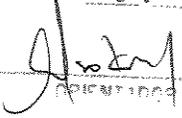


Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por José Ricardo
Pelaquim Mendes e aprovada
pela comissão julgadora em 18/02/1998


Pelaquim Mendes

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**O Uso de Conhecimento Especialista e de
Base de Dados na Seleção de Brocas de
Perfuração**

Autor: José Ricardo Pelaquim Mendes
Orientador: Celso Kazuyuki Morooka

02/98

M522u

35011/BC

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

O Uso de Conhecimento Especialista e de Base de Dados na Seleção de Brocas de Perfuração

**Autor: José Ricardo Pelaquim Mendes
Orientador: Celso Kazuyuki Morooka**

Curso: Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 1998
S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	395/98
V.	Ex.
TOMBO BC/	35011
PROC.	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/09/98
N.º CPD	

CM-00115882-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M522u

Mendes, José Ricardo Pelaquim

O uso de conhecimento especialista e de base de dados na seleção de brocas de perfuração. / José Ricardo Pelaquim Mendes.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Celso Kazuyuki Morooka
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Brocas (Ferramenta). 2. Sistemas especialistas (Computação). 3. Perfuração e broqueamento. I. Morooka, Celso Kazuyuki. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

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

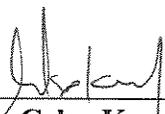
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**O Uso de Conhecimento Especialista e de
Base de Dados na Seleção de Brocas de
Perfuração**

Autor: **José Ricardo Pelaquim Mendes**

Orientador: **Celso Kazuyuki Morooka**

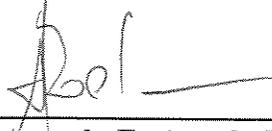
Banca Examinadora:



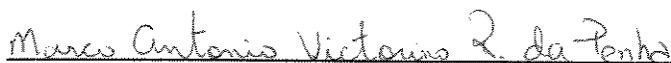
Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka
Unicamp



Prof. Dr. Helio Mitio Morishita
USP



Prof. Dr. Armando Freitas da Rocha
Unicamp



Eng. Marco Antonio Victorino (membro especialista)
Petrobras

Campinas, 18 de Fevereiro de 1998

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio e compreensão durante estes anos de estudos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais expresso meus agradecimentos:

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A CAPES pela bolsa de estudos fornecida.

A Petrobras S. A. por ceder os dados para esta dissertação.

Aos Engenheiros Antonio Marco Victorino e Kazuo Miura pela atenção e orientações.

Ao Professor Armando Rocha e colegas do laboratório de Inteligência Artificial pela assistência.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Resumo

MENDES, José Ricardo Pelaquim. *O Uso de Conhecimento Especialista e de Base de Dados na Seleção de Brocas de Perfuração*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 104 p. Dissertação (Mestrado)

Uma série de trabalhos desenvolvidos com o uso do conceito de Sistemas Inteligentes Distribuídos, criando agentes de raciocínio fornecido por especialistas em diversas áreas do Petróleo, implementadas em um shell específico (Kards), tem vislumbrado um grande potencial do uso desta tecnologia no ramo do Petróleo. Na seleção de brocas para a perfuração de poços de Petróleo, o objetivo é alcançar um mínimo custo métrico, sendo a seleção na prática realizada através de poços de correlação e na própria experiência do engenheiro de perfuração. O uso de métodos analíticos geralmente necessitam de informações expensivas além de ser uma tarefa árdua devido a complexibilidade do problema. Nesta dissertação é apresentado um método de preservação do conhecimento especializado no processo de seleção de brocas tricônicas através de redes neurais, lógica nebulosa e ferramentas disponíveis no Sistema Kards. Este trabalho serviu de base para arquitetar um Sistema Inteligente para o auxílio de seleção de brocas tricônicas, sendo útil também em termos de treinamento de novos engenheiros.

Palavras Chave

- Broca, Sistema Inteligente

Abstract

MENDES, José Ricardo Pelaquim. *The Use of Expert Knowledge and Data Bank for Drill Bits Selection*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 104 p. Dissertação (Mestrado)

A series of works developed using the concept of Distributed Intelligent Systems, creating agents of reasoning provided by experts in several areas of Petroleum, structured in a specific shell (Kards), has glimpsed a great potential of this technology in Petroleum sector. In the bit selection to drill oil well, the objective is to obtain a minimum metric cost, being the selection in practice realized using correlation wells and in drilling engineers experience. The use of analytical methods usually needs extensive informations and moreover it is hard job owing to complexity of the problem. In the thesis is presented a method of preservations of specialized knowledge in triconics drills selection process using neural nets, fuzzy logic and available tools in the Kards System. This work was a base to construct an Intelligent System for the assistance of triconics drills selection, being also useful to fit to training of engineers.

Keywords

- Bit, Intelligent System

Índice

Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	xi
Nomenclatura.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Aspectos Gerais.....	1
1.2 Principais Objetivos.....	2
1.3 Justificativa.....	2
2. Métodos de Seleção de Brocas.....	5
2.1 Método de Dembach.....	5
2.2 Método de Mason.....	7
2.3 Método da Energia Específica.....	12
2.4 Método de Ohara.....	14
2.5 Método baseado no CEC.....	15

2.6 Método de Dumans.....	17
2.7 Método de Falcão.....	19
2.8 Comentários.....	21
3. Grafo de Conhecimento.....	23
4. Metodologia Adotada.....	32
4.1 Estrutura do Sistema.....	33
4.2 Conhecimento para Escolha de Brocas.....	40
5. Aplicações do Presente Sistema.....	53
5.1 Estudo de Caso 1: Campo de Dourado.....	53
5.2 Estudo de Caso 2: Campo de Lambari.....	67
5.3 Estudo de Caso 3: Campo de Cascudo.....	78
6. Conclusões e Considerações Finais.....	86
Referências Bibliográficas.....	88
Apêndice A.....	92
Apêndice B.....	101

Lista de Figuras

2.1	Seleção econômica das brocas para o campo de <i>Blocker</i> , Texas, EUA	10
2.2	Perfil para seleção econômica de brocas e seus limites	11
2.3	Guia universal para seleção de brocas tricônicas	12
2.4	Guia de seleção de broca PDC	16
3.1	Grafo de Conhecimento Procedimental	24
3.2	Nó de agregação	25
3.3	Nó de decisão	26
3.4	Redes de Grafos de Conhecimento	27
4.1	Arquitetura do sistema	34
4.2	Ficha de Identificação	37
4.3	Ficha de registros das brocas utilizadas no poço hipotético 1-CAM-60	37
4.4	Ficha com as formações atravessadas e seus topos	38
4.5	Ficha de Identificação da Broca	39
4.6	Grafo para escolha dos poços de correlação	42
4.7	Grafo para análise de desgaste	44
4.8	Grafo de escolha de brocas	49
5.1	Visualização das formações atravessadas no Campo de Dourado	54
5.2	Recomendações para a broca 111C, fase de 17 ½ pol.	64
5.3	Recomendações para a broca 517, fase de 12 ¼ pol.	64
5.4	Recomendações para a broca 517, fase de 8 ½ pol.	65
5.5	Recomendações para a broca 527, fase de 8 ½ pol.	65
5.6	Fator de comparação para as brocas 517 e 527 de 8 ½ pol.	66
5.7	Visualização das formações atravessadas no Campo de Lambari	68
5.8	Recomendações para a broca 111, fase de 26 pol.	76
5.9	Recomendações para a broca 114C, fase de 14 ¾ pol.	76

5.10	Recomendações para a broca 111C, fase de 14 ¾ pol.	76
5.11	Recomendações para a broca 447, fase de 8 ½ pol.	76
5.12	Recomendações para a broca 116M, fase de 8 ½ pol.	76
5.13	Recomendações para a broca 517, fase de 8 ½ pol.	76
5.14	Fator de comparação para as brocas 114C e 111C fase de 14 ¾ pol.	77
5.15	Fator de comparação para as brocas 447, 116M, 517 fase 8 ½ pol.	77
5.16	Visualização das formações atravessadas no Campo de Cascudo	78
5.17	Recomendações para a broca 111, fase de 26 pol.	82
5.18	Recomendações para a broca 115, fase de 16 pol.	82
5.19	Recomendações para a broca 115M, fase de 16 pol.	82
5.20	Recomendações para a broca 116, fase de 12 ¼ pol.	82
5.21	Recomendações para a broca 116C, fase de 12 ¼ pol.	83
5.22	Recomendações para a broca 117M, fase de 12 ¼ pol.	83
5.23	Recomendações para a broca 517, fase de 12 ¼ pol.	83
5.24	Recomendações para a broca 111, fase de 12 ¼ pol.	83
5.25	Recomendações para a broca 517, fase de 8 ½ pol.	83
5.26	Recomendações para a broca 447B, fase de 8 ½ pol.	83
5.27	Fator de comparação para as brocas 115 e 115M fase 16 pol.	84
5.28	Fator de comparação para as brocas 116, 116C, 117M, 517 e 111 fase 12 ¼ pol.	84
5.29	Fator de comparação para as brocas 517 e 447B fase 8 ½ pol.	84

Lista de Tabelas

2.1	Relação entre a leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas apresentada por Dernbach	6
2.2	Relação entre a leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas apresentada por Pinheiros & Linhares	7
2.3	Fator de correção do tempo de trânsito em função do tamanho do grão	8
2.4	Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC com cortador de grande diâm.	16
2.5	Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC tipo rabo de peixe	17
4.1	Valores de confiança para o desgaste principal	46
4.2	Valores de confiança para o motivo da retirada da broca	48
5.1	Formações atravessadas e seus topos do Campo de Dourado	54
5.2	Análise do Grafo de Correlação para o Campo de Dourado	55
5.3	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 1	55
5.4	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 2	56
5.5	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 3	56
5.6	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 4	57
5.7	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 5	57
5.8	Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 7	58
5.9	Resultado da análise para o poço DRO 1	59
5.10	Resultado da análise para o poço DRO 2	60
5.11	Resultado da análise para o poço DRO 3	61
5.12	Resultado da análise para o poço DRO 4	62
5.13	Resultado da análise para o poço DRO 5	63
5.14	Resultado da análise para o poço DRO 7	64
5.15	Quadro de brocas utilizadas no poço projeto (DRO 6)	66

5.16	Formações atravessadas e seus topos do Campo de Lambari	67
5.17	Análise do Grafo de Correlação para o Campo de Lambari	67
5.18	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 1	68
5.19	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 2	69
5.20	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 3	69
5.21	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 4	69
5.22	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 5	70
5.23	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 6	70
5.24	Quadro de brocas utilizadas no poço LBR 7	70
5.25	Resultado da análise para o poço LBR 1	71
5.26	Resultado da análise para o poço LBR 2	72
5.27	Resultado da análise para o poço LBR 3	73
5.28	Resultado da análise para o poço LBR 4	73
5.29	Resultado da análise para o poço LBR 5	74
5.30	Resultado da análise para o poço LBR 6	75
5.31	Resultado da análise para o poço LBR 7	75
5.32	Quadro de brocas utilizadas no poço projeto (LBR 8)	77
5.33	Formações atravessadas e seus topos do Campo de Cascudo	78
5.34	Análise do Grafo de Correlação para o Campo de Cascudo	79
5.35	Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 1	79
5.36	Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 2	79
5.37	Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 3	80
5.38	Resultado da análise para o poço CSD 1	80
5.39	Resultado da análise para o poço CSD 2	81
5.40	Resultado da análise para o poço CSD 3	82
5.41	Quadro de brocas utilizadas no poço de projeto (CSD 4)	85

Nomenclatura

Letras Gregas e Latinas

θ	Ângulo de atrito interno	(graus)
α	Fator em função do tamanho do mineral da rocha	
τ	Tensão de cisalhamento no plano de falha	(N/m ²)
τ_0	Tensão de cisalhamento inicial	(N/m ²)
σ_1	Tensão de compressão	(N/m ²)
σ_3	Pressão de confinamento	(N/m ²)
ρ_b	Massa específica da amostra	(g/cm ³)
ΔP	Diferencial de pressão poço formação	(N/m ²)
Δt_s	Tempo de trânsito cisalhante	(μ seg/m)
Δt_c	Tempo de trânsito compressional	(μ seg/m)
b_i	Coefficiente adimensional	
C	Módulo de compressibilidade	(N/m ²) ⁻¹
CB	Custo da broca	(US\$)
C_f	Custo métrico	(US\$/m)
C_r	Taxa horária da sonda	(US\$/h)
D	Profundidade	(m)
D_b	Diâmetro da broca	(m)
E	Módulo de Young	(N/m ²)
E_s	Energia específica	(MJ/m ³)
F	Intervalo perfurado	(m)
F_j	Força nos jatos da broca	(N)
H	Altura do dente normalizado	(/8)

K	Constante = 0,00235	
N	Rotação da broca	(rpm)
R	Taxa de penetração	(m/h)
Sc	Tensão à compressão da rocha	(N/m ²)
Sh	Índice de argilosidade	(%)
Tb	Tempo de broca de fundo	(h)
Tm	Tempo de manobra	(h)
W	Peso sobre broca	(KN)
tf	Maior diferença entre os topos das formações comuns entre o poço projeto e correlação (m)	
nf	Números de formações previstas no poço projeto	
ni	Número de igualdades de formações entre o poço correlação e as previstas no poço projeto	
d	Desgaste da estrutura cortante [0,8]	
MP	Metragem de projeto	(m)
MM	Metragem mínima	(m)
MB	Metragem da broca	(m)
MT	Melhor taxa de perfuração de uma dada fase (m/h)	
IB	Idade da broca	(anos)
la	Diferença de lâmina d'água	(m)
CM	Custo médio da broca para um dado diâmetro (US\$)	

Siglas

CEC	<i>Cation Exchange Capacity</i>
IADC	<i>International Association of Drilling Contractors</i>
PDC	<i>Polycrystalline diamond compact</i>
TSP	<i>Termally stable sinthetic diamond curtters</i>
LFN	Linguagem Formal Nebulosa

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos Gerais

Existem na literatura várias aplicações de técnicas de Inteligência Artificial na resolução total ou parcial de problemas práticos e significativos encontrados no comércio, indústria e nos diversos ramos da atividade humana. Esta lista de aplicações é extensa e crescente, várias citações são facilmente encontradas na literatura relacionadas a diversas áreas: médico, militar, engenharia, etc. Como o caso PROSPECTOR, Duda et al. (1979), que dá conselhos sobre exploração de minerais, o DESIGN ADVISOR, Steele et al. (1989), que avalia projetos de *chips* e o MYCIN, Shortliffe (1976), que diagnostica doenças infecciosas.

No ramo do Petróleo existe um grande potencial no uso destas técnicas, principalmente o de sistemas especialistas. Na Petrobras há aplicações de IA na resolução de problemas em plantas de processo, bombeamento mecânico, no gerenciamento de operações de completação entre outros. Especificamente na perfuração a técnica pode ser aplicada com sucesso no diagnóstico de falhas, seleção de brocas e seleção de elementos de coluna de perfuração, Sato (1992).

No caso da otimização da escolha das brocas a serem utilizadas em um poço de petróleo, o processo de seleção na prática se baseia em poços de correlação e na experiência pessoal em acompanhamentos de brocas em diversas situações, bem como a escolha adequada dos poços de correlação, que também depende do "sentimento" do técnico. Esta

característica do processo de seleção é possível de se implementar usando técnicas de Inteligência Artificial, proporcionando assim uma preservação deste conhecimento.

Existem os métodos analíticos para se realizar a seleção das brocas, mas sua utilização é uma tarefa árdua devido à complexibilidade do problema e da dificuldade na sua modelagem. E ainda, dificuldade na obtenção dos parâmetros envolvidos, tais como dureza e abrasividade das formações, fluido de perfuração, considerações direcionais, tamanho da broca, etc.

1.2 Principais Objetivos

O objetivo do presente trabalho é a estruturação organizada do conhecimento especializado no processo de seleção de brocas, assim como a sua manutenção e preservação automatizada. A preservação deste conhecimento será realizada na forma de grafos de conhecimento baseado em redes neurais e lógica nebulosa, Rocha (1992).

Esta técnica serviu de base para montar a arquitetura de um sistema inteligente para o auxílio na escolha de brocas em perfurações de petróleo, sendo possível também a sua utilização para o treinamento de novos técnicos da área de perfuração. O sistema foi testado em 3 regiões diferentes, com dados reais onde os nomes dos campos e poços são tomados de forma fictícia.

1.3 Justificativa

A experiência adquirida por uma pessoa em seu ramo de atuação é obtida com a convivência em sua atividade. Com o passar do tempo o seu desempenho melhora e ela passa a resolver problemas mais sofisticados, ou seja, o indivíduo consegue identificar as variantes mais relevantes que estão envolvidas na sua atividade e a relacioná-las de maneira mais eficiente para solucionar problemas específicos. O sujeito passa a ter uma espécie de "sentimento", uma intuição apurada para seu ramo de atuação sem perder a racionalidade, ou seja, possui uma habilidade de equilibrar um planejamento calculado com ações intuitivas.

No entanto, para uma pessoa atingir este estágio é necessário um tempo razoável de vivência na sua atividade e seria sem dúvida desejável transmitir esta experiência para outros membros da comunidade e aos ingressantes no assunto. Entretanto, sem uma maneira eficiente de representar tal conhecimento, informações são perdidas no processo de transmissão.

Textos escritos em linguagem natural são ineficientes para representar as relações de variantes possíveis e suas conseqüências em problemas específicos. Na linguagem natural é relativamente fácil representar um fato estático e encadeamento diretos, mas é extremamente difícil representar todas as relações deste fato com o domínio, ou seja, é relativamente fácil representar um procedimento operacional através de textos, mas é extremamente difícil representar todas as variantes possíveis, suas conseqüências, quando aplicá-las, bem como explicar cada rotina operacional em detalhes, que em última análise, são experiências acumuladas por especialistas. O grafo de conhecimento, representação desenvolvida por Rocha (1992), parece ser suficientemente eficiente para representar tal conhecimento.

No caso de seleção de brocas o grafo de conhecimento possui outras vantagens em relação aos métodos analíticos. Ele pode considerar com facilidade todos os parâmetros envolvidos no processo de seleção de brocas através da análise de resultados obtidos no campo (reais). Métodos que envolvem modelos matemáticos tem dificuldade na consideração de todos estes parâmetros, simulando-se assim a realidade com bastante limitação. E ainda as informações nos formatos necessários para estes modelos, muitas vezes são caras e difíceis de serem obtidas.

Por exemplo em casos comuns que acontecem na prática como problemas de encerramento, cone quebrado ou perdido são informações muito relevantes e consideradas nas redes neurais para a análise de casos de campo no processo de escolha de broca. O uso de métodos analíticos é bastante limitado para analisar tais problemas considerando-os num processo de escolha de brocas.

Vale ressaltar que os métodos analíticos não consideram todos os parâmetros envolvidos no problema muitas vezes por uma dificuldade matemática. O cálculo destes

parâmetros podem ser bastante complexos, sendo considerados normalmente aqueles que se julga mais importantes, simplificando-se assim o modelo. Portanto, estas simplificações limitam o modelo incapacitando-o para analisar casos de maneira desejável.

Capítulo 2

Métodos de Seleção de Brocas

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para a familiarização dos conceitos envolvidos no processo de seleção de brocas e para se conhecer o que há de disponível na literatura neste sentido.

2.1 Método de Dernbach

Dernbach (1989) propôs um método para seleção de brocas tricônicas com o auxílio do perfil sônico e do *gama-ray* para a obtenção da porosidade total e o índice de argilosidade, respectivamente.

Ele dividiu as rochas em 3 grupos: folhelho, arenito e carbonatos (calcáreo, dolomita, anidrita ou suas combinações).

O índice de argilosidade é calculado com a expressão:

$$Sh = \left(\frac{cg - ag}{bg - ag} \right) \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde:

Sh = índice de argilosidade (%).

bg = leitura máxima no *gama ray*.

eg = leitura no *gama ray* no intervalo de interesse.

A seleção da broca é realizada em função da porosidade, tempo de trânsito e litologia. A Tabela 2.1 é a tabela proposta por Dernbach.

Tabela 2.1: Relação entre a leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas apresentada por Dernbach.

Leitura do sônico ($\mu\text{seg/pé}$)	Tipo de broca (IADC)	Argilosidade Litologia
65-70 70-75 72-85 75-80+	2 1 1 3 1 2 1 1	formações superficiais argilosas e/ou pouco consolidadas
80+ 75+ 70+ 65+ 60-65 55-60	5 1 5 3 6 1 6 3 7 3 & 3 1 8 3 & 3 4	0-20%
70+ 65+ 60+ 60	5 1 5 3 6 1 6 3	20-30%
65+ 60+	5 1 5 3	30-40%
47-65 58-65 65+	6 3 6 1 5 3	calcáreo dolomita

Pinheiro & Linhares (1984) empregaram este método na Bacia de Campos e propuseram uma tabela para escolha de brocas tricônicas já adequada para a região em questão.

Tabela 2.2: Relação entre a leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas apresentada por Pinheiro & Linhares.

leitura do sônico (μ seg/pé)	tipo de broca (IADC)	argilosidade litologia
65-70 75-85 85-95 95+	2 1 ou 5 1 1 3 1 2 1 1	formações superficiais argilosas e/ou pouco consolidadas
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 anidrita
60+ 55-60	5 1 5 1	basalto

2.2 Método de Mason

Mason (1987) baseado em estudos experimentais correlacionou a tensão de compressão da rocha com o tempo de trânsito cisalhante. Este tempo de trânsito cisalhante sendo calculado a partir do tempo de trânsito compressional obtido do perfil sônico.

Em seus estudos foi mostrado que em formações diferentes podem ter o mesmo tempo de trânsito compressional, mas são melhores perfuradas com brocas diferentes. Portanto, a utilização do tempo de trânsito compressional requer o desenvolvimento do método para cada tipo de broca ou combinações litológicas. Logo, Mason (1987) propôs utilizar o tempo de trânsito cisalhante estimado a partir do tempo de trânsito compressional para evitar o efeito da litologia com a equação:

$$\Delta ts = \Delta tc \left(\frac{\Delta ts}{\Delta tc} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

onde:

Δts = tempo de trânsito cisalhante ($\mu\text{seg}/\text{m}$).

Δtc = tempo de trânsito compressional ($\mu\text{seg}/\text{m}$).

$\left(\frac{\Delta ts}{\Delta tc} \right)$ = valores tabelados para diversas litologias.

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

Os valores de alfa utilizados por Mason (1987) estão na tabela:

Tabela 2.3: Fator de correção do tempo de trânsito cisalhante em função do tamanho do grão.

Classificação de Wentworth Grão	Tamanho(mm)	Fator de correção da razão $\left(\frac{\Delta ts}{\Delta tc} \right)$, α (adimensional)
Silte	<1/16	0,90
Muito fino	1/16 a 1/8	0,95
Fino	1/8 a 1/4	1,00
Médio	1/4 a 1/2	1,05
Grosseiro	1/2 a 1,0	1,10
Muito Grosseiro	1,0 a 2,0	1,15
Granular	2,0 a 4,0	1,20
>Granular	>4,0	>1,30

Mason (1987) para correlacionar o tempo de trânsito cisalhante com a seleção da broca, identifica quais as brocas possuem o melhor desempenho através das formações perfuradas, isto é, quais brocas proporcionam as corridas mais econômicas através das litologias atravessadas.

Para se determinar tais brocas algumas hipóteses foram assumidas:

1. Que em algum momento da vida do campo, a melhor broca foi utilizada para perfurar determinado intervalo.
2. Que a broca foi operada em condições corretas.

3. O registro das melhores corridas estão disponíveis.

Logo para garantir que estas hipóteses sejam satisfeitas, a área de estudo para realização dos testes deveria possuir as seguintes restrições:

1. Campo muito perfurado nos últimos 5 anos.
2. Topo das formações basicamente no mesmo plano.
3. Litologia diversificada.
4. Otimização dos parâmetros hidráulicos e mecânicos alcançado.

O campo escolhido por Mason (1987) que melhor se encaixa nestas condições foi o campo de *Blocker*. Com o registro das brocas deste campo, foram eliminadas as brocas que perfuraram cimento, ferro e brocas com repassamento. O custo métrico do intervalo foi calculado com a seguinte expressão:

$$C_f = \frac{(T_m - T_b) \cdot C_r + C_B}{F} \quad (2.3)$$

onde:

T_m = tempo de manobra (h).

T_b = tempo de broca de fundo (h).

C_r = taxa horária da sonda (US\$/h).

C_B = custo da broca (US\$).

F = intervalo perfurado pela broca (m).

O código IADC das brocas foi mostrado num gráfico de profundidade de saída da broca versus custo por metro.

A Figura 2.1 mostra o gráfico de 35 poços estudados no campo de *Blocker*. As brocas mais econômicas aparecem mais a esquerda do gráfico podendo assim estabelecer quais as mais viáveis economicamente para um determinado intervalo e seu código IADC.

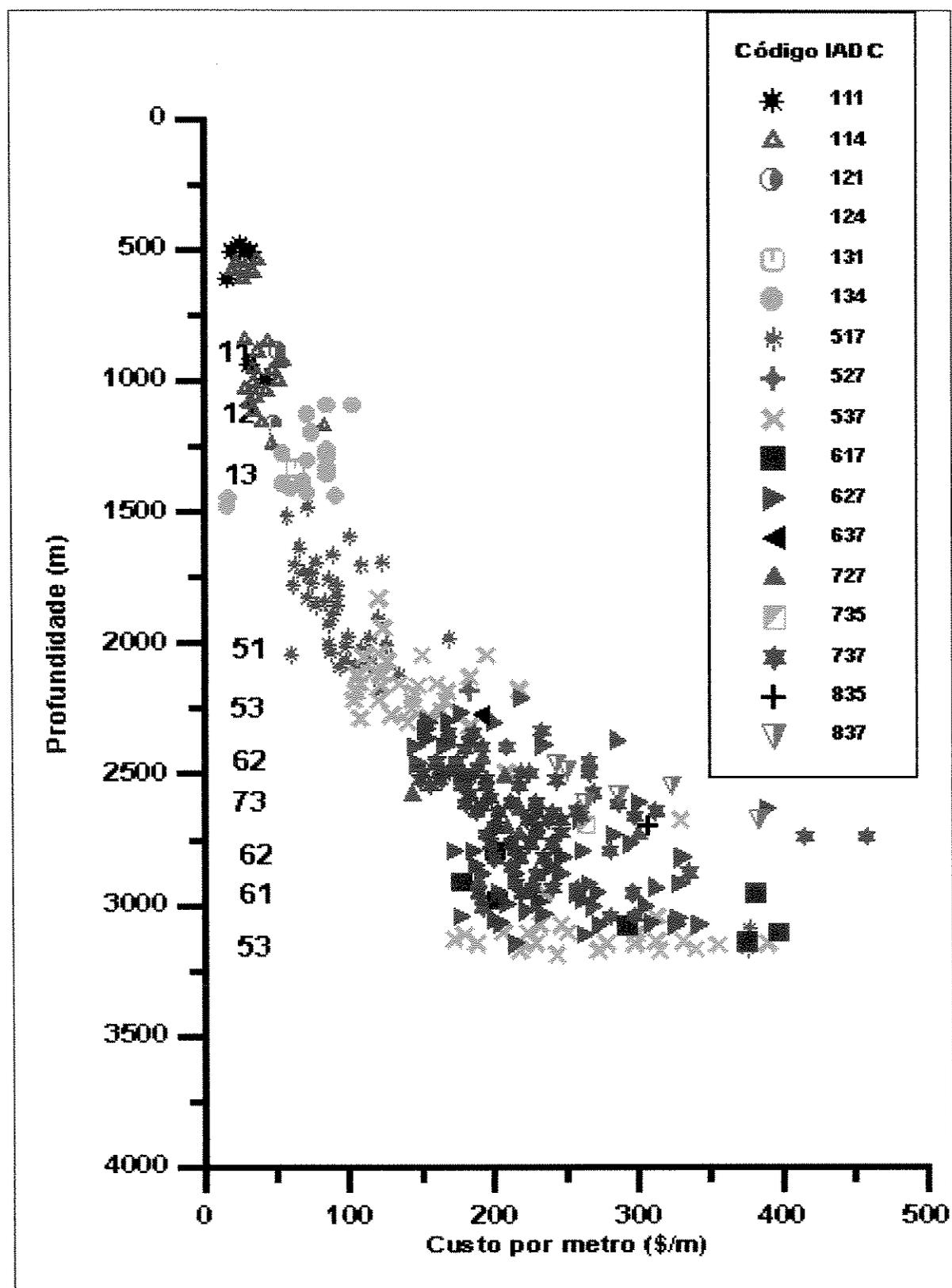


Figura 2.1: Seleção econômica das brocas para o campo de *Blocker*

Posteriormente, Mason (1987) transportou os intervalos para o gráfico de tempo de trânsito cisalhante versus profundidade.

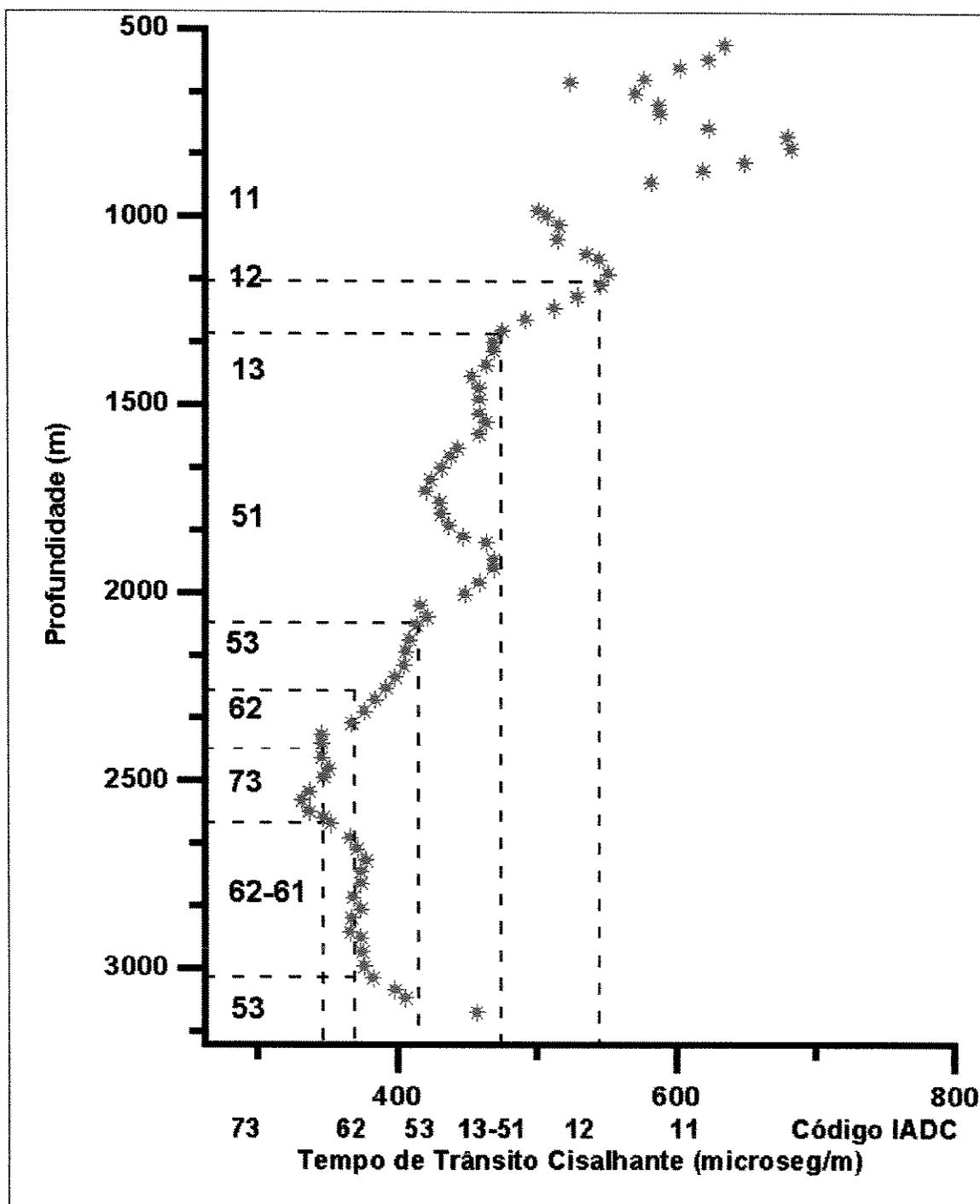


Figura 2.2: Perfil para seleção econômica de brocas e seus limites

As linhas pontilhadas na Figura 2.2 definem os intervalos onde um determinado tipo de broca teve a corrida mais econômica.

Ao final do seu trabalho Mason (1987) apresentou um gráfico correlacionando o tempo de trânsito cisalhante em função do tempo de trânsito do fluido contido nos poros da formação, com retas de resistência a compressão, dividindo os vários códigos IADC da broca recomendada (Figura 2.3).

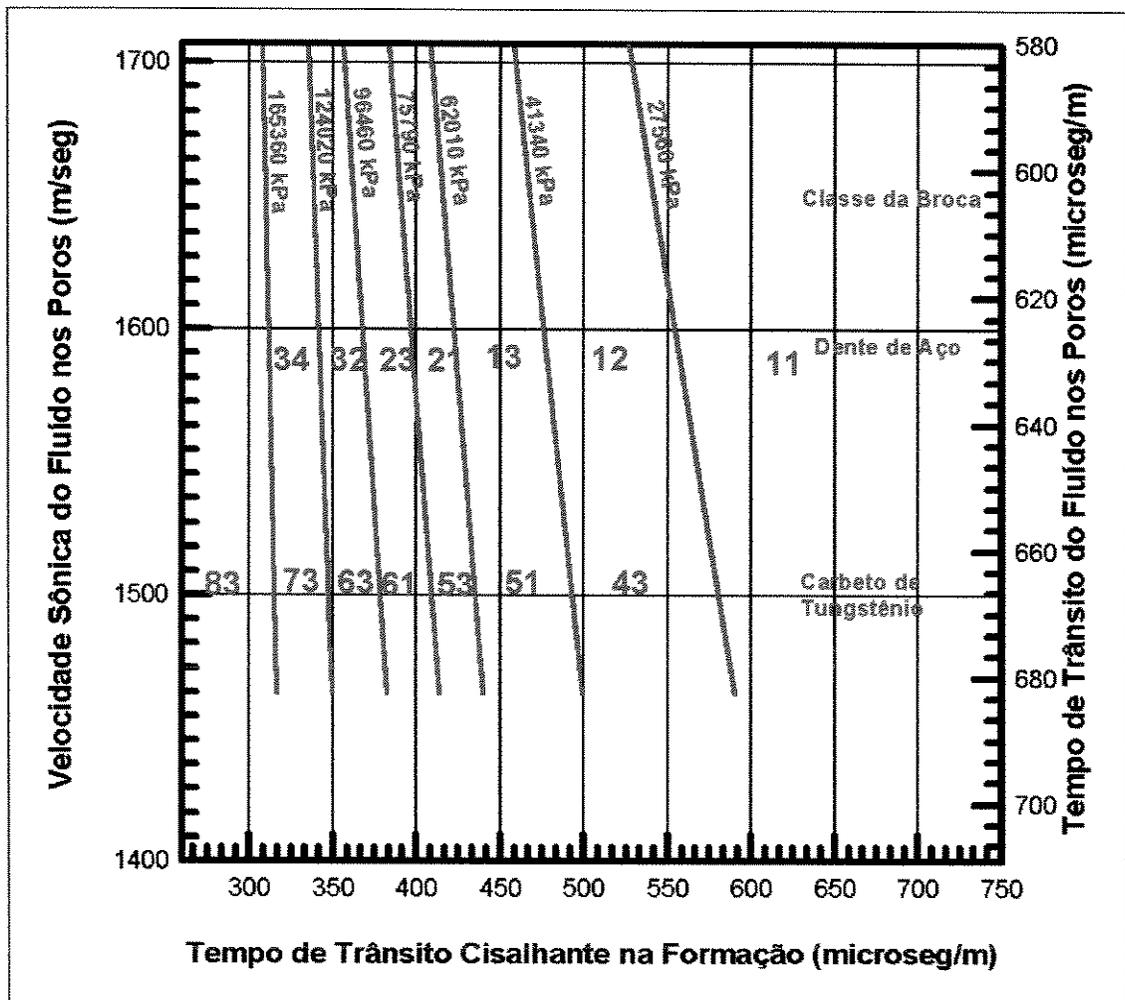


Figura 2.3: Guia universal para seleção de brocas tricônicas

2.3 Método da Energia Específica

Rabia (1985) propôs um método para seleção de brocas baseado no cálculo da Energia Específica. Com este método ele pode analisar o desempenho da broca evitando fatores não relacionados com sua *performance*, tais como tempo de manobra, custo horário da sonda, etc.

O cálculo da Energia Específica foi adaptado pelo autor ao mecanismo de corte das brocas de rolamento. Sua definição: energia necessária para remover um volume unitário de rocha.

A Energia Específica pode ser obtida através da equação:

$$Es = K \cdot \left(\frac{W \cdot N}{Db \cdot R} \right) \quad (2.4)$$

onde:

K = constante = 0,00235.

W = peso sobre broca (kN).

N = rotação da broca (rpm).

R = taxa de penetração (m/h).

Db = diâmetro da broca (m).

Es = energia específica (MJ/m³).

O valor de K não possui muita importância já que o comportamento da energia específica é mais importante que o próprio valor da mesma.

Após a utilização do método em poços nos Emirados Árabes e no Mar do Norte, o autor concluiu:

- Pode ser usada como medida do desempenho da broca.
- É compatível com o custo métrico.

2.4 Método de Ohara

Ohara (1989) adotou a proposta de Mason (1987) para fazer a escolha de brocas baseado em perfis sônicos. Ele montou um programa computacional para o cálculo da tensão de compressão em função do tempo de trânsito compressional e cisalhante.

Pela proposta de Mason (1987) pode-se chegar até 5 tipos de brocas tricônicas:

1. Broca de dente fresado com rolamento não selado.
2. Broca de dente fresado com rolamento selado.
3. Broca de dente fresado com rolamento *journal*.
4. Broca de inserto com rolamento *journal*.
5. Broca de inserto com rolamento selado.

Ohara (1989) propôs um novo modelo de perfuração desenvolvido através de uma análise dimensional considerando a resistência da compressão chegando a seguinte equação:

$$\frac{8,33 \cdot 10^{-2} \cdot R}{N \cdot Db} = \exp \left[\begin{array}{l} b_1 + \ln \left(\frac{W}{Sc \cdot Db^2} \right)^{b_2} + \left(-\frac{\Delta P}{Sc} \right)^{b_3} + \left(2 - \frac{D}{Db} 5,0 \cdot 10^{-5} \right)^{b_4} \\ + \ln \left(\frac{Fj}{Sc \cdot Db^2} \right)^{b_5} + \left(-\frac{H}{Db} \right)^{b_6} \end{array} \right] \quad (2.5)$$

onde:

b_i = coeficientes a determinar (adimensionais).

ΔP = diferencial de pressão poço formação (N/m^2).

D = profundidade (m).

Fj = força nos jatos da broca (N).

Sc = tensão à compressão da rocha (N/m^2).

H = altura do dente normalizado (/8).

Com este modelo, ele analisa os tipos de brocas possíveis, indicados no modelo de Mason (1987) e determina o tipo de broca que satisfaz a condição de menor custo métrico.

Ele aplicou o método em alguns poços na área de Alagoas concluindo que os resultados foram consistentes com relação à prática.

2.5 Método baseado no CEC

Goult et al.(1988) desenvolveram um trabalho no sentido de associar uma característica da formação ao desempenho da broca. O estudo foi realizado para a área do Golfo do México onde os autores apresentaram um guia para seleção de brocas PDC, correlacionando o tipo de broca com o valor do CEC (*Cation Exchange Capacity*). O CEC é uma medida da reatividade dos folhelhos ou capacidade de troca catiônica. Altos valores de CEC indicam tendência dos folhelhos tornarem-se plásticos por hidratação e nestes casos a remoção dos cascalhos torna-se mais difícil podendo causar o encerramento da broca.

O desempenho de brocas PDC foi relacionado com os valores de CEC do folhelho mostrando que quando estes valores diminuem, a taxa de perfuração aumenta. A medida do CEC pode ser feita na sonda ou em laboratório. Também é possível obter o valor do CEC através de perfis de *gama ray*.

Para o estudo as brocas foram divididas em três grupos:

1. Brocas PDC convencionais com cortadores de $\frac{1}{2}$ polegada.
2. Brocas PDC tipo rabo de peixe com cortadores de $\frac{1}{2}$ polegada.
3. Brocas PDC com cortadores de diâmetros maiores com um jato para cada cortador.

O guia proposto por Goult et al.(1988) está na Figura 2.4, há também as Tabelas 2.4 e 2.5 com os parâmetros hidráulicos recomendados para as brocas PDC com cortadores de maior diâmetro e rabo de peixe.

Este método é limitado por classificar todas as brocas PDC em apenas 3 categorias, pois dentro de cada categoria há brocas com projetos diferentes podendo fornecer resultados diferentes em função da litologia atravessada. No entanto, o método parece útil para a predição de quando se usar brocas PDC, qual categoria usar e dá uma estimativa dos parâmetros hidráulicos.

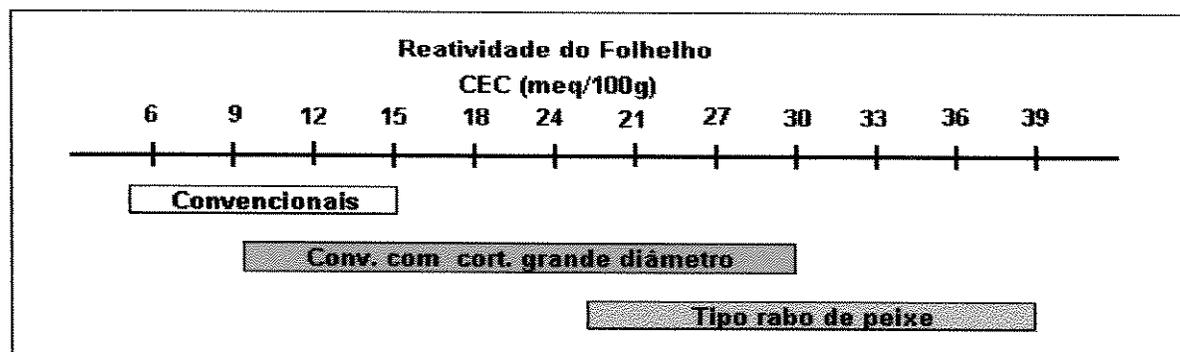


Figura 2.4: Guia de seleção de broca PDC

Tabela 2.4: Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC com cortador de grande diâmetro

Diâmetro da Broca (pol)	Parâmetros Hidráulicos	Faixas de CEC (meq/100g)		
		6 a 18	18 a 24	24 a 30
7 7/8 a 8 1/2	Recomendado, gal/min, hp/pol ²	450, 4.5	500, 5.0	550, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol ²	350, 2.0	400, 2.0	450, 2.5
9 7/8 a 10 5/8	Recomendado, gal/min, hp/pol ²	600, 4.5	650, 5.0	700, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol ²	550, 2.0	600, 2.5	650, 3.0
12 1/4	Recomendado, gal/min, hp/pol ²	700, 4.5	750, 5.0	800, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol ²	600, 2.0	700, 2.5	750, 3.0
14 3/4 a 17 1/2	Recomendado, gal/min, hp/pol ²	800, 5.5	850, 5.5	950, 6.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol ²	700, 2.0	750, 3.0	800, 3.5
		$1m^3 / s = 1,584 \cdot 10^4 (gal / min)$ $1KW / m = 8,651 \cdot 10^{-4} (Hp / pol^2)$		

Tabela 2.5: Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC tipo rabo de peixe

Diâmetro da Broca (pol)	Parâmetros Hidráulicos	Faixas de CEC (meq/100g)			
		6 a 18	18 a 24	24 a 30	30 a 39
>=6 3/4	Recomendado, gal/min, hp/pol2	180, 3.0	200, 3.0	225, 3.5	250, 4.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol2	150, 1.5	150, 1.5	180, 2.0	200, 2.5
7 7/8 a 8 1/2	Recomendado, gal/min, hp/pol2	350, 3.5	400, 3.5	450, 5.0	450, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol2	300, 2.0	350, 2.0	350, 3.5	400, 3.5
9 7/8 a 10 5/8	Recomendado, gal/min, hp/pol2	550, 3.5	600, 3.5	650, 5.0	750, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol2	500, 2.0	550, 2.5	600, 3.5	650, 4.0
12 1/4	Recomendado, gal/min, hp/pol2	650, 4.0	700, 4.0	750, 5.0	800, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol2	550, 2.0	600, 2.0	650, 3.5	650, 4.0
14 3/4 a 17 1/2	Recomendado, gal/min, hp/pol2	750, 5.0	850, 5.0	900, 5.0	1000, 5.0
	Mínimo, gal/min, hp/pol2	700, 2.0	750, 3.0	800, 3.5	900, 4.0
$1m^3 / s = 1,584 \cdot 10^4 (gal / min)$					
$1KW / m = 8,651 \cdot 10^{-4} (Hp / pol^2)$					

2.6 Método de Dumans

Dumans (1990) adaptou o método de Mason (1987) para o Brasil, mais especificamente para as áreas de Tubarão (Bacia de Santos) e Bacia de Campos. Ele verifica a validade do método nas áreas em questão propondo um programa de brocas para um poço de projeto e acompanhando o desenvolvimento das brocas sugeridas. Posteriormente, ele identifica os intervalos de resistência ao cisalhamento onde determinados tipos de brocas PDC apresentam menores custos por metro perfurado ou associa, na falta de dados, o código IADC de brocas tricônicas com PDC.

O roteiro seguido no seu trabalho para processo de escolha de brocas é composto das seguintes etapas:

1. Obter arquivo de perfis e identificar as litologias atravessadas.
2. Tabela os valores da relação $\left(\frac{\Delta ts}{\Delta tc}\right)$ para a área em estudo.
3. Calcular a tensão de cisalhamento inicial.
4. Estimar a pressão diferencial atuante no fundo do poço e assumir valores médios de ângulo de atrito interno.
5. Calcular a resistência à compressão da formação e a resistência ao cisalhamento no plano de falha.

6. Calcular o custo métrico perfurado pela broca.

7. Utilizar o guia de seleção de brocas tricônicas proposto por Mason (1987) e estabelecer intervalos de melhor utilização das brocas identificando seus códigos IADC.

Para o cálculo da resistência à compressão e da tensão de cisalhamento no plano de falha, Dumans (1990) utilizou o critério de ruptura de *Mohr-Coulomb* onde a coesão ou tensão de cisalhamento inicial é calculada a partir de um modelo empírico baseado na equação:

$$\tau_0 = \frac{3,77 \cdot E}{C \cdot 10^{12}} [0,008 \cdot Sh + 0,0045 \cdot (1 - Sh)] \quad (2.6)$$

onde:

τ_0 = tensão de cisalhamento inicial (N / m^2).

E = módulo de Young (N / m^2).

C = módulo de compressibilidade (N / m^2)⁻¹.

Os módulos de elasticidade e compressão foram calculados com as expressões:

$$E = \left(\frac{\rho b}{\Delta t s^2} \right) \cdot \left(\frac{3 \cdot \Delta t s^2 - 4 \cdot \Delta t c^2}{\Delta t s^2 - \Delta t c^2} \right) \cdot 9,94 \cdot 10^{14} \quad (2.7)$$

$$C = \left[\rho b \cdot \left(\frac{1}{\Delta t c^2} - \frac{4}{3 \Delta t s^2} \right) \cdot 9,94 \cdot 10^{14} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

onde:

ρb = massa específica da amostra (g/cm^3).

A resistência à compressão é estimada com a equação seguinte considerando-se o fluido como não penetrante.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \cdot \left[\frac{\tau_0 + \sigma_3 \cdot \tan \theta}{\cos \theta - \tan \theta + \sin \theta \cdot \cos \theta} \right] \quad (2.9)$$

onde:

σ_1 = tensão à compressão (N / m^2).

σ_3 = pressão de confinamento atuando no fundo do poço (N / m^2).

θ = ângulo de atrito interno (graus).

Dumans (1990) assumiu um valor de 3447 kPa (500 lb / pol^2) para o diferencial de pressão atuando no fundo do poço durante a perfuração.

Conhecendo agora os valores de σ_1 , σ_3 e θ ele determina o valor da tensão de cisalhamento atuando no plano de falha com a seguinte expressão:

$$\tau = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cdot \cos \theta \quad (2.10)$$

onde:

τ = tensão de cisalhamento no plano de falha (N / m^2).

Dumans (1990) concluiu que a utilização de equações que fornecem a resistência a compressão, sem especificar as condições em que as mesmas foram medidas, podem levar a resultados bastante diferentes dos resultados obtidos por outros meios, em condições conhecidas. Ele concluiu também que o uso da resistência ao cisalhamento indicou ser promissora, na identificação das características da formação, tendo a mesma refletido, de maneira atenuada, o comportamento da resistência à compressão.

2.7 Método de Falcão

Falcão (1991) com base em históricos e banco de dados de perfis de poço de brocas PDC, construiu um arquivo onde correlaciona-se o tipo de broca PDC e a resistência ao cisalhamento do intervalo onde ela foi utilizada juntamente com alguns parâmetros importantes como: intervalo perfurado, tempo de broca de fundo e custo da broca.

O método se baseia no cálculo da resistência ao cisalhamento para um intervalo, calculado da mesma maneira proposta por Dumans (1990) e em seguida estes dados são plotados num gráfico de resistência ao cisalhamento versus profundidade. Observa-se se neste intervalo a resistência ao cisalhamento pode ser considerada razoavelmente constante e caso isso se confirme e a broca utilizada tiver sido retirada por final da vida útil, coleta-se as seguintes informações: tipo de broca, diâmetro, custo da broca, intervalo perfurado e os parâmetros mecânicos e hidráulicos. Alimenta-se o arquivo e parte-se para a análise de outra broca.

Com estes dados é possível identificar os intervalos com resistência ao cisalhamento semelhantes em que determinado tipo de broca PDC apresentou melhor desempenho entre as outras que trabalharam nas mesmas condições. De posse da resistência ao cisalhamento das formações a serem perfuradas no próximo poço, obtidas através de perfil sônico do poço de correlação é possível indicar um programa de brocas mais adequado visando reduzir o custo da perfuração.

Falcão (1991) afirma que esta correlação não pode ser feita diretamente com o código IADC como foi utilizado por Mason (1987), pois o código não define o tamanho nem a inclinação de topo e lateral do cortador que tem grande influência no desempenho da broca. Logo estas brocas devem ser analisadas individualmente para se obter uma boa correlação.

Em seu trabalho ele também realizou algumas simulações onde ele fixava uma das variáveis entre custo horário da sonda e profundidade de entrada da broca e observava o comportamento da outra. Com isso ele concluiu que para o método proposto que não há a possibilidade de se obter um guia de seleção universal para brocas de PDC como o proposto por Mason (1987) para brocas de rolamento, pois para cada situação particular que está sendo analisada, ou seja, um custo horário de sonda e uma profundidade de entrada da broca, teríamos um guia de seleção que seria diferente caso alguns dos parâmetros anteriores fossem alterados, justificando em função disso, que a implementação do método só possa ser realizada através de um programa computacional.

2.8 Comentários

Com relação aos métodos analíticos existentes na literatura é importante verificar em que situações certas relações possuem validade. Como no caso da tensão de compressão, Spaar (1988) comenta em seu trabalho que a tensão de compressão é fortemente influenciada pelo ambiente de perfuração. Desde que ela não é uma constante, não pode ser comparada poço a poço. Ele afirma que para propósitos de seleção de brocas a tensão de compressão de não confinamento é superior a tensão de compressão confinada, pois esta é uma característica da rocha e permanece constante em condições de perfuração.

Outra questão importante são as correlações entre a resistência da formação com o perfil sônico. A velocidade da onda compressional é bastante sensível ao fluido da formação sendo preferível a utilização da velocidade da onda cisalhante onde esta influência é menor.

Outro parâmetro importante é a pressão de poros. Cunningham (1977) e Anderson (1990) mostraram que o diferencial de pressão entre a coluna de fluido de perfuração e a pressão de poros afeta mais a perfuração do que a tensão de *overburden*.

Voltando agora para o aspecto global dos métodos analíticos verifica-se que eles não tem sido utilizados no campo de forma assídua, basicamente porque são métodos caros que necessitam de informações que nem sempre estão disponíveis, como por exemplo dados de perfis sônicos e/ou *gamma ray*.

Na prática o técnico baseado em sua experiência e com as informações disponíveis, na maioria das vezes consegue montar um plano de brocas para um determinado poço de maneira mais rápida e barata do que se estivesse utilizando alguns dos métodos descritos anteriormente.

Em vista disto para este trabalho, os métodos analíticos foram deixados em segundo plano e a metodologia adotada foi no sentido de estruturar o conhecimento prático do

especialista com o objetivo de preservá-lo e servir de base para um sistema inteligente de seleção de brocas.

Capítulo 3

Grafo de Conhecimento

O grafo de conhecimento, Rocha (1992) e Miura (1991), é a representação de um processo de raciocínio baseado em redes neurais e lógica nebulosa. Ele mantém a compatibilidade com outras representações em grafos (tais como redes semânticas, roteiros, quadros e outros) para utilizar as características positivas destas representações, tal como a hereditariedade.

Mas ao contrário destas representações, seu mecanismo de inferência está baseado na confiança de vários caminhos concorrentes, cujos operadores são fornecidos pela lógica nebulosa, que possibilita o tratamento de incertezas.

O grafo de conhecimento pode ser interpretado como um processo de busca em um espaço de estados segundo Rich (1993), ou como um conjunto de proposições de lógica nebulosa, Zaded (1975), que podem ser resolvidas por Modus Ponens Generalizado. Por ser baseado, também, em redes neurais nebulosas, possibilita uma transcrição direta em sistemas especialistas nebulosos, Machado (1989) e (1990).

O grafo de conhecimento possui quatro níveis:

- Terminal: nível mais baixo, é responsável pela aquisição dos dados que serão propagados através do grafo.

- Associação: onde se dá a manipulação dos dados adquiridos no nível terminal.
- Decisão: responsável pela distribuição da sentença processada e é portanto responsável pela ativação da saída a ser associada de acordo com os dados obtidos no nível terminal e trabalhos no nível associação.
- Saída: responsável pela finalização da rede e sua possível conexão com as demais redes que compõem o raciocínio.

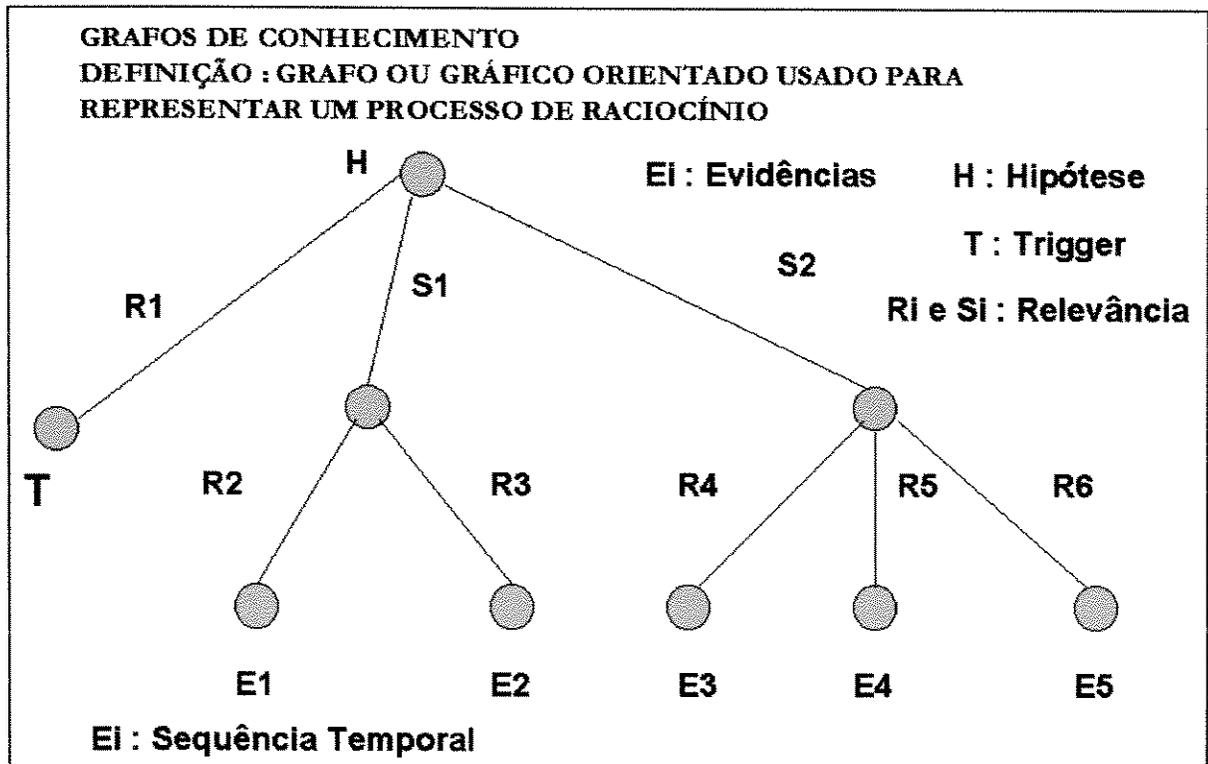


Figura 3.1: Grafo de Conhecimento Procedimental

O peso de um arco no grafo de conhecimento expressa a relevância da informação do seu nó terminal em suportar a decisão representada no nó raiz.

Nos nós intermediários (associação e decisão) são associados operadores lógicos para combinar as informações, que em termos de lógica nebulosa, são uma composição de operadores de agregação e projeção. Na operação de agregação pode ser usada qualquer

norma triangular; tais como: média máxima, produto e outros correlatos. Na operação de projeção, o valor da confiança é normalizado e projetado para um dos arcos que saem do nó.

Os nós de agregação representam variáveis nebulosas e aparecem em todas os grafos de conhecimento, são proposições do tipo $\{Y \text{ é } C\}$ (Figura 3.2). O Y é uma variável nebulosa ou linguística e o C um conjunto nebuloso ou linguístico.

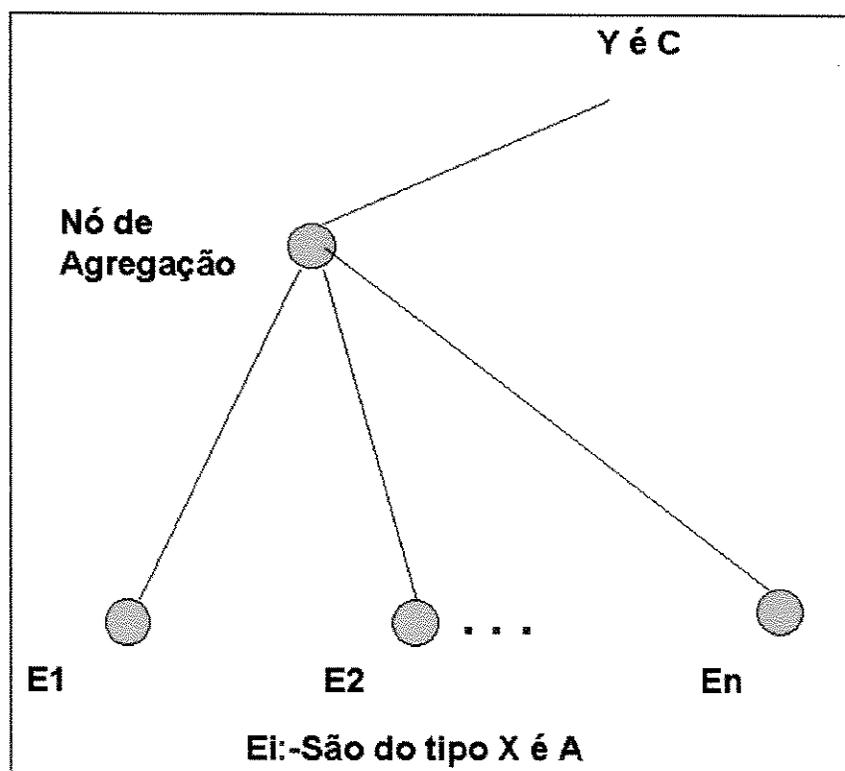


Figura 3.2: Nó de Agregação

Os nós de decisão apresentam variáveis do tipo linguística e aparecem nos grafos procedimentais, constituindo proposições do tipo $Y \text{ é } \{E, F, G\}$ (Figura 3.3).

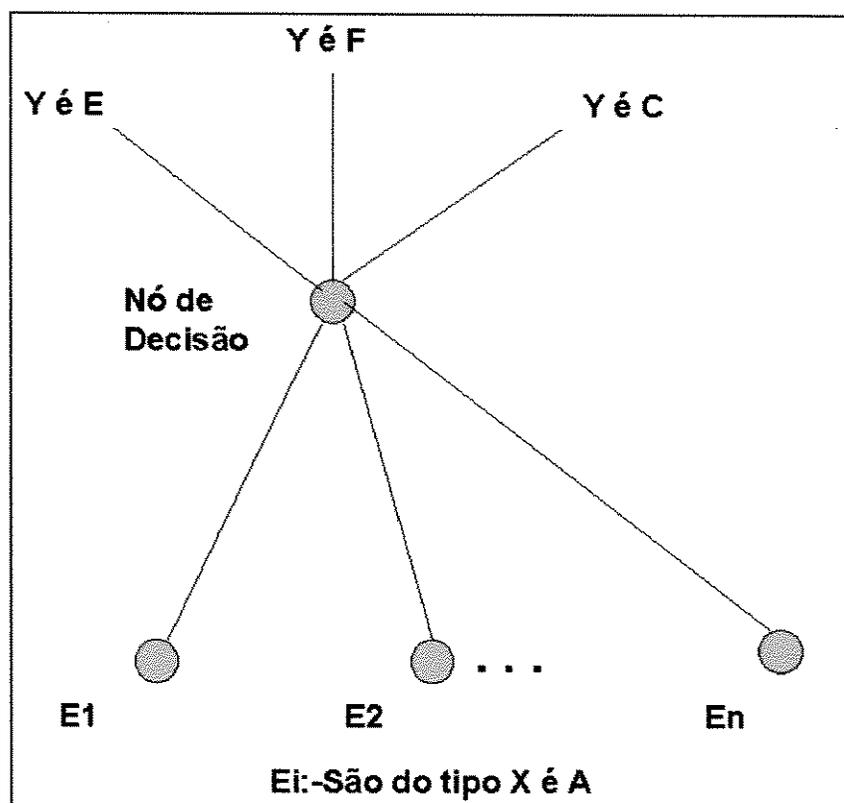


Figura 3.3: Nó de Decisão

No nó de agregação o valor da confiança é transmitido para todos os arcos deixando o nó.

No nó de decisão há um direcionamento do fluxo de processamento no grafo de conhecimento, o valor da confiança é recodificado nos diferentes rótulos linguísticos, e cada um destes rótulos são atribuídos a um dos arcos deixando o nó. O valor de confiança σ_b calculada no nó é usada para implementar proposições do tipo:

Dado: $\sigma_b = Q\{[(X \text{ é } A) \cdot w_1] \text{ e } \dots\}$.

Se $\alpha_{i-1} \leq \sigma_b \leq \alpha_i$.

Então Y é B, onde $B_i \in B$, são conjuntos de termos linguísticos associados a variável {Y é B}.

Como os nós de decisão podem direcionar o fluxo de raciocínio para outras hipóteses relacionadas, estes nós são elementos chaves para aglutinar os grafos de conhecimento numa rede de conhecimento de uma área de especialização (Figura 3.4). Neste caso, os nós de decisão podem direcionar o fluxo de raciocínio de um grafo para outro, sempre que a hipótese representada num grafo não tem sucesso na tentativa de prová-la.

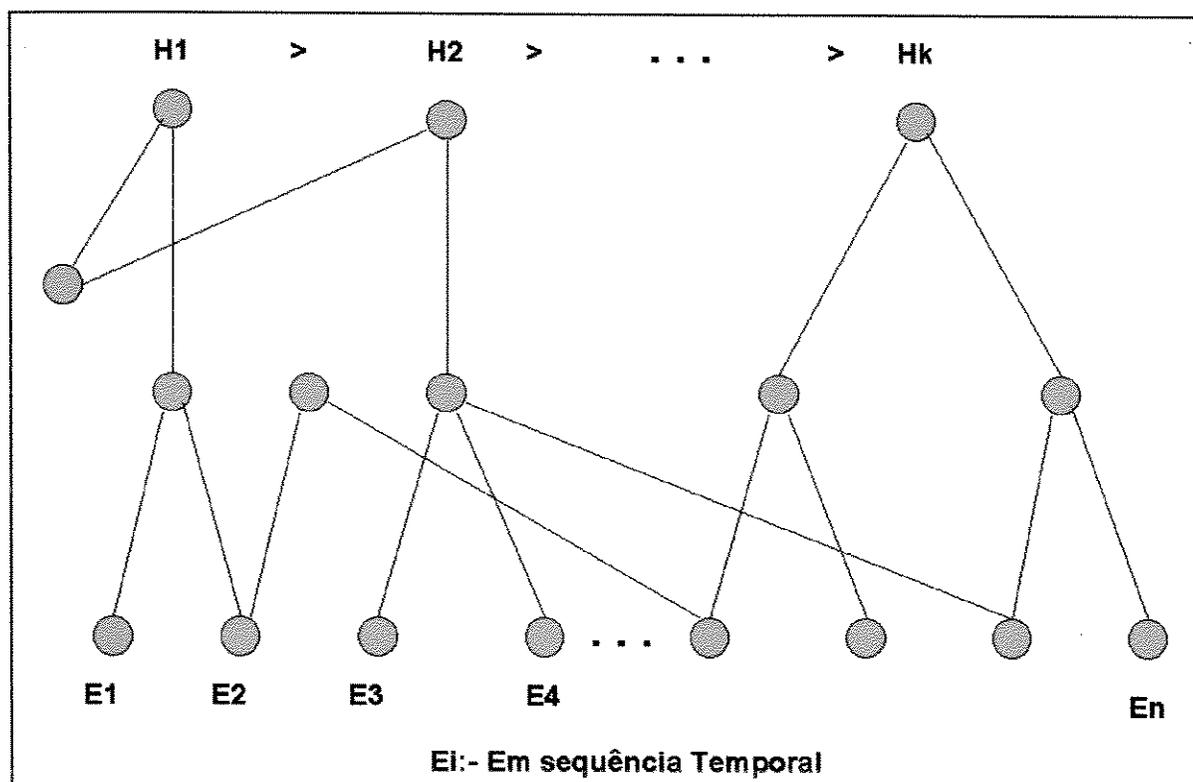


Figura 3.4 : Rede de Grafos de Conhecimento

O processo de inferência é feito pela propagação da confiança na informação coletada.

No nó de evidência são calculados ou atribuídos os graus de confiança.

A confiança nos nós intermediários é uma função do produto da relevância pela confiança.

A confiança no nó raiz é calculada como o máximo do produto da relevância pela confiança obtida entre os arcos que chegam ao nó.

A estratégia de controle numa base de conhecimento construída a partir de grafos de conhecimento seria:

Passo 1:-

Uma rede de grafos de conhecimento é selecionada, ativando-se o seu disparador (*trigger*) comum. Ativado o disparador, a hipótese (grafo) com arco de maior relevância, saindo do disparador e chegando a esta hipótese, é testado.

Geralmente, se escolhe como disparador uma classe de problemas ou de procedimentos similares. Esta classe pode ser definida, por exemplo: como um agrupamento de problemas (procedimentos) que ocorrem (são executados) numa determinada fase; ou como um agrupamento de um determinado tipo de problemas (procedimentos) que podem ocorrer em diversas fases.

A classe escolhida deve ser suficiente genérica para acionar todos os grafos correlacionados com o problema em análise, e suficientemente característico para não acionar a totalidade dos grafos da base de conhecimento.

Passo 2:-

Teste do grafo de conhecimento. Os rótulos dos nós de entrada deste grafo, são comparados com evidências disponíveis (processo de *matching*). Esta comparação é feita nó a nó, seguindo a disposição seqüencial dos nós. Para cada nó instanciado, o seu valor de confiança $[0,1]$ é propagado através dos arcos saindo de cada nó. Este ciclo termina quando a hipótese é confirmada pelas evidências, ou quando todos os nós terminais do grafo forem instanciados, mesmo que a hipótese não seja confirmada.

Passo 3:-

Se a hipótese for confirmada, a mensagem (diagnóstico, procedimentos, ou disparador para uma rede de grafos num nível elevado) é emitida e FIM.

Caso contrário (todos os nós terminais instanciados), a hipótese (grafo) com o arco com o próximo maior valor de relevância é testado (passo 2). Se todos os grafos da rede forem testados, e a hipótese não se confirmar, significa que não há conhecimento disponível para a solução do problema na base de conhecimento, e uma mensagem condizente deve ser emitida.

A seguir, algumas propriedades observadas na eliciação do conhecimento por Rocha (1985) e (1992).

Em entrevistas:

1. A complexibilidade do grafo está diretamente relacionada com a dificuldade do diagnóstico;
2. O grafo de conhecimento elaborado por especialista é menor e mais conciso que os grafos elaborados por não especialistas;
3. Os valores de relevância (peso) associados aos arcos quando fornecidos por especialistas são maiores que os valores fornecidos por não especialista;
4. Os valores de relevância aumentam a partir de nós terminais até a raiz com ganho na rede de modo tal que os valores atribuídos aos arcos que chegam ao nó raiz são maiores que o máximo de outros arcos (especialistas);
5. O especialista junta informações para ter um ganho de confiança na rede para a tomada de decisão. A agregação de cada nó intermediário é uma função não linear dos produtos da relevância por confiança de todos os arcos de entrada.

Em análise de textos:

1. Segundo Greco (1988), a probabilidade de uma frase ser lembrada é uma função linear da confiança média na frase, compartilhada pela população. Em geral, as pessoas lembram apenas das frases que tenham confiança maiores de 0,5.
2. Para Theoto o grau de dispersão do grafo médio não é alto, embora seja dependente do tipo do texto e da especialização da população alvo. Populações menos especializadas produzem grafos menores que populações bem treinadas.
3. O conteúdo dos grafos médios fornecem um texto médio que descreve a compreensão média do texto original, pela população entrevistada.
4. Os conteúdos dos textos médios estão correlacionados com o conhecimento prévio da população entrevistada.

A partir destas observações, podemos deduzir que um indivíduo se torna especialista numa determinada área, quando consegue acumular um certo número de conceitos do domínio em questão, e priorizar determinadas relações entre os conceitos, diminuindo as possibilidades combinatórias destes conceitos, a fim de melhorar a navegabilidade nesta rede de conceitos.

Os não especialistas, por sua vez, tendem a ter um foco mais disperso sobre as evidências disponíveis, por isso, têm que manter um número maior de relações, dificultando a navegabilidade na rede, e, como consequência, uma dificuldade em chegar-se à uma solução do problema.

Mas a principal característica que se obtém dessas observações, sobre grafos de conhecimento, é a entropia adequada para representar o conhecimento especializado e sua

facilidade de entendimento, e por conseqüência, a facilidade de transmissão do conhecimento de um indivíduo para outro.

Uma das vantagens dos grafos de conhecimento sobre outras representações é a capacidade de representar as agregações e projeções calculáveis (baseado na lógica nebulosa), que possibilita tratar as incertezas, descrito por Rocha (1992):

"Como a agregação é uma função não-linear e baseado na noção de "a maioria ou pelo menos N" dos arcos que chegam ao nó, é permitida a tomada de decisão sob a ignorância de alguns dados de entrada. Isto é muito importante, pois sempre que um dado de baixo custo, fornece alta confiança na decisão, testes caros e de risco podem ser evitados. Além disso, os casos atípicos podem ser reconhecidos, mesmo que alguma evidência esteja faltando."

Capítulo 4

Metodologia Adotada

Para a montagem de um sistema inteligente que auxilie no processo de seleção de brocas e que preserve o conhecimento especializado, foi empregado uma metodologia de desenvolvimento dividida nos seguintes módulos:

- Conhecimento para escolha de broca
- Estruturação do Sistema.
- Aplicação e análise dos resultados.

No módulo de aquisição do conhecimento, o objetivo é identificar o conhecimento exigido para a tarefa em questão e representá-lo na forma de Grafos de Conhecimento de tal forma que as informações requeridas possam ser acessadas rapidamente e processadas de maneira adequada nos processos de decisões. A elucidação deste conhecimento foi realizada por meio de entrevistas com um especialista no domínio da aplicação.

Após a aquisição do conhecimento, o sistema foi estruturado em um ambiente computacional adequado à esta atividade onde é organizada uma base de dados para a implementação dos Grafos de Conhecimento e sua navegação.

Terminado estes dois módulos o próximo passo foi testar o sistema com dados de campo e analisar os resultados verificando seu comportamento. No presente capítulo são tratados os módulos de aquisição de conhecimento e estruturação do sistema, sendo que a aplicação e análises dos dados são tratados nos capítulos posteriores.

É importante frisar que o método aqui proposto foi aplicado somente para brocas tricônicas, podendo ser facilmente estendido para outros tipos de brocas

4.1 Estrutura do Sistema

O sistema inteligente proposto orienta o técnico na montagem de um plano de brocas a serem utilizadas num poço projeto. Este sistema identifica os poços de correlação e faz uma análise do desempenho das brocas utilizadas nestes poços. Esta tecnologia é de uso recomendado em situações complexas que implicam em resultados razoáveis mas não necessariamente precisos. As principais partes do sistema é a base de conhecimento e a máquina de inferência. A base de conhecimento reúne todo o conhecimento na forma de informações importantes para a tarefa em desenvolvimento, enquanto a máquina de inferência representa a parte computacional através dos programas que detêm as inferências lógicas do sistema. Muitas vezes é necessário um banco de dados que fornece as informações necessárias para o seu funcionamento.

A arquitetura montada é baseada em 3 componentes:

- Banco de dados: fornecem as informações necessárias para o funcionamento dos Grafos de Conhecimento.
- Base de conhecimento: armazena o conhecimento especializado representado nos Grafos de Conhecimento.

- Máquina de inferência: processa o conhecimento especializado segundo as regras de navegação. Neste caso o sistema de inferência está codificado nos Grafos de Conhecimento quando sua navegação é realizada

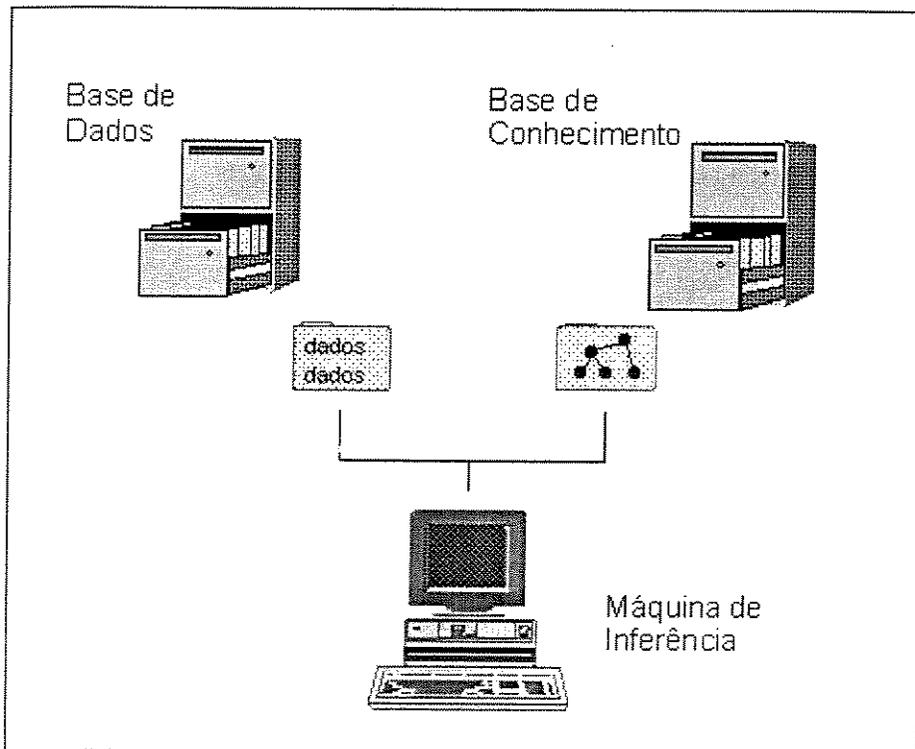


Figura 4.1: Arquitetura do Sistema

Para a montagem da estrutura do sistema e navegação dos grafos seria possível realizar a programação em qualquer linguagem como por exemplo o *Visual Basic*, linguagem C, Fortran, etc. Neste trabalho, foi escolhido o Sistema Kards devido às facilidades disponíveis neste sistema e por ser um ambiente próprio para este tipo de aplicação. Este sistema possui facilidades para implementar e manusear dados, representar o conhecimento especializado, simular o raciocínio através da navegação dos Grafos de Conhecimento, fazer o processamento sensorial dos dados adquiridos do ambiente externo (*scanner*, mesa digitalizadora), efetuar aprendizado e processar o jargão utilizado para comunicação em ambientes especializados.

O Sistema Kards foi estruturado nos seguintes módulos operacionais:

- Interpretador (Calculadora): interpretador interno que manuseia uma LFN (Linguagem Formal Nebulosa) booleana para que as máquinas nas quais o Kards é executado tenha um tratamento de uma LFN.
- Base de Dados: é organizado no conceito de armários, onde um armário contém gavetas, cada gaveta contém pastas e cada pasta contém fichas com dados.
- Raciocínio especializado (Quest): o conhecimento utilizado para interpretar um raciocínio é armazenado no sistema através dos Grafos de Conhecimento. Esses grafos são guardados em fichas do tipo rede de forma que o conhecimento pode ser armazenado num conjunto de sentenças associadas as distintas fichas de uma pasta.
- Jargão: módulo destinado a ajudar na análise do conteúdo de sentenças escritas em linguagem natural.
- Sensor: utiliza o conceito de redes neurais simbólicas ou numéricas para o reconhecimento de padrões de informações adquiridos de *scanner*, mesa digitalizadora, etc.

Para o sistema efetuar sua tarefa ele deve acessar uma base de dados com informações da história relevante do que foi realizado até o momento, ou seja, como o método de seleção de brocas proposto aqui é baseado em poços de correlação, é de suma importância o estudo do desempenho de brocas selecionadas em outros poços bem como a identificação destes poços (poços que melhor se correlacionam com o poço projeto). Logo esta base de dados deve conter informações que servirão de dados de entrada para o conhecimento especializado (Grafos de Conhecimento) realizar sua análise.

Para a montagem desta base de dados foram construídos 3 armários no Kards para acomodar tais informações. Um dos armários foi denominado de Armário Poço e está estruturado da seguinte maneira:

Armário Poço:

- As gavetas estão divididas com as iniciais dos campos a que pertencem os poços. Exemplo: para os campos hipotéticos Cação, Tainha e Camarão o armário apresentaria 3 gavetas com as iniciais CA, TAI, e CAM, onde cada gaveta conteria informações de poços pertencentes ao campo referente aquela gaveta.
- As pastas contidas em cada gaveta foram nomeadas com os nomes dos poços pertencentes a gaveta (campo). Exemplo: supondo que para gaveta CAM (Camarão) há um poço de nome 1-CAM-60, logo nesta gaveta haverá uma pasta de nome 1-CAM-60.
- Existem 3 fichas dentro de cada pasta com informações a respeito do poço referente. A ficha 1 denominada de Ficha de Identificação estão as informações gerais do poço como: nome do poço, sonda, utilizada para a perfuração, lâmina d'água, campo e ano. A ficha 2 estão os registros das brocas usadas neste poço e a ficha 3 estão as formações atravessadas naquele poço e seus topos.

Am: VERDCA&VPOCO Fe: 1- IDENTIFICAÇÃO
 Gav: CA Usr: 21 - 1-CAM-60

IDENTIFICAÇÃO

- 1- POÇO: 1-CAM-60
- 2- SONDA: 55-40
- 3- CAMPO: Camarão
- 4- ANO: 97
- 5- LÂMINA: 1000

Apaga a ficha 17:03 10-13-97

Figura 4.2: Ficha de Identificação

Am: VERDCA&VPOCO Fe: 2- REGISTRO DE BROCAS
 Gav: CA Usr: 21 - 1-CAM-60

	DIÂMETRO	TIPO	SÉRIE	RPM	PSB	PRESSÃO	VAZÃO	PL
01	26	M11	64168	80	10	3000	875	8,8
02	26	M11	64168	140	20	3000	1000	8,8
03	16	ATXCG1	D35CA	150	35	3200	750	9,2
04	12 1/4	ATJ1CS	P998X	120	30	2850	700	9,6
05	8 15/32	C201	82946	80	25	850	170	9,6
06	12 1/4	ATJ1CS	P998X	70	20	2400	650	9,6
07	8 15/32	C201	82946	60	20	350	150	9,6
08	12 1/4	MFD5HC	LE9017	120	50	3350	700	10

Apaga a ficha 17:05 10-13-97

Figura 4.3: Ficha de registros das brocas utilizadas no poço hipotético 1-CAM-60

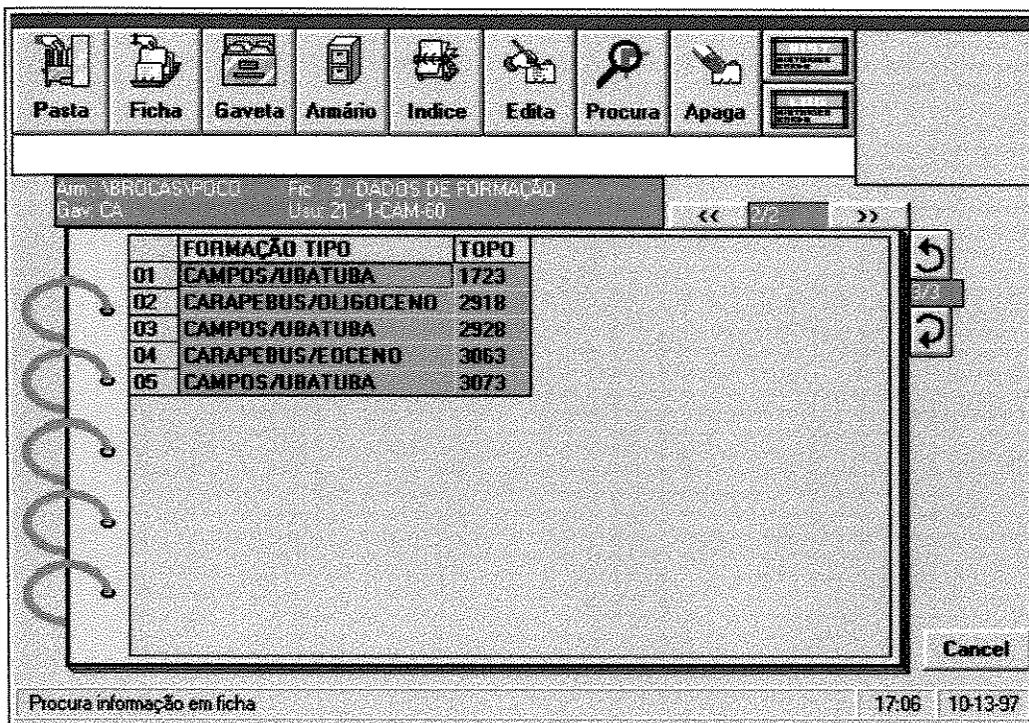


Figura 4.4: Ficha com as formações atravessadas e seus topos

O outro armário que foi montado no Kards foi denominado de Armário Brocas e possui a seguinte estrutura:

Armário Brocas:

- As gavetas estão em ordem alfabética.
- As pastas estão divididas em tipo de broca e diâmetro. Exemplo: para uma determinada pasta de uma dada broca ela seria nomeada como AG575-Diâmetro 12¼ (se essa fosse o caso).
- Cada pasta contém uma ficha com informações de fábrica, código IADC, custo e modelo.

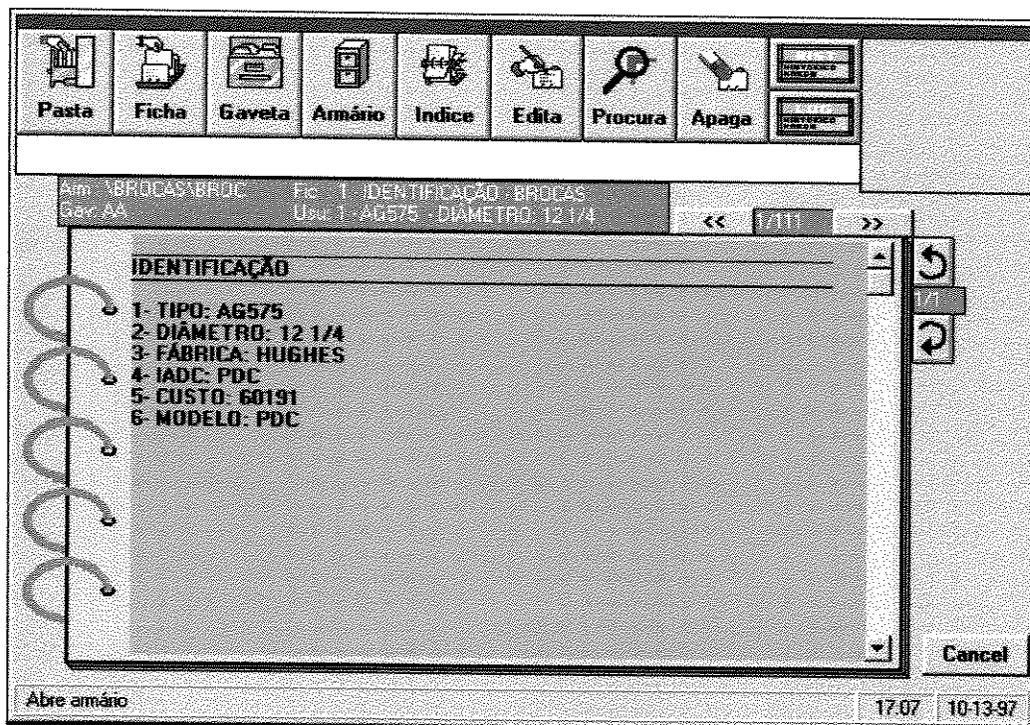


Figura 4.5:Ficha de Identificação da Broca

O terceiro armário é o Armário Projetos onde são colocadas as informações disponíveis dos poços a serem perfurados, como o topo das formações previstas, comprimento das fases, localização dos campos onde eles serão perfurados.

Armário Projetos:

- As gavetas e as pastas estão divididas da mesma maneira que no armário poço.
- Cada pasta contém 3 fichas de sendo uma a Ficha de Identificação com informações de campo e lâmina d'água. A ficha 2 estão os topos das formações previstas para o poço e a ficha 3 estão o comprimentos das fase a serem perfuradas. A estrutura destas fichas são semelhante as mostradas anteriormente.

No momento que se define o poço de projeto e aciona-se o Grafo de Correlação o sistema percorre a base de dados em busca dos poços de correlação. Ao final deste processo obtém-se uma listagem dos poços pesquisados e seu grau de afinidade com o poço de

projeto. Desta listagem separa-se aqueles mais afins, por exemplo os que foram classificados como BOM ou ÓTIMO, para fazer a análise do desgaste sofrido pelas brocas utilizadas (Grafo de Desgaste) e posteriormente a análise da metragem, taxa de penetração, custo da broca, idade da broca (Grafo de Escolha de Brocas).

Depois que os grafos percorrem todo a base de dados e realizam sua análise do desempenho das brocas, o que se tem no final é o grau de recomendação de cada broca utilizada nos diferentes poços de correlação para o poço de projeto.

4.2 Conhecimento para Escolha de Brocas

4.2.1 Estratégia de Abordagem (Entrevista)

O especialista utiliza-se de um vocabulário técnico denominado de jargão para falar de seu campo de especialização. A caracterização deste jargão pode ser feita para fornecer as evidências envolvidas no processo e no modelo de raciocínio deste especialista. portanto, é desejável a determinação destas evidências para serem utilizadas como os nós terminais na construção dos Grafos de Conhecimento.

A caracterização do jargão foi realizada por meio de entrevistas e para construção dos grafos colocou-se o entrevistado a par do funcionamento de grafos relacionados a outras áreas. Este cuidado foi tomado para evitar uma indução no processo de raciocínio do especialista. Para o presente estudo o conhecimento foi adquirido a partir de 1 especialista.

Notou-se que o uso desta representação é extremamente fácil de se aplicar em entrevistas e o especialista não tem nenhuma dificuldade na compreensão do seu funcionamento. Após o entendimento sobre grafos, a estratégia de abordagem adotada na entrevista seguiu os seguintes passos:

- Listar as informações necessárias para a tomada da decisão.

- Ordenar estas informações em ordem temporal e dar uma valor na escala de 0 a 1 para a importância desta informação para a decisão.
- Combinar estas informações (nós terminais) agrupando-as em nós intermediários de tal maneira que ele julga necessário para suportar a hipótese representada no nó raiz.

4.2.2 Construção dos Grafos de Conhecimento

A seleção da broca na prática é feita através de poços de correlação, ou seja, aquele poço já perfurado que serve de comparação ao poço a ser perfurado, aqui chamado de poço projeto. A escolha é feita através da análise dos registros de brocas utilizadas nestes poços de correlação. Logo a etapa inicial no processo de seleção de brocas é identificar os poços que melhor se correlacionam com o poço projeto.

Após esta etapa inicial, o processo é dividido em mais duas etapas. Na etapa seguinte faz-se um estudo do desgaste sofrido pelas brocas utilizadas nos poços de correlação e, na última etapa considera-se o restante dos parâmetros relevantes para a seleção. Portanto o conhecimento para escolha de brocas na perfuração no presente trabalho pode ser expresso através dos seguintes grafos de conhecimento:

- Grafo 1: construção de um Grafo de Conhecimento para identificar os poços de correlação.
- Grafo 2: construção de um Grafo de Conhecimento para análise do desgaste sofrido pelas brocas.
- Grafo 3: construção de um Grafo de Conhecimento que efetivamente recomenda ou não a broca para o poço projeto.

4.2.2.1 Grafo 1: Grafo de Poço de Correlação

O grafo de Poço de Correlação é construído através de entrevistas com o especialista e sua finalidade é a identificação dos poços de correlação (Figura 4.6).

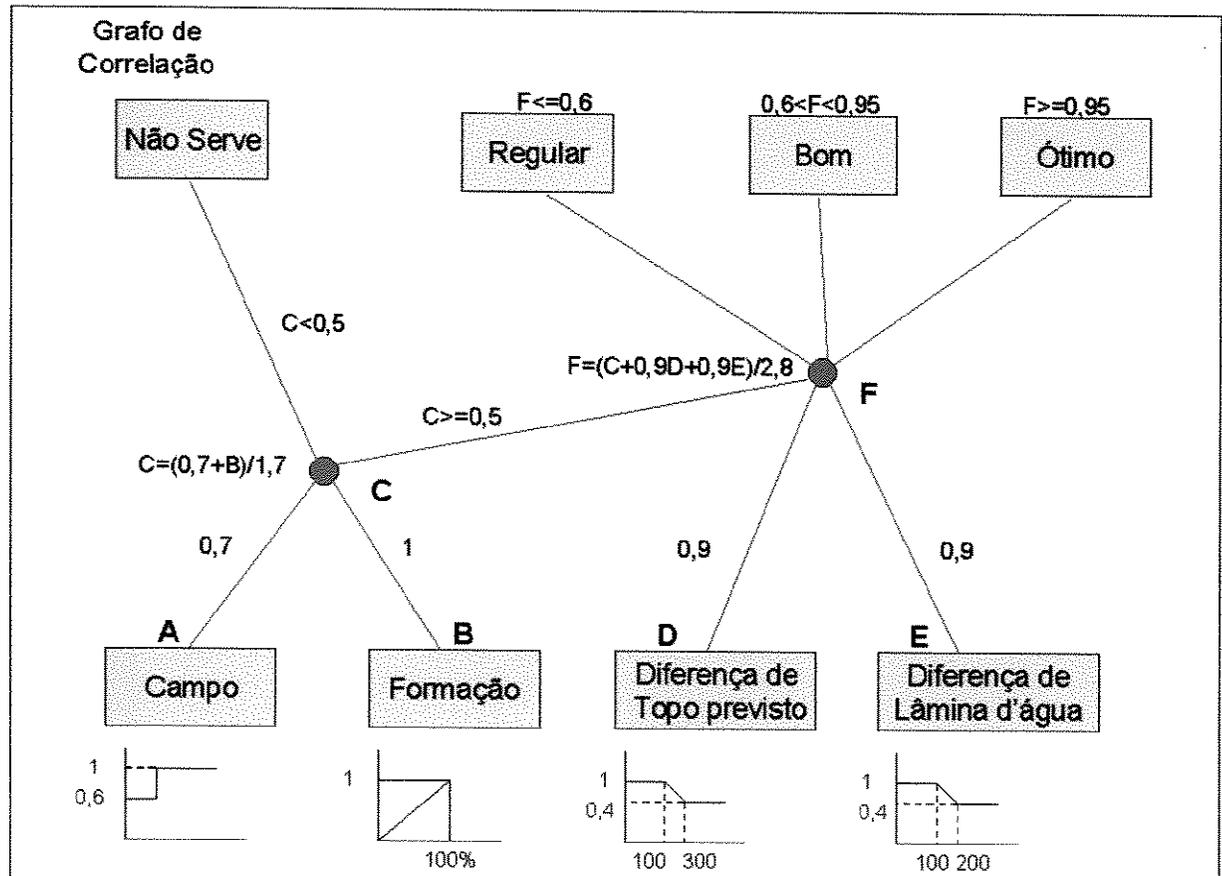


Figura 4.6: Grafo para a escolha dos poços de correlação

As evidências consideradas para identificar o grau de confiabilidade na classificação dos poços para correlação foram: Campo, Formação, Diferença de Topo Previsto e Lâmina d'água. Na realidade, estes parâmetros e o cálculo de suas confianças seguem conforme proposto no trabalho de Sato (1992). Neste trabalho, concluiu-se que os parâmetros e as confianças adotadas são bastante satisfatórios para seleção de brocas.

Na evidência Campo é feita uma comparação entre o campo a que pertence o poço projeto e os campos a que pertencem os poços de correlação, se o poço perfurado pertencer

ao mesmo campo do poço projeto, adota-se o valor de confiança 1, caso contrário o valor 0,6.

No caso da evidência Formação são comparados as igualdades entre as formações do poço projeto e os poços de correlação perfurados. O cálculo é feito da seguinte maneira:

1. Determinar o número de formações previstas no poço projeto (n_f).
2. Comparar as formações dos poços perfurados (n_i = número de igualdades).
3. Calcular a igualdade: $\%X = \left(\frac{n_i}{n_f} \right) \cdot 100$.
4. Calcular a confiança: $y = 0,01 \cdot (\%X)$.

Para a evidência Diferença de Topo Previsto é feita uma comparação (das formações comuns em ambos) entre os topos de formações do poço projeto e poços perfurados. É tomada a maior diferença encontrada para calcular a confiança:

$$\begin{cases} tf < 100m \rightarrow y = 1.0 \\ 100m \leq tf < 300m \rightarrow y = (260 - 0,6tf) / 200 \\ tf \geq 300m \rightarrow y = 0.4 \end{cases}$$

onde:

tf = maior diferença entre os topos das formações comuns entre poço de projeto e correlação (m).

Por último a diferença de lâmina d'água dos poços projeto e perfurado:

$$\begin{cases} la < 100m \rightarrow y = 1.0 \\ 100m \leq la < 200m \rightarrow y = (260 - 0,6la) / 200 \\ la \geq 200m \rightarrow y = 0.4 \end{cases}$$

onde:

la = diferença de lâmina d' água (m).

Para agregação dos nós intermediários foi utilizado conhecimento do especialista assim como as relevâncias atribuídas as ligações. No cálculo dos valores das agregações foi utilizada a promediação. Com este grafo os poços analisados são classificados em ÓTIMO, BOM, REGULAR e NÃO SERVE como correlação ao poço projeto.

4.2.2.2 Grafo 2: Grafo de Análise de Desgaste de Broca

Este grafo contém o conhecimento do especialista para a análise do desgaste sofrido pelas brocas utilizadas nos poços de correlação selecionados (Figura 4.7).

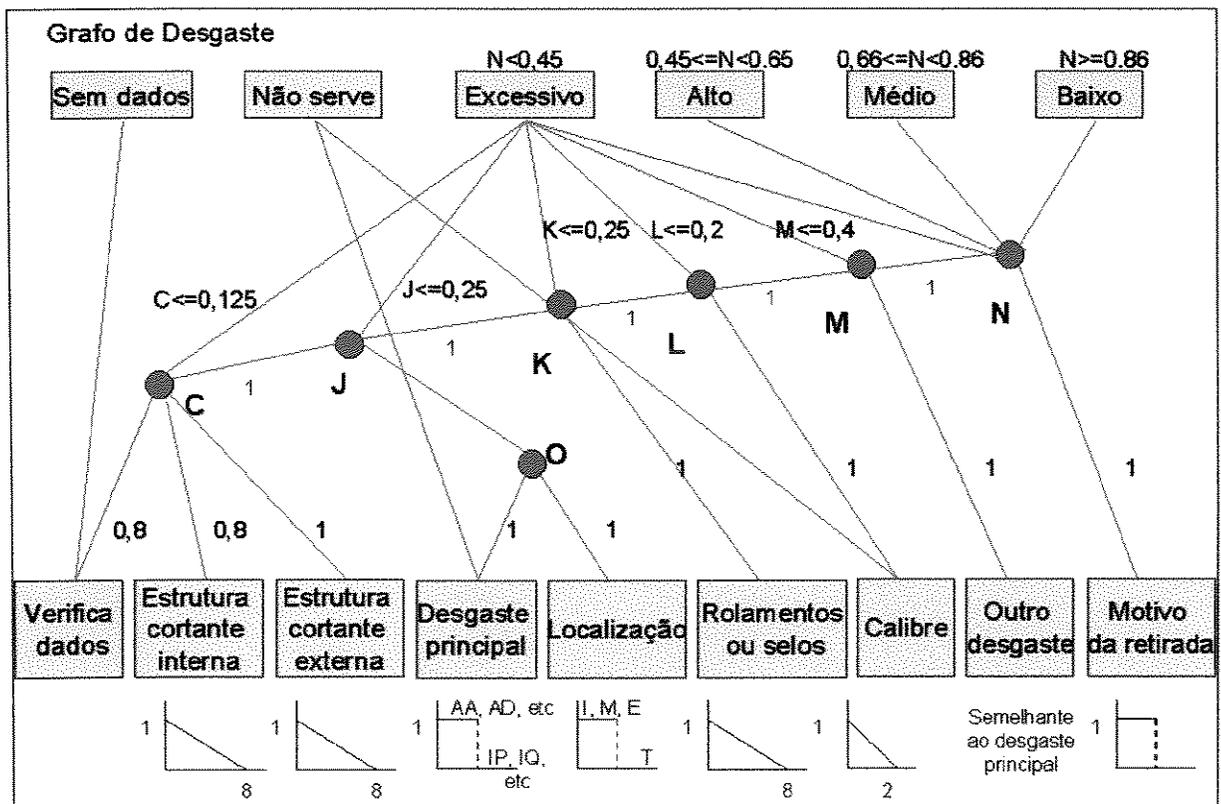


Figura 4.7: Grafo para a análise de desgaste

Este grafo utiliza como informações de entrada os dados do código de desgaste de brocas:

- **Verifica Dados:** para a análise do desgaste da broca, o código de desgaste deve conter pelo menos as colunas de Estrutura Cortante Interna e Externa, de Rolamentos ou Selos e por último a coluna de Calibre. Caso uma destas colunas estiver faltando, a análise fica muito comprometida e então é emitida uma mensagem de *Sem Dados*.
- **Estrutura cortante (interna e externa):** é desejável um desgaste uniforme dos cortadores durante a corrida da broca que é considerado no nó de associação **C**, para o cálculo da confiança do desgaste da estrutura cortante é proposta a seguinte relação:

$$y = -\left(\frac{1}{8}\right) \cdot d + 1$$

onde:

d = desgaste

- **Desgaste Principal (caracterização):** para esta informação foram atribuídos os seguintes valores de confiança para o código (Tabela 4.1):

Tabela 4.1: Valores de confiança para o desgaste principal

Código	Significado	Valor da Confiança (y)
<i>AA</i>	Desgaste por auto afiação	1
<i>AD</i>	Aba de peina desgastada	1
<i>AQ</i>	Aba de perna quebrada	0
<i>BE</i>	Bocal de jato erodido	1
<i>CA</i>	Cone com calibre arredondado	1
<i>CD</i>	Cone com desgaste descentralizado	1
<i>CE</i>	Cone erodido	0
<i>CI</i>	Cone com interferência	1
<i>DD</i>	Dentes desgastados	1
<i>DL</i>	Dentes lascados	1
<i>DP</i>	Desgaste plano nos dentes	1
<i>DQ</i>	Dentes quebrados	1
<i>DT</i>	Cone com desgaste por testemunho	1
<i>EG</i>	Desgaste por engrenagem	1
<i>EN</i>	Desgaste por enceramento	1
<i>ID</i>	Insertos/cortadores desgastados	1
<i>IG</i>	Insertos/cortadores girados	1
<i>IL</i>	Insertos/cortadores lascados	1
<i>IP</i>	Insertos/cortadores perdidos	0
<i>IQ</i>	Insertos/cortadores quebrados	0
<i>JP</i>	Jato perdido	0
<i>MA</i>	Marca em forma de anel	1
<i>MF</i>	Marca de ferro	1
<i>MI</i>	Marca de inserto	1
<i>NC</i>	Nenhuma característica de desgaste	1
<i>RR</i>	Broca reutilizável	1
<i>TR</i>	Cone travado	0
<i>TT</i>	Trinca no inserto ou desintegração do cortador por temperatura	0
<i>WO</i>	<i>wash-out</i> na broca	0

A erosão deve ser estudada como uma característica primária ou secundária. Se a estrutura cortante falha devido a erosão, pode ser caracterizado como um desgaste primário. Se há uma significativa erosão, mas não há perda da estrutura cortante, então deve-se determinar se a erosão é um desgaste primário ou secundário dependendo dos outros desgastes presentes

Nos casos onde há danificação do cone ou perna, faz se um cálculo do número de revoluções realizado pela broca e se for menor que o garantido pelo fabricante descarta-se a broca:

$$\left. \begin{array}{l} CP : Cone_perdido \\ CQ : Cone_quebrado \\ CT : Cone_trincado \\ PQ : Perna_quebrado \\ PE : Perna_empenada \end{array} \right\} rpm \cdot Tb \leq Re\ comendado \rightarrow y = N\ a\ o_Serve$$

Caso contrário: $y = 1$

onde:

rpm : rotação por minuto.

Tb : tempo de broca de fundo (h).

- Localização: adotou-se o seguinte cálculo para a confiança:

$$I = \text{fileira inteira} \rightarrow y=1$$

$$M = \text{fileira do meio} \rightarrow y=1$$

$$E = \text{fileira externa} \rightarrow y=1$$

$$T = \text{todas as fileiras} \rightarrow y=0$$

- Rolamentos ou Selos: para rolamentos não selados a confiança é calculada da mesma maneira que o desgaste:

$$y = -\left(\frac{1}{8}\right) \cdot d + 1$$

No caso de rolamentos selados temos:

$$E = \text{efetivos} \rightarrow y = 1$$

$$F = \text{falho} \rightarrow y = 0$$

- Calibre: para perda de calibre de 0 a 2 usa-se uma função linear para o cálculo da confiança, para perda maior que 2 a confiança é zero.

$$\begin{cases} 0 < perda_de_calibre \leq 2 \rightarrow y = \frac{1}{2} \cdot perda_de_calibre + 1 \\ perda_de_calibre > 2 \rightarrow y = 0 \end{cases}$$

- Outro desgaste: o cálculo é o mesmo do desgaste principal.
- Motivo da retirada da broca: foram atribuídos os seguintes valores:

Tabela 4.2: Valores de confiança para o motivo da retirada da broca

Código	Significado	Valor da Confiança (y)
AM	Aguardar melhoria de tempo	1
BF	Tempo de broca de fundo	1
CL	Para condicionar lama	1
CM	Aumento do custo/metro	0
DU	Por dúvida	1
EN	Broca encerada	0
FC	Falha da coluna	1
FF	Falha de ferramenta de fundo	1
FM	Falha do motor de fundo	1
FO	Para foto	1
JO	Jato obstruído	1
MB	Para mudança de BHA	1
MF	Mudança de formação	1
MP	Mudança de projeto	1
PE	Para perfilagem	1
PF	Profundidade final do poço ou fase	1
PP	Problemas do poço	1
QP	Por queda de pressão	1
RD	Reversão com desconexão	1
RS	Reparo da sonda	1
TE	Para testemunhar	1
TF	Para teste de formação	1
TO	Por torque	1
TP	Por taxa de penetração	0

Este grafo de conhecimento para análise de desgaste de broca apresenta 1 nó de associação (**O**) e 6 nós de decisão (**C, J, K, L, M, N**) que devem ser varridos para se chegar a um diagnóstico do desgaste sofrido pela broca.

A agregação da confiança em cada nó associativo ou decisão é realizada através da promediação ponderada usando-se como fatores de ponderação a relevância atribuída ao arco

de ligação entre os nós fornecido pelo especialista. O peso de cada ligação reflete a importância do mesmo na tomada de decisão.

4.2.2.3 Grafo 3: Grafo de Escolha de Brocas

As informações escolhidas para a navegação do Grafo de Escolha de Brocas foram: Metragem Mínima, Metragem da Broca, Taxa de Penetração, Desgaste, Custo da Broca e Idade da Broca. Com estas informações o grafo pode recomendar a broca para o poço de projeto com um certo grau de confiança ou não recomendar.

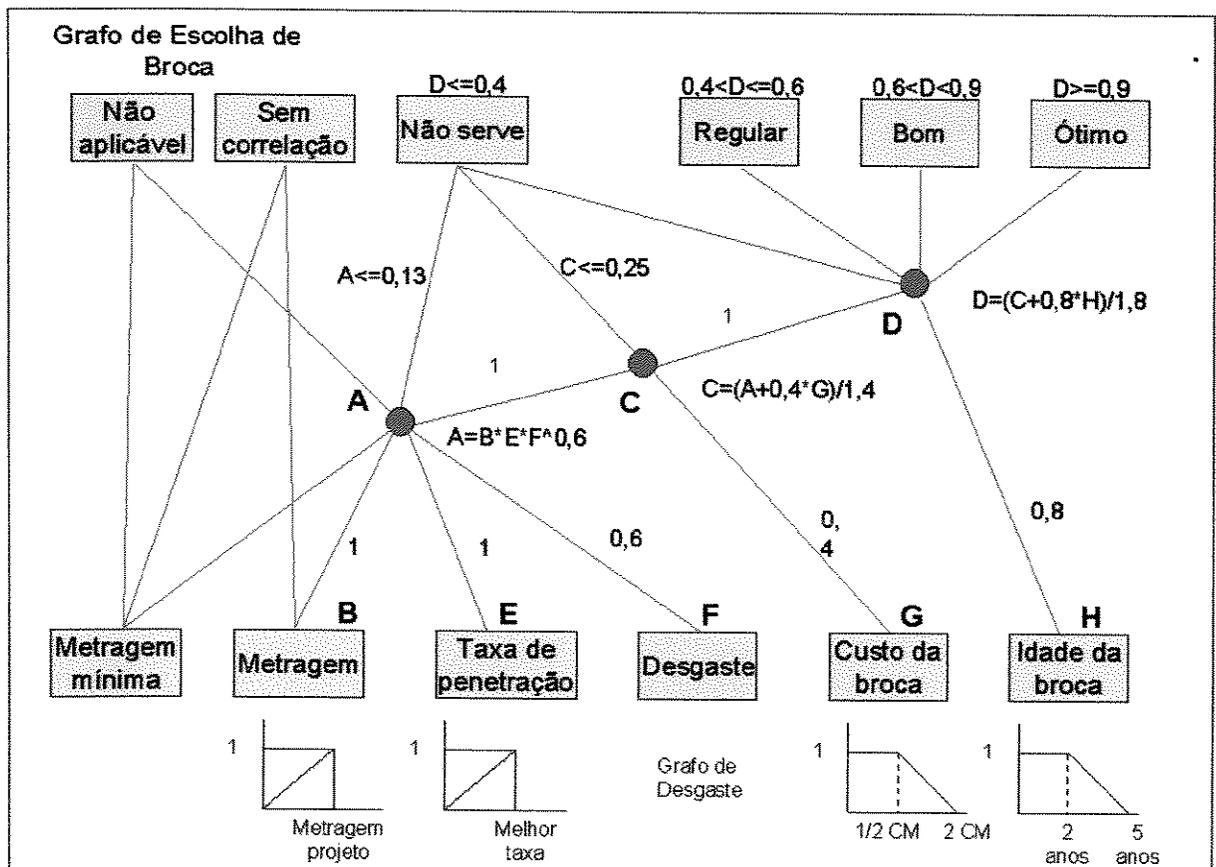


Figura 4.8: Grafo de escolha de brocas

- **Metragem Mínima:** neste nó é verificado se a metragem que a broca realizou é suficiente para a análise de seu desempenho. Muitas vezes a broca é retirada do poço por algum motivo não relacionado com sua *performance* antes que se

obtenha uma metragem relevante, prejudicando assim a sua conceituação no processo de tomada de decisão. Portanto, foi definido uma metragem mínima que está relacionada com a metragem da fase correspondente no poço de projeto:

$$\begin{cases} MP \leq 100 \rightarrow MM = 30 \\ MP > 100 \rightarrow MM = \frac{17}{90} \cdot MP + \left(30 - \frac{170}{9}\right) \end{cases}$$

onde:

MP = metragem de projeto (m).

MM = metragem mínima (m).

Caso a broca não tenha efetuado esta metragem mínima e então é emitida uma mensagem de *Não Aplicável*. Como este grafo foi construído para análise de somente brocas tricônicas, quando se tratar de brocas PDC ou Coroa é emitido uma mensagem de *Sem Correlação*.

- Metragem: caso a broca tenha efetuado uma metragem superior a mínima, esta metragem é comparada com a metragem da fase correspondente do poço projeto e calculada uma confiança. Quando não existe metragem correspondente para aquela fase no poço de projeto é emite-se uma mensagem de *Sem Correlação*.

$$\begin{cases} MB \geq MP \rightarrow y = 1 \\ MB < MP \rightarrow y = \frac{1}{MP} \cdot MB \end{cases}$$

onde:

MB = metragem da broca (m).

Por exemplo, se uma broca X de diâmetro 12 ¼ de polegadas perfurou 300 metros em um dado poço de correlação e a fase correspondente a aquele diâmetro no poço de projeto possui 900 metros então atribuída uma confiança de 1/3 à este nó.

- Taxa de Perfuração: para este nó a confiança é calculada comparando-se a taxa de perfuração da broca que está sendo analisada com a melhor taxa de perfuração obtida na fase.

$$\begin{cases} R \geq MT \rightarrow y = 1 \\ R < MT \rightarrow \frac{1}{MT} \cdot R \end{cases}$$

onde:

R = taxa de perfuração da broca (m/h)

MT = melhor taxa de perfuração da fase (m/h)

- Desgaste: a análise e o grau de confiança atribuído ao desgaste sofrido pela broca é realizado pelo Grafo de Desgaste apresentado anteriormente.
- Custo da Broca: neste nó é comparado o custo da broca utilizada com o custo médio das brocas para este diâmetro. A confiança atribuída é calculada conforme a seguir:

$$\begin{cases} CB < \frac{1}{2} CM \rightarrow y = 1 \\ CB > 2 \cdot CM \rightarrow y = 0 \\ \frac{1}{2} CM \leq CB \leq 2 \cdot CM \rightarrow y = \frac{2}{3 \cdot CM} \cdot (2 \cdot CM - CB) \end{cases}$$

onde:

CM = custo médio da broca para este diâmetro (US\$)

CB = custo da broca (US\$)

- Idade da Broca: devido ao constante processo de aperfeiçoamento das brocas no sentido de melhorar seu desempenho, não é desejável a utilização de brocas muito antigas que podem estar ultrapassadas tecnologicamente. Portanto, é atribuído um grau de confiança para broca baseado em sua idade:

$$\begin{cases} IB \leq 2\text{anos} \rightarrow y = 1 \\ IB > 10\text{anos} \rightarrow y = 0 \\ 2\text{anos} < IB \leq 10\text{anos} \rightarrow y = \frac{IB}{8} + \frac{5}{4} \end{cases}$$

onde:

IB = idade da broca (anos).

Os nós de associação e decisão foram agrupados conforme julgou o especialista necessário para a tomada de decisão, assim como as relevâncias atribuídas aos arcos. Para o cálculo da agregação da confiança no nó **A** (Figura 4.8) foi utilizado um produto e nos outros nós a promediação. Em cada nó de decisão é verificado se há condições de qualificar a broca para o poço de projeto, caso o processo de *matching* prosseguir até o nó de decisão final **D** a broca é classificada como ÓTIMO, BOM, REGULAR ou NÃO SERVE como recomendação ao poço de projeto.

Capítulo 5

Aplicações do Presente Sistema

O sistema desenvolvido foi testado em poços de 3 diferentes regiões de produção no País. Os nomes dos campos e poços são adotados de maneira fictícia.

Os campos onde o sistema foi aplicado são Dourado, Cascudo e Lambari.

5.1 Estudo de Caso 1: Campo de Dourado

No campo de Dourado foram selecionados 7 poços terrestres sendo o sexto (DRO 6) escolhido como sendo o poço projeto. A análise realizada pelo Grafo de Correlação julgou os poços como sendo de boa correlação ao poço DRO 6. Os topos das formações destes poços estão indicados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1. O resultado da análise do Grafo de Correlação está na Tabela 5.2.

Conforme podemos visualizar através da Figura 5.1, os poços de correlação realmente apresentam uma boa coerência entre si o que confirma os resultados indicados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Formações atravessadas e seus topos do Campo de Dourado

Formação	Topo das Formações (metros)						
	DRO 1	DRO 2	DRO 3	DRO 4	DRO 5	DRO 6	DRO 7
DRO/FM A	0	0	0	0	0	0	0
DRO/FM B	777	748	771	800	806	804	725
DRO/FM C	-	-	-	981	985	-	-
DRO/FM D	920	832	929	1023	1020	970	900
DRO/FM E	1548	1560	1708	1795	1697	1616	1606
DRO/FM F	1956	1956	-	2162	-	2184	-
DRO/FM G	1977	1961	-	2183	-	2186	-

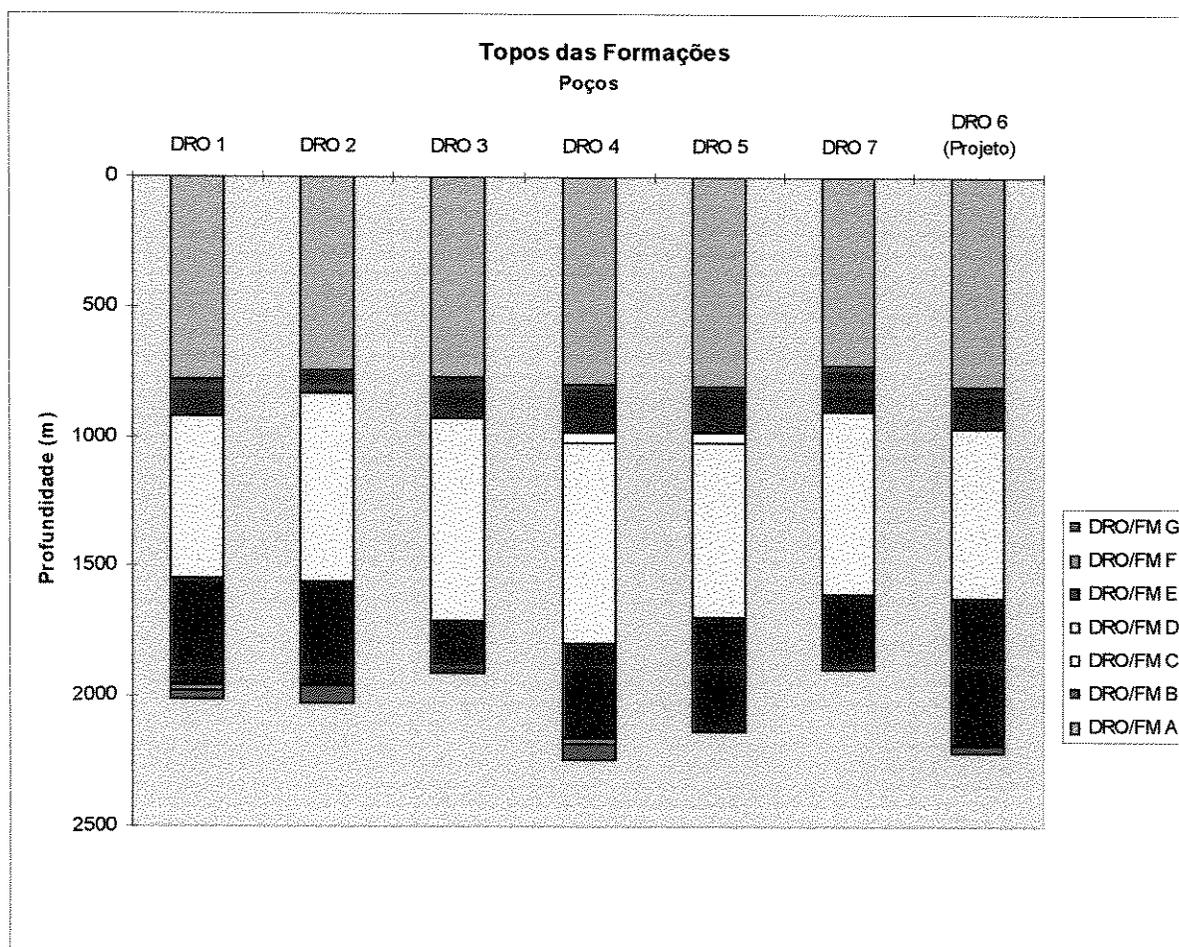


Figura 5.1 : Visualização das formações atravessadas no Campo de Dourado

Tabela 5.2: Análise do Grafo de Correlação para o Campo de Dourado.

Usuário	Gaveta	Poço	Correlação
10	AW	DRO 1	BOM
11	AW	DRO 2	BOM
12	AW	DRO 3	BOM
13	AW	DRO 4	BOM
14	AW	DRO 5	BOM
15	AW	DRO 7	BOM

Como foi exposto no capítulo anterior, a base de dados do sistema mimetiza armários de escritórios, portanto as duas primeiras colunas da Tabela 5.2 referem-se ao número do usuário e a gaveta a que pertence.

Após a verificação da correlação entre os poços, é necessário se fazer uma análise do desempenho das brocas utilizadas. Posteriormente, efetuar-se a recomendação das melhores brocas para o poço projeto. Os quadros de brocas utilizadas estão indicados nas Tabelas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, respectivamente.

Tabela 5.3: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 1

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M114J	1	0	88CP38IDTP	111C	893	10,2
17 1/2	M11	2	893	11IDT21NCPF	111	51	4,4
12 1/4	FT53	3	944	FC	537	395	5,8
12 1/4	FT53	3R1	1339	FC	537	103	4,3
12 1/4	DSJ	4	1442		XXX		
12 1/4	DSJ	4R1	1442		XXX		
12 1/4	DSJ	5U	1442		XXX		
12 1/4	DSJ	6	1174	12NCTF2DPMB	XXX	31	8,8
12 1/4	S84F	7	1205		517		
12 1/4	DSJ	5R1	1442		XXX		
12 1/4	DSJ	6R1	1140	MF	XXX	36	6,0
12 1/4	S84F	7R1	1176		517	43	5,0
12 1/4	S84F	7R2	1219	22IDEE1DPPF	517	346	4,9
8 1/2	ATJ22	8	1565	11NCTE0RRTF	517	48	6,4
8 1/2	ATJ22	8R1	1613	55IDTE1CEPF	517	400	6,0

Tabela 5.4: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 2

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M114J	1	0	54DPT52NCPF	111C	849	14,2
12 1/4	S84F	2	849	22IQTF2ADPF	517	659	6,3
8 1/2	SM11	3U	1508		114	0	0
8 1/2	ATJ22	4	1508	66IDTF3CITP	517	448	5,9
8 1/2	S86F	5U	1956		537	72	6

Tabela 5.5: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 3

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
24	M114J	1U	0		111C	64	
17 1/2	M114J	2	64	65DDT52DPPF	111C	864	13,4
12 1/4	ATJ22	3	928	11TRTFINCTO	517	600	6,4
12 1/4	ATJ22	4U	1528		517	6	15
12 1/4	FT52	5U	1534	44ADTF2IDBF	517	95	2,9
12 1/4	FT52	6	1629	00NCTE0NCPF	517	37	4,6
8 1/2	HP51A	7	1666	11NCTE1NCTF	517	58	5,3
8 1/2	HP51A	7R1	1724	11NCTE1NCTE	517	14	4,0
8 15/32	C22	8	1738		COROA	18	1,5
8 15/32	GD54	9	1756		COROA	18	1,8
8 1/2	HP51A	7R2	1774	33ADTE2RRTE	517	70	4,5
8 15/32	GD54	9R1	1844		COROA	12	1,4
8 1/2	HP51A	7R3	1856	33ADTF3CEPF	517	56	4,8

Tabela 5.6: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 4

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M11	1U	0		111	60	30
17 1/2	DSJC	2	60	54IDT53DPPF	111C	915	10,8
12 1/4	ATJ22	3	975	11NCTF11DPP	517	311	3,9
12 1/4	FT52	4U	1286	PP	517	51	4,6
12 1/4	FT52	4R1	1337	PP	517	213	4,1
12 1/4	FT52	4R2	1550	PF	517	150	3,4
8 1/2	SM11	5U	1700		114		
8 1/2	F27	6	1700	13NCT1ERRTE	527	173	3,8
8 15/32	C201	7	1873		COROA	9	2,5
8 15/32	C201	7R1	1882		COROA	9	1,2
8 1/2	F27	6R1	1891	TF	527		
8 15/32	C201	7R2	1891		COROA	9	1,3
8 15/32	C201	7R3	1900		COROA	9	1
8 15/32	C201	7R4	1909		COROA	9	1,1
8 15/32	C201	7R5	1918		COROA	9	0,5
8 15/32	C201	7R6	1927		COROA	9	1,1
8 15/32	C201	7R7	1936		COROA	10	1
8 1/2	F27	6R2	1946	33DPTE11DPPF	527	150	3,1
8 1/2	R7	8U	2096	11NCT1ERRTF	311	5	1,4
8 1/2	S86F	9	2101	22NCTE0RRPF	537	140	3,5

Tabela 5.7: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 5

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M114J	1	0	65DPT53CAPF	111C	1000	11,4
12 1/4	FT52	2	1000	22CI1F2IDBF	517	470	3,7
12 1/4	FT52	3	1470	22CI12FRPPF	517	230	5,3
8 1/2	FT52S	4	1700	11NCTE0RRTF	517	127	5,3
8 1/2	FT52S	4R1	1827	23IQTE2CATF	517	101	5,6
8 1/2	FT52S	5	1928	44CETE1DDPF	517	209	3,9

Tabela 5.8: Quadro de brocas utilizadas no poço DRO 7

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M114J	1	0		111C	687	19,4
17 1/2	M114J	1R1	687	54AAT62CEPF	111C	246	8,9
12 1/4	S84F	2	933		517	493	6,9
8 1/2	ATJ22	3	1500	11NCTF1RRQP	517	143	3,9
8 1/2	FT52	4	1643	44IDTF2ADPF	517	257	3,8

A análise do desempenho das brocas foi feita partindo-se da premissa que os dados fornecidos pelos registros de brocas, a identificação das formações e assim como os respectivos topos estivessem corretos. Nas primeiras fases, normalmente, a formação é inconsolidada e o uso de broca de código IADC 11 é correta.

O poço projeto escolhido (DRO 6) é um poço terrestre com 3 fases sendo a primeira de 17 ½ polegadas com 928 metros, a segunda de 12 ¼ polegadas com 526 metros e a terceira de 8 ½ polegadas com 713 metros.

5.1.1 Poço DRO 1

Os resultados da análise feita pelo sistema no poço DRO 1 são mostrados na Tabela 5.9. Neste poço na fase de 17 ½ polegadas foram utilizadas 2 brocas, a 111C e a 111, sendo que a primeira o programa julgou seu desempenho como BOM, no entanto para a segunda broca, ela foi retirado do poço antes de obter uma metragem suficiente para a análise, perfurou somente 51 metros. Esta broca foi retirada devido ao término da fase e, então foi emitida uma mensagem de *Não Aplicável*, ou seja, nada se pode concluir.

Tabela 5.9: Resultado da análise para o poço DRO 1.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
17 1/2	M114J	1	Excessivo	111C	Bom
17 1/2	M11	2	Baixo	111	Não aplicável
12 1/4	FT53	3	Sem dados	537	Não aplicável
12 1/4	FT53	3R1	Sem dados	537	Não aplicável
12 1/4	DSJ	4	Sem dados	XXX	Não aplicável
12 1/4	DSJ	4R1	Sem dados	XXX	Não aplicável
12 1/4	DSJ	5U	Sem dados	XXX	Não aplicável
12 1/4	DSJ	6	Médio	XXX	Não aplicável
12 1/4	S84F	7	Sem dados	517	Não aplicável
12 1/4	DSJ	5R1	Sem dados	XXX	Não aplicável
12 1/4	DSJ	6R1	Sem dados	XXX	Não aplicável
12 1/4	S84F	7R1	Sem dados	517	Não aplicável
12 1/4	S84F	7R2	Baixo	517	Bom
8 1/2	ATJ22	8	Baixo	517	Não aplicável
8 1/2	ATJ22	8R1	Excessivo	517	Bom

Para a fase de 12 ¼ polegadas as brocas de números 3, 3R1, 4, 4R1, 5U, 7, 5R1, 6R1 e 7R1 não dispunham de dados de seu desgaste, logo o programa prossegue a análise considerando o pior caso, ou seja, adota um valor de confiança de zero para o desgaste e verifica se mesmo assim a broca pode ser recomendada para o poço projeto. Para as brocas mencionadas nenhuma foi recomendada, portanto nada se pode concluir a favor ou contra e, o programa emitiu a mensagem de *Não Aplicável*.

Ainda nesta fase a broca número 6 apesar de obter um desgaste médio foi retirada do poço antes de obter uma metragem suficiente para análise, 31 metros. A broca 7R2 (reutilizada) obteve uma metragem de 389 metros com desgaste baixo sendo classificada como boa pelo programa.

Para a fase de 8 ½ polegadas a broca número 8 foi retirado do poço após 48 metros de perfuração para se realizar teste de formação impedindo um parecer, no entanto ela foi reutilizada (broca número 8R1) perfurando uma metragem total de 448 metros com uma taxa de perfuração de 6,0 m/h sendo classificada como boa.

5.1.2 Poço DRO 2

Neste poço a fase de 17 ½ polegadas foi perfurada com apenas uma broca obtendo um bom desempenho e um desgaste médio. Para a fase seguinte também uma broca foi o suficiente com desempenho semelhante.

Para a fase de 8 ½ polegadas foram utilizadas as brocas de números 3U, 4 e 5U sendo que a primeira e a última não possuem dados de seus desgastes e o sistema toma o procedimento já descrito, ou seja, adota um valor de confiança zero para o desgaste e prossegue com a análise, no entanto nada pode se concluir e a mensagem de *Não aplicável* foi emitida. Veja a Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultado da análise para o poço DRO 2.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
17 1/2	M114J	1	Médio	111C	Bom
12 1/4	S84F	2	Médio	517	Bom
8 1/2	SM11	3U	Sem dados	114	Não aplicável
8 1/2	ATJ22	4	Excessivo	517	Bom
8 1/2	S86F	5U	Sem dados	537	Não aplicável

4.1.3 Poço DRO 3

No poço DRO 3 a primeira broca de 24 polegadas de diâmetro não será utilizada no poço projeto, logo não se realizou nenhuma análise de desempenho a seu respeito.

A broca número 2 usada na fase de 17 ½ polegadas obteve um desgaste médio e um julgamento geral de seu desempenho como bom.

Para a fase de 12 ¼ polegadas a broca número 3 obteve um bom desempenho, no entanto, as brocas seguintes desta fase o sistema não pode concluir nada. A broca de número 4U não apresentou dados de seu desgaste, a 5U e a 6 apesar de sofrerem desgaste médio e baixo respectivamente foram retiradas do poço com uma metragem insuficiente para análise geral do desempenho.

Para a fase de 8 ½ polegadas as brocas de números 8, 9 e 9R1 são do tipo Coroa utilizadas não propriamente para perfurar, logo o sistema não realizou nenhuma análise a seu respeito. A broca número 7 foi retirada do poço para teste de formação e as brocas 7R1 e 7R2 (broca 7 reutilizada) foram retiradas para testemunhar, suas metragens foram insuficientes para análise.

A broca 7R3 para esta mesma fase obteve uma metragem total de 198 metros sendo o suficiente para a análise. seu desgaste foi julgado pelo programa como excessivo. Outro fator que pesou muito na análise foi seu custo sendo muito superior ao custo médio de brocas semelhantes de mesmo código IADC. Portanto o sistema classificou a broca como *Não serve*. Veja Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Resultado da análise para o poço DRO 3.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
24	M114J	1U	Sem dados	111C	
17 1/2	M114J	2	Médio	111C	Bom
12 1/4	ATJ22	3	Baixo	517	Bom
12 1/4	ATJ22	4U	Sem dados	517	Não aplicável
12 1/4	FT52	5U	Médio	517	Não aplicável
12 1/4	FT52	6	Baixo	517	Não aplicável
8 1/2	HP51A	7	Baixo	517	Não aplicável
8 1/2	HP51A	7R1	Baixo	517	Não aplicável
8 15/32	C22	8	Sem dados	COROA	
8 15/32	GD54	9	Sem dados	COROA	
8 1/2	HP51A	7R2	Médio	517	Não aplicável
8 15/32	GD54	9R1	Sem dados	COROA	
8 1/2	HP51A	7R3	Excessivo	517	Não serve

5.1.4 Poço DRO 4

Para este poço a fase de 17 ½ polegadas foi perfurada com duas brocas sendo que a primeira não possui dados de desgaste e também apresentou uma metragem pequena. A segunda broca foi classificada como boa com uma metragem de 915 metros, uma taxa de perfuração de 10,8 m/h e um desgaste médio.

Na fase de 12 ¼ polegadas a broca número 3 sofreu um desgaste baixo e obteve uma metragem de 311 metros sendo classificada como boa. As outras brocas desta fase não apresentam dados de seu desgaste e ainda a broca número 4U obteve uma metragem insuficiente para análise devido a problemas de poço.

A fase seguinte a de 8 ½ polegadas as brocas de números 7, 7R1, 7R2, 7R3, 7R4, 7R5, 7R6 e 7R7 (broca 7 reutilizada) são do tipo Coroa não sendo analisada pelo sistema. As brocas 5U e 6R1 não apresentam dados do seu desgaste sendo emitida a mensagem de *Não aplicável*. A broca de número 6 foi classificada como boa com uma metragem de 173 metros, uma taxa de penetração 3.7 m/h e um desgaste baixo, na sua segunda reutilização (broca de número 6R2) ela também obteve um bom desempenho com uma metragem total de 323 metros. As brocas 8U e 9 não obtiveram metragem suficiente para análise. Veja Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Resultado da análise para o poço DRO 4.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
17 1/2	M11	1U	Sem dados	111	Não aplicável
17 1/2	DSJC	2	Médio	111C	Bom
12 1/4	ATJ22	3	Baixo	517	Bom
12 1/4	FT52	4U	Sem dados	517	Não aplicável
12 1/4	FT52	4R1	Sem dados	517	Não aplicável
12 1/4	FT52	4R2	Sem dados	517	Não aplicável
8 1/2	SM11	5U	Sem dados	114	Não aplicável
8 1/2	F27	6	Baixo	527	Bom
8 15/32	C201	7	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R1	Sem dados	COROA	
8 1/2	F27	6R1	Sem dados	527	Não aplicável
8 15/32	C201	7R2	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R3	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R4	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R5	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R6	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	7R7	Sem dados	COROA	
8 1/2	F27	6R2	Baixo	527	Bom
8 1/2	R7	8U	Baixo	311	Não aplicável
8 1/2	S86F	9	Baixo	537	Não aplicável

5.1.5 Poço DRO 5

Neste poço a primeira broca utilizada na fase de 17 ½ polegadas obteve um desempenho classificado pelo sistema de ótimo com uma metragem de 1000 metros e uma taxa de perfuração de 11,4 m/h.

Na fase de 12 ¼ polegadas foram utilizadas duas brocas com desempenho bom. Para a fase de 8 ½ polegadas a broca de número 4 não obteve metragem para análise no entanto sua reutilização (broca 4R1) foi classificada como boa com uma metragem total perfurada de 228 metros. A broca de número 5 também obteve um desempenho bom. Veja Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Resultado da análise para o poço DRO 5.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
17 1/2	M114J	1	Médio	111C	Ótimo
12 1/4	FT52	2	Médio	517	Bom
12 1/4	FT52	3	Baixo	517	Bom
8 1/2	FT52S	4	Baixo	517	Não aplicável
8 1/2	FT52S	4R1	Médio	517	Bom
8 1/2	FT52S	5	Médio	517	Bom

5.1.6 Poço DRO 7

No poço DRO 7 na fase de 17 ½ polegadas foram utilizada as brocas de números 1 e 1R1 sendo que na primeira não há dados do seu desgaste, no entanto na segunda (reutilização) a broca foi classificada como boa com uma metragem total de perfuração de 933 metros.

Na fase de 12 ¼ polegadas a broca utilizada não possui dados de seu desgaste e nada se pôde concluir.

Para a fase de 8 ½ polegadas a broca 3 foi retirada do poço antes de se obter uma metragem suficiente para análise devido a queda de pressão. A broca de número 4 foi classificada pelo sistema de regular apesar de seu desgaste médio, boa metragem e taxa de

perfuração; isto se deu devido ao custo elevado deste tipo de broca comparado com o custo médio de outras brocas semelhantes. Veja Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Resultado da análise para o poço DRO 7.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
17 1/2	M114J	1	Sem dados	111C	Não aplicável
17 1/2	M114J	1R1	Excessivo	111C	Bom
12 1/4	S84F	2	Sem dados	517	Não aplicável
8 1/2	ATJ22	3	Baixo	517	Não aplicável
8 1/2	FT52	4	Médio	517	Regular

5.1.7 Conclusão, Campo de Dourado

Após o sistema ter analisado as brocas utilizadas nos poços de correlação é possível sugerir as brocas a serem usadas no poço de projeto. Para uma melhor visualização do processo foram construídos as Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5:

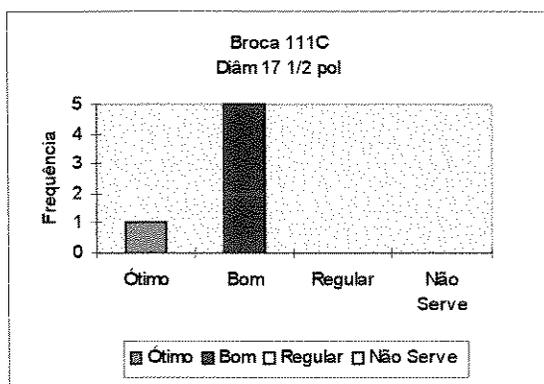


Figura 5.2: Broca 111C, fase 17 1/2 pol.

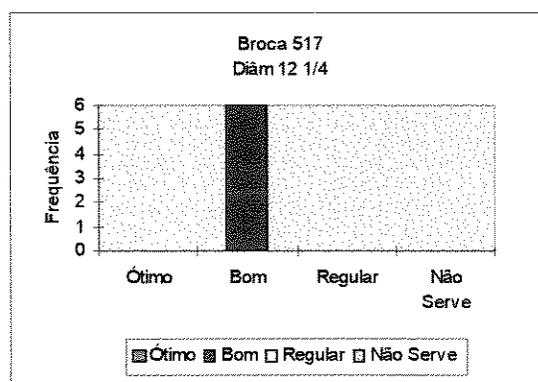


Figura 5.3: Broca 517, fase 12 1/4 pol.

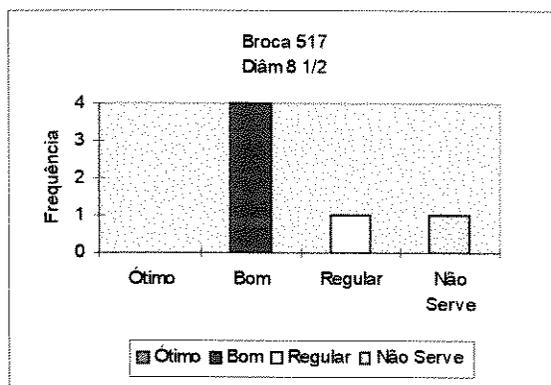


Figura 5.4: Broca 517, fase 8 1/2 pol.

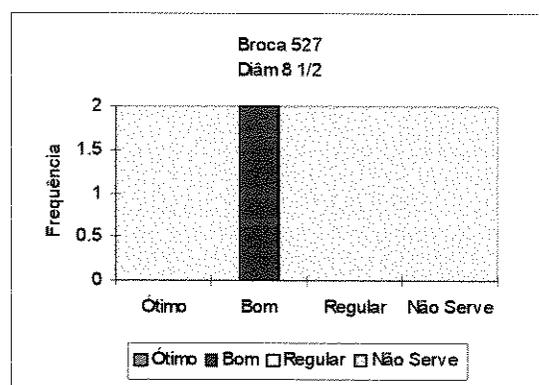


Figura 5.5: Broca 527, fase 8 1/2 pol.

No eixo das abscissas estão as recomendações e o das ordenadas as frequências para cada recomendação. Portando, a broca de código IADC 111C para a fase de 17 ½ polegadas obteve 5 recomendações boas e 1 ótima. Na fase de 12 ¼ polegadas a broca de código 517 obteve 6 recomendações boas. Como nestas duas fases só foram utilizadas estas duas brocas e elas não obtiveram nenhuma recomendação negativa, é sugerido a utilização da broca de código IADC 111C para a fase de 17 ½ polegadas e a broca de código 517 para a fase de 12 ¼ polegadas.

Para a fase de 8 ½ polegadas a broca 517 obteve 4 recomendações boas, 1 regular e 1 não serve e a broca 527 obteve 2 boas. Nos casos onde é necessário comparar o desempenho de várias brocas para uma mesma fase foi criado um fator de comparação. Este fator considera a frequência de uma dada classificação e a quantidade de vezes que esta broca foi utilizada, ou seja, quanto mais vezes uma dada broca foi usada com um bom desempenho, maior a confiança nesta broca para perfurar em situações semelhantes.

Para o cálculo deste fator de comparação, primeiro calcula-se a frequência relativa para cada classificação e multiplica-se por um peso. Este peso é adotado como sendo 1 para classificação ótimo, 0,75 para bom, 0,5 para regular e -1 para não serve. Por último soma-se este valores e normaliza-se o resultado com os resultados das outras brocas analisadas. Veja a Figura 5.6.

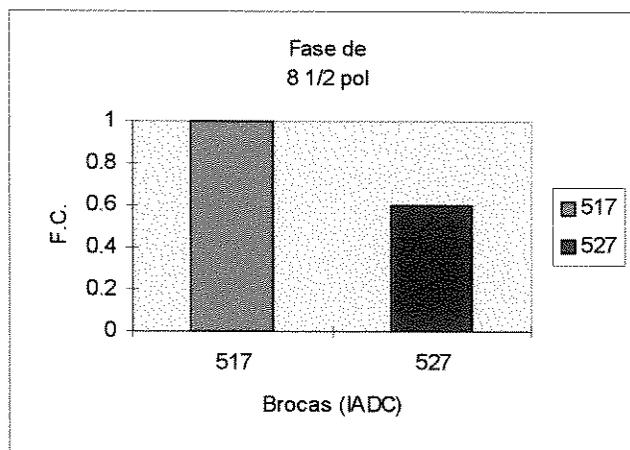


Figura 5.6: Fator de comparação, brocas 527 e 517

Na figura o eixo das abscissas estão o código IADC das brocas e o das ordenadas o fator de comparação. Portanto como a broca de código IADC 517 possui um fator de comparação maior que o da broca 527 ela é a broca sugerida para perfurar a fase de 8 ½ polegadas no poço projeto.

Resumindo-se foram sugeridas as broca de códigos IADC 111C para a fase de 17 ½ polegadas e 517 para a fase de 12 ¼ e 8 ½ polegadas. A Tabela 5.15 mostra o quadro de brocas utilizadas no poço projeto (DRO 6).

Tabela 5.15: Quadro de brocas utilizadas no poço projeto (DRO 6)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
17 1/2	M114J	1	0		111C	592	33,8
17 1/2	M114J	1R1	592		111C	396	11,6
12 1/4	S84F	2	978	44AATE1NCPF	517	526	5,5
8 1/2	FT52	3	1504	33CETE2RRTF	517	196	5,6
8 1/2	FT52	4	1700	44CATF2IDTP	517	337	5,3
8 1/2	S86F	5U	2037	55IDT32CATP	537	73	2,6
8 1/2	FT52	3R1	2110		517	107	4,7

Verifica-se que as brocas sugeridas foram as utilizadas no poço projeto exceto a broca número 5U de código IADC 537 a qual foi retirada por taxa de penetração.

5.2 Estudo de Caso 2: Campo de Lambari

O Campo de Lambari possui 8 poços sendo o oitavo, o poço de projeto. O procedimento de análise é o mesmo da aplicação anterior. Os dados das formações e lâmina d'água estão na Tabela 5.16 e na Figura 5.2, o resultado da análise do Grafo de Correlação está na Tabela 5.17.

Tabela 5.16: Formações atravessadas e seus topos do Campo de Lambari

	Topos das Formações (metros)							
	LBR 1	LBR 2	LBR 3	LBR 4	LBR 5	LBR 6	LBR 7	LBR 8
Lâm. d'água	784	699	846	946	894	1044	785	1058
LBR/FM A	784	699	846	946	894	1044	785	1058
LBR/FM B	2499	2460	-	3092	-	2674	2442	2705
LBR/FM A	2538		-	3108	-	-	2462	2731
LBR/FM C	2691	2692	2622	-	2649	2710	-	2837
LBR/FM D	2896		2884	-	2827	2769	-	2922
LBR/FM E	-		-	3169	-	-	-	-
LBR/FM A	-		-	3202	-	2898	-	-
LBR/FM F	2932	2955	2902	3294	2839	2929	2937	2996
LBR/FM G	-		-	3359	-	-	2962	-
LBR/FM H	-	3037	-	3410	2854	-	3002	-
LBR/FM A	2961		-	-	-	-	3012	-
LBR/FM I	3114	3072	-	3620	-	2937	3262	-

Tabela 5.17: Análise do Grafo de Correlação para o Campo de Lambari.

Usuário	Gaveta	Poço	Correlação
1	AJ	LBR 1	BOM
2	AJ	LBR 2	BOM
4	AJ	LBR 3	BOM
5	AJ	LBR 4	BOM
6	AJ	LBR 5	BOM
7	AJ	LBR 6	BOM
8	AJ	LBR 7	BOM

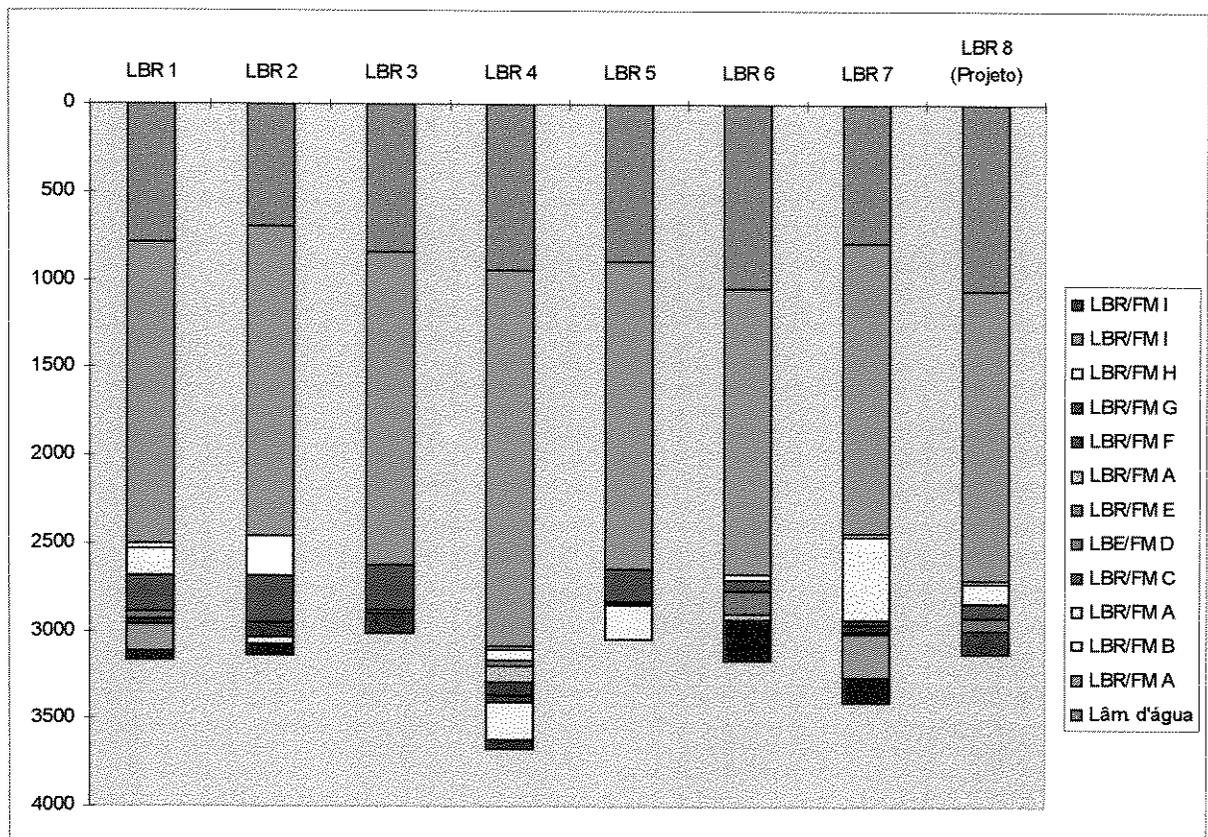


Figura 5.7 : Visualização das formações atravessadas no Campo de Lambari

O quadro de brocas utilizadas nestes poços estão nas tabelas seguintes:

Tabela 5.18: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 1)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	S3SJ	1U	784		111	60	10,9
26	S3SJ	1R1	864		111	266	31,3
14 3/4	CX3A	2	1112	01AAEE0NCBF	114C	385	13,5
14 3/4	CX3A	2R1	1497	11AATE0RRBF	114C	282	9,2
14 3/4	CX3A	2R2	1779	22AATE0NCPF	114C	251	9,4
12 1/4	ATM11H	3	2030	87IQTE1IPTP	447B	662	10,5
12 1/4	ATJ22	4	2692	34IQME0IDTO	517	274	5,2
12 1/4	F2	5	2966	11IDTE1ILPF	517	204	4,0

Tabela 5.19: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 2)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1	699		111	35	7,8
26	M11	1R1	734	0000PF	111	319	24,5
14 3/4	CR1	2	1053	86IDT71CETP	111C	1001	24,1
14 3/4	CR1	3	2054	75DQT41IDPF	111C	226	13,3
8 1/2	MFDSH	4	2280	43AATE1NCPF	116M	862	16,1

Tabela 5.20: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 3)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	S3SJ	1U	846		111	56	18,6
26	S3SJ	1R1	902	0100RRPF	111	332	39,0
14 3/4	CX3A	2	1234	54ILMF4IDPF	114C	1061	17,6
8 1/2	ATJ11H	3	2295	11IQIFINCTE	447	580	9,6
8 15/32	C201	4	2875		COROA	9	2
8 15/32	C201	4R1	2884		COROA	9	2,2
8 15/32	C201	4R2	2893		COROA	9	3
8 15/32	C201	4R3	2902		COROA	9	3
8 15/32	C201	4R4	2911		COROA	9	3
8 15/32	C201	4R5	2920		COROA	9	1,2
8 1/2	S84F	5U	2929	11IDTE1NCPF	517	83	7,2

Tabela 5.21: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 4)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	S3S	1U	946		111	70	28
26	S3S	1R1	1016		111	284	33,4
17 1/2	M114J	2	1300	33IDT40RRPF	111C	622	17,0
12 1/4	FM114J	3	1922	66DQTE1DPBF	116C	896	14,5
12 1/4	FM114J	4	2818	11AATE0NCBF	116C	162	11,5
8 1/2	ATJ11H	5	2980	11IQTE3NCTO	447	539	10,6
8 1/2	ATJ11H	6	3519	11CATE2NCPF	447	151	7,0

Tabela 5.22: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 5)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1	894	11IDT10RRPF	111	350	17,1
14 3/4	SM114J	2	1244	22IDTE1ADPF	114C	1116	23,0
8 1/2	ATJ11H	3	2360	11IDTE1RRTE	447	485	12,6
8 15/32	GD44	3	2845		COROA	9	1,6
8 15/32	GD44	4R1	2854		COROA	9	1,6
8 1/2	RC476	5U	2863		COROA	9	1,3
8 15/32	C201	6	2872		COROA	9	1,5
8 1/2	ATJ11H	7	2881	11IDTE0RRPF	447	177	13,1

Tabela 5.23: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 6)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1	1044		111	57	16,2
26	M11	1R1	1101	11NCT10RRPF	111	282	25,6
14 3/4	SM114J	2	1383	23AATE0ADTP	114C	1002	16,8
8 1/2	ATJ11H	3	2385	11NCTE1RRQP	447	603	12,9
8 1/2	ATJ11H	3R1	2988	11NCTE1RRQP	447	145	7,8
8 1/2	ATJ11H	3R2	3133	22NCTE1NCPF	447	37	7,4

Tabela 5.24: Quadro de brocas utilizadas no poço (LBR 7)

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	S3SJ	1U	785		111	59	16,9
26	S3SJ	1R1	844	33DDT31RRPF	111	375	28,8
14 3/4	M114J	2	1219	65IDT80DPPF	111C	1131	19,2
8 1/2	ATJ11H	3	2350	11NC12QP	447	351	10,6
8 1/2	ATJ22	4	2701	23NC23TO	517	448	8,6
8 1/2	S84F	5	3149	12DPE23ADPF	517	251	5,6

O poço projeto (LBR 8) possui uma lâmina d'água 1058 metros com 3 fases sendo a primeira de 26 polegadas com 357 metros, a segunda de 14 ¾ polegadas com 1015 metros e a terceira de 8 ½ polegadas com 698 metros.

5.2.1 Poço LBR 1

Neste poço para a fase de 26 polegadas as brocas de números 1U e 1R1 não apresentam dados do seu desgaste e o sistema prossegue a análise verificando se é possível indicar as brocas tomando um valor de confiança zero para o desgaste, no entanto isto não ocorreu e o sistema nada pode concluir emitindo uma mensagem de *Não aplicável*.

Para a fase de 14 $\frac{3}{4}$ polegadas foram utilizadas as brocas de números 2, 2R1 e 2R2 sendo classificadas com um desempenho bom e um desgaste baixo. Na fase de 12 $\frac{1}{4}$ polegadas as brocas não foram recomendadas porque no poço projeto não há esta fase. Veja Tabela 5.25.

Tabela 5.25: Resultado da análise para o poço LBR 1.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	S3SJ	1U	Sem dados	111	Não aplicável
26	S3SJ	1R1	Sem dados	111	Não aplicável
14 $\frac{3}{4}$	CX3A	2	Baixo	114C	Bom
14 $\frac{3}{4}$	CX3A	2R1	Baixo	114C	Bom
14 $\frac{3}{4}$	CX3A	2R2	Baixo	114C	Bom
12 $\frac{1}{4}$	ATM11H	3	Excessivo	447B	
12 $\frac{1}{4}$	ATJ22	4	Baixo	517	
12 $\frac{1}{4}$	F2	5	Baixo	517	

5.2.2 Poço LBR 2

Para a fase de 26 polegadas a broca de número 1 não possui dados do desgaste, já a broca 1R1 (broca 1 reutilizada) apresenta dados suficientes para a análise e o sistema julgou seu desempenho como bom.

A broca de número 2 da fase de 14 $\frac{3}{4}$ polegadas obteve um desempenho bom apesar do desgaste excessivo mas com uma metragem de 1001 metros. A broca seguinte, a número 3, na mesma fase obteve uma metragem bem inferior, mas o suficiente para a análise, e um desgaste médio, portanto o sistema classificou-a como boa.

A última broca utilizada neste poço na fase de 8 ½ polegadas conseguiu uma metragem de 862 metros e um desgaste baixo sendo recomendada como boa e não ótima devido ao seu custo elevado se comparado a brocas semelhantes. Veja Tabela 5.26.

Tabela 5.26: Resultado da análise para o poço LBR 2.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	M11	1	Sem dados	111	Não aplicável
26	M11	1R1	Médio	111	Bom
14 3/4	CR1	2	Excessivo	111C	Bom
14 3/4	CR1	3	Médio	111C	Bom
8 1/2	MFDSH	4	Baixo	116M	Bom

5.2.3 Poço LBR 3

A broca de número 1U não apresentou uma metragem mínima para análise e dados do seu desgaste, no entanto a sua reutilização (broca de número 1R1) teve um bom desempenho com uma metragem total de 382 metros e taxa de perfuração 33,7 m/h.

Na fase de 14 ¾ polegadas a broca de número 2 perfurou 1061 metros com uma taxa de perfuração de 17.6 m/h sendo classificada como ótima.

Na fase seguinte a de 8 ½ polegadas a broca de número 3 obteve um desgaste baixo com uma boa metragem e taxa de perfuração sendo recomendada como boa, já as brocas de número 4, 4R1, 4R2, 4R3, 4R4 e 4R5 são do tipo Coroa não sendo analisadas. A broca de número 5U foi retirada do poço por profundidade final antes de obter uma metragem mínima para análise, 83 metros Veja Tabela 5.27.

Tabela 5.27: Resultado da análise para o poço LBR 3.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	S3SJ	1U	Sem dados	111	Não aplicável
26	S3SJ	1R1	Baixo	111	Bom
14 3/4	CX3A	2	Médio	114C	Ótimo
8 1/2	ATJ11H	3	Baixo	447	Bom
8 15/32	C201	4	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	4R1	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	4R2	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	4R3	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	4R4	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	4R5	Sem dados	COROA	
8 1/2	S84F	5U	Baixo	517	Não aplicável

5.2.4 Poço LBR 4

Este poço apresenta uma fase de 17 ¼ e outra de 12 ½ polegadas que não estão previstas no poço projeto, portanto o programa não analisou as brocas utilizadas nestas fases. Na fase de 26 polegadas não temos dados dos desgastes sofridos e o programa nada concluiu.

Para a fase de 8 ½ polegadas a broca de número 5 obteve um bom desempenho e a 6 regular. Veja Tabela 5.28.

Tabela 5.28: Resultado da análise para o poço LBR 4.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	S3S	1U	Sem dados	111	Não aplicável
26	S3S	1R1	Sem dados	111	Não aplicável
17 1/2	M114J	2	Baixo	111C	
12 1/4	FM114J	3	Baixo	116C	
12 1/4	FM114J	4	Baixo	116C	
8 1/2	ATJ11H	5	Médio	447	Bom
8 1/2	ATJ11H	6	Médio	447	Regular

5.2.5 Poço LBR 5

As brocas de números 1 e 2 para as fases de 26 e 14 ¾ polegadas respectivamente obtiveram um desgaste baixo e boa metragem sendo classificadas pelo sistema como ótimas.

Para a fase de 8 ½ polegadas as brocas 3 e 7 foram julgadas como boas e as restantes são do tipo Coroa. Veja Tabela 5.29.

Tabela 5.29: Resultado da análise para o poço LBR 5.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	M11	1	Baixo	111	Ótimo
14 ¾	SM114J	2	Baixo	114C	Ótimo
8 1/2	ATJ11H	3	Baixo	447	Bom
8 15/32	GD44	3	Sem dados	COROA	
8 15/32	GD44	4R1	Sem dados	COROA	
8 1/2	RC476	5U	Sem dados	COROA	
8 15/32	C201	6	Sem dados	COROA	
8 1/2	ATJ11H	7	Baixo	447	Bom

5.2.6 Poço LBR 6

A broca número 1 não possui dados do desgaste sofrido e metragem mínima para análise, já a sua reutilização (broca 1R1) foi classificada como ótima com uma metragem total de 339 metros.

Na fase de 14 ¾ polegadas a broca de número 2 apesar de ter sofrido um desgaste alto perfurou 1002 metros com uma taxa de perfuração 16,8 m/h sendo julgada pelo sistema como boa.

Para a fase de 8 ½ polegadas as brocas 3, 3R1 e 3R2 (broca 3 e suas reutilizações) foram recomendadas para o poço projeto com uma classificação boa. Veja Tabela 5.30.

Tabela 5.30: Resultado da análise para o poço LBR 6.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	M11	1	Sem dados	111	Não aplicável
26	M11	1R1	Baixo	111	Otimo
14 3/4	SM114J	2	Alto	114C	Bom
8 1/2	ATJ11H	3	Baixo	447	Bom
8 1/2	ATJ11H	3R1	Baixo	447	Bom
8 1/2	ATJ11H	3R2	Baixo	447	Bom

5.2.7 Poço LBR 7

Neste poço novamente a broca 1U não possui dados de seu desgaste e metragem mínima para análise, sua reutilização a broca 1R1 atingiu uma recomendação boa.

A broca de número 2 da fase de 14 ¾ polegadas perfurou 1131 metros com um desgaste baixo sendo classificada como ótima. Na fase de 8 ½ polegadas foram utilizadas três brocas sendo que as duas primeiras obtiveram uma recomendação boa e a última, a broca de número 5, regular. Veja Tabela 5.31.

Tabela 5.31: Resultado da análise para o poço LBR 7.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	S3SJ	1U	Sem dados	111	Não aplicável
26	S3SJ	1R1	Médio	111	Bom
14 3/4	M114J	2	Baixo	111C	Otimo
8 1/2	ATJ11H	3	Excessivo	447	Bom
8 1/2	ATJ22	4	Excessivo	517	Bom
8 1/2	S84F	5	Médio	517	Regular

5.2.8 Conclusão, Campo de Lambari

Os resultados obtidos anteriormente são mostrados nas figuras seguintes de forma a ser ter uma melhor visualização do processo e do desempenho das brocas indicado pelo sistema.

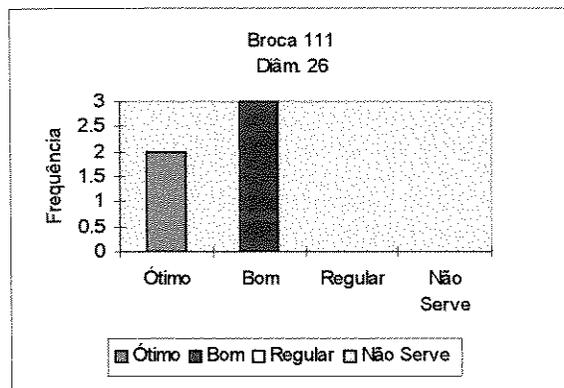


Figura 5.8: Broca 111, fase 26 pol.

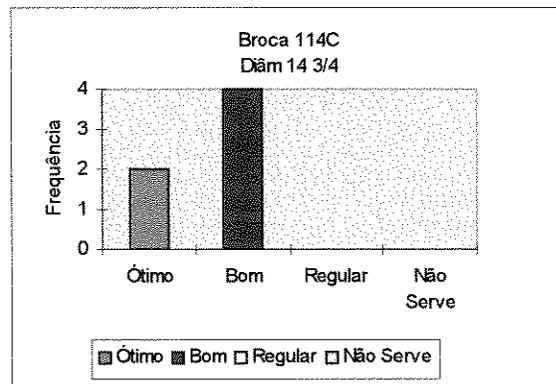


Figura 5.9: Broca 114C, fase 14 3/4 pol.

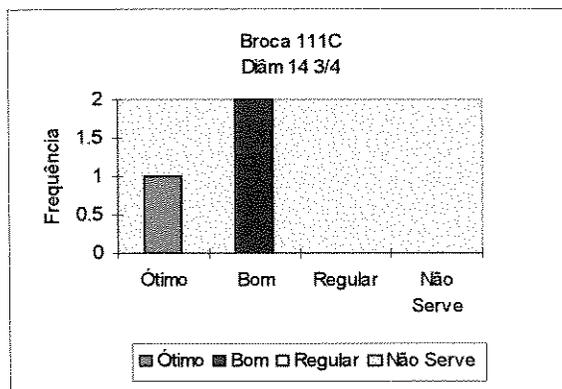


Figura 5.10: Broca 111C, fase 14 3/4 pol.

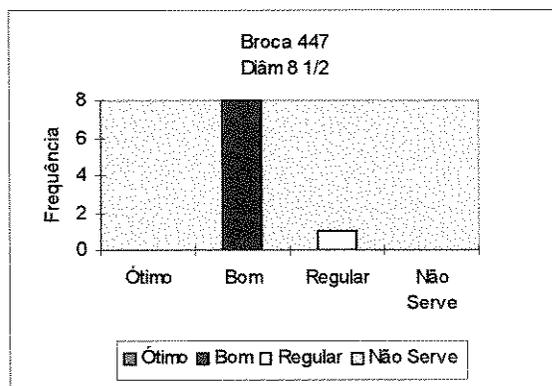


Figura 5.11: Broca 447, fase 8 1/2 pol.

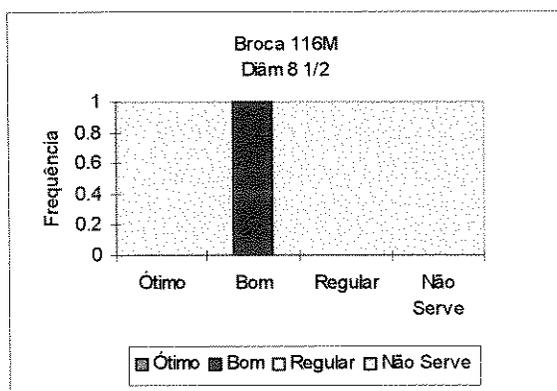


Figura 5.12: Broca 116M, fase 8 1/2 pol.

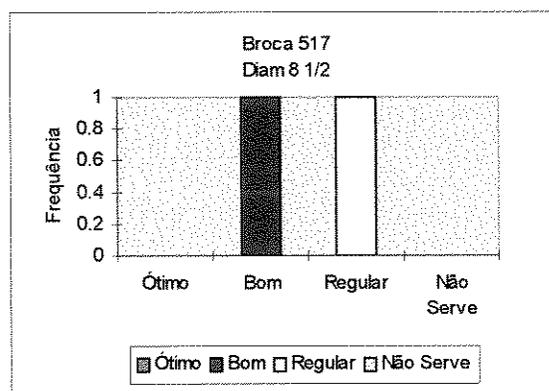


Figura 5.13: Broca 517, fase 8 1/2 pol.

Para a fase de 26 polegadas é sugerido uma broca de código IADC 111, nos poços de correlação onde ela foi usada sua recomendação foi sempre boa ou ótima, mesmo porque nesta fase a seleção da broca não é crítica devido a inconsolidação da formação.

Na fase de 14 $\frac{3}{4}$ polegadas é necessário escolher entre brocas de código IADC 114C ou 111C e na fase de 8 $\frac{1}{2}$ polegadas entre as de 447, 116M e 517. Para estes casos temos os gráficos com os fatores de comparação.

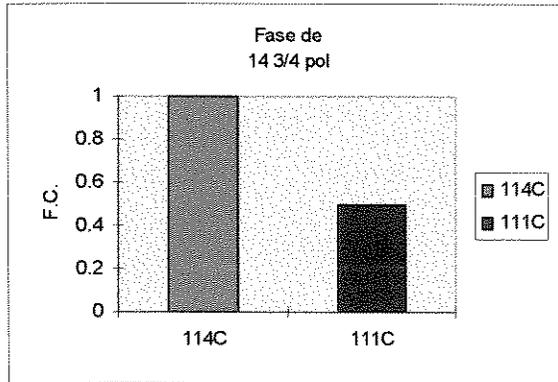


Figura 5.14: Fator de comparação

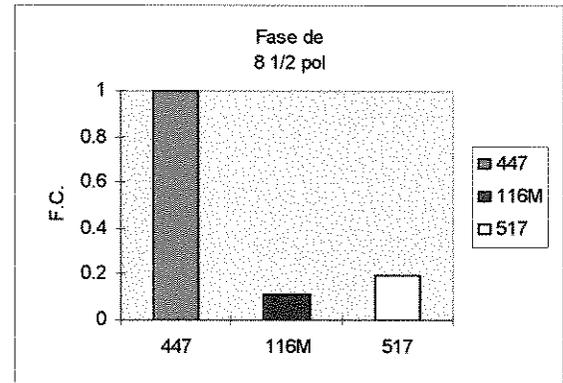


Figura 5.15: Fator de comparação

Pela Figura 5.14 brocas de código IADC 114C parecem mais indicadas para a fase de 14 $\frac{3}{4}$ polegadas do que as de código 111C, nesta figura a broca 114C possui uma confiança maior. No caso da fase de 8 $\frac{1}{2}$ polegadas é indicado brocas com código IADC 447 pela Figura 5.15.

A seguir é mostrado o quadro de brocas utilizado no poço projeto (LBR 8).

Tabela 5.32: Quadro de brocas utilizadas no poço projeto (LBR 8)

Diâmetro (pol)	Broca	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1058		111	357	35,7
14 $\frac{3}{4}$	SM114J	1415	22IDTE0NCPF	114C	1015	22,1
8 $\frac{1}{2}$	ATJ11H	2430	1IDTE0RRTE	447	110	18,3
8 $\frac{15}{32}$	GD7	2540		COROA	5	0,6
8 $\frac{1}{2}$	ATJ11H	2545	11IDTE0RRTE	447	10	10
8 $\frac{15}{32}$	GD44	2555		COROA	9	0,3
8 $\frac{1}{2}$	ATJ11H	2564	11IDTE0RRTE	447	9	1,6
8 $\frac{1}{2}$	ATJ11H	2573	11IQME0RRTE	447	145	10,4
8 $\frac{15}{32}$	GD44	2718		COROA	7	0,9
8 $\frac{15}{32}$	GD44	2725		COROA	5	0,9
8 $\frac{15}{32}$	GD44	2730		COROA	7	0,5
8 $\frac{1}{2}$	ATJ11H	2737	22IQMENC PF	447	391	8,1

Verifica-se que as brocas sugeridas foram as utilizadas no poço projeto.

5.3 Estudo de Caso 3: Campo de Cascudo

Para o campo de Cascudo foram selecionados 4 poços sendo o quarto escolhido como poço de projeto. O procedimento é o mesmo das aplicações anteriores, ou seja, após a indicação das brocas para o poço projeto verifica-se as que foram realmente utilizadas. A análise realizada pelo Grafo de Correlação julgou-os como uma boa correlação ao poço projeto. Os dados das formações e lâmina d'água estão na Tabela 5.33 e na Figura 5.16 e o resultado da análise do Grafo de Correlação na Tabela 5.34.

Tabela 5.33: Formações atravessadas e seus topos do Campo de Cascudo

	Topos das Formações (metros)			
	CSD 1	CSD 2	CSD 3	CSD 4
Lâm. d'água	1723	1421	1101	1242
CSD/FM A	1723	1421	1101	1242
CSD/FM B	2918	2922	2632	2789
CSD/FM A	2928	2932	2642	2934
CSD/FM C	3063	3123	2834	2987
CSD/FM A	3073	3133	2934	3039
CSD/FM D	-	-	-	-

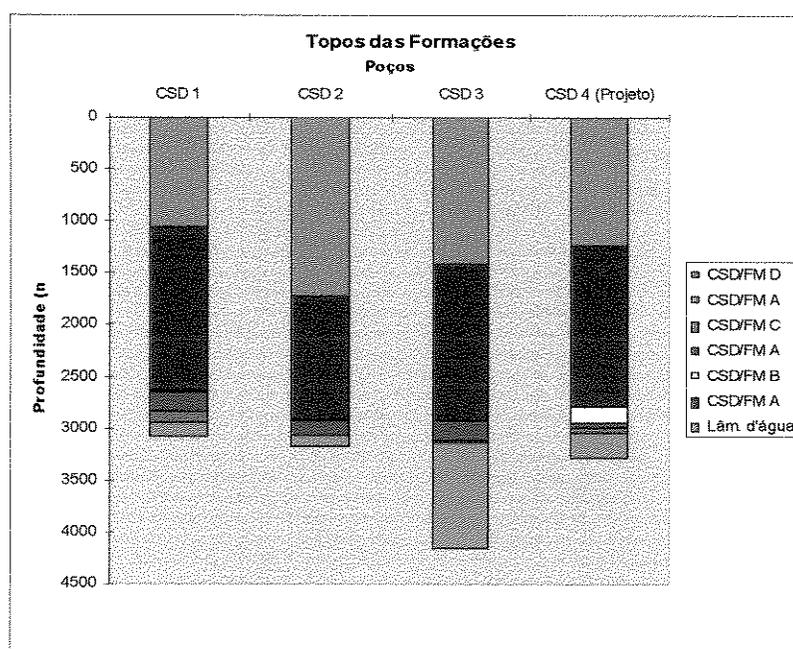


Figura 5.16 : Visualização das formações atravessadas

Tabela 5.34: análise do Grafo de Correlação para o Campo de Cascudo.

Usuário	Gaveta	Poço	Correlação
2	BC	CSD 1	BOM
77	BK	CSD 2	BOM
121	BK	CSD 3	BOM

Verificado a correlação entre os poços o procedimento é semelhante aos casos anteriores, ou seja, o sistema analisa o desempenho das brocas utilizadas nestes poços para na próxima etapa sugerir as brocas a serem usadas no poço projeto. Os quadros de brocas utilizadas estão nas Tabelas 5.35, 5.36 e 5.37.

Tabela 5.35: Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 1

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1U	1723		111	70	10
26	M11	1R1	1793		111	309	20,6
16	ATXCG1	2	2108	32IDTE1NCPF	115	598	20,3
12 1/4	ATJ1CS	3	2700	11NCTE1RRT	116	82	13,7
8 15/32	C201	4	2782		COROA	9	0,9
12 1/4	ATJ1CS	3R1	2791		116	7	7
8 15/32	C201	4R1	2798		COROA	9	0,75
12 1/4	MFDSHC	5	2807	33IDTE1PF	117M	360	8,7

Tabela 5.36: Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 2

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	S3SJ	1U	1421	11DDT00RRPF	111	356	29,6
16	MS11GC	2	1777	11DDTE0RRPF	115M	903	30,6
12 1/4	FM114J	3	2680	11NCTE2NCTE	116C	245	15,3
8 15/32	GD44	4	2925		COROA	5	1
12 1/4	M11	5	2930	87DPI80DQTO	111	139	6,9
12 1/4	FT52	6	3069	11NCTF0NCPF	517	238	8,3
8 1/2	M11	7	3307	11NCT10RRMB	111	9	9
8 1/2	AR435	8	3316	00NCTD0RRTP	PDC	5	1,2
8 1/2	ATJ22	9	3321	11NCTE0RRDU	517	239	5,9
8 1/2	ATJ22	10	3560	11IDTE0NCTP	517	400	4,7
8 1/2	S84F	11	3960	11IDTE1NCPF	517	204	4,2

Tabela 5.37: Quadro de brocas utilizadas no poço CSD 3

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1U	1101	11IDE10NCPF	111	296	37
14 3/4	SM114J	2	1397	22AAT20RRPF	114C	1003	28,6
8 1/2	ATM11H	3	2400	11IDTF0NCPF	447B	681	15,0

O poço projeto (CSD 4) possui uma lâmina d'água 1242 metros com 4 fases sendo a primeira de 26 polegadas com 454 metros, a segunda de 16 polegadas com 655 metros, a terceira de 12 ¼ polegadas de 192 metros e a quarta de 8 ½ polegadas com 306 metros.

5.3.1 Poço CSD 1

Para a fase de 26 polegadas foram utilizadas as brocas de número 4U e 4R1 obtendo uma metragem total de 379 metros, no entanto não temos dados sobre o desgaste sofrido e nada se pode concluir.

Na fase de 16 polegadas uma broca foi o suficiente para perfurar a fase com uma metragem de 598 metros sendo classificada pelo programa como boa.

As brocas de números 4 e 4R1 na fase de 12 ¼ polegadas são do tipo Coroa não sendo analisadas pelo programa. A broca de número 3R1 não apresenta dados do seu desgaste e as brocas 3 e 5 foram julgadas boas pelo sistema. Veja Tabela 5.38.

Tabela 5.38: Resultado da análise para o poço CSD 1.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	M11	1U	Sem dados	111	Não aplicável
26	M11	1R1	Sem dados	111	Não aplicável
16	ATXCG1	2	Baixo	115	Bom
12 1/4	ATJ1CS	3	Baixo	116	Bom
8 15/32	C201	4	Sem dados	COROA	
12 1/4	ATJ1CS	3R1	Sem dados	116	Não aplicável
8 15/32	C201	4R1	Sem dados	COROA	
12 1/4	MFDSHC	5	Excessivo	117M	Bom

5.3.2 Poço CSD 2

As brocas de números 1U e 2 para as fases de 26 e 16 polegadas respectivamente foram classificadas como boas. Na fase de 12 ¼ polegadas foram usadas quatro brocas sendo que a de número 4 é do tipo Coroa, as brocas 3 e 6 obtiveram um julgamento bom e a de número 5 regular.

Para a fase de 8 ½ polegadas a broca de número 8 é do tipo PDC não sendo analisada pelo sistema. A broca 7 perfurou apenas 9 metros não obtendo uma metragem mínima para análise. As brocas 10 e 11 foram classificadas como boas e a 9 regular. Veja a Tabela 5.39.

Tabela 5.39: Resultado da análise para o poço CSD 2.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	S3SJ	1U	Baixo	111	Bom
16	MS11GC	2	Baixo	115M	Bom
12 1/4	FM114J	3	Médio	116C	Bom
8 15/32	GD44	4	Sem dados	COROA	
12 1/4	M11	5	Excessivo	111	Regular
12 1/4	FT52	6	Baixo	517	Bom
8 1/2	M11	7	Baixo	111	Não aplicável
8 1/2	AR435	8	Alto	PDC	
8 1/2	ATJ22	9	Baixo	517	Regular
8 1/2	ATJ22	10	Alto	517	Bom
8 1/2	S84F	11	Baixo	517	Bom

5.3.3 Poço CSD 3

Neste poço foram utilizadas apenas 3 brocas sendo a primeira de 26 polegadas foi julgada como boa com um desgaste baixo, a segunda de 14 ¼ polegadas não foi analisada porque no poço projeto não há esta fase, e por último a terceira foi classificada pelo sistema como ótima com uma metragem de 681 metros e um desgaste baixo. Veja Tabela 5.40.

Tabela 5.40: Resultado da análise para o poço CSD 3.

Diâmetro (pol)	Broca	Número	Desgaste	IADC	Recomendação
26	M11	1U	Baixo	111	Bom
14 3/4	SM114J	2	Baixo	114C	
8 1/2	ATM11H	3	Baixo	447B	Ótimo

5.3.4 Conclusão, Campo de Cascudo

As figuras a seguir mostram a apresentação dos resultados da análise do sistema sobre o desempenho das brocas utilizadas nos poços de correlação no Campo de Cascudo.

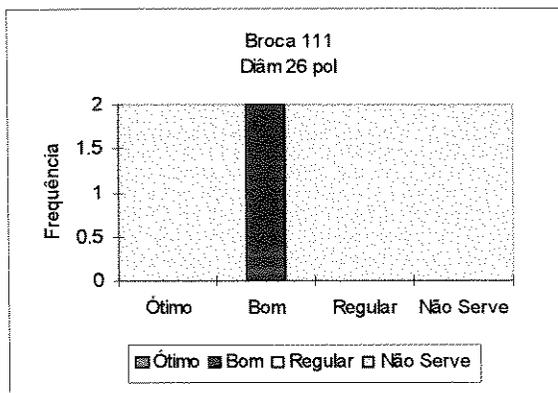


Figura 5.17: Broca 111, fase 26pol.

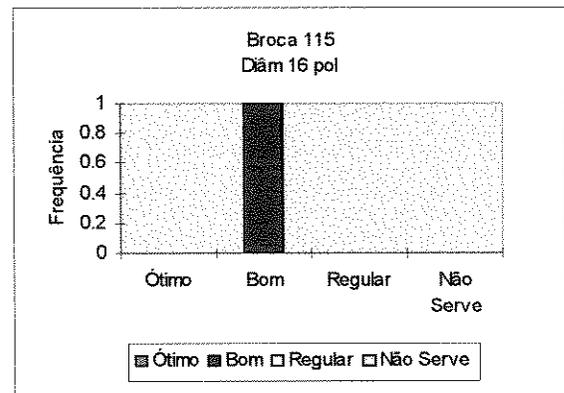


Figura 5.18: Broca 115, fase 16 pol.

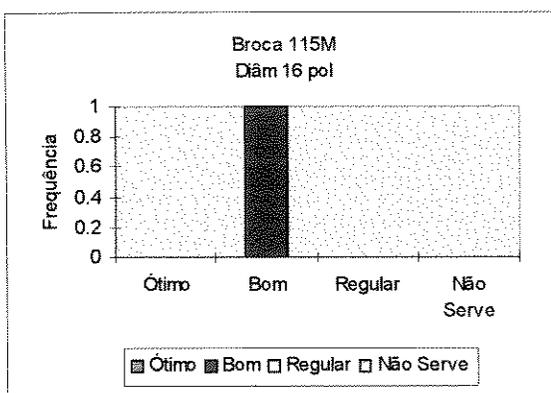


Figura 5.19: Broca 115M, fase 16 pol.

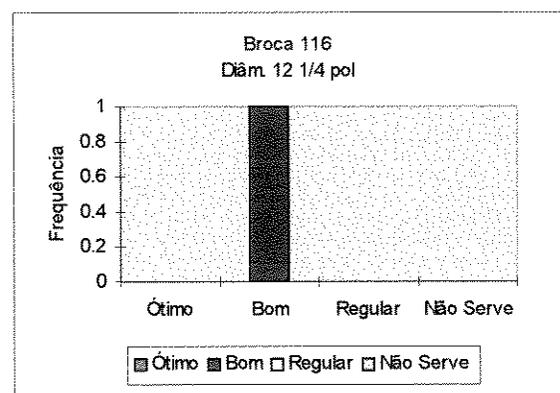


Figura 5.20: Broca 116, fase 12 1/4 pol.

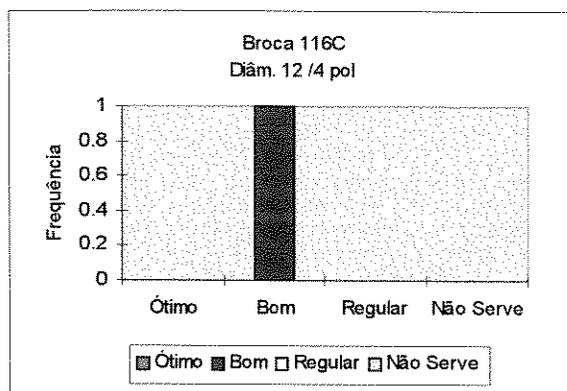


Figura 5.21: Broca 116C, fase 12 1/4 pol.

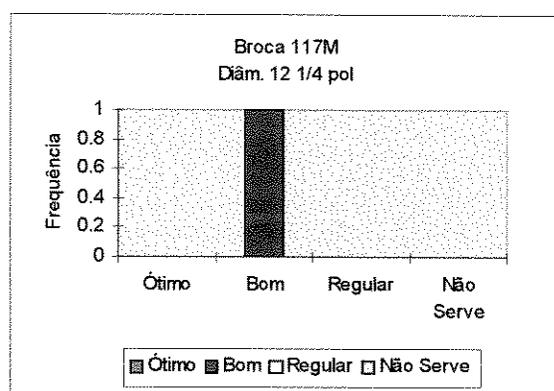


Figura 5.22: Broca 117M, fase 12 1/4 pol.

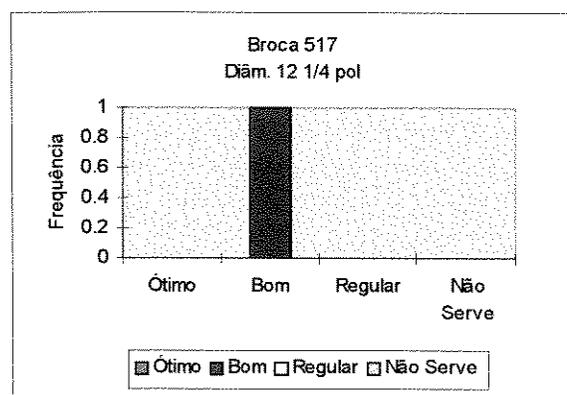


Figura 5.23: Broca 517, fase 12 1/4 pol.

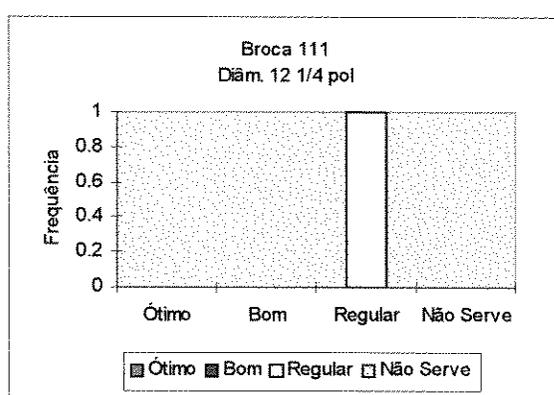


Figura 5.24: Broca 111, fase 12 1/4 pol.

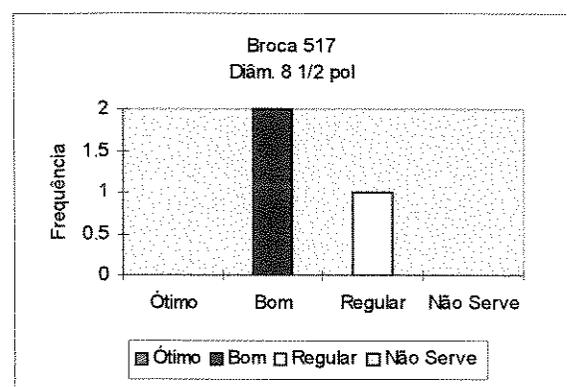


Figura 5.25: Broca 517, fase 8 1/2 pol.

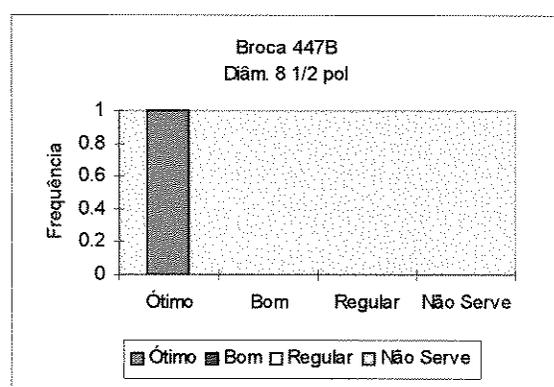


Figura 5.26: Broca 447, fase 8 1/2 pol.

Na maioria dos casos cada tipo de broca foi utilizada apenas uma vez com uma recomendação boa como é o caso das brocas mostradas nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20. Nestes casos, do ponto de vista da recomendação dada e do número de vezes utilizadas elas são equivalentes. A seguir são mostrados os gráficos com os fatores de comparação entre as brocas onde isto se reflete.

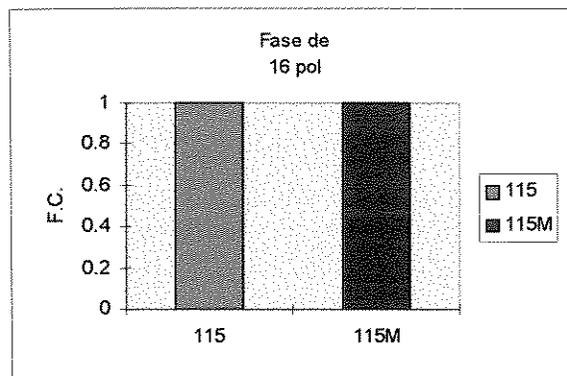


Figura 5.27: Fator de comparação.

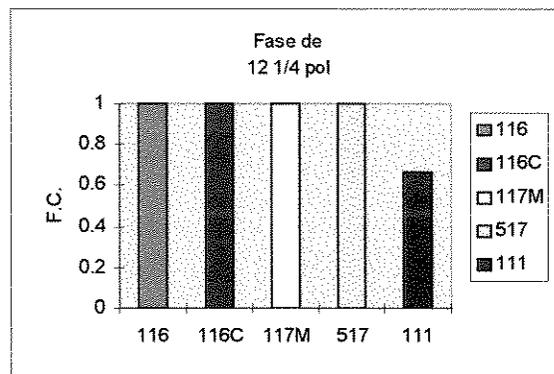


Figura 5.28: Fator de comparação.

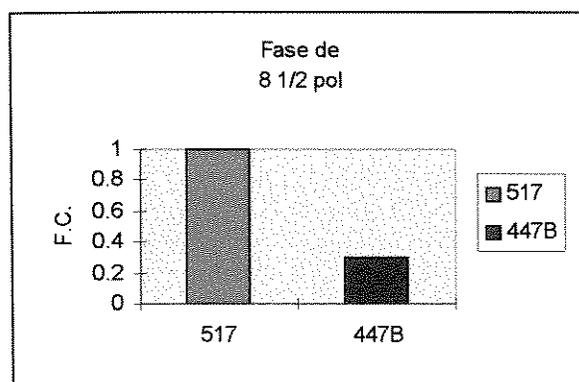


Figura 5.29: Fator de comparação

Para a fase de 26 polegadas é sugerido uma broca de código IADC 111 pois só foram utilizadas este tipo de broca nos poços de correlação e como já foi comentado anteriormente nas primeiras fase geralmente a formação é inconsolidada e o uso desta broca é correto.

As brocas de código IADC 115 e 115M para a fase de 16 polegadas são equivalentes. No entanto para a fase de 12 ¼ polegadas o número de opções aumenta, sendo que a menos indicada é a broca de código 111, veja a Figura 5.28.

Para a fase de 8 ½ polegadas a sugestão para o poço projeto é uma broca de código IADC 517. Apesar da broca 447B ter obtido uma recomendação ótima ela foi utilizada apenas uma vez enquanto que a broca 517 apresentou uma confiança maior por ter sido usada duas vezes com uma recomendação boa e uma regular.

Na Tabela 5.41 é apresentado o quadro de brocas utilizadas no poço projeto. Verifica-se que na fase de 8 ½ polegadas foram usadas brocas de código 116M. Nos poços de correlação esta broca não foi utilizada nesta fase, sendo assim não foi possível avaliar seu desempenho e indicá-la ou não para o poço projeto. Nas demais fases as brocas usadas estão de acordo com as indicadas.

Tabela 5.41: Quadro de brocas utilizadas no poço projeto (CSD 4)

Diâmetro (pol)	Broca	Prof. de entrada (m)	Desgaste	IADC	Metragem (m)	Taxa de penetração (m/h)
26	M11	1242		111	44	
26	M11	1286		111	410	
16	MSDSHC	1696	00NCT00RRRS	115M	158	21
16	MSDSHC	1854	22AAE0RRPF	115M	497	14
12 1/4	MSDSHC	2351	11IDT11NCMB	117M	192	13,2
8 1/2	MSDSH	2543	11IDTE0RRTF	116M	41	5,1
8 15/32	C201	1584		COROA	9	0,8
8 1/2	MFDSH	2593	12IDEE0RRTE	116M	210	8
8 15/32	C201	2803		COROA	9	0,9
8 1/2	MFDSH	2812		116M	0	0
8 15/32	C201	2812		COROA	2	1,3
8 15/32	C201	2814		COROA	7	0,8
8 15/32	C201	2821		COROA	9	1,2
8 15/32	C201	2830		COROA	5	1
8 15/32	C201	2835		COROA	9	1,2
8 15/32	C201	2844		COROA	5	0,5

Capítulo 6

Conclusões e Considerações Finais

Para a realização deste trabalho foi necessário a familiarização com o domínio do conhecimento do especialista e representar este conhecimento numa forma organizada. A aquisição do conhecimento foi realizada por meio de entrevistas onde se verificou que a sua obtenção fica muito facilitada através de casos de campo onde se promove uma discussão caso a caso e é possível apontar fatores relevantes de maneira mais simples e direta.

O uso de Grafos de Conhecimento é adequado para explicitar o conhecimento especialista do processo de seleção de brocas e realizar a manutenção (aprendizado evolutivo), possui também a vantagem de proporcionar a visualização do problema e de fácil transmissão a outros membros da comunidade. Os Grafos levantados formaram a base de conhecimento de um sistema inteligente que tem como objetivo auxiliar o usuário no processo de seleção de brocas ou ser usado no treinamento de novos integrantes, promovendo assim uma melhor compreensão do processo de seleção de brocas tricônicas explicitando os fatores, dados relevantes e o raciocínio empregado na metodologia de seleção.

O sistema foi testado em 3 regiões distintas de produção de petróleo do país, com dados reais de campo para se verificar seu desempenho e demonstrar que o conhecimento contido na forma de Grafos de Conhecimento não é regional e sim baseado numa metodologia de escolha de brocas construída com a experiência de especialistas, válidas para qualquer região de perfuração, desde que se tenha dados adequados de poços para a correlação. Os resultados mostraram que o sistema desenvolvido no presente estudo fez as

mesmas escolhas das brocas utilizadas nos poços de projetos, cabendo-se ressaltar aqui que ele na realidade tenta mimetizar o julgamento do especialista e, muitas vezes faz as mesmas escolhas do especialista mas não necessariamente a melhor broca é escolhida, ou seja, preserva o conhecimento especializado no processo de seleção. O sistema embora necessite de mais testes e aprimoramentos em termos de conhecimento utilizado, verifica-se que a metodologia utilizada e a implementação realizada é bastante adequada para a escolha de brocas na perfuração.

O desempenho pode ser cada vez mais melhorado com a realização de ajustes e correções sucessivas nos valores adotados para relevância, confiança, evidências, etc.

A maneira como foi apresentado os resultados da análise dos grafos (figuras com as frequências das recomendações e fatores de comparação) não é regra e sim mais uma sugestão para uma futura interface com o usuário.

Como sugestão para trabalhos futuros, menciona-se:

- Alimentar o sistema com dados de novas regiões e verificar o seu desempenho.
- Adquirir conhecimento no processo de seleção de brocas TSP, PDC e diamante na forma de Grafos de Conhecimento e transcrever este conhecimento para o sistema.
- Elaborar uma interface para o sistema com o uso intensivo de gráficos para uma informação visual do usuário.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, E.E. & AZAR, J.J. *PDC Bit Performance under Simulated Borehole Conditions*. SPE 20412 DRILLING ENGINEERING, 1990.
- BOURGOYNE A. T. et al *Applied Drilling Engineering* SPE Text Book Series, vol II, 1986, 1 ed.
- CLARK D. A. *Aplication of the New IADC Dull Grading System for Fixed Cutter Bits*. SPE 16145, SPE/IADC DRILLING CONFERENCE, New Orleans, LA, March 15-18, 1987 p. 851-858.
- CUNNINGHAM, R. A. *An Empirical Approach to Relate Drilling Parameters* SPE 6715 DRILLING ENGINEERING, 1977.
- DERNBACH, L. A. *Sonic-Gama Ray Analysis Improves Bit Selection*. Oil & Gas Journal, 14 Junho 1982 p. 90-101.
- DUDA, R. O., P. E. HART, K. KONOLIGE e R. REBOH. *A Computer-Based Consultant for Mineral Exploration*. Relatório técnico, SRI Internatiomal, 1979.
- DUMANS, C. F. F. *Método Associativo para Escolha de Brocas Tricônicas e Brocas de Diamante Policristalino*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas. 1990, 163p. Tese de Mestrado.

- FALCÃO, J. L. *Metodologia de Escolha de Brocas de PDC Baseado no Perfil Sônico, Custo Estimado e Performance passada das Brocas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1991, 97p. Tese de Mestrado.
- GOULT A. D. et al *PDC Application in the Gulf Mexico with water-based Drilling Fluids* SPE DRILLING ENGINEERING, Junho de 1988, p. 117-124.
- GRECO, G. & Rocha A. F. *Brain Activity and Fuzzy Belief*. Fuzzy Sets in Psychology, Zeteny, T (ed), Advances in Psychology North Holland, vol 56, p. 297-320, 1988.
- GSTALTER, S. And J. Raynal *Measure of Some Mechanical Properties of Rocks and Their Relationship to Rock Drillability*. JPT Agosto, 1966.
- MACHADO, R. J. & Rocha, A. F. *Handling Knowledge in High Order Neural Networks: the combinatorial Neural Model*. Neural Theory and Architecture of International Joint on Neural Networks, Washington, 1989.
- MACHADO, R. J. et al *Efficiente Methods for Inference and Inquiry in Fuzzy Connectionist Expert Systems*. VII SBIA, Campina Grande PB, 1990.
- MANUAL SISTEMA KARDS. Departamento de Engenharia de Petróleo. Laboratório de Inteligência Artificial. UNICAMP, 1995.
- MASON, K. L. *Tricone Bit Selection Using Sonic Logs*. SPE 13256 DRILLING ENGINEERING, June 1987, p. 135-142.
- MIURA, K. *Método para Aquisição e Representação do Conhecimento sobre Procedimentos Operacionais em Serviços de Completação de Poços Marítimos*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1991, 195p. Tese de Mestrado.

- OHARA, S. *Método de Escolha do Tipo de Broca e Seleção do Peso sobre Broca e Velocidade de Rotação na Perfuração com Mínimo Custo*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1989, 179p. Tese de Mestrado.
- PETROGUIA. Manual do Departamento de Perfuração, PETROBRAS, 1 edição, Julho 1989.
- PINHEIRO, CESAR & LINHARES, T. X., SAULO *Utilização de perfis geológicos para a elaboração de programas de broca*. QUARTO CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PERFURAÇÃO 1984.
- RABIA H. *A New Approach to Drill Bit Selection*. SPE 15894 DRILLING ENGINEERING, 1986.
- RICH, E. *Inteligência Artificial*. São Paulo: Mac Graw-Hill do Brasil, 1993, 722 p.
- ROCHA, A. F. & Theoto, M & Torasso, P. *Specialized Speech: a First Prose for Language Expert Systems*. Information Sciences p. 193-210, 1985.
- ROCHA, A. F. *Neural Nets: A Theory for Brains and Machines*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, 1992.
- SATO, A. T. *Sistema Inteligente para elaborar um projeto de perfuração de um poço de petróleo*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, 1992, 113p. Tese de Mestrado.
- SHORTLIFFE, E. H. *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*. New York, Elsevier, 1976.

STEELE, R., S. S. RICHARDSON e M. A. WINCHELL. "Design advisor: A Knowledge-based integrated circuit design critic" In *Innovative Applications of Artificial Intelligence*, ed H. Schorr e A. Rappaport, 213-224. Menlo Park, AAAI Press, 1989

SPAAR, J. R. et al *Formation Compressive Streng Estimates for Predictiong Drillability and PDC Bit Selection*. SPE 29397 DRILLING CONFERENCE, Amsterdam, 1995.

THEOTO, M. et al *Comparing Expertise and the Experts Data Base*. (Unpublished).

WINTERS, W. J. & DOIRON, H. H. *The 1987 IADC Fixed Cutter Bit Classification System*. SPE 16142, SPE/IADC DRILLING CONFERENCE, New Orleans, LA, March 15-18, 1987 p. 807-816.

ZADED, L. A. *Pruf: A Meaning Representation Language for Natural Languages*. Internation Journal of Man-Machine Studies, vol 10.

ZADED, L.A. *Fuzzy Logic and Approximate Reasoning*. Syntese, vol 30, 1975.

Apêndice A

Conhecimentos Básicos de Perfuração

Fases de um Poço

A perfuração de um poço de petróleo tem como objetivo estabelecer o fluxo de hidrocarbonetos da rocha reservatório até a superfície. Os poços de petróleo podem atingir grandes profundidades e por motivos operacionais não é perfurado de uma só vez, mas em diversas etapas. Estas etapas, chamadas fase do poço, são caracterizadas pelo diâmetro da broca em uso. Assim toda fase tem um diâmetro inferior a da anterior. Uma fase consiste na perfuração de um trecho do poço iniciando-se na profundidade final da fase anterior e prosseguindo até a profundidade programada para o seu final. Para a perfuração deste trecho normalmente são necessárias várias brocas. No final da fase são descidos e cimentados tubos de revestimentos de aço.

O custo da perfuração de uma fase pode alcançar milhares de dólares. Este valor está diretamente relacionado com a escolha e rendimento das brocas utilizadas durante a perfuração.

Brocas de Perfuração

Bourgoyne(1986) classifica as brocas de perfuração em dois grupos: broca draga e brocas de cones cortantes. As brocas dragas constituem um elemento cortante integral, sem

partes móveis, ao contrário das de cones, onde os cones giram em torno de seus eixos enquanto a broca gira em torno do eixo do poço.

O mecanismo de perfuração das brocas de draga é semelhante ao do arado no solo: formação de sulcos por raspagem. Este tipo de broca inclui as com lâminas integrais de aço, brocas de diamante naturais e as de diamantes artificiais.

Com o crescente desenvolvimento do projeto de brocas para perfuração, a broca com lâmina de aço, que foi a pioneira no método rotativo de perfuração, está atualmente em desuso.

Brocas Tricônicas

As brocas com três cones cortantes são, de longe, as mais usadas na perfuração rotativa hoje em dia. Este tipo de broca possui três elementos principais: estrutura cortante, rolamentos e corpo.

- **Estrutura cortante:** são fileiras circunferências de dentes interpostas entre as fileiras dos dentes dos cones adjacentes. Os dentes podem ser de aço fresado no próprio cone, ou insertos de carbeto de tungstênio, prensados em orifícios previamente abertos na superfície do cone. A ação das brocas tricônicas para formações moles é a de raspagem no fundo do poço, como as brocas draga de lâminas. Com isto, os dentes de aço destas brocas apresentam uma deposição de material duro numa de suas faces, de modo que uma face se desgasta mais rapidamente do que a outra e o dente permanece relativamente afiado. Para formações duras a ação é essencialmente de esmagamento.
- **Rolamentos:** Atualmente existem os rolamentos com roletes e esferas não selados, rolamentos com roletes e esferas selados e rolamentos Journal (fricção).

- **Corpo da Broca:** é constituídos pela conexão, pernas da broca e canais de fluido. Para conexão existem vários tipos de roscas que variam conforme o diâmetros das brocas. Na grande maioria das brocas atuais os canais de fluidos terminam em jatos colocados entre cada dois cones e são removíveis possibilitando a variação de diâmetros no bocal.

Brocas de Diamantes Naturais

Até cerca de vinte anos atrás, as brocas de diamantes naturais eram consideradas ferramentas exclusivas para perfuração de rochas duras e abrasivas, explorando as conhecidas propriedades dos diamantes: altíssima dureza; resistência compressiva e condutividade térmica. Entretanto, com os avanços no projeto, nos processos de fabricação e na escolha dos diamantes, esta broca está sendo usada atualmente na perfuração de vários tipos de rocha.

No método mais comum de fabricação desta broca, diamantes são colocados na superfície interna de um molde oco com configuração do corpo da broca. Em seguida, é colocada uma haste vazada de aço, no centro do molde, preenchendo-se com carbetto de tungstênio em pó o espaço entre o molde e a haste. O carbetto de tungstênio é, então, infiltrado com uma liga metálica num forno sujeito a temperaturas de 1050 a 1170° C, formando o material que constitui o corpo da broca. Após este processo de formação da matriz, uma haste adicional de aço é soldada à primeira para formar, após usinagem, a rosca da broca.

Quando esta broca é operada apropriadamente, apenas os diamantes entram em contato com a formação, criando um pequeno espaço entre a rocha e o corpo da broca e por sulcos moldados em sua face. Estes sulcos são estreitos de modo a forçar parte do fluido de perfuração a escoar pelo espaço entre rocha e matriz, limpando e resfriando os diamantes.

Brocas de Diamantes Artificiais

Desde o final da década de 70, uma broca, usando diamantes sintéticos, têm apresentado grande desenvolvimento: é a broca PDC. A característica principal deste tipo de broca é seu cortador, o *Polycrystalline Diamond Compact* (PDC), que é composto por uma fina camada de partículas de diamantes (0.5 mm) fixada a outra mais espessa (3mm) de carbeto de tungstênio num processo a alta temperatura e alta pressão. O cortador propriamente dito é formado pela junção deste compacto a um corpo cilíndrico de carbeto de tungstênio, que é propriamente moldado na face da broca.

Existem basicamente dois tipos de broca PDC: a com corpo de aço e a com corpo de carbeto de tungstênio. Nas brocas de corpo de aço, os cortadores são mais longos e são prensados em furos feitos no corpo da broca da mesma maneira que nas brocas tricônicas de insertos. Já os cortadores para a broca de carbeto de tungstênio são menores e são soldados ao corpo da broca após a formação da matriz, pois a camada de diamantes do PDC é termicamente estável até 700°C, temperatura inferior a alcançada no processo de formação da matriz.

Foram desenvolvidos cortadores de diamantes sintéticos estáveis termicamente até as temperaturas observadas no processo metalúrgico de infiltração para a formação de carbeto de tungstênio: são os chamados diamantes TSP *Thermally Stable Polycrystalline*. Estes diamantes substituem os diamantes naturais no processo convencional de fabricação de brocas de diamantes discutido anteriormente. As brocas TSP são indicadas para a perfuração de rochas muito duras ou abrasivas, substituindo as brocas PDC.

As brocas PDC, tanto as com corpo de aço como as de carbeto de tungstênio, apresentam jatos intercambiáveis por onde circula o fluido de perfuração. Alguns tipos de broca PDC de corpo de carbeto de tungstênio não apresentam jatos mas sim canais de fluxo, moldados da mesma maneira que as brocas de diamantes naturais.

As brocas PDC têm apresentado excelentes resultados em rochas moles e médias. Para rochas mais duras e abrasivas desenvolveu-se um tipo de broca PDC que, em alguns casos, substitui economicamente a broca de diamantes naturais ou as brocas TSP: a broca híbrida. Esta broca tem dupla estrutura de corte: uma primária, constituída de fileiras radiais de cortadores PDC convencionais e a secundária, formada por insertos de carbetos de tungstênio com diamantes impregnados. Cada um destes insertos fica posicionado bem atrás de cada cortador PDC. Assim, a broca começa perfurando como uma broca de PDC convencional a uma alta taxa de penetração. Quando uma formação mais dura ou abrasiva é encontrada, o cortador PDC se desgasta ligeiramente fazendo com que o inserto com diamantes impregnados passe a atuar sobre a rocha. O inserto de carbetos de tungstênio se desgasta gradualmente em contato com a rocha abrasiva expondo novos diamantes, que substituem os que são perdidos

Classificação IADC das brocas tricônicas

A identificação de brocas tricônicas normalmente se faz utilizando-se da classificação IADC. Este sistema utiliza um código com quatro caracteres onde os três primeiros são numéricos e o último é alfabético. Os caracteres numéricos estão divididos em série, tipo e modelo, como a seguir:

1. Série: podem ser atribuídos valores de 1 a 8 de acordo com a resistência da rocha (dureza) e o tipo de dente. Os valores de 1 a 3 referem-se as brocas de dente de aço e os valores de 4 a 8 às brocas de insertos de carbetos de tungstênio.
2. Tipo: É uma subdivisão da série. Existem quatro tipos que referem-se ao grau de dureza da rocha: tipo 1, formações mais moles e tipo 4, formações mais duras.
3. Modelo: referem-se às características do rolamento e proteção do calibre.

O quarto caracter descreve uma característica adicional da broca.

				Modelo						
				1	2	3	4	5	6	7
				Rolamento Convencional	Rol. convenc. refrigeração a ar	Rol. convenc. c/ proteção no calibre	Rolamento Selado	Rol. sel. com proteção no calibre	Rolamento journal	Rol. journal com proteção no calibre
Aço	1 Mole	1 2 3 4	1							
			2							
			3							
Dente de	2 Média	1 2 3 4	1							
			2							
			3							
In sertos	3 Dura	1 2 3 4	1							
			2							
			3							
In sertos	4 Mole	1 2 3 4	1							
			2							
	5 Média/Mole	1 2 3 4	1							
			2							
	6 Média/Dura	1 2 3 4	1							
			2							
	7 Dura	1 2 3 4	1							
			2							
8 Extremamente Dura	1 2 3 4	1								
		2								

4

Complemento
A - Para perfuração a ar
B - Vago
C - Jato central
D - Para melhor controle direcional
E - Jato com extensão
F - Vago
G - Proteção externa no corpo quanto ao calibre
H e I - Vagos
J - Jatos estendidos no lugar de um cone para utilização em poço direcional
K, L, M, N, O, P e Q - Vagos
R - Corpo com soldas reforçadas (para perfuração a percussão)
S - Sem detalhamento adicional
T, U, V e W - Vagos
X - Inserto tipo cinzel
Y - Insertos tipo cônico
Z - Outros tipos de insertos

Figura A.1: Código IADC para brocas tricônicas

Codificação do Desgaste de Broca

Nos trabalhos de Clark e Winters (1987) é discutido o novo sistema de codificar o desgaste das brocas de três dígitos revisto pelo IADC. Para substituir o antigo sistema foi proposta a utilização de um sistema mais simples e fácil de ser usado, e que é válido para todos os tipos de broca e se encontra atualmente em uso. Isto é, as brocas de diamante natural, de diamante sintético termicamente estável (TSP), de diamante sintético (PDC) e todos os tipos de broca tricônica utilizando-se desta classificação.

O sistema possui oito colunas divididas em grupos, conforme a seguir:

1. Desgaste dos dentes: engloba as quatro primeiras colunas:
 - a) A primeira coluna é usada para descrever o estado da estrutura cortante nos 2/3 internos da broca. Para brocas de dentes de aço é uma medida linear do desgaste dos dentes devido a abrasão ou dano; para brocas de insertos de tungstênio é uma medida linear da perda, desgaste ou quebra dos insertos e para brocas de diamante, TSP e PDC é uma medida linear da perda, desgaste ou quebra dos cortadores. Vide Figura A.3.
 - b) A coluna dois usa a mesma escala anterior para descrever as condições da estrutura cortante no 1/3 externo da broca. Vide Figura A.3.
 - c) A coluna três usa um código de duas letras para indicar a característica principal do desgaste da broca.
 - d) A coluna quatro usa um código de até duas letras ou números para indicar a localização do desgaste principal da broca.

2. Rolamento: engloba a quinta coluna. Usa uma escala linear de 0 a 8 para estimar a vida útil já usada do rolamento das brocas não seladas. Para brocas seladas deve-se indicar se um ou mais selos estão falhos (F) ou se todos estão efetivos (E). Se a broca for de diamante usa-se a letra (D).

3. Calibre: engloba a sexta coluna. Quando existe algum desgaste deve-se indicá-lo em 1/16 da polegada. No caso de brocas de diamante a perda de calibre será igual à leitura feita. Para brocas tricônicas demonstra-se matematicamente que a perda de calibre será igual a 2/3

da leitura realizada. Vide Figura A.4 (nesta figura também são mostrados os perfis das brocas de diamantes).

4. Observações: engloba as colunas sete e oito. A coluna sete mostra outra característica de desgaste da broca e usa o mesmo código da coluna três. A oitava coluna é usada para assinalar o motivo da retirada da broca. Um código de letras foi feito para indicar os motivos mais usuais de troca de brocas.

D				R	⊙	Observações	
Estrutura Cortante		Desgaste Principal		Rolamentos ou Selos	Calibre 1/16"	Outro desgaste	Motivo da Retirada
Interna	Externa	Caracter.	Localização				
1	2	3	4	5	6	7	8
(3) DESGASTE PRINCIPAL (Estes Códigos também são usados para a coluna 7)			(4) LOCALIZAÇÃO BROCAS TRICÔNICAS		(6) CALIBRE		
AA - Desgaste por Auto-Afição AD - Aba da Perna Desgastada AQ - Aba da Perna Quebrada BE - Bocal do Jato Erodido CA - Cone com Calibre Arredondado CD - Cone c/ Desgaste Descentralizado CE - Cone Erodido CI - Cone com Interferência CP - Cone Perdido CQ - Cone Quebrado CT - Cone Trincado DD - Dentes Desgastados DL - Dentes Lascados DP - Desgaste Plano nos Dentes DQ - Dentes Quebrados DT - Cone c/ Desgaste por Testemunho EG - Desgaste por Engrenagem EN - Desgaste por Enceramento ID - Insertos/Cortadores Desgastados IG - Insertos/Cortadores Girados IL - Insertos/Cortadores Lascados IP - Insertos/Cortadores Perdidos IQ - Insertos/Cortadores Quebrados JP - Jato Perdido MA - Marca em Forma de Anel MF - Marca de Ferro MI - Marca de Inserto NC - Nenhuma Características de Desgaste PE - Perna Empenada PQ - Perna Quebrada RR - Broca Reutilizável TR - Cone Travado TT - Trinca no Inserto ou Desintegração do Cortador por Temperatura WO - Wah-Out na Broca			I - Fileira Interna M - Fileira do Meio E - Fileira Externa T - todas as Fileiras		Ex. 0 - Nenhuma perda de calibre 1 - 1/16" de perda de calibre 2 - 2/16" de perda de calibre		
			BROCAS DE DIAMANTE		(8) MOTIVO DE RETIRADA DA BROCA		
			C - Cone N - Nariz P - Pescoço O - Ombro G - Calibre T - Todas as Áreas		AM - Aguardar Melhoria de Tempo BF - Tempo de Broca de Fundo CL - Para Condicionar Lama CM - Aumento do Custo/Metro DU - Por Dúvida EN - Broca Encerada FC - Falha da Coluna FF - Falha da Ferramenta de Fundo FM - Falha do Motor de Fundo FO - Para Foto JO - Jato Obstruído MB - Para Mudança de BHA MF - Mudança de Formação MP - Mudança de Projeto PE - Para Perfilagem PF - Profundidade Final do Poço ou Fase PP - Problemas de Poço QP - Por Queda de Pressão RD - Reversão por Desconexão RS - Reparo da Sonda TE - Para Testemunhar TF - Para Teste de Formação TO - Por Torque TP - Por Taxa de Penetração		
			(5) ROLAMENTOS/SELOS				
			ROLAMENTOS NÃO SELADOS - uma escala linear estimando a vida útil do rolamento já utilizada				
			ROLAMENTOS SELADOS				
			E - Indica Todos os Selos Efetivos F - Indica Um ou Mais selos Falhos D - Indica Broca de Diamante				

Figura A.2: Código IADC de desgaste das brocas

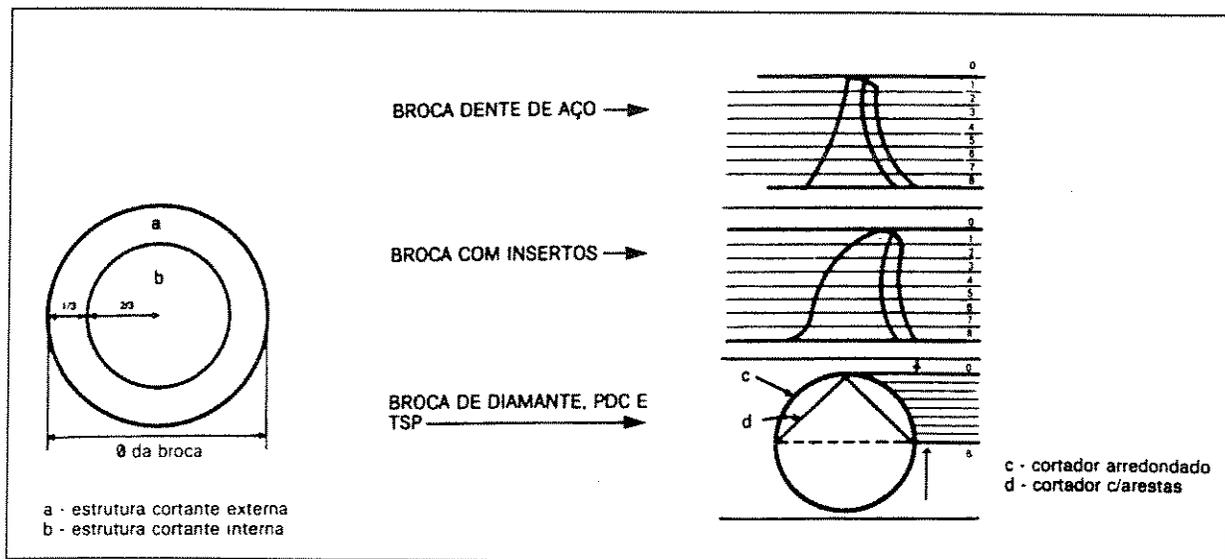


Figura A.3: Desgaste da estrutura Cortante

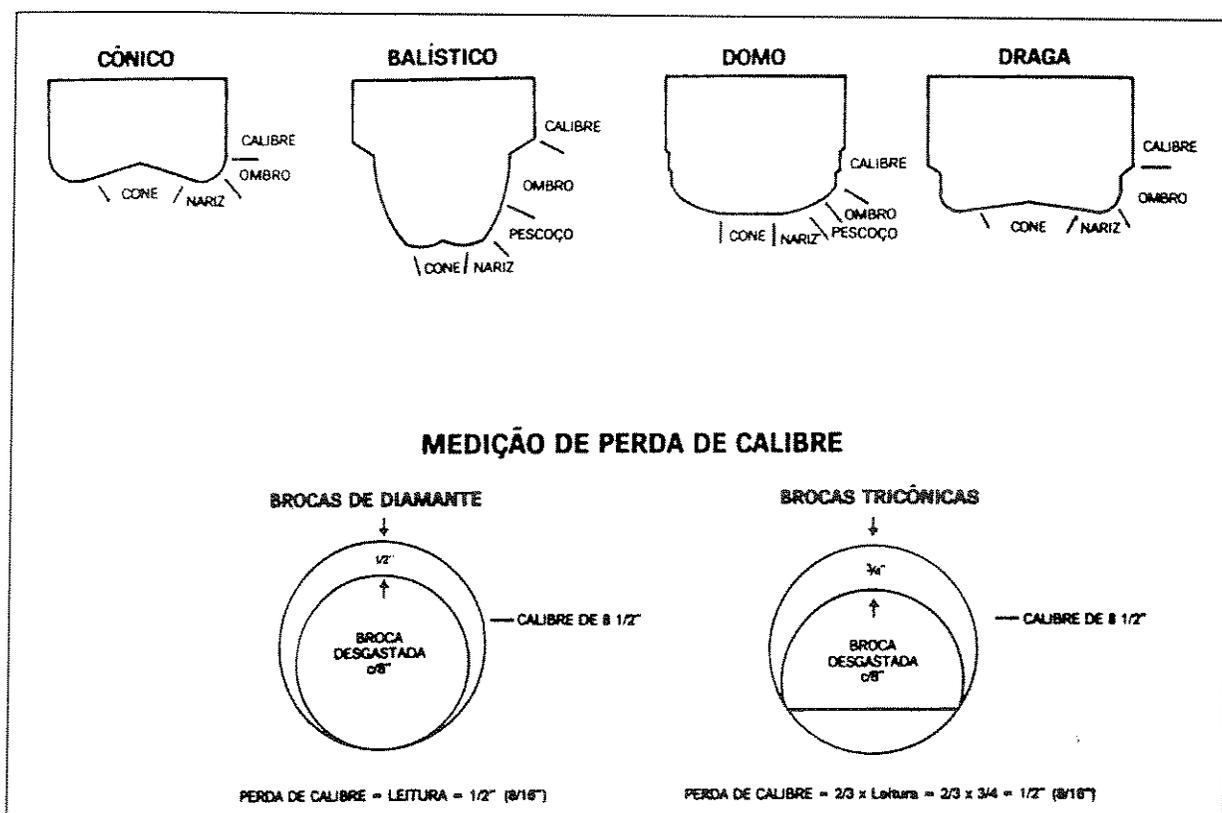


Figura A.4: Perfis de brocas de diamante e medição de calibre.

Apêndice B

Glossário

Abrasividade: o quão rapidamente uma broca é desgastada ao perfurar uma dada formação.

Confiança: crença que o especialista ou usuário coloca em cada conceito; uma medida da compatibilidade entre as evidências disponíveis e de dados prototípicos (padrões); quanto maior a confiança, maior é o suporte fornecido pelo dado.

Custo Métrico: é o custo total da perfuração dividido pela metragem perfurada pela broca. Os custos podem ser fixos ou variáveis. Os custos fixos são independentes do tempo em que a broca ficar no poço como por exemplo o próprio custo da broca. Os custos variáveis são a soma dos custos dos quais influem o tempo de operação, tais como a depreciação, o aluguel de equipamentos, o consumo de óleo diesel, o pessoal da sonda e do apoio e vários outros. O custo de pessoal é fixo para a empresa, mas para análise de uma broca este custo passa a ser variável, pois só será alocado ao custo métrico da broca enquanto ela permanecer no poço.

Gama Ray (Perfil de Raios Gama): utilizado como um indicador qualitativo e quantitativo do conteúdo argiloso de uma rocha qualquer. De um modo geral as rochas são mais ou menos radiotivas a depender da quantidade de elementos radiotivos presentes. Os folhelhos são as rochas que apresentam os mais altos valores se radioatividade após os evaporitos potássicos.

Lógica Nebulosa: a lógica nebulosa pode ser visto como uma extensão da lógica clássica e multivariada. O seu uso e objetivo são totalmente diferentes. O fato da lógica nebulosa trabalhar com raciocínio aproximado, em vez de raciocínio preciso, implica que, em geral, a

cada cadeia de raciocínio na lógica nebulosa são curtos no comprimento, e rigor não é uma regra importante como é na lógica clássica.

Uma forte propriedade da lógica nebulosa é a sua capacidade de trabalhar proposições em linguagem natural. O significado de uma proposição imprecisa é representado como uma restrição elástica numa variável (lingüística), e a resposta a uma pergunta é deduzida através da propagação da restrição elástica.

Um caminho para raciocínio aproximado, em que os valores e quantificadores são definidos como distribuições de possibilidades que levam rótulos lingüísticos, tais como: verdade, não muito verdade, muitos, não muitos, poucos, etc. As regras de inferência são aproximadas, em vez de exatas, para melhor manipular informações incompletas, imprecisas, ou não confiáveis.

Matching: A compatibilidade σ entre A e A' é a medida da igualdade entre os conjuntos nebulosos A e A' , tal que o casamento entre $\{X \text{ é } A\}$ e $\{X \text{ é } A'\}$ é calculado como:

$$(X \text{ é } A') = [(X \text{ é } A) \text{ é } \sigma],$$

$$\text{onde } \sigma \in [0,1]$$

A determinação de valor de σ , significa avaliar quão igual são estes dois conjuntos nebulosos, considerando todos seus elementos

Onda Cisalhante (Transversal ou Secundária): o movimento vibratório das partículas é perpendicular a direção de propagação. As ondas cisalhantes só se propagam nos meios que tenham resistência ao cisalhamento (não se propagam nos fluidos). Apresentam maior amplitude que as de compressão.

Onda Compressional (Longitudinal ou Primária): são ondas nas quais o movimento das partículas se faz na mesma direção da propagação, têm maior velocidade que as transversais e podem se propagar em qualquer meio elástico.

Perfil Sônico: ferramenta acústica que usa ondas sonoras para medir a porosidade.

Perfurabilidade: é a medida da facilidade de se perfurar uma formação.

Redes Neurais Nebulosas: é uma rede neural com uma topologia progressiva com três ou mais camadas: a camada de entrada para as evidências, camadas intermediárias para abstrações e camada de saída para categorias. Neste modelo o N é definido por:

$$N = \{X, \theta, \alpha, G, Y\}$$

onde:

X é a ativação dos dentritos: $X = w_i \cdot X_i$

X_i são sinais de entrada nos dentritos (valores de confiança)

w_i são os pesos sinápticos (valores de relevância)

θ é uma função de promediação, que combina a atividade pré-sináptica P

P é a atividade pré-sináptica, que é uma força dirigida para ativar o axônio de neurônio N , definida como:

$$P = \theta_{i=1}^n w_i \cdot X_i$$

A função promediação θ depende do tipo de agregação proposta para o nó. Em geral, θ é uma combinação de somatória e um quantificador lingüístico Q que pode ser: E, OU, PELO MENOS N, etc.

α são limiares

G são funções de codificação

Y é a ativação do axônio, que é dependente de α , G e P definido como:

$$Y = \begin{cases} 0 \dots P \leq \alpha_1 \\ G(P) \dots \alpha_1 \leq P \leq \alpha_2 \\ 1 \dots P \geq \alpha_2 \end{cases}$$

α e G podem ter valores distintos, para diferentes braços de axônio do neurônio, que podem exibir diferentes propriedades. Usando esta característica podemos implementar um nó de decisão. Nesta condição, a ativação Y de neurônio é:

$$Y_j = \begin{cases} \gamma_1 \dots Y > \alpha_j \\ G(Y) \dots \alpha_{j-1} < Y \leq \alpha_j \\ \gamma_2 \dots Y \leq \alpha_{j-1} \end{cases}$$

$$\gamma_1, \gamma_2 \in [0, 1]$$

Nesta linha de raciocínio, o neurônio pode ser visto como uma regra de inferência da lógica nebulosa, tal que: O *matching* toma o lugar da sinapse, a agregação é executada no

corpo celular; a projeção é relacionada com a codificação do axônio; e o *matching* inverso toma o lugar no braço axônico, onde o limiar axônico está relacionado com o índice de semelhança.

Relevância: adesão entre variáveis simbólicas representando conceitos; uma medida da frequência de associação entre evidências e a hipótese; quando maior a relevância, maior a influência do dado; relevância zero significa sem influência.

Tempo de Trânsito: é o inverso da velocidade do som. Corresponde ao tempo necessário para a onda sonora percorrer um pé de formação. Na perfilagem sônica a velocidade é normalmente registrada em pés por segundo e o valor do tempo de trânsito é expresso em microsegundos por pé.