' NOME DO ARQUIVO DE PERFIL
    READ (*, '(A15)') ARQ2

C.... PERGUNTA SE O NOME DO ARQUIVO ESTA CORRETO
    WRITE (*, '(A\'))' NOME DOS ARQUIVOS CORRETOS (S/N) ?
    READ (*, '(A1)') RESP
    IF (RESP.NE. 'S'. AND. RESP.NE. 's') GOTO 2
    K(3) = K(3) + 1

C.... ZERANDO O VETOR K (contador)
    DO 3 JK = 3,17
        K(JK) = 0
3  CONTINUE

C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
    OPEN (1, FILE = ARQ1, STATUS = 'OLD', ERR=999, RECL=180)
    OPEN (2, FILE = ARQ2, STATUS = 'OLD', ERR=999, RECL=180)
    ARQ3 = ARQ//'/LIT. ARQ'
    OPEN (20, FILE = ARQ3, STATUS = 'UNKNOWN')

C.... LEITURA DOS DADOS
5  READ (1,11,END=888) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP
    IF (JJ.EQ. 1) GOTO 30
10  READ (2,12,END=888) PROFP,LITO

C.... COMPARA A PROFUNDIDADE DOS DADOS E PERFIL
30  COMP = (PROF-PROFP)
    IF (COMP.GT. -1. AND. COMP.LT. 1.) GOTO 20
    IF (COMP.GE. 1.) THEN
        JJ = 0
        GOTO 10
    END IF
    IF (COMP.LE. -1.) THEN

```



```

IF (COMP. LE. -1.) THEN
  JJ = 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 02-CALCAREO CRISTALINO,04-COQUINA,06-CALCILUTITO
C 07-CALCISSILTITO,08-CALCARENITO
20 JJ = 0
IF (LITO(1:1). EQ. '0'. OR. LITO(1:1). EQ. ' ') THEN
  LIT3 = ARQ// 'CAL. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT3, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (3, FILE = LIT3, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (3,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO
  K(3) = K(3) + 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 10-CALCIRUBITO
IF (LITO. EQ. '10') THEN
  LIT4 = ARQ// 'CRU. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT4, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (4, FILE = LIT4, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (4,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO
  K(4) = K(4) + 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 30-DOLOMITA
IF (LITO. EQ. '30') THEN
  LIT5 = ARQ// 'DOL. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT5, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (5, FILE = LIT5, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (5,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO
  K(5) = K(5) + 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 40-BRECHA
IF (LITO. EQ. '40') THEN
  LIT6 = ARQ// 'BRE. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT6, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (6, FILE = LIT6, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (6,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO
  K(6) = K(6) + 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 42-CONGLOMERADO
IF (LITO. EQ. '42') THEN
  LIT7 = ARQ// 'COL. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT7, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (7, FILE = LIT7, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (7,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO
  K(7) = K(7) + 1
  GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 46-TILITO, 48-AREIA, 49-ARENITO
IF (LITO(1:1). EQ. '4') THEN
  LIT8 = ARQ// 'ARN. DAT'
  INQUIRE (FILE = LIT8, OPENED = FLAG)
  IF (.NOT. FLAG) OPEN (8, FILE = LIT8, STATUS = 'UNKNOWN')
  WRITE (8,13) TP, PROF, PESO, ROTM, H, FJ, PLM, PP, LITO

```

```

      K(8) = K(8) + 1
      GOTO 5
    END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 54-SILTITO, 55-ARGILA, 56-ARGILITO, 57-FOLHELHO
C 58-MARGA
      IF (LITO(1:1).EQ.'5') THEN
        LIT9 =ARQ// 'FLH.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT9,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (9,FILE = LIT9,STATUS='UNKNOWN')
        WRITE (9,19) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
        K(9) = K(9) + 1
        GOTO 5
      END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 64-IGNEA NAO IDENTIFICADA, 65-DIABASIO,
C 66-BASALTO, 67-GRANITO
      IF (LITO(1:1).EQ.'6') THEN
        LIT10 =ARQ// 'IGN.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT10,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (10,FILE = LIT10,STATUS='UNKNOWN')
        WRITE (10,19) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
        K(10) = K(10) + 1
        GOTO 5
      END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 70-METAMORFICA NAO IDENTIFICADA
      IF (LITO.EQ.'70') THEN
        LIT11 =ARQ// 'MET.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT11,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (11,FILE = LIT11,STATUS='UNKNOWN')
        WRITE (11,19) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
        K(11) = K(11) + 1
        GOTO 5
      END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 71-GNAISSE, 72-FILITO, 73-XISTO,74-QUARTZITO
C 75-META-ARENITO,76-META-SILTITO,77-ARDOSIA,78-ULTRABASICA
      IF (LITO(1:1).EQ.'7') THEN
        LIT12 =ARQ// 'GNA.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT12,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (12,FILE = LIT12,STATUS='UNKNOWN')
        WRITE (12,19) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
        K(12) = K(12) + 1
        GOTO 5
      END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 81-TAQUIDRITA, 82-ANIDRITA, 83-GIPSITA,
C 84-SAL NAO IDENTIFICADO, 85-HALITA,86-SILVINITA,87-CARNALITA
      IF (LITO(1:1).EQ.'8') THEN
        LIT13 =ARQ// 'SAL.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT13,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (13,FILE = LIT13,STATUS='UNKNOWN')
        WRITE (13,19) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
        K(13) = K(13) + 1
        GOTO 5
      END IF
C.... ARQUIVA DADOS DE 91-CHAMOSITA
      IF (LITO.EQ.'91') THEN
        LIT14 =ARQ// 'CHM.DAT'
        INQUIRE (FILE = LIT14,OPENED = FLAG)
        IF(.NOT.FLAG) OPEN (14,FILE = LIT14,STATUS='UNKNOWN')

```

```

WRITE (14,13) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
K(14) = K(14) + 1
GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 92-CARVAO
IF (LITO.EQ.'92') THEN
LIT15 =ARG//CAV.DAT
INQUIRE (FILE = LIT15,OPENED = FLAG)
IF(.NOT.FLAG) OPEN (15,FILE = LIT15,STATUS='UNKNOWN')
WRITE (15,13) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
K(15) = K(15) + 1
GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS DE 94-SILEX
IF (LITO.EQ.'94') THEN
LIT16 =ARG//SIX.DAT
INQUIRE (FILE = LIT16,OPENED = FLAG)
IF(.NOT.FLAG) OPEN (16,FILE = LIT16,STATUS='UNKNOWN')
WRITE (16,13) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
K(16) = K(16) + 1
GOTO 5
END IF

C.... ARQUIVA DADOS COM LITOLOGIA NAO ABRANGIDAS ACIMA
LIT17 =ARG//OUT.DAT
INQUIRE (FILE = LIT17,OPENED = FLAG)
IF(.NOT.FLAG) OPEN (17,FILE = LIT17,STATUS='UNKNOWN')
WRITE (17,13) TP,PROF,PESO,ROTM,H,FJ,PLM,PP,LITO
K(17) = K(17) + 1
GOTO 5

C.... FECHAMENTO DOS ARQUIVOS
888 CLOSE (1)
CLOSE (2)
INQUIRE (FILE = LIT3,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 3
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT3,K(3),IL
IF(FLAG) CLOSE (3)
INQUIRE (FILE = LIT4,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 4
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT4,K(4),IL
IF(FLAG) CLOSE (4)
INQUIRE (FILE = LIT5,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 5
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT5,K(5),IL
IF(FLAG) CLOSE (5)
INQUIRE (FILE = LIT6,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 6
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT6,K(6),IL
IF(FLAG) CLOSE (6)
INQUIRE (FILE = LIT7,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 7
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT7,K(7),IL
IF(FLAG) CLOSE (7)
INQUIRE (FILE = LIT8,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 8
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT8,K(8),IL
IF(FLAG) CLOSE (8)
INQUIRE (FILE = LIT9,OPENED = FLAG)

```

```

IF(FLAG) IL = 9
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT9,K(9),IL
IF(FLAG) CLOSE (9)
INQUIRE (FILE = LIT10,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 10
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT10,K(10),IL
IF(FLAG) CLOSE (10)
INQUIRE (FILE = LIT11,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 11
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT11,K(11),IL
IF(FLAG) CLOSE (11)
INQUIRE (FILE = LIT12,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 12
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT12,K(12),IL
IF(FLAG) CLOSE (12)
INQUIRE (FILE = LIT13,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 13
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT13,K(13),IL
IF(FLAG) CLOSE (13)
INQUIRE (FILE = LIT14,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 14
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT14,K(14),IL
IF(FLAG) CLOSE (14)
INQUIRE (FILE = LIT15,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 15
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT15,K(15),IL
IF(FLAG) CLOSE (15)
INQUIRE (FILE = LIT16,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 16
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT16,K(16),IL
IF(FLAG) CLOSE (16)
INQUIRE (FILE = LIT17,OPENED = FLAG)
IF(FLAG) IL = 17
IF(FLAG) WRITE (20,14) LIT17,K(17),IL
IF(FLAG) CLOSE (17)
CLOSE (20)
11  FORMAT (8F10.2)
12  FORMAT(2X,F5.1,BX,A2)
13  FORMAT (8F10.2,2X,A2)
14  FORMAT (2X,A12,2X,I4,2X,I2)
000  STOP
      END

```

ANEXO F

```

*      PROGRAMA PARA DETERMINACAO DOS COEFICIENTES  $\alpha_1$  -  $\alpha_8$ 
*
*      DO MODELO DE PERFURACAO DE BURGOYNE & YOUNG      V 5.4
*
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      REAL LI,LS
      DIMENSION T(2000,8),A(8,8),B(8),AR(8,8),BR(8)
      DIMENSION CR(8),CP(8),CF(8),LI(8),LS(8)
      COMMON /B1/Y(2000),N
      COMMON /B2/X(2000,8),C(8)
      LOGICAL R(8)
      CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2
      INTEGER FLAG
      DATA LI /1.,100.E-6, 50.E-6, 50.E-6, 6., 4., 1., 1/
      DATA LS /1.,250.E-6,250.E-6,250.E-6,2., 9,1.5., 3., 6/

C
C.... FUNCOES
C
      FO(U)      = ALOG(U)
      F1(U)      = 1.0
      F2(D)      = 10000.0-D
      F3(D,GP)   = D**(.69*(GP-8.6))
      F4(D,GP,RC) = D*(GP-RC)
      F5(W)      = ALOG(W/4.0)
      F6(RPM)    = ALOG(RPM/100.)
      F7(H)      = -H
      F8(FJ)     = ALOG (FJ/1000.)

C
C.... LEITURA DOS ARQUIVOS
C
      2  WRITE (*, '(A\)' )  NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS -->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ
      WRITE (*, '(A\)' )  ARQUIVO PRESSAO DE POROS SONICO----->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ2
      WRITE (*, '(A\)' )  NOME DO ARQUIVO DOS COEFIC. ( $\alpha_1$  -  $\alpha_8$ ) -->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ1

C
C.... PERGUNTA ATE QUE PROFUNDIDADE E NAO COMPACTADO
C
      WRITE (*,*)      ' ENTRE C/ PROFUNDIDADE (m) A PARTIR DA QUAL SERA'
      WRITE (*,*)      ' CONSIDERADO COMPACTADO - (TEMPO DE TRANSITO NO'
      WRITE (*, '(A\)' ) FOLHELHO ADJACENTE menor que 100 USEQ/PE ) -->
      READ (*, '(F6, 1)' ) PROFI
      WRITE (*, '(A\)' )  DADOS ACIMA CORRETOS (S/N) ----->
      READ (*, '(A1)' ) RESP
      IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 2

```

```

C
C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
C
OPEN (1,FILE = ARQ, STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL =180)
OPEN (2,FILE = ARQ1,STATUS = 'UNKNOWN',RECL=80)
OPEN (3,FILE = ARQ2,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL = 80)
NEL =8
I=0
5 I=I+1
READ (1,'(8F10.2)',END=10) (T(I,J),J=1,8)
7 READ (3,'(2X,F6.1,3X,F5.2)',END=10) PROFS,PPS
DIF = T(I,2) - PROFS
IF (DIF.GT. 0.5) THEN
GOTO 7
ELSE
DIF = ABS (DIF)
IF (DIF.LE. 0.5) THEN
T(I,8) = PPS/8.334
END IF
END IF
PROFC = T(I,2)
C
C.... conversao para unidades de campo americana
C
T(I,1) = T(I,1)*3.281
T(I,2) = T(I,2)*3.281
T(I,3) = T(I,3)*2.205
T(I,7) = T(I,7)*8.334
T(I,8) = T(I,8)*8.334
GOTO 5
10 CLOSE (1)
CLOSE (3)
C
C.... transformacoes das variaveis
C
N=I-1
C
C.... verifica a quantidade de dados
C
IF (N.LT.NEL) THEN
WRITE (*,*) ' FALTAM DADOS PARA A REGRESSAO '
GOTO 999
END IF
DO 20 I=1,N
Y(I) = FO(T(I,1))
X(I,1) = F1(I)
X(I,2) = F2(T(I,2))
X(I,3) = F3(T(I,2),T(I,8))
X(I,4) = F4(T(I,2),T(I,8),T(I,7))
X(I,5) = F5(T(I,8))
X(I,6) = F6(T(I,4))
X(I,7) = F7(T(I,5))
X(I,8) = F8(T(I,6))
20 CONTINUE
C
C.... monta a matriz de minimizacao e o vetor dependente
C.... (a matriz e simetrica)

```

```

C
DO 100 K=1,NEL
DO 90 J=K,NEL
A(K,J) = 0.0
DO 80 I=1,N
A(K,J) = A(K,J) + X(I,K)*X(I,J)
80 CONTINUE
90 CONTINUE
B(K) = 0.0
DO 95 I=1,N
B(K) = B(K) + Y(I)*X(I,K)
95 CONTINUE
100 CONTINUE

C
C.... reflete a parte simetrica
C
DO 120 J=1,NEL
DO 110 I=J,NEL
A(I,J) = A(J,I)
110 CONTINUE
120 CONTINUE

C
C.... monta o vetor logico R
C
DO 130 I=1,NEL
R(I) = .TRUE.
130 CONTINUE
IC = 0
IK = 1
C.... MONTA A MATRIZ DE MINIMIZACAO REDUZIDA
140 CALL MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
I = NEL - IC
C.... RESOLVE O SISTEMA
CALL SIST (AR,BR,CR,I,STATUS,NEL)
C.... VERIFICA SE TODOS OS COEFICIENTES SAO NULOS
IF (IK.GT. NEL) GOTO 147
IF (CR(1).EQ.0.0.AND. CR(2).EQ.0.0.AND. CR(3).EQ.0.0.AND. CR(4).EQ.
1 0.0.AND. CR(5).EQ.0.0.AND. CR(6).EQ.0.0.AND. CR(7).EQ.0.0.AND.
2 CR(8).EQ.0.0) THEN
IK = IK+1
DO 145 I=1,NEL
R(I) = .TRUE.
145 CONTINUE
R(IK) = .FALSE.
C(IK) = 0.0
IC = 1
GOTO 140
END IF
C.... armazena os coeficientes calculados em C(.)
147 CALL ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
DO 150 I = 1,NEL
CP(I) = C(I)
150 CONTINUE
C.... calcula a soma dos quadrados dos residuos
CALL SQRES (NEL,SQ)
SQR = SQ
WRITE (*,('A\,I1,I1,F12.9')) (' a',IX,C(IX),IX=1,NEL)

```

```

WRITE (*, '(A\F12.3)') '          SQR1 = ', SQR
WRITE (*, '(A\F12.3)') '          SQR  = ', SQ
WRITE (*, '(A\I4      )') '          N   = ', N
C. . . . CALCULA O COEFICIENTE DE CORRELACAO MULTIPLA
CALL MEAN (SST)
RG = 1 - (SQ/SST)
IF (RG.LT.0.0) THEN
WRITE (*,*) ' COEF. CORRELACAO MULTIPLA NAO CALCULADO '
RG1 = 0.0
ELSE
RG1 = SQRT(RG)
WRITE (*, '(A\F10.3)') '          CCM = ', RG1
END IF
C
C. . . . FIXA UM COEFICIENTE DE CADA VEZ
C
      JFLAG = 0
155 DO 160 I = 2,NEL
      DO 170 J = 1,NEL
        R(J) = .TRUE.
        C(J) = CP(J)
170 CONTINUE
        R(I) = .FALSE.
        IF (JFLAG.EQ.1) THEN
          IF (C(I).LT.LI(I)) C(I) = (LI(I)+LS(I))/2.
          IF (I.LT.9) GOTO 175
          IF (PROFC.LE.PROFI) THEN
            IF (C(I).GT.LS(I+1)) C(I) = (LI(I)+LS(I+1))/2.
            GOTO 185
          END IF
175 IF (C(I).GT.LS(I) ) C(I) = (LI(I)+LS(I))/2.
          GOTO 185
          END IF
          IF (C(I).LT.LI(I)) C(I) = LI(I)
          IF (I.LT.9) GOTO 180
          IF (PROFC.LE.PROFI) THEN
            IF (C(I).GT.LS(I+1)) C(I) = LS(I+1)
            GOTO 185
          END IF
180 IF (C(I).GT.LS(I) ) C(I) = LS(I)
185 IC = 1
190 CALL MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
      IK = NEL - IC
      CALL SIST (AR,BR,CR,IK,STATUS,NEL)
      CALL ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
      CALL SQRES (NEL,SQ)
      CALL ASSUME (PROFI,C,R,IC,PROFC,NEL,FLAG)
      IF (FLAG.NE.1) GOTO 190
      RG = 1 - (SQ/SST)
      IF (RG.LT.0.0) THEN
        RG = 0.0
      ELSE
        RG = SQRT(RG)
      END IF
C
C. . . . ARMAZENA OS COEFICIENTES COM MENOR SQR
C

```



```

IF (JFLAG.EQ.1) THEN
IF (SQ.LT.SQR1) THEN
GOTO 195
ELSE
GOTO 160
END IF
END IF
195 IF (SQ.LT.SQR1.OR.I.EQ.2) THEN
DO 200 K = 1,NEL
CF(K) = CK(K)
200 CONTINUE
WRITE (*, '(A\,I1,IX,F12.9)' ) ' α',IX,CF(IX),IX=1,NEL)
WRITE (*, '(A\,F12.9)' ) ' SQR = ',SQ
WRITE (*, '(A\,F12.9)' ) ' CCM = ',RG
WRITE (*, '(A\,I4 )' ) ' N = ',N
SQR1 = SQ
R2 = RG
END IF
160 CONTINUE
C
C.... FIXA DOIS COEFICIENTE DE CADA VEZ
C
NE1 = NEL - 1
DO 210 I = 2,NE1
IM1 = I + 1
DO 210 J = IM1,NEL
DO 230 IN = 1,NEL
C(IN) = CP(IN)
R(IN) = .TRUE.
230 CONTINUE
R(I) = .FALSE.
R(J) = .FALSE.
IF (JFLAG.EQ.1) THEN
IF (C(I).LT.LI(I)) C(I) = (LI(I)+LS(I))/2.
IF (C(I).GT.LS(I)) C(I) = (LI(I)+LS(I))/2.
IF (C(J).LT.LI(J)) C(J) = (LI(J)+LS(J))/2.
IF (J.LT.8) GOTO 235
IF (PROFC.LE.PROFD) THEN
IF (C(J).GT.LS(J+1)) C(J) = (LI(J)+LS(J+1))/2.
GOTO 240
END IF
235 IF (C(J).GT.LS(J)) C(J) = (LI(J)+LS(J))/2.
GOTO 240
END IF
IF (C(I).LT.LI(I)) C(I) = LI(I)
IF (C(I).GT.LS(I)) C(I) = LS(I)
IF (C(J).LT.LI(J)) C(J) = LI(J)
IF (J.LT.8) GOTO 245
IF (PROFC.LE.PROFD) THEN
IF (C(J).GT.LS(J+1)) C(J) = LS(J+1)
GOTO 240
END IF
245 IF (C(J).GT.LS(J)) C(J) = LS(J)
240 IC = 2
250 CALL MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
IK = NEL - IC
CALL SIST (AR,BR,CR,IK,STATUS,NEL)

```

```

CALL ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
CALL SQRES (NEL,SQ)
CALL ASSUME (PROF1,C,R,IC,PROFC,NEL,FLAG)
IF (FLAG.NE.1) GOTO 250
RG = 1 - (SQ/SST)
IF (RG.LT.0.0) THEN
  RG = 0.0
ELSE
  RG = SQRT(RG)
END IF
IF (SQ.LT.SQR1) THEN
  DO 200 K = 1,NEL
    CF(K) = C(K)
200 CONTINUE
    WRITE (*,'(A\,I1,1X,F12.9)') (' α',IX,CF(IX),IX=1,NEL)
    WRITE (*,'(A\,F12.3)') '      SQR   = ',SQ
    WRITE (*,'(A\,F12.3)') '      CCM   = ',RG
    WRITE (*,'(A\,I4      )') '      N     = ',N
    SQR1 = SQ
    R2 = RG
  END IF
210 CONTINUE
  IF (JFLAG.NE.1) THEN
    JFLAG=1
    GOTO 155
  END IF
  WRITE (2,'(A\,I1,1X,F12.9)') (' α',I,CF(I),I=1,NEL)
  WRITE (2,'(A\,F10.2)') '      SQR1 = ',SQR
  WRITE (2,I1) SQR1,N
  WRITE (2,'(A\,F5.3)') '      CCM1 = ',RG1
  WRITE (2,'(A\,F5.3)') '      CCM   = ',R2
11 FORMAT (2X,'SQR = ',F10.2,4X,'N = ',I4)
  CLOSE (2)
999 STOP
  END

C
C *****
C... SUBROTINA PARA CALCULO DA SOMA DOS QUADRADOS DOS RESIDUOS
C *****
C
C
SUBROUTINE SQRES (NE,SQ1)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON /B1/Y1(2000),NT
COMMON /B2/X1(2000,8),C1(8)
SQ1 = 0.0
DO 10 I=1,NT
  RES = Y1(I)
  DO 20 J=1,NE
    RES = RES - X1(I,J)*C1(J)
20 CONTINUE
  SQ1 = SQ1 + RES*RES
10 CONTINUE
  RETURN
  END

C
C *****
C... SUBROTINA PARA ARMAZENAR OS COEFICIENTES EM C1 )

```

```

C      * * * * *
C
SUBROUTINE ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
DIMENSION C(NEL),CR(NEL)
LOGICAL R(NEL)
IK = 0
DO 10 I=1,NEL
IF (R(I)) THEN
IK = IK + 1
C(I) = CR(IK)
END IF
10 CONTINUE
RETURN
END

C      * * * * *
C      SUBROUTINA PARA MONTAGEM DA MATRIZ DE MINIMIZACAO REDUZIDA
C      * * * * *
C
SUBROUTINE MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
DIMENSION BR(NEL),B(NEL),AR(NEL,NEL),A(NEL,NEL),C(NEL)
LOGICAL R(NEL)
IK = 0
DO 10 I=1,NEL
IF (R(I)) THEN
JK = 0
IK = IK + 1
BR(IK) = B(I)
DO 20 J=1,NEL
IF (R(J)) THEN
JK = JK + 1
AR(IK,JK) = A(I,J)
ELSE
BR(IK) = BR(IK) - C(J)*A(I,J)
END IF
20 CONTINUE
END IF
10 CONTINUE
RETURN
END

C      * * * * *
C      SUBROTINA PARA RESOLUCAO DO SISTEMA - ELIMINACAO DE GAUSS
C      * * * * *
C
SUBROUTINE SIST(A,B,C,N,STATUS,NEL)
DIMENSION A(NEL,NEL),B(NEL),C(NEL)
STATUS = 1
NL1 = N-1
DO 70 J=1,NL1
JP1 = J+1
C. . . . pivotar
IFLAG = 0
JPIVO = J
DO 10 JJ = JP1,N
IF ( ABS(A(JPIVO,J)) .GE. ABS(A(JJ,J)) ) GOTO 10
IFLAG = 1

```

```

      JPIVO = JJ
10  CONTINUE
      IF ( ABS(A(JPIVO,J)) .LT. 0.001) RETURN
C. . . . troca linha com o pivo se necessario
      IF (IFLAG) 40,40,20
20  DO 30 JJ = J,N
      T = A(J,JJ)
      A(J,JJ) = A(JPIVO,JJ)
      A(JPIVO,JJ) = T
30  CONTINUE
      T = B(J)
      B(J) = B(JPIVO)
      B(JPIVO) = T
C. . . . determina multiplicador e elimina elementos abaixo da diagonal
40  DO 60 JJ = JPI,N
      BETA = A(JJ,J)/A(J,J)
      DO 50 JJJ = JPI,N
      A(JJ,JJJ) = A(JJ,JJJ) - BETA*A(J,JJJ)
50  CONTINUE
      B(JJ) = B(JJ) - BETA*B(J)
60  CONTINUE
70  CONTINUE
C. . . . sistema triangularizado; resolve de baixo para cima
      STATUS = 0
      C(N) = B(N)/A(N,N)
      NL1 = N-1
      DO 90 I=NL1,1,-1
      JJ = I+1
      DO 80 J = JJ,N
      B(I) = B(I) - A(I,J)*C(J)
80  CONTINUE
      C(I) = B(I)/A(I,I)
90  CONTINUE
      RETURN
      END

C
C  * * * * *
C. . . . SUBROTINA PARA VERIFICACAO DOS COEFICIENTE DETERMINADOS
C  * * * * *
C

SUBROUTINE ASSUME (PROFI,C,R,IC,PROFC,NEL,IFLAG)
  DIMENSION C(NEL),LI(9),LS(9)
  LOGICAL R(NEL)
  REAL LI,LS
  DATA LI /1.,100.E-6, 50.E-6, 50.E-6,.6,.4,.1,.1/
  DATA LS /1.,250.E-6,250.E-6,250.E-6,2.,.9,1.5,.3,.6/
  IF (C(2).LT.LI(2).OR.C(2).GT.LS(2)) THEN
    IF (C(2).LT.LI(2)) C(2) = LI(2)
    IF (C(2).GT.LS(2)) C(2) = LS(2)
    IC = IC + 1
    R(2) = .FALSE.
    IFLAG = 0
    RETURN
  END IF
  IF (C(3).LT.LI(3).OR.C(3).GT.LS(3)) THEN
    IF (C(3).LT.LI(3)) C(3) = LI(3)
    IF (C(3).GT.LS(3)) C(3) = LS(3)

```

```

IC = IC + 1
R(3) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
END IF
IF (C(4).LT.LI(4).OR.C(4).GT.LS(4)) THEN
IF (C(4).LT.LI(4)) C(4) = LI(4)
IF (C(4).GT.LS(4)) C(4) = LS(4)
IC = IC + 1
R(4) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
END IF
IF (C(5).LT.LI(5).OR.C(5).GT.LS(5)) THEN
IF (C(5).LT.LI(5)) C(5) = LI(5)
IF (C(5).GT.LS(5)) C(5) = LS(5)
IC = IC + 1
R(5) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
END IF
IF (C(6).LT.LI(6).OR.C(6).GT.LS(6)) THEN
IF (C(6).LT.LI(6)) C(6) = LI(6)
IF (C(6).GT.LS(6)) C(6) = LS(6)
IC = IC + 1
R(6) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
END IF
IF (C(7).LT.LI(7).OR.C(7).GT.LS(7)) THEN
IF (C(7).LT.LI(7)) C(7) = LI(7)
IF (C(7).GT.LS(7)) C(7) = LS(7)
IC = IC + 1
R(7) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
END IF
IF (PROFC.GT.PROFD) GOTO 10
C.... FORMACOES NAO COMPACTADAS
IF (C(8).LT.LI(8).OR.C(8).GT.LS(8)) THEN
IF (C(8).LT.LI(8)) C(8) = LI(8)
IF (C(8).GT.LS(8)) C(8) = LS(8)
IC = IC + 1
R(8) = .FALSE.
IFLAG = 0
RETURN
ELSE
IFLAG = 1
RETURN
END IF
C.... FORMACOES COMPACTADAS
10 IF (C(8).LT.LI(8).OR.C(8).GT.LS(8)) THEN
IF (C(8).LT.LI(8)) C(8) = LI(8)
IF (C(8).GT.LS(8)) C(8) = LS(8)
IC = IC + 1
R(8) = .FALSE.
IFLAG = 0

```

```

RETURN
ELSE
IFLAG =1
RETURN
END IF
RETURN
END

```

```

C
C.... CALCULA A MEDIA DE N DADOS NO ARRAY X
C

```

```

SUBROUTINE MEAN (SST)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON/B1/X(2000),N
SOMA = 0.0
SST = 0.0
DO 10 I = 1,N
SOMA = SOMA + X(I)
10 CONTINUE
XMEAN = SOMA/FLOAT(N)
DO 20 I = 1,N
SST = SST + (X(I) - XMEAN)*(X(I) - XMEAN)
20 CONTINUE
RETURN
END

```

ANEXO G

```

*
*      PROGRAMA PARA CALCULO DA TAXA DE PENETRACAO      V. 3.0
*
*      PELO MODELO DE PERFURACAO DE BOURGOYNE & YOUNG
*

PROGRAM TAXAPEN
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
LOGICAL R(20)
COMMON/COEF/A(8),R
COMMON/MEDIA/TP(2000),N
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2,ARQ3,ARQ19,ARQ20,ARQ21,arq22
CHARACTER*12 LIT,LIT1
CHARACTER*2 LITO1,LITO
CHARACTER*1 RESP

C.... LEITURA DOS NOMES DOS ARQUIVOS
2      WRITE (*,'(A\)' NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS --> '
      READ (*,'(A15)' ARQ
      WRITE (*,'(A\)' NOME DO ARQUIVO DE PERFIL ELETRICO -----> '
      READ (*,'(A15)' ARQ1
      WRITE (*,'(A\)' NOME DO ARQUIVO DE PRESSAO DE POROS -----> '
      READ (*,'(A15)' ARQ21
      WRITE (*,'(A\)' NOME DO ARQUIVO DOS COEFICIENTES -----> '
      READ (*,'(A15)' ARQ19
      WRITE (*,'(A\)' NOME DO ARQUIVO PARA GRAFICO -----> '
      READ (*,'(A15)' ARQ20
      WRITE (*,'(A\)' NOME ARQUIVO PARA GRAFICO (cada 5 m)----> '
      READ (*,'(A15)' ARQ22

C.... PERGUNTA SE OS NOMES DOS ARQUIVOS ESTAO CORRETOS
      WRITE (*,'(A\)' NOMES DE ARQUIVOS CORRETOS (S/N) ? ----> '
      READ (*,'(A1)' RESP
      IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 2
      NEL = 8
      DO 50 IK = 3,17
      R(IK) = .FALSE.

50      CONTINUE

C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
      OPEN (1, FILE = ARQ , STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
      OPEN (2, FILE = ARQ1, STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
      OPEN (19,FILE = ARQ19,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
      OPEN (20,FILE = ARQ20,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
      OPEN (22,FILE = ARQ22,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
      OPEN (21,FILE = ARQ21,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)

C.... LEITURA DOS COEFICIENTES
      IK = 0

3      READ (19,11,END = 4) LIT,IL
      LIT1 = 'C'//LIT(2:12)
      OPEN (11,FILE = LIT1, STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)

```

```

OPEN (IL,FILE = LIT1, STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
R(IL) = .TRUE.
GOTO 3
4      I = 0
      SQR = 0.0
C.... LEITURA DOS DADOS
5      I = I + 1
      IF (I.EQ.1) GOTO 10
      LITO1 = LITO
      JJ = 0
10     READ (1,13,END=100) TP(I),PROF,PSEB,ROTM,H,FJ,PLM,PP
      IF (JJ.EQ.1) GOTO 30
20     READ (2,12,END=100) PROFP,LITO
C.... COMPARA A PROFUNDIDADE DOS DADOS E PERFIL
30     COMP = PROF-PROFP
      IF (COMP.GT.-1.AND.COMP.LT.1.) GOTO 35
      IF (COMP.GE. 1.) THEN
        JJ = 0
        GOTO 20
      END IF
      IF (COMP.LE. -1.) THEN
        JJ = 1
        GOTO 10
      END IF
C.... COMPARA A PROFUNDIDADE DA PRESSAO DE POROS COM OS DADOS
35     READ (21,(2X,F6.1,3X,F5.2)) PROFS,PPS
      DIF = PROFP - PROFS
      IF (DIF.GT.0.5) THEN
        GOTO 35
      ELSE
        IF (DIF.LT.0.5) THEN
          PP = PPS/8.334
        END IF
      END IF
C.... CONVERSÃO PARA UNIDADES DE CAMPO AMERICANAS
40     PROF = PROF*3.281
      PSEB = PSEB*2.205
      PLM = PLM *8.334
      PP = PP *8.334
C.... LEITURA DOS COEFICIENTES
      IF (I.EQ.1.OR.LITO1.NE.LITO) THEN
        CALL COEFIC (LITO)
      END IF
C.... CALCULO DAS FUNCOES
      WDET = 0.0
      F1 = EXP(A(1))
      F2 = EXP(A(2)*(10000.-PROF))
      F3 = EXP(A(3)*PROF**0.69)*(PP-8.6)
      F4 = EXP(A(4)*PROF*(PP-PLM))
      F5 = ((PSEB-WDET)/(4.-WDET))**A(5)
      F6 = (ROTM/100.)**A(6)
      F7 = EXP(-A(7)*H)
      F8 = (FJ/1000.)**A(8)
C.... CALCULO DA TAXA DE PENETRACAO (fl/h)
      ROP = F1*F2*F3*F4*F5*F6*F7*F8
C.... CONVERSÃO PARA UNIDADES DE CAMPO BRASILEIRAS
      PROF = PROF/3.281

```



```

      ROP = ROP/3.284
      Z = ((TP(I) - ROP)/TP(I))*100.
C.... CALCULO DA SOMA DO QUADRADO DOS RESIDUOS
      RES = TP(I) - ROP
      SQR = SQR + RES*RES
      WRITE (20,15) PROF,TP(I),ROP,Z ,LITO
C.... GRAVACAO PARA ARQUIVO DE GRAFICO A CADA 5 metros
      IK = IK + 1
      IF (IK.EQ.1.OR.IK.EQ.5) THEN
        IK = 1
        WRITE (22,15) PROF,TP(I),ROP,Z ,LITO
      END IF
      GOTO 5
100  WRITE (*, '(A\F12.1)') '      SQR = ',SQR
      N = I -1
C.... CALCULO DO COEFICIENTE DE CORRELACAO MULTIPLA (RG)
      CALL MEAN (SST)
      RG = 1- (SQR/SST)
      IF (RG.LT.0.0) THEN
        WRITE (*,*) ' COEF. DE CORRELACAO MULTIPLA NAO CALCULADA '
      ELSE
        RG = SQRT(RG)
        WRITE (*, '(A\F4.3)') ' CCM      = ',RG
      END IF
11  FORMAT (2X,A12,8X,I2)
12  FORMAT (2X,F5.1,8X,A2)
13  FORMAT (8F10.2)
15  FORMAT (4F10.2,2X,A2)
999  CLOSE (1)
      CLOSE (2)
      DO 900 I2 = 3,17
        IF (R(I2)) CLOSE (I2)
300  CONTINUE
      CLOSE (19)
      CLOSE (20)
      CLOSE (21)
      STOP
      END

C
C.... CALCULA A MEDIA DE N DADOS NO ARRAY X
C
      SUBROUTINE MEAN (SST)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      COMMON/MEDIA/X(2000),N
      SOMA = 0.0
      SST = 0.0
      DO 10 I = 1,N
        SOMA = SOMA + X(I)
10  CONTINUE
      XMEAN = SOMA/FLOAT(N)
      DO 20 I = 1,N
        SST = SST + (X(I) - XMEAN)*(X(I) - XMEAN)
20  CONTINUE
      RETURN
      END

C
C.... SUBROTINA PARA DETERMINACAO DOS COEFICIENTES (LITOLOGIA)

```

C

```

SUBROUTINE COEFIC (LITO)
LOGICAL R(20)
CHARACTER*2 LITO
COMMON/COEF/A(8),R
IF (LITO(1:1).EQ.'0'.OR.LITO(1:1).EQ.' ') THEN
IF (R(3)) THEN
READ (3,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 3
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 10-CALCIRUDITO
IF (LITO.EQ.'10') THEN
IF (R(4)) THEN
READ (4,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 4
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 30-DOLOMITA
IF (LITO.EQ.'30') THEN
IF (R(5)) THEN
READ (5,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 5
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 40-SRECHA
IF (LITO.EQ.'40') THEN
IF (R(6)) THEN
READ (6,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 6
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 42-CONGLOMERADO
IF (LITO.EQ.'42') THEN
IF (R(7)) THEN
READ (7,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 7
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 46-TILITO, 48-AREIA, 49-ARENITO
IF (LITO(1:1).EQ.'4') THEN
IF (R(8)) THEN
READ (8,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 8
END IF
RETURN
END IF

```

```

C.... DADOS DE 54-SILTITO, 55-ARGILA, 56-ARGILITO, 57-FOLHELHO, 58-MARGA
IF (LITO(1:1).EQ.'5') THEN
IF (R(9)) THEN
READ (9,10) (A(I),I=1,8)
REWIND 9

```

```

      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 64-IGNEA NAO IDENTIFICADA, 65-DIABASIO,
C      66-BASALTO, 67-GRANITO
      IF (LITO(1:1). EQ. '6') THEN
      IF (R(10)) THEN
      READ (10,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 10
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 70-METAMORFICA NAO IDENTIFICADA
      IF (LITO. EQ. '70') THEN
      IF (R(11)) THEN
      READ (11,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 11
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 71-GNAISSE, 72-FILITO, 73-XISTO,74-QUARTZITO
C      75-META-ARENITO,76-META-SILTITO,77-ARDOSIA,78-ULTRABASICA
      IF (LITO(1:1). EQ. '7') THEN
      IF (R(12)) THEN
      READ (12,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 12
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 81-TAGUIDRITA, 82-ANIDRITA, 83-GIPSITA,
C      84-SAL NAO IDENTIFICADO, 85-HALITA,86-SILVINITA,87-CARNALITA
      IF (LITO(1:1). EQ. '8') THEN
      IF (R(13)) THEN
      READ (13,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 13
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 91-CHAMOSITA
      IF (LITO. EQ. '91') THEN
      IF (R(14)) THEN
      READ (14,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 14
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 92-CARVAO
      IF (LITO. EQ. '92') THEN
      IF (R(15)) THEN
      READ (15,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 15
      END IF
      RETURN
    END IF
C. . . . DADOS DE 94-SILEX
      IF (LITO. EQ. '94') THEN
      IF (R(16)) THEN

```

```
      READ (16,10) (A(I),I=1,8)
      REWIND 16
      END IF
      RETURN
      END IF
C.... DADOS COM LITOLOGIA NAO ABRANGIDAS ACIMA
C.... FECHAMENTO DOS ARQUIVOS
      IF (R(17)) THEN
        READ (17,10) (A(I),I=1,8)
        REWIND 17
      END IF
      RETURN
10    FORMAT (4X,F12.9)
      END
```

ANEXO H

```

*   PROGRAMA PARA DETERMINACAO DOS COEFICIENTES b1 - b6
*   PARA O MODELO PROPOSTO           v. 3.0
*
PROGRAM MULTREG
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
REAL LI,LS
DIMENSION T(2000,8),A(6,6),B(6,6),AR(6,6),BR(6,6),PROFE(100),DBR(100)
DIMENSION CR(6),CP(6),CF(6),DB(2000),SC(2000)
COMMON /B1/Y(2000),N
COMMON /B2/X(2000,6),C(6)
LOGICAL R(6)
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2,ARQ3,ARQ4
INTEGER FLAG
DATA LI / 30. E-6/
DATA LS /100. E-6/

C
C.... FUNCOES
C
      FO(TP,RPM,D)      = ALOG(TP/(RPM*D))
      F2(PSE,SIG,D)     = ALOG(PSE/(SIG*D*D))
      F3(PP,PL,SIG,PROF) = PROF*(PP-PL)/SIG
      F4(PROF,D)         = 2. -(PROF/D)*5. E-5
      F5(FJ,SIG,D)      = ALOG(FJ/(SIG*D*D))
      F6(H,D)           = -H/D

C
C.... LEITURA DOS ARQUIVOS
C
      2  WRITE (*, '(A\)' )  NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS -->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ
      WRITE (*, '(A\)' )  NOME DO ARQUIVO DE BROCAS "BIT RECORD"-->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ3
      WRITE (*, '(A\)' )  ARQUIVO PRESSAO DE POROS SONICO----->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ2
      WRITE (*, '(A\)' )  ARQUIVO TENSAO DE COMPRESSAO ----->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ4
      WRITE (*, '(A\)' )  NOME DO ARQUIVO DOS COEFIC. (b1 - b6 -->
      READ (*, '(A15)' ) ARQ1
      WRITE (*, '(A\)' )  DADOS ACIMA CORRETOS (S/N) ----->
      READ (*, '(A1)' ) RESP

```

```

      IF (RESP. NE. 'S'. AND. RESP. NE. 's') GOTO 2
C
C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
C
      OPEN (1,FILE = ARQ, STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL =180)
      OPEN (2,FILE = ARQ1,STATUS = 'UNKNOWN',RECL=80)
      OPEN (3,FILE = ARQ2,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL = 80)
      OPEN (4,FILE = ARQ3,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL = 180)
      OPEN (5,FILE = ARQ4,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL = 80)
      NEL =6
C.... LEITURA DO DIAMETRO DA BROCA DO ARQUIVO DE "BIT RECORD"
      IJ = 0
      9 IJ = IJ + 1
      READ (4,'(F6.1,GX,F7.4)',END=4 ) PROFE(IJ),DBR(IJ)
      GOTO 3
C.... LEITURA DOS DADOS DE PERFURACAO
      4 I=0
      5 I=I+1
      IFLAG = 0
      9 READ (1,'(8F10.2)',END=10) (T(I,J),J=1,8)
C.... LEITURA DOS DADOS DE PRESSAO DE POROS CALCULADO PELO SONICO
      IF (IFLAG.EQ.1) GOTO 12
      6 READ (3,'(2X,F6.1,3X,F5.2)',END=1) PROFS,PPS
      12 DIF = T(1,2) - PROFS
      IF (DIF.LT.-1.) THEN
        IFLAG = 1
        GOTO 9
      END IF
      IF (DIF.GT.0.5) THEN
        GOTO 6
      ELSE
        IF (DIF.GT.-1.0.AND.DIF.LT.1.0) T(1,8) = PPS/8.834
      END IF
C.... LEITURA DA TENSÃO DE COMPRESSÃO
      7 READ (5,'(F10.2,20X,F10.2)',END=1) PRFS,SCS
      DIF = PROFS - PRFS
      IF (DIF.LT.-1.0) GOTO 9
      IF (DIF.GT.0.5) THEN
        GOTO 7
      ELSE
        SCD = SCS
      END IF
C.... DIAMETRO DA BROCA NO METRO PERFURADO
      IJ = 0
      8 IJ = IJ+1
      IF (T(1,2).GE.PROFE(IJ).AND.T(1,2).LT.PROFE(IJ+1)) THEN
        DBR(IJ) = DBR(IJ)
      ELSE
        GOTO 8
      END IF
      GOTO 5
      1 I = I-1
      10 CLOSE (1)
        CLOSE (3)
        CLOSE (4)

```

```

CLOSE (5)
N=I-1
C.... calculo do Sc medio
SCM = 0.
DO 15 J =1,N
SCM = SCM + SC(J)
15 CONTINUE
SCM = SCM/FLOAT(N)
C.... fixa os limites inferiores e superiores
BS = 25.684*SCM
LI = LI*BS
LS = LS*BS
C
C.... conversao das unidades para MKS
C
DO 19 I = 1,N
T(I,1) = T(I,1)*60.0
T(I,3) = T(I,3)*DB(I)*9807.
T(I,6) = T(I,6)*4.448
T(I,7) = T(I,7)*9807.
T(I,8) = T(I,8)*9807.
DB(I) = DB(I)*.0254
SC(I) = SC(I)*6894.7
19 CONTINUE
C
C.... transformacoes das variaveis
C
C.... verifica se ha menos que 6 dados
IF (N.LT.6) THEN
WRITE (*,*) 'NAO E POSSIVEL REALIZAR A REGRESSAO DADOS < 6'
GOTO 999
END IF
DO 20 I=1,N
Y(I) = F0(T(I,1),T(I,4),DB(I))
X(I,1) = 1.0
X(I,2) = F2(T(I,3),SC(I),DB(I))
X(I,3) = F3(T(I,8),T(I,7),SC(I),T(I,2))
X(I,4) = F4(T(I,2),DB(I))
X(I,5) = F5(T(I,6),SC(I),DB(I))
X(I,6) = F6(T(I,5),DB(I))
20 CONTINUE
C
C.... monta a matriz de minimizacao e o vetor dependente
C.... (a matriz e simetrica)
C
DO 100 K=1,NEL
DO 90 J=K,NEL
A(K,J) = 0.0
DO 80 I=1,N
A(K,J) = A(K,J) + X(I,K)*X(I,J)
80 CONTINUE
90 CONTINUE
B(K) = 0.0
DO 95 I=1,N
B(K) = B(K) + Y(I)*X(I,K)
95 CONTINUE
100 CONTINUE

```

```

C
C.... reflete a parte simetrica
C
      DO 120 J=1,NEL
      DO 110 I=J,NEL
      A(I,J) = A(J,I)
110  CONTINUE
120  CONTINUE
C
C.... monta o vetor logico R
C
      DO 130 I=1,NEL
      R(I) = .TRUE.
130  CONTINUE
      IC = 0
      IK = 1
C.... MONTA A MATRIZ DE MINIMIZACAO REDUZIDA
140  CALL MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
      I = NEL - IC
C.... RESOLVE O SISTEMA
      CALL SIST (AR,BR,CR,I,STATUS,NEL)
C.... VERIFICA SE TODOS OS COEFICIENTES SAO NULOS
      IF (CR(1).EQ.0.0. AND. CR(2).EQ.0.0. AND. CR(3).EQ.0.0. AND. CR(4).EQ.
1  0.0. AND. CR(5).EQ.0.0. AND. CR(6).EQ.0.0) THEN
      WRITE (*, '(A\,11,1X,F12.5)') (' b',IX,CR(IX),IX=1,NEL)
      WRITE (*,*) 'CASO SEJA ZERO VAI ASSUMIR'
      IK = IK+1
      IF (IK.GT. NEL) GOTO 147
      DO 145 I=1,NEL
      R(I) = .TRUE.
145  CONTINUE
      R(IK) = .FALSE.
      C(IK) = 0.0
      IC = 1
      GOTO 140
      END IF
C.... armazena os coeficientes calculados em C(.)
147  CALL ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
      DO 150 I = 1,NEL
      CP(I) = C(I)
150  CONTINUE
C.... calcula a soma dos quadrados dos residuos
      CALL SQRES (NEL,SQ)
      SQR=SQ
      WRITE (*, '(A\,11,1X,F12.5)') (' a',IX,C(IX),IX=1,NEL)
      WRITE (*, '(A\,F12.3)') '          SQR = ',SQR
      WRITE (*, '(A\,I4      )') '          N = ',N
C.... CALCULA O COEFICIENTE DE CORRELACAO MULTIPLA
      CALL MEAN (TPM,SST)
      RG = 1 - (SQ/SST)
      IF (RG.LT.0.0) THEN
      WRITE (*,*) ' COEF. CORRELACAO MULTIPLA NAO CALCULADO '
      RG1 = 0.0
      ELSE
      RG1 = SQRT(RG)
      WRITE (*, '(A\,F10.3)') '          CCM = ',RG1
      END IF

```



```

C.... calculo do coeficiente de determinacao
CD = 1-(SST/TPM)
IF (CD, LT, 0, 0) THEN
WRITE (*,*) ' COEF. DETERMINACAO NAO CALCULADO '
CD = 0.0
ELSE
CD = SQRT(CD)
WRITE (*, '(A\F10.3)') ' CD = ', CD
END IF
DO 155 I = 1, NEL
155 CONTINUE
WRITE (2, '(A\,I1,IX,F12.7)') (' b', I, C(I), I=1, NEL)
WRITE (2, 14) SQ, N
WRITE (2, '(A\F5.3)') ' CCM1 = ', RG1
WRITE (2, '(A\F5.3)') ' CD = ', CD
C
C.... FIXA UM COEFICIENTE DE CADA VEZ
C
DO 160 I = 2, NEL
DO 170 J = 1, NEL
R(J) = .TRUE.
C(J) = CP(J)
170 CONTINUE
R(I) = .FALSE.
IF (I, EQ, 3) THEN
IF (C(I), LT, LI) C(I) = LI
IF (C(I), GT, LS) C(I) = LS
END IF
IC = 1
190 CALL MATRED (R, BR, B, AR, A, C, NEL)
IK = NEL - IC
CALL SIST (AR, BR, CR, IK, STATUS, NEL)
CALL ARMAZENA (R, NEL, C, CR)
CALL SQRES (NEL, SQ)
CALL ASSUME (LI, LS, C, R, IC, NEL, FLAG)
IF (FLAG, NE, 1) GOTO 190
RG = 1 - (SQ/SST)
IF (RG, LT, 0, 0) THEN
RG = 0.0
ELSE
RG = SQRT(RG)
END IF
C
C.... ARMAZENA OS COEFICIENTES COM MENOR SQR
C
IF (SQ, LT, SQR1, OR, I, EQ, 2) THEN
DO 200 K = 1, NEL
CF(K) = C(K)
200 CONTINUE
WRITE (*, '(A\,I1,IX,F12.6)') (' b', IX, CF(IX), IX=1, NEL)
WRITE (*, '(A\F12.3)') ' SQR = ', SQ
WRITE (*, '(A\F12.3)') ' CCM = ', RG
WRITE (*, '(A\,I4)') ' N = ', N
SQR1 = SQ
R2 = RG
END IF
160 CONTINUE

```

```

WRITE (2, '(A\,I1,1X,F12.6)' ) ' b',I,CF(I),I=1,NEL)
WRITE (2, '(A\,F10.2)' ) ' SQR1 = ',SQR
WRITE (2,11) SQR1,N
WRITE (2, '(A\,F5.3)' ) ' CCM1 = ',RG1
WRITE (2, '(A\,F5.3)' ) ' CCM = ',R2
WRITE (2, '(5X,2F12.6)' ) L1,LS
WRITE (*, '(5X,2F12.6)' ) L1,LS
11 FORMAT (2X,'SQR = ',F10.2,4X,'N = ',I4)
CLOSE (2)
999 STOP
END

C
C *****
C... SUBROTINA PARA CALCULO DA SOMA DOS QUADRADOS DOS RESIDUOS
C *****
C
SUBROUTINE SQRES (NEL,SQ)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
COMMON /B1/Y(2000),N
COMMON /B2/X(2000,6),C(6)
SQ = 0.0
DO 10 I=1,N
RES = Y(I)
DO 20 J=1,NEL
RES = RES - X(I,J)*C(J)
20 CONTINUE
SQ = SQ + RES*RES
10 CONTINUE
RETURN
END

C
C *****
C... SUBROTINA PARA ARMAZENAR OS COEFICIENTES EM C( )
C *****
C
SUBROUTINE ARMAZENA (R,NEL,C,CR)
DIMENSION C(NEL),CR(NEL)
LOGICAL R(NEL)
IK = 0
DO 10 I=1,NEL
IF (R(I)) THEN
IK = IK + 1
C(I) = CR(IK)
END IF
10 CONTINUE
RETURN
END

C
C *****
C... SUBROTINA PARA MONTAGEM DA MATRIZ DE MINIMIZACAO REDUZIDA
C *****
C
SUBROUTINE MATRED (R,BR,B,AR,A,C,NEL)
DIMENSION BR(NEL),B(NEL),AR(NEL,NEL),A(NEL,NEL),C(NEL)
LOGICAL R(NEL)
IK = 0
DO 10 I=1,NEL

```

```

IF (R(I)) THEN
  JK = 0
  IK = IK + 1
  BR(IK) = B(I)
  DO 20 J=1,NEL
    IF (R(J)) THEN
      JK = JK + 1
      AR(IK,JK) = A(I,J)
    ELSE
      BR(IK) = BR(IK) - C(J)*A(I,J)
    END IF
20  CONTINUE
  END IF
10  CONTINUE
  RETURN
END

C
C *****
C SUBROTINA PARA RESOLUCAO DO SISTEMA - ELIMINACAO DE GAUSS
C *****
C
SUBROUTINE SIST(A,B,C,N,STATUS,NEL)
  DIMENSION A(NEL,NEL),B(NEL),C(NEL)
  STATUS = 1
  NL1 = N-1
  DO 70 J=1,NL1
    JP1 = J+1
C. . . . pivotar
    IFLAG = 0
    JPIVO = J
    DO 10 JJ = JP1,N
      IF ( ABS(A(JPIVO,J)) .GE. ABS(A(JJ,J)) ) GOTO 10
    IFLAG = 1
    JPIVO = JJ
10  CONTINUE
    IF ( ABS(A(JPIVO,J)) .LT. 0.001) RETURN
C. . . . troca linha com o pivo se necessario
    IF (IFLAG) 40,40,20
20  DO 30 JJ = J,N
    T = A(J,JJ)
    A(J,JJ) = A(JPIVO,JJ)
    A(JPIVO,JJ) = T
30  CONTINUE
    T = B(J)
    B(J) = B(JPIVO)
    B(JPIVO) = T
C. . . . determina multiplicador e elimina elementos abaixo da diagonal
40  DO 60 JJ = JP1,N
    BETA = A(JJ,J)/A(J,J)
    DO 50 JJJ = JP1,N
      A(JJ,JJJ) = A(JJ,JJJ) - BETA*A(J,JJJ)
50  CONTINUE
    B(JJ) = B(JJ) - BETA*B(J)
60  CONTINUE
70  CONTINUE
C. . . . sistema triangularizado; resolve de baixo para cima
  STATUS = 0

```

```

      C(N) = B(N)/A(N,N)
      NL1 = N-1
      DO DO I=NL1,1,-1
        JJ = I+1
        DO DO J = JJ,N
          B(I) = B(I) - A(I,J)*C(J)
60      CONTINUE
        C(I) = B(I)/A(I,I)
80      CONTINUE
      RETURN
      END

C
C.... CALCULA A MEDIA DE N DADOS NO ARRAY X
C
      SUBROUTINE MEAN (SOMA,SOMAG)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      COMMON/B1/Y2(2000),N2
      SOMA = 0.0
      DO 10 I = 1,N2
        SOMA = SOMA + Y2(I)
10     CONTINUE
      XMEAN = SOMA/FLOAT(N2)
      SOMAG = 0.0
      DO 20 I = 1,N2
        SOMAG = SOMAG + (Y2(I)-XMEAN)**2
20     CONTINUE
      RETURN
      END

C
C....
C
      SUBROUTINE ASSUME (LI,LS,C,R,IC,NEL,IFLAG)
      REAL LI,LS
      DIMENSION C(NEL)
      LOGICAL R(NEL)
      IF (C(3).LT.LI.OR.C(3).GT.LS) THEN
        IF (C(3).LT.LI) C(3) = LI
        IF (C(3).GT.LS) C(3) = LS
        IC = IC + 1
        R(3) = .FALSE.
        IFLAG = 0
        RETURN
      END IF
      IFLAG = 1
      RETURN
      END

```

ANEXO I

PROGRAMA PARA CALCULO DA TAXA DE PENETRACAO

PELO MODELO DE PERFURACAO DE PROPOSTO V. 1.0

```

PROGRAM ROP
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
DIMENSION PROFE(100),DSR(100)
LOGICAL R(20)
COMMON/COEF/B(6),R
COMMON/MEDIA/TP(2000),N
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ2,ARQ3,ARQ19,ARQ20,ARQ21,ARQ22,ARQ23
CHARACTER*15 ARQ24
CHARACTER*12 LIT,LIT1
CHARACTER*2 LITO1,LITO
CHARACTER*1 RESP

C.... LEITURA DOS NOMES DOS ARQUIVOS
2  WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO EM QUE ESTAO OS DADOS -->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DE PERFIL ELETRICO ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ1
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO TENSAO DE COMPRESSAO -->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ23
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DE PRESSAO DE POROS ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ21
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DOS COEFICIENTES ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ19
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO DE "BIT RECORD" ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ24
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME DO ARQUIVO PARA GRAFICO ----->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ20
    WRITE (*, '(A\)' ) NOME ARQUIVO PARA GRAFICO (cada 5 m )-->
    READ (*, '(A15)' ) ARQ22

C.... PERGUNTA SE OS NOMES DOS ARQUIVOS ESTAO CORRETOS
    WRITE (*, '(A\)' ) NOMES DE ARQUIVOS CORRETOS (S/N) ? ----->
    READ (*, '(A1)' ) RESP
    IF (RESP.NE. 'S'. AND. RESP.NE. 's') GOTO 2
    NEL = 8
    DO 50 IK = 3,17
    R(IK) = .FALSE.
50  CONTINUE

C.... ABERTURA DOS ARQUIVOS
    OPEN (1, FILE = ARQ , STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
    OPEN (2, FILE = ARQ1, STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
    OPEN (19,FILE = ARQ19,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
    OPEN (23,FILE = ARQ23,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
    OPEN (24,FILE = ARQ24,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
    OPEN (20,FILE = ARQ20,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)

```

```

OPEN (20,FILE = ARQ20,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
OPEN (22,FILE = ARQ22,STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
OPEN (21,FILE = ARQ21,STATUS = 'OLD',ERR=999,RECL=80)
C.... LEITURA DO DIAMETRO DA BROCA DO ARQUIVO DE "BIT RECORD"
  IJ = 0
  1 IJ = IJ + 1
    READ (24,(F6.1,GX,F7.4),END=6 ) PROFE(IJ),DBR(IJ)
    GOTO 1
C.... LEITURA DOS COEFICIENTES
  6   IK = 0
  3   READ (10,11,END = 4) LIT,IL
    LIT1 = 'C'//LIT(2:12)
    OPEN (11,FILE = LIT1, STATUS = 'UNKNOWN',ERR=999,RECL=80)
    R(11) = .TRUE.
    GOTO 3
  4   I = 0
    SQR = 0.0
C.... LEITURA DOS DADOS
  5   I = I + 1
    IF (I.EQ.1) GOTO 10
    LITO1 = LITO
    JJ = 0
  10  READ (1,13,END=100) TP(I),PROF,PSB,ROT,H,FJ,PL,PP
    IF (JJ.EQ.1) GOTO 30
  20  READ (2,12,END=100) PROFP,LITO
C.... COMPARA A PROFUNDIDADE DOS DADOS E PERFIL
  30  COMP = PROF-PROFP
    IF (COMP.GT. -1. AND. COMP.LT. 1.) GOTO 35
    IF (COMP.GE. 1.) THEN
      JJ = 0
      GOTO 20
    END IF
    IF (COMP.LE. -1.) THEN
      JJ = 1
      GOTO 10
    END IF
C.... COMPARA A PROFUNDIDADE DA PRESSAO DE POROS COM OS DADOS
  35  READ (21,(2X,F6.1,3X,F5.2)) PROFS,PPS
    DIF = PROF - PROFS
    IF (DIF.GT. 0.5) THEN
      GOTO 35
    ELSE
      IF (DIF.GT. -1.0 AND. DIF.LT. 1.0) PP = PPS/8.334
    END IF
C.... LEITURA DA TENSÃO DE COMPRESSÃO
  37  READ (23,(F10.2,20X,F10.2),END=1) PRFS,SCS
    DIF = PROF - PRFS
    IF (DIF.GT. 0.5) THEN
      GOTO 37
    ELSE
      SC = SCS
    END IF
C.... DIAMETRO DA BROCA NO METRO PERFURADO
  IJ = 0
  38 IJ = IJ+1
    IF (PROF.GE. PROFE(IJ). AND. PROF.LT. PROFE(IJ+1)) THEN
      DB = DBR(IJ)

```

```

ELSE
GOTO 98
END IF

C.... CONVERSAO PARA UNIDADES MKS
40   PSB   = PSB*DB*0807.
      FJ    = FJ*4.448
      PL    = PL*0807.
      PP    = PP*0807.
      DB    = DB*.0254
      SC    = SC*6994.7

C.... LEITURA DOS COEFICIENTES
      IF (I.EQ.1.OR.LITO1.NE.LITO) THEN
        CALL COEFIC (LITO)
      END IF

C.... CALCULO DAS FUNCOES
      F1 = EXP(B(1))
      F2 = (PSB/(SC*DB*DB))**B(2)
      F3 = EXP(B(3)*PROF*(PP-PL)/(SC*DB*DB))
      F4 = EXP(B(4)*(2.-(PROF/DB)*5E-5))
      F5 = (FJ/(SC*DB*DB))**B(5)
      F6 = EXP(B(6)*(-H/DB))

C.... CALCULO DA TAXA DE PENETRACAO (m/s)
      FO = F1*F2*F3*F4*F5*F6
      RP= FO*ROT*DB

C.... CONVERSAO PARA UNIDADES DE CAMPO BRASILEIRA (m/h)
      RP = RP/60.
      Z = (TP(I) - RP)/TP(I)*100.

C.... CALCULO DA SOMA DO QUADRADO DOS RESIDUOS
      RES = TP(I) - RP
      SQR = SQR + RES*RES
      WRITE (20,15) PROF,TP(I),RP,Z ,LITO

C.... GRAVACAO PARA ARQUIVO DE GRAFICO A CADA 5 metros
      IK = IK + 1
      IF (IK.EQ.1.OR.IK.EQ.5) THEN
        IK = 1
        WRITE (22,15) PROF,TP(I),RP,Z ,LITO
      END IF
      GOTO 5

100   WRITE (*,('A\F12.1'))      SQR = ',SQR
      N = I -1

C.... CALCULO DO COEFICIENTE DE CORRELACAO MULTIPLA (RG)
      CALL MEAN (SST)
      RG = 1- (SQR/SST)
      IF (RG.LT.0.0) THEN
        WRITE (*,*) ' COEF. DE CORRELACAO MULTIPLA NAO CALCULADA '
      ELSE
        RG = SQRT(RG)
        WRITE (*,('A\F4.9'))      CCM = ',RG
      END IF

11    FORMAT (2X,A12,8X,I2)
12    FORMAT (2X,F5.1,8X,A2)
13    FORMAT (8F10.2)
15    FORMAT (4F10.2,2X,A2)
999   CLOSE (1)
      CLOSE (2)
      DO 900 I2 = 9,17
        IF (R(I2)) CLOSE (I2)

```

```

300    CONTINUE
      CLOSE (10)
      CLOSE (20)
      CLOSE (24)
      STOP
      END

C
C.... CALCULA A MEDIA DE N DADOS NO ARRAY X
C
      SUBROUTINE MEAN (SST)
      IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
      COMMON/MEDIA/X(2000),N
      SOMA = 0.0
      SST = 0.0
      DO 10 I = 1,N
      SOMA = SOMA + X(I)
10    CONTINUE
      XMEAN = SOMA/FLOAT(N)
      DO 20 I = 1,N
      SST = SST + (X(I) - XMEAN)*(X(I) - XMEAN)
20    CONTINUE
      RETURN
      END

C
C.... SUBROTINA PARA DETERMINACAO DOS COEFICIENTES (LITOLOGIA)
C
      SUBROUTINE COEFIC (LITO)
      LOGICAL R(20)
      CHARACTER*2 LITO
      COMMON/COEF/B(6),R
      IF (LITO(1:1).EQ.'0'.OR.LITO(1:1).EQ.' ') THEN
      IF (R(3)) THEN
      READ (3,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 3
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 10-CALCIRUDITO
      IF (LITO.EQ.'10') THEN
      IF (R(4)) THEN
      READ (4,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 4
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 30-DOLOMITA
      IF (LITO.EQ.'30') THEN
      IF (R(5)) THEN
      READ (5,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 5
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 40-BRECHA
      IF (LITO.EQ.'40') THEN
      IF (R(6)) THEN
      READ (6,10) (B(I),I=1,6)

```



```

        REWIND 6
        END IF
        RETURN
    END IF

C. . . . DADOS DE 42-CONGLOMERADO
        IF (LITO.EQ. '42') THEN
            IF (R(7)) THEN
                READ (7,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 7
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 46-TILITO, 48-AREIA, 49-ARENITO
        IF (LITO(11).EQ. '4') THEN
            IF (R(8)) THEN
                READ (8,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 8
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 54-SILTITO, 55-ARGILA, 56-ARGILITO, 57-FOLHELHO, 58-MARCA
        IF (LITO(11).EQ. '5') THEN
            IF (R(9)) THEN
                READ (9,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 9
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 64-IGNEA NAO IDENTIFICADA, 65-DIABASIO,
C      66-BASALTO, 67-GRANITO
        IF (LITO(11).EQ. '6') THEN
            IF (R(10)) THEN
                READ (10,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 10
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 70-METAMORFICA NAO IDENTIFICADA
        IF (LITO.EQ. '70') THEN
            IF (R(11)) THEN
                READ (11,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 11
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 71-GNAISSE, 72-FILITO, 73-XISTO,74-QUARTZITO
C      75-META-ARENITO,76-META-SILTITO,77-ARDOSIA,78-ULTRABASICA
        IF (LITO(11).EQ. '7') THEN
            IF (R(12)) THEN
                READ (12,10) (B(I),I=1,6)
                REWIND 12
            END IF
            RETURN
        END IF

C. . . . DADOS DE 81-TAQUIDRITA, 82-ANIDRITA, 83-GIPSITA,
C      84-SAL NAO IDENTIFICADO, 85-HALITA,86-SILVINITA,87-CARNALITA
        IF (LITO(11).EQ. '8') THEN

```

```

      IF (R(13)) THEN
      READ (13,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 13
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 91-CHAMOSITA
      IF (LITO.EQ.'91') THEN
      IF (R(14)) THEN
      READ (14,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 14
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 92-CARVAO
      IF (LITO.EQ.'92') THEN
      IF (R(15)) THEN
      READ (15,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 15
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS DE 94-SILEX
      IF (LITO.EQ.'94') THEN
      IF (R(16)) THEN
      READ (16,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 16
      END IF
      RETURN
      END IF

C.... DADOS COM LITOLOGIA NAO ABRANGIDAS ACIMA
C.... FECHAMENTO DOS ARQUIVOS
      IF (R(17)) THEN
      READ (17,10) (B(I),I=1,6)
      REWIND 17
      END IF
      RETURN

10  FORMAT (4X,F12.9)
      END

```

ANEXO J

PROGRAMA PARA DETERMINACAO DO PESO E ROTACAO OTIMO
COM MINIMO CUSTO

```

IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
DIMENSION A(12,3),B(11,15)
CHARACTER*15 ARQ,ARQ1,ARQ9,ARQ4
CHARACTER*5 IADC,IADC1
CHARACTER*1 RESP,RESP1
REAL J1,J2,J9,N,NOTIMO,NMAX,LDP,NR,NMAX1
OPEN (1,FILE = 'DADIN. ARQ' ,STATUS = 'UNKNOWN',ERR = 999)
OPEN (6,FILE = 'BROCPAR. ARQ',STATUS = 'OLD',RECL=80)
OPEN (7,FILE = 'PSEROCA. ARQ',STATUS = 'OLD',RECL=80)
READ (1,14) LDP,CON,WDBT,DE1,DB1,CB1,OP1,TT1,CR1,Q1,
1 AJA,AJB,AJC,AJD,TH1,TB1,PL1,PP1,WMAX1,NMAX1,IADC1,ARQ1
C.... entrada de dados
40 WRITE (*,(A\)) ' PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA -----> '
WRITE (*,(F6.1)) DE1
READ (*,(F6.1)) D
IF (D.EQ.0.) D = DE1
WRITE (*,(A\)) ' CODIGO IADC DA BROCA -----> '
WRITE (*,(A5)) IADC1
READ (*,(A5)) IADC
IF (IADC.EQ.' ') IADC = IADC1
WRITE (*,(A\)) ' DIAMETRO DA BROCA (pol) -----> '
WRITE (*,(F6.3)) DB1
READ (*,(F6.3)) DB
IF (DB.EQ.0.) DB = DB1
WRITE (*,(A\)) ' PESO MAX NA BROCA (Klbs) -----> '
WRITE (*,(F5.1)) WMAX1
READ (*,(F5.1)) WMAX
IF (WMAX.EQ.0.) WMAX = WMAX1
WRITE (*,(A\)) ' ROTACAO MAX NA BROCA (rpm) -----> '
WRITE (*,(F5.0)) NMAX1
READ (*,(F5.0)) NMAX
IF (NMAX.EQ.0) NMAX = NMAX1
WRITE (*,(A\)) ' CUSTO DA BROCA (US$) -----> '
WRITE (*,(F7.1)) CB1
READ (*,(F7.1)) CB
IF (CB.EQ.0.) CB = CB1
WRITE (*,(A\)) ' DADOS ACIMA CORRETOS (S/N) -----> '
READ (*,(A1)) RESP
IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 40
C.... verifica se o rolamento da broca e selado ou journal
IF (IADC(4:4).NE. '1') GOTO 50
C.... caso o rolamento seja nao selado

```

C. . . . caso o rolamento seja nao selado

```

WRITE (*,*) ' TIPO DE LAMA '
WRITE (*,*) '      (1) COM BARITINA'
WRITE (*,*) '      (2) SULFIDE MUD'
WRITE (*,*) '      (3) AGUA DO MAR OU DOCE'
WRITE (*,*) '      (4) AGUA - BENTONITA'
WRITE (*,*) '      (5) BASE OLEO'
WRITE (*,(A\)) ' ESCOLHA (1,2,3,4 ou 5 )'
WRITE (*,(F2.0)) OP1
READ (*,(F2.0)) OP
IF (OP.EQ.0.) OP = OP1
IF (OP.GE.3.) THEN
CALL TALBER (OP,B2)
B1 = 1.0
GOTO 60
ELSE
B1 = 1.0
B2 = 1.0
GOTO 60
END IF

```

C. . . . broca com rolamentos selados

```

50 IF (IADC(4:4).EQ.'4'.OR.IADC(4:4).EQ.'5') THEN
B1 = 0.70
B2 = 0.85
ELSE

```

C. . . . broca com rolamentos journal

```

B1 = 1.60
B2 = 1.00
END IF

60 WRITE (*,(A\)) ' TEMPO DE MANOBRA (horas) -----> '
WRITE (*,(F5.1)) TT1
READ (*,(F5.1)) TT
IF (TT.EQ.0.) TT = TT1
WRITE (*,(A\)) ' CUSTO HORARIO DA SONDA (US$/h) -----> '
WRITE (*,(F7.1)) CR1
READ (*,(F7.1)) CR
IF (CR.EQ.0.) CR = CR1
WRITE (*,(A\)) ' VAZAO DE BOMBEIO (gpm) -----> '
WRITE (*,(F6.1)) Q1
READ (*,(F6.1)) Q
IF (Q.EQ.0.) Q = Q1
WRITE (*,(A\)) ' JATO (1) ( /S2) -----> '
WRITE (*,(F3.0)) AJA
READ (*,(F3.0)) AJ1
IF (AJ1.EQ.0.) AJ1 = AJA
WRITE (*,(A\)) ' JATO (2) ( /S2) -----> '
WRITE (*,(F3.0)) AJB
READ (*,(F3.0)) AJ2
IF (AJ2.EQ.0.) AJ2 = AJB
WRITE (*,(A\)) ' JATO (3) ( /S2) -----> '
WRITE (*,(F3.0)) AJC
READ (*,(F3.0)) AJ3
IF (AJ3.EQ.0.) AJ3 = AJC
WRITE (*,(A\)) ' JATO (4) ( /S2) -----> '
WRITE (*,(F3.0)) AJD
READ (*,(F3.0)) AJ4
IF (AJ4.EQ.0.) AJ4 = AJD

```

```

WRITE (*,'(A\)' ) ABRASIVIDADE DA FORMACAO - Tal H (h) --> '
WRITE (*,'(F6.1)' ) TH1
READ (*,'(F6.1)' ) TALH
IF (TALH.EQ.O.) TALH = TH1
WRITE (*,'(A\)' ) CONSTANTE DO ROLAMENTO - Tal B (h) --> '
WRITE (*,'(F6.1)' ) TB1
READ (*,'(F6.1)' ) TALB
IF (TALB.EQ.O.) TALB = TB1
WRITE (*,'(A\)' ) PESO DA LAMA (lb/gal) -----> '
WRITE (*,'(F6.1)' ) PL1
READ (*,'(F6.1)' ) PL
IF (PL.EQ.O.) PL = PL1
WRITE (*,'(A\)' ) PRESSAO DE POROS (lb/gal) -----> '
WRITE (*,'(F6.1)' ) PP1
READ (*,'(F6.1)' ) PP
IF (PP.EQ.O.) PP = PP1
WRITE (*,'(A\)' ) ARQUIVO DOS COEFICIENTES -----> '
WRITE (*,'(A15)' ) ARQ1
READ (*,'(A15)' ) ARQ
IF (ARQ.EQ.' ') ARQ = ARQ1
WRITE (*,'(A\)' ) QUER GRAVAR OS RESULTADOS ? -----> '
READ (*,'(A1)' ) RESP1
IF (RESP1.NE.'S'.AND.RESP1.NE.'s') GOTO 65
WRITE (*,'(A\)' ) ARQUIVO DOS RESULTADOS (W,N,Custo) -----> '
READ (*,'(A15)' ) ARQ3
WRITE (*,'(A\)' ) ARQUIVO DOS RESULTADOS (W,N,TP) -----> '
READ (*,'(A15)' ) ARQ4
OPEN (3,FILE = ARQ3,STATUS = 'UNKNOWN',ERR = 999)
OPEN (4,FILE = ARQ4,STATUS = 'UNKNOWN',ERR = 999)
65 WRITE (*,'(A\)' ) DADOS ACIMA CORRETOS (S/N) -----> '
READ (*,'(A1)' ) RESP
IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 50
OPEN (2,FILE = ARQ, STATUS = 'UNKNOWN',ERR = 999)
READ (2,15) A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8
C. . . . LEITURA DOS PARAMETROS DE DESGASTE DE DENTE ( H1,H2,H3 )
DO 70 I=1,12
70 READ(6,16) (A(I,J),J=1,3)
C. . . . LEITURA DO PESO MAXIMO SOBRE BROCA
DO 80 I=1,11
80 READ(7,17) (B(I,J),J=1,15)
C. . . . parametros de desgaste de dente (H1,H2,H3)
CALL POSICAO (DB,IADC,IL,JI,JJ,IFLAG)
IF (IFLAG.NE.O) THEN
CALL ASSUME (DB,IADC,IFLAG,WDBM,H1,H2,H3)
END IF
WDBM = B(JI,JJ)
H1 = A(IL,1)
H2 = A(IL,2)
H3 = A(IL,3)
C. . . . CALCULO DA FORCA NO JATO
AT = .00076699*(AJ1*AJ1+AJ2*AJ2+AJ3*AJ3+AJ4*AJ4)
FJ = .000166199*PL*Q*Q/AT
WRITE (*,11)
WRITE (*,4) D,DB,TALH,TALB,PP,PL,WDBM,WDBT
WRITE (*,5) CB,CR,TT,CON,H1,H2,H3,FJ,LDP,NMAX
WRITE (*,9) A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,B1,B2
D = D*3.281

```

```

CFC = CB
TPC = 0.0
DO DO W = 10.,VMAX,5.
DO DO N = 40.,NMAX,5.
C.... VIDA UTIL DOS DENTES (HORAS)
  IF (IADC(4:4).EQ.'7') THEN
    WDB1 = 2.5
    N1 = 60.
  ELSE
    WDB1 = 4.0
    N1 = 100.
  END IF
  W1=W*2.205
  J2 = ((WDBM - W/DB)/(WDBM - WDB1))*((N1/N)**H1*(1./(1+H2/2.)))
  HF = 1.
  TD = J2*(TALH/H3)*(HF + H2*HF*HF/2.)
C.... VIDA UTIL DOS ROLAMENTOS (HORAS)
  IF (N.LE.100.AND.IADC(4:4).EQ.'4') B1= 1.9
  WP = 4*DB/W
  IF (WP.LE.1.AND.IADC(4:4).EQ.'4') B2= 1.15
  J9 = ((100./N)**B1)*(WP)**B2
  BF = 1.
  TB = J9*TALB*BF
C.... CALCULO DO INTERVALO A SER PERFURADO
  F1 = EXP(A1)
  F2 = EXP(A2*(10000.-D))
  F3 = EXP(A3*(D**0.60)*(PP-S.6))
  F4 = EXP(A4*D*(PP-PL))
  F5 = ((W/DB-WDBT)/(4.-WDBT))**A5
  F6 = (N/100. )**A6
  F8 = (FJ/1000. )**A8
  J1 = F1*F2*F3*F4*F5*F6*F8
C.... OCORRENCIA DA FALHA (DENTE OU ROLAMENTO)
  IF (TB.LE.TB) GOTO 100
  HF = SQRT((1/H2)**2 + 2.*TB/(H2*J2*TALH/H3)) - 1./H2
  IF (HF.GT.1.0) HF = 1.0
100  D1 = J1*J2*TALH/H3
      D2 = EXP(-A7*HF)
      D3 = H2/(A7*A7)
      DELTAD = D1*((1-D2)/A7 + D3*(1-D2 - A7*HF*D2))
      IF (DELTAD.LE.0) GOTO 90
C.... TEMPO DE CONECCAO
      TC = (DELTAD/LDP)*CON/60.
C.... CUSTO POR METRO
      IF (TD.LT.TB) TB = TD
      DELTAD = DELTAD*.9048
      CF = (CB + CR*(TB +TC + TT))/DELTAD
      TP = DELTAD/TB
      IF (RESP1.EQ.'N'.OR.RESP1.EQ.'n') GOTO 105
      WRITE (8,6) W,N,CF
      WRITE (4,6) W,N,TP
105  IF (CF.GE.CFC) GOTO 110
      CFC = CF
      WOTIMO = W
      NOTIMO = N
      PERF = DELTAD
      TBC = TB

```

```

TPR      = TP
HFC      = HF
110 IF (TP, LE, TPC) GOTO 90
TPC = TP
NR = N
WR = W
DDC = DELTAD
CF1 = CF
TB1 = TB
90 CONTINUE
WRITE (*,8) WOTIMO,NOTIMO,CFC ,PERF,TBC,TPR,HFC
WRITE (*,19) WR,NR,TPC,DDC,CF1,TB1
DE1      = D/3.281
IADC1    = IADC
DB1      = DB
WMAX1    = WMAX
NMAX1    = NMAX
CB1      = CB
OP1      = OP
TT1      = TT
CR1      = CR
Q1       = Q
AJA      = AJ1
AJB      = AJ2
AJC      = AJ3
AJD      = AJ4
TH1      = TALH
TB1      = TALB
PL1      = PL
PP1      = PP
ARQ1     = ARQ
WRITE (*,('A\')) ' QUER CONTINUAR O PROGRAMA (S/N) -----'
READ (*,('A1')) RESP
IF (RESP, NE, 'S', AND, RESP, NE, 's') THEN
GOTO 888
ELSE
REWIND 6
REWIND 7
CLOSE (2)
CLOSE (9)
CLOSE (4)
GOTO 40
END IF
4  FORMAT (10X,'E N T R A D A   D E   D A D O S',//,
1 5X,'PROF. ENTRADA DA BROCA = ',F6.0,' ( m )',//,
2 5X,'DIAMETRO DA BROCA      = ',F6.3,' (pol)',//,
3 5X,'TAL H                  = ',F6.1,' ( h )',//,
4 5X,'TAL B                  = ',F6.1,' ( h )',//,
4 5X,'Grad. PRESSAO POROS    = ',F6.1,' (ppg)',//,
6 5X,'PESO DA LAMA           = ',F6.1,' (ppg)',//,
7 5X,'(W/Db) max             = ',F6.1,' (Klb/pol)',//,
8 5X,'(W/Db) t               = ',F6.1,' (lb/pol)',//,
5  FORMAT(5X,'CUSTO DA BROCA      = ',F6.0,' (US$)',//,
1 5X,'CUSTO DA SONDA          = ',F6.1,' (US$/h)',//,
2 5X,'TEMPO DE MANOBRA        = ',F6.1,' ( h )',//,
3 5X,'TEMPO DE CONEXAO        = ',F6.1,' (min/9m)',//,
4 5X,'H1                      = ',F6.1,/,

```

```

5 5X,H2 = 'F6.1,',
* 5X,H3 = 'F6.3,',
6 5X,FJ = 'F6.1, (lbf) ',
7 5X,COMPRIMENTO DP = 'F6.1, (ft) ',
8 5X,ROTACAO MAXIMA = 'F6.1, (rpm)'
6 FORMAT (5X,3(F10.1))
8 FORMAT (2X, ' ',
1 10X,PESO E ROTACAO OTIMO PARA MINIMO CUSTO',
2 10X,W = 'F5.1, Klbs',3X,N = 'F5.0, rpm',3X,CUSTO',F6.1,
3 ' US$/m ',
4 10X,METRAGEM = 'F6.0, m TBF = 'F5.1, h TP = 'F5.1,
5 ' m/h ', Hf = 'F4.2)
9 FORMAT(5X,A1 = 'F10.6,',
* 5X,A2 = 'F10.6,',
1 5X,A3 = 'F10.6,',
2 5X,A4 = 'F10.6,',
3 5X,A5 = 'F10.6,',
4 5X,A6 = 'F10.6,',
5 5X,A7 = 'F10.6, ',
5 5X,A8 = 'F10.6,',
6 5X,B1 = 'F10.6,',
7 5X,B2 = 'F10.6,/(H1)
11 FORMAT (' ',/(H1)
13 FORMAT (2X, ' ',
1 10X,PESO E ROTACAO PARA MAXIMA TAXA DE PENETRACAO',
2 10X,W = 'F5.1,Klbs',3X,N = 'F5.0,'rpm',3X,TP = 'F7.1,
3 ' m/h ',
4 10X,METR. = 'F6.0, m C/m = 'F7.1, US$/m TBF = 'F5.1,
4 ' h ',/(H1)
14 FORMAT (20(10X,F10.8,/,),10X,A5,/,10X,A15)
15 FORMAT (8(4X,F12.9,/,))
16 FORMAT (6X,3(3X,F9.2))
17 FORMAT (8X,8(1X,F2.1),1X,F9.1,8(1X,F2.1))
998 REVIND 1
WRITE (1,14) LDP,CON,WDBT,DE1,DB1,CB1,OP1,TT1,CR1,Q1,
1 AJA,AJB,AJC,AJD,TH1,TB1,PL1,PP1,WMAX1,NMAX1,IADCL,ARG1
CLOSE(1)
CLOSE(2)
CLOSE(3)
CLOSE(4)
CLOSE(6)
CLOSE(7)
999 STOP
END

C
C.... SUBROTINA PARA DETERMINAR EXPOENTES DE DESGASTE DE ROLAMENTOS
C
SUBROUTINE TALBER (OP,B2)
IF (OP.EQ.3) B2 = 1.2
IF (OP.EQ.4) B2 = 1.5
IF (OP.EQ.5) B2 = 2.0
RETURN
END

C
C.... DETERMINA A POSICAO DA MATRIZ PARA PSBmax e H1,H2,H3
C

```



```

SUBROUTINE POSICAO (DB,IADC,I1,I,J,IFLAG)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
CHARACTER*5 IADC
I = 0
J = 0
IFLAG = 0
JFLAG = 0
IF (IADC(2:3).EQ.'11') J = 1
IF (IADC(2:3).EQ.'12') J = 2
IF (IADC(2:3).EQ.'13') J = 3
IF (IADC(2:3).EQ.'14') J = 4
IF (IADC(2:3).EQ.'21') J = 5
IF (IADC(2:3).EQ.'22') J = 6
IF (IADC(2:3).EQ.'23') J = 7
IF (IADC(2:3).EQ.'31') J = 8
IF (IADC(2:3).EQ.'32') J = 9
IF (IADC(2:3).EQ.'89') J = 10
IF (IADC(2:3).EQ.'34') J = 11
IF (IADC(2:2).EQ.'4') J = 12
IF (IADC(2:2).EQ.'5') J = 13
IF (IADC(2:2).EQ.'6') J = 14
IF (IADC(2:2).EQ.'7') J = 15
IF (IADC(2:2).EQ.'8'.AND.IADC(2:3).NE.'89') J = 16
IF (IADC(2:3).EQ.'83') J = 17
IF (J.EQ.0) THEN
  IFLAG=1
  RETURN
END IF
IF (DB.EQ. 6.125) I=1
IF (DB.EQ. 6.750) I=2
IF (DB.EQ. 7.875) I=3
IF (DB.EQ. 8.500) I=4
IF (DB.EQ. 8.750) I=5
IF (DB.EQ. 9.875) I=6
IF (DB.EQ.10.625) I=7
IF (DB.EQ.12.250) I=8
IF (DB.EQ.14.750) I=9
IF (DB.EQ.15.000) I=10
IF (DB.EQ.17.500) I=11
IF (I.EQ.0) THEN
  IFLAG=2
  RETURN
END IF
I1 = J
IF (I1.GT.10) I1 = 12
IF (J.GE.8.AND.J.LE.10) J = 8
IF (J.GT.10.) J = J - 2
RETURN
END

```

C
C.... ASSUME VALORES NAO TABELADOS DE WDEMox, H1,H2,H3

C

```

SUBROUTINE ASSUME(DB,IADC,IFLAG,WDEM,H1,H2,H3)
IMPLICIT REAL (A-H,O-Z)
CHARACTER*5 IADC
CHARACTER*4 RESP
IF (IFLAG.EQ.1) THEN

```

```

WRITE (*,*)' ***** CODIGO IADC NAO TABELADO ***** '
ELSE
WRITE (*,*)' ***** DIAMETRO DE BROCA NAO TABELADO***** '
END IF
WRITE (*,11) DB,IADC(2:5)
10 WRITE (*,(A\))' VALOR PARA WDBM (klbs/pol)-----> '
READ (*,12) WDBM
WRITE (*,(A\))' VALOR PARA H1 (COEF. B&Y )-----> '
READ (*,12) H1
WRITE (*,(A\))' VALOR PARA H2 (COEF. B&Y )-----> '
READ (*,12) H2
WRITE (*,(A\))' VALOR PARA H3 (COEF. B&Y )-----> '
READ (*,12) H3
WRITE (*,(A\))' VALORES ACIMA CORRETOS (S/N)? -> '
READ (*,(A1)) RESP
IF (RESP.NE.'S'.AND.RESP.NE.'s') GOTO 10
11 FORMAT (//5X,'Diametro : ',F7.4,' (pol)', /,
1      5X,'IADC      : ',A9,/)
12 FORMAT (F4.1)
RETURN
END

```