

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

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

**METODOLOGIA DE ESCOLHA DE BROCAS DE  
PDC BASEADO NO PERFIL SÔNICO, CUSTO ESTIMADO  
E PERFORMANCE PASSADA DAS BROCAS**

*Esse exemplar corresponde a redação final da  
tese defendida pelo Eng. José Luiz Falcão e  
aprovado pela comissão julgadora em 18/11/91*

*47/91*

*Eric Edgar Maidla*  
Prof. Dr. Eric Edgar Maidla

**Autor : José Luiz Falcão  
Orientador : Eric Edgar Maidla**

Novembro de 1991

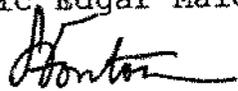
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

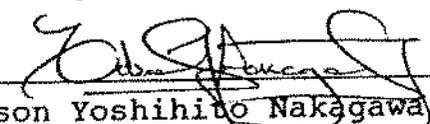
A dissertação "Metodologia de Escolha de Brocas de PDC Baseado no Perfil Sônico, Custo Estimado e Performance Passada das Brocas", elaborada por José Luiz Falcão e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela subcomissão de Pós-Graduação como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 18 de Novembro de 1991

Banca Examinadora

  
Eric Edgar Maidla, Ph. D.

  
Sergio A. B. Fontoura, Ph. D.

  
Edson Yoshihito Nakagawa, Ph. D.

## AGRADECIMENTOS

À UNICAMP pelo enriquecimento profissional e cultural.

À PETROBRÁS, por ter me dado a oportunidade de fazer o curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo.

Ao Prof. Dr. Eric Edgar Maidla pela dedicação na orientação desta tese.

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

Aos colegas do DEPER, especialmente aos Engenheiros: Francisco Castro, Shiniti Ohara, Carlos F. Fontenelle Dumans e ao técnico Wilson Sergio do Amorim pela ajuda na coleta dos dados de perfis.

A Juan M. Recorder, da Christensen Roder, pelo fornecimento alguns dos dados sobre brocas de PDC.

Ao estagiário Francisco J. P. Dezen pela elaboração da parte gráfica do programa.

## RESUMO

Determinar um PROGRAMA DE BROCAS que seja compatível com a litologia e que REDUZA o CUSTO DO METRO PERFURADO, torna-se cada vez mais importante devido tanto aos altos custos envolvidos na perfuração de um poço quanto às incertezas sobre o retorno do capital investido. Com esse objetivo apresenta-se um Método de Escolha de Brocas de Diamante Policristalino (PDC). São analisados outros métodos que consideram as características das formações, assim como algumas características construtivas e de projeto desse tipo de broca que tem influência sobre o seu desempenho.

Este estudo propõe, a partir do Banco de Dados de Perfil e do Histórico das Brocas de PDC já utilizadas, identificar os intervalos de mesma Resistência ao Cisalhamento ( $\tau$ ), calculada com base no método de Dumans<sup>(1)</sup>, em que um determinado tipo de broca de PDC apresentou o melhor desempenho entre todas as outras que operaram nas mesmas condições, propondo como medida de desempenho o Custo Estimado do Metro Perfurado ( $C_E$ ). Assim, baseado no desempenho das brocas utilizadas nos poços anteriores, e de posse da resistência ao cisalhamento das rochas a serem perfuradas no poço seguinte, poderia-se indicar um PROGRAMA DE BROCAS DE PDC mais adequado a essas condições. A utilização sistemática do método com realimentação do Arquivo com os novos dados obtidos, deverá fornecer respostas cada vez mais confiáveis.

## ABSTRACT

Due to the high costs of oil well drilling, as well as the uncertainties about the revenues of the invested money, the development of a Bit Program compatible with the formation to reduce the costs of the drilled meter has become increasingly important.

In order to achieve costs reduction a proposal of a method to select Polycrystalline Diamond Bits (PDC) is presented here, where some selecting methods that consider the characteristics of the formation are analysed. Some project and constructive characteristics of this kind of bits that condition its performance are also analysed here.

Using the Profile Data Bank and the PDC bits already used, this study aims at the identification of the intervals of the same Shear Strength ( $\tau$ ), whose figures were based on Dumans's method<sup>(1)</sup>. According to this method, certain kinds of PDC bits show a better performance among other PDC bits that work under the same conditions, using the Estimated Cost ( $C_f$ ) as performance measure. Therefore, based on the performance of the bits previously used in other wells, and on the Shear Strength of the rocks to be drilled in the next well, a more adequate Bit Program can be suggested. The systematic use of this method combined with file input of the new data obtained will increasingly provide reliable and more accurate information.

## ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS UTILIZADOS

- $C_b$  = Custo da Broca (US\$)
- $C_s$  = Custo da Sonda (US\$/h)
- $C_m$  = Custo do Metro Perfurado (US\$/m)
- $C_E$  = Custo Estimado do Metro Perfurado (US\$/m)
- $\Delta D$  = Intervalo Perfurado (m)
- $P_E$  = Profundidade de Entrada da Broca (m)
- $P_S$  = Profundidade de Saída da Broca (m)
- $P$  = Profundidade do Poço (m)
- $W$  = Peso Sobre a Broca (klb)
- $N$  = Rotação da Broca (RPM)
- $K$  = Constante Adimensional
- $d_B$  = Diâmetro da Broca (pol)
- $R$  = Taxa de Penetração da Broca (m/h)
- $t_b$  = Tempo de Broca no Fundo (h)
- $t_m$  = Tempo de Manobra (h)
- $V_{cl}$  = Fator de Argilosidade (%)
- $E$  = Módulo de Elasticidade (lb/pol<sup>2</sup>)
- $C$  = Módulo de Compressibilidade (lb/pol<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>
- $\phi$  = Ângulo de Atrito Interno (graus)
- $\tau_0$  = Coesão Interna da Rocha (lb/pol<sup>2</sup>)
- $\sigma_1$  = Tensão de Ruptura à Compressão (lb/pol<sup>2</sup>)
- $\sigma_3$  = Pressão de Confinamento (lb/pol<sup>2</sup>)
- $\sigma_n$  = Tensão Normal ao Plano de Falha (lb/pol<sup>2</sup>)
- $\tau$  = Tensão de Cisalhamento no Plano de Falha (lb/pol<sup>2</sup>)
- $\rho$  = Massa Específica da Amostra Considerada (g/cm<sup>3</sup>)

$\phi$  = Porosidade (%)  
 $\alpha$  = Fator de Tamanho dos Grãos do Mineral da Rocha  
 $\rho_w$  = Densidade do Fluido de Perfuração (lb/gal)  
 $\rho_p$  = Densidade equivalente à pressão de poros (lb/gal)  
 $E_s$  = Energia Específica (pol lbf /pol<sup>3</sup>)  
 $\Delta t_f$  = Tempo de Trânsito nos Fluidos dos Poros ( $\mu$ seg/ft)  
 $\Delta t_m$  = Tempo de Trânsito na Matriz da Rocha ( $\mu$ seg/ft)  
 $\Delta t_s$  = Tempo de Trânsito Cisalhante ( $\mu$ seg/ft)  
 $\Delta t_c$  = Tempo de Trânsito Compressional ( $\mu$ seg/ft)  
SDT= Perfil Sônico Digital  
GR = Perfil Raio Gama  
BHC= Perfil Sônico (Borehole Compensate)  
IADC = International Association of Drilling Contractors  
CEC = Cations Exchange Capacity (meq/100g)  
 $\delta$  = relação entre o tempo de trânsito cisalhante e o  
tempo de trânsito compressional ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ )

## ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	
1.1 - Introdução	1
1.2 - Objetivo do Estudo	3
1.3 - Justificativa	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 - Histórico das Brocas de PDC	5
2.2 - Características Gerais das Brocas	9
2.3 - Classificação IADC das Brocas de PDC	17
2.4 - Mecanismo de Desgaste dos Cortadores	19
2.5 - Método de Escolha de Brocas Utilizando Perfis	22
2.6 - Método de Seleção de Brocas Baseado na Energia Específica	29
2.7 - Métodos de Seleção de Brocas de PDC	30
CAPÍTULO 3 - MÉTODO PROPOSTO	
3.1 - Introdução	45
3.2 - Limitações	46
3.3 - Custo Estimado	47
3.4 - Resistência ao Cisalhamento da Rocha	49
3.5 - Geração do Arquivo de Brocas de PDC	51
3.6 - Obtenção da Broca de Mínimo Custo Para uma Determinada Faixa de Resistência ao Cisalhamento	56
CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO	
4.1 - Análise dos Gráficos	57
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	
5.1 - Conclusões	78
5.2 - Recomendações	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
ANEXOS	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 PASTILHA DE DIAMANTE POLICRISTALINO (REF. 28).....	10
2.2 ESTRUTURA CORTANTE DA BROCA DE PDC (REF. 10).....	11
2.3 INCLINAÇÃO DE TOPO (a) E LATERAL (b) DO CORTADOR (REF. 28) .....	13
2.4 RELAÇÃO ENTRE VIDA ÚTIL DA BROCA E NÚMERO DE CORTADORES (REF. 28).....	14
2.5 CONICIDADE DO PERFIL: BAIXA (a), DUPLA (b) E PARABÓLICA (c).(REF. 29).....	16
2.6 SELEÇÃO ECONÔMICA DE BROCAS PARA O CAMPO DE BLOCKER, TEXAS, EUA (REF. 2).....	26
2.7 PERFIL PARA SELEÇÃO ECONÔMICA DE BROCAS E SEUS LIMITES (REF. 2).....	28
2.8 GUIA UNIVERSAL PARA SELEÇÃO DE BROCAS DE ROLAMENTO (REF. 2) .....	28
2.9 GUIA DE SELEÇÃO DO TIPO DE BROCA EM FUNÇÃO DO CEC PARA O GOLFO DO MÉXICO (REF. 3).....	33
3.1 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS FORÇAS ATUANTES NO FUNDO DO POÇO CONSIDERADAS NA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (REF. 1).....	51

4.1	VARIAÇÃO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA FIXO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA VARIANDO (DIÂMETRO 8.1/2 POL).....	58
4.2	VARIAÇÃO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA VARIADO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA FIXA (DIÂMETRO DE 8.1/2 POL).....	60
4.3	VARIAÇÃO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA VARIANDO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA FIXA (DIÂMETRO 12.1/4 POL).....	62
4.4	VARIAÇÃO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA FIXO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA VARIANDO (DIÂMETRO 12.1/4 POL).....	63
4.5	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B27M DE 12.1/4 POL.....	66
4.6	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B33M DE 12.1/4 POL.....	66
4.7	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R433 DE 12.1/4 POL.....	68
4.8	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R435H DE 12.1/4 POL.....	68
4.9	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R410 DE 12.1/4 POL.....	70
4.10	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R408 DE 12.1/4 POL.....	70
4.11	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R482 DE 8.1/2 POL.....	73

4.12	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS PD2 DE 8.1/2 POL.....	73
4.13	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R435SE DE 8.1/2 POL.....	75
4.14	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R485 DE 8.1/2 POL.....	75
4.15	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B33M DE 8.1/2 POL.....	77
4.16	RELAÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R433 DE 8.1/2 POL.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 FATOR DE CORREÇÃO PARA O TEMPO DE TRÂNSITO CISALHANTE EM FUNÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS DO MINERAL (REF 2).....	24
2.2 SELEÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA BROCAS DE PDC COM CORTADORES DE GRANDE DIÂMETRO (REF 3)....	34
2.3 SELEÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA BROCAS DE PDC TIPO RABO DE PEIXE (REF 3).....	35
2.4 FORMATO DOS DADOS NO ARQUIVO DE PERFIL.....	38
2.5 VALORES DA RELAÇÃO ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) PARA A ÁREA DE TUBARÃO (REF 1).....	38
2.6 EXPRESSÕES PARA ESTIMAR A RELAÇÃO ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) PARA A ÁREA DE MACAÉ (REF 1).....	38
2.7 VALORES DA RELAÇÃO ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) PARA OUTRAS ÁREAS (REF 1).....	39
2.8 ÍNDICE DE ARGILOSIDADE EM FUNÇÃO DA LITOLOGIA (REF. 1).....	40
2.9 VALORES MÉDIOS DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO ( $\phi$ ) EM FUNÇÃO DA LITOLOGIA (REF 7).....	43
3.1 RESUMO DA PESQUISA DO ARQUIVO DE BROCAS POR ÁREA.	55
3.2 RESUMO DA PESQUISA DE BROCAS POR DIÂMETRO.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
2.1 CLASSIFICAÇÃO IADC DAS BROCAS DE CORTADORES FIXOS (REF. 32).....	18
2.2 CLASSIFICAÇÃO IADC DO DESGASTES DAS BROCAS (REF. 34).....	21

## CAPÍTULO 1

### APRESENTAÇÃO

#### 1.1 - INTRODUÇÃO

Para que se obtenha o petróleo, diversas etapas têm que ser vencidas. Dentre elas destacamos aquela que permitirá colocar em contato o reservatório de petróleo com a superfície, ou seja, o poço.

O processo de perfuração de um poço de petróleo envolve cifras de alguns milhões de dólares, sendo que uma das ferramentas mais básicas utilizadas para esse fim é a broca de perfuração ('drilling bit'). A seleção da broca mais adequada a um determinado tipo de formação, ou seja, daquela que fornece o menor custo do metro perfurado é um dos principais problemas com que se defronta o Engenheiro de Perfuração.

As brocas empregadas na perfuração pelo Sistema Rotativo usualmente são classificadas, de acordo com seu projeto, em dois tipos<sup>(6)</sup>: Draga ('drag bit') e Rolamento ('rolling cutter bits'). As de rolamento atualmente em uso são as do tipo Tricônico e seu principal mecanismo de corte é por esmagamento (rompe as rochas por compressão) e o das Draga é por raspagem (rompe a rocha por cisalhamento).

As brocas de Diamante Policristalino (PDC) são uma evolução das antigas brocas tipo Draga. Introduzidas inicialmente nos campos petrolíferos do Mar do Norte elas se destacaram pelas altas taxas de penetração obtidas em evaporitos e calcáreos, superiores às de rolamento nas mesmas condições. Em certas litologias sua vida também é significativamente maior. Essa combinação de taxa de penetração maior com vida mais longa das brocas de PDC, apesar de mais caras que as de rolamento, quando corretamente empregadas resulta num menor custo do metro perfurado.

Todavia, para que se adeque um tipo de broca a uma certa litologia há necessidade de um método de seleção. Para brocas de rolamento, existem diversos métodos<sup>(2,4)</sup> devido a grande quantidade de conhecimentos e informações acumulados nos mais de 80 anos, desde o início de sua utilização, em 1909. A seleção das brocas de PDC, ao contrário, tem sido tradicionalmente considerada 'mais arte que ciência',<sup>(14)</sup>. Apesar de algumas tentativas<sup>(13,14,18,19)</sup> para modelagem de brocas e coroas de PDC e dos Bancos de Dados de Parâmetros de Perfuração e Perfis de Poços, o processo da tentativa ainda domina na prática. A razão parece ser a falta de um método que converta todas essas informações em uma técnica compreensiva de escolha de brocas.

## 1.2 - OBJETIVO

O objetivo deste estudo é, a partir das brocas de PDC já utilizadas, apresentar um método que auxilie na escolha da broca mais adequada ao tipo de rocha que será perfurada através dos seguintes passos:

(1) com base no Histórico das brocas de PDC utilizadas nos poços anteriores e do Banco de Dados de Perfis de Poços, gravados em fitas magnéticas, construir um Arquivo de Brocas de PDC, onde se correlaciona o tipo de broca e a Resistência ao Cisalhamento<sup>(1,22)</sup> do intervalo onde ela foi utilizada juntamente com os parâmetros (intervalo perfurado, tempo de broca no fundo e custo da broca) que a representam;

(2) para o poço seguinte, de posse da Resistência ao Cisalhamento dos diversos intervalos a serem perfurados e baseado nesse Arquivo de Brocas de PDC, selecionar um conjunto de brocas mais adequado de modo a reduzir o custo da perfuração.

## 1.3 - JUSTIFICATIVA

Apesar das brocas só responderem por cerca de 3% do custo total da perfuração do poço, elas tem influência sobre quase 50% desse custo total.

Nos campos do Mar do Norte as brocas de PDC já respondem por cerca de 70% da metragem total perfurada e na área de Macaé por cerca de 13% (em 1988) com tendência de

aumento dessa participação. Assim, qualquer melhoria que se faça numa escolha adequada desse tipo de broca deve-se refletir no custo do poço.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - HISTÓRICO

Nos primórdios da indústria petrolífera no século passado, as primeiras brocas empregadas economicamente na perfuração de um poço pelo sistema rotativo foram as do tipo Draga<sup>(6)</sup>. Os elementos cortantes dessas brocas consistiam de lâminas de aço fixas ao seu corpo revestidas de carbeto de tungstênio. Porém, devido ao rápido desgaste dessa estrutura cortante durante a operação, elas foram suplantadas em termos de economicidade com o surgimento das brocas de Rolamento no início deste século (1909), e que desde então, através dos constantes aperfeiçoamentos em seu projeto, passaram a dominar o mercado.

Apesar disso, as brocas draga possuíam algumas vantagens sobre às de rolamento tais como a de não possuírem partes móveis, o que as tornava menos sujeitas a quebras no fundo do poço, além de necessitarem de menos peso sobre a broca, o que produzia poços mais retos e de melhor qualidade. O que limitava sua utilização econômica era o desgaste acentuado de sua estrutura cortante que reduzia sua vida útil.

Em 1954<sup>(28)</sup>, cientistas suecos, americanos e sul-africanos, trabalhando independentemente, conseguiram desenvolver um processo de obtenção de cristais de diamante industrial a partir do grafite. Em 1970, a General Electric conseguiu a aglutinação desses cristais produzindo os primeiros PCD ('polycrystalline diamond') e posteriormente os primeiros compactos ('polycrystalline diamond compact' ou PDC). Com essa nova opção de cortador disponível, foi lançada no mercado, no decorrer da década de 70, uma nova geração de brocas draga que utilizava compactos de Diamante Policristalino (PDC) como elemento cortante, mais resistentes ao desgaste, e que rapidamente se destacaram como uma alternativa econômica para perfuração de rochas de dureza mole a média.

No decorrer deste trabalho se usará muito o termo dureza que tem muita relação com a perfurabilidade da rocha, muito utilizado na indústria petrolífera. No Anexo 1 encontra-se uma escala comparativa entre dureza e resistência a compressão da rocha obtida por um fabricante de brocas<sup>(28)</sup>.

O início do uso comercial dessas brocas se deu em 1976 nos campos petrolíferos do Mar do Norte, onde foi utilizada com sucesso na perfuração de evaporitos e carbonatos. No Brasil, elas foram introduzidas em 1984. Durante os anos seguintes, com as melhorias em seu projeto, a vida útil e as taxas de penetração obtidas foram aumentadas o

que permitiu ampliar as áreas viáveis a sua utilização. Apesar disso, a aplicação das brocas de PDC estava limitada:

- a) a perfuração de formações de dureza mole a média,
- b) a poços de pequeno diâmetro,
- c) as fases finais dos poços,
- d) a utilização com motores de fundo,
- e) a poços perfurados com lama à base de óleo.

Na tentativa de perfuração de formações mais duras, enquanto outros aspectos de projeto da broca eram aperfeiçoados, o cortador de PDC demonstrava ser o seu componente mais vulnerável, pois ele é suscetível de ser desgastado devido ao calor gerado pelo atrito com a rocha. Nessas formações, a broca de PDC pode iniciar a perfuração com taxas elevadas, mas logo se desgastará sem conseguir uma corrida econômica. Esse fato está de acordo com a conclusão de alguns autores<sup>(5,9,11)</sup> de que a estrutura cortante dessas brocas também é adequada à perfuração de formações duras o limitante é o desgaste acentuado que reduz sua vida útil.

Para superar esse problema, e estender seu uso a formações mais duras, foram feitas várias tentativas pelos fabricantes. Uma delas, em 1980, foi a broca HÍBRIDA, que consistia no posicionamento de insertos de carbeto de tungstênio, impregnados de diamante, atrás dos cortadores de PDC. O objetivo era obter as vantagens das altas taxas de penetração dos PDC, quando perfurando em formações de dureza mole a média, e a proteção contra quebra prematura,

proporcionada pelos insertos, quando intercalações de rochas duras fossem encontradas. Na prática entretanto, essas modificações não resultaram num aumento significativo da taxa de penetração nem da vida da broca<sup>(16)</sup>.

Outra tentativa foi com a utilização de brocas TSP ('thermally stable synthetic diamond cutters'). Esses cortadores, termicamente estáveis, também são produzidos a partir da aglutinação de cristais de diamante industrial, num processo semelhante ao do PCD, somente que o material aglutinante tem coeficiente de expansão térmica semelhante ao do diamante resultando num material termicamente estável até próximo de 1200 graus centígrados, temperatura em que o diamante inicia o processo de reversão para o grafite. Entretanto, os cortadores TSP, devido a sua fragilidade, são produzidos em tamanho inferior ao dos cortadores de PDC, o que não lhes permite obter as mesmas taxas de penetração destes, em função do seu tamanho e exposição que limita sua penetração na rocha e dificulta sua limpeza.

Em 1985, foi feita uma nova tentativa com as brocas tipo MOSAICO. Nelas, procurava-se aliar a ação de corte dos PDC com a resistência à abrasão dos TSP. Os cortadores das brocas MOSAICO são formados a partir da junção dos TSP, que têm forma triangular, numa pastilha maior através de um processo que os fabricantes mantêm em segredo. Em teoria, esses cortadores, com uma área exposta maior e mais resistentes à abrasão, deverão proporcionar uma taxa de

penetração mais elevada em rochas mais duras, que deverá se aproximar das obtidas com os cortadores de PDC em rochas de dureza média.

As brocas de PDC também encontraram aplicação na perfuração de poços com diâmetro maior que o diâmetro nominal da broca, em substituição aos alargadores tradicionais ('under reamers'). Atualmente estão sendo usados dois tipos de broca com essa finalidade: as BICENTRADAS ('bicenter bits') e as EXCÊNTRICAS, empregadas principalmente na perfuração em zonas de sal visando reduzir a possibilidade de prisão da coluna de perfuração pelo fechamento do poço, e também, para melhorar a cimentação de revestimentos profundos de diâmetro pequeno, pelo aumento do espaço anular o que permite uma cimentação mais efetiva<sup>(17)</sup>.

## 2.2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS

### 2.2.1 - Aspectos Construtivos

2.2.1.1 - Cortador PDC : o compacto ou cortador PDC é formado por uma pastilha (Fig. 2.1), composta por uma camada de PCD ('Polycrystalline Diamond') de aproximadamente 0.5 mm e uma outra mais espessa, em torno de 2.7 mm, de carbeto de tungstênio. O PCD é obtido através da aglutinação de cristais de diamante industrial, sintetizados a partir do grafite, utilizando o cobalto como catalizador, submetido a altas

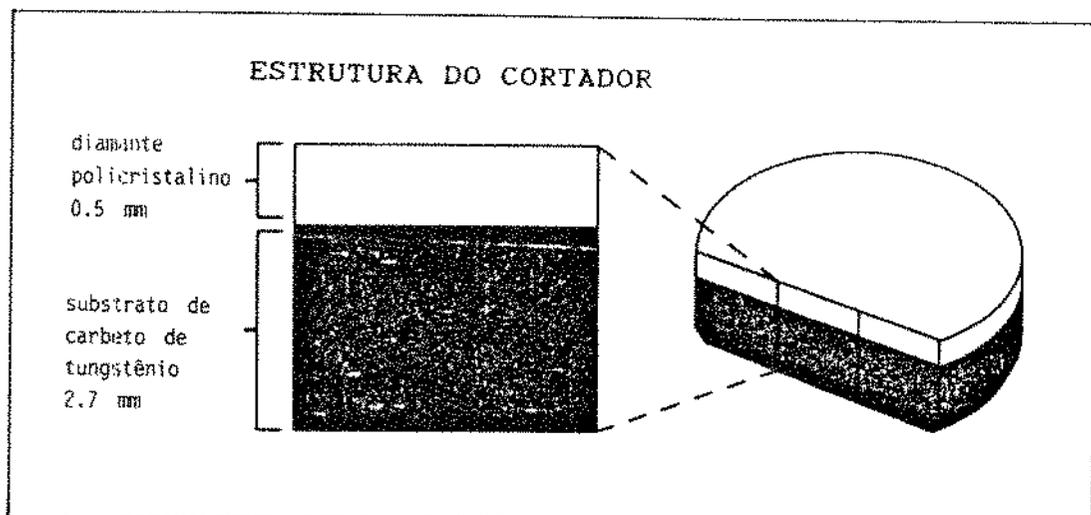


FIG. 2.1 - PASTILHA DE DIAMANTE POLICRISTALINO (REF. 28)

pressões, em torno de 5170 MPa (750 kpsi) e altas temperaturas, em torno de 1400 graus centígrados. Os compactos assim formados são fixados: diretamente ao corpo da broca por um processo denominado brasagem, caso das de corpo de Carbeto de Tungstênio ou por interferência, caso das de corpo de aço, onde cortadores tipo poste ('stud') são fixados à broca num processo semelhante ao utilizado na fixação dos insertos no cone das brocas de rolamento tipo Journal, formando assim a estrutura cortante da broca de PDC (FIG. 2.2).

Devido à disposição aleatória dos cristais de diamante, os PDC apresentam resistência à fratura igual em todas as direções, diferindo dos diamantes naturais que apresentam planos de clivagem. Além disso, durante a perfuração, o cortador apresenta auto afiação, devido ao

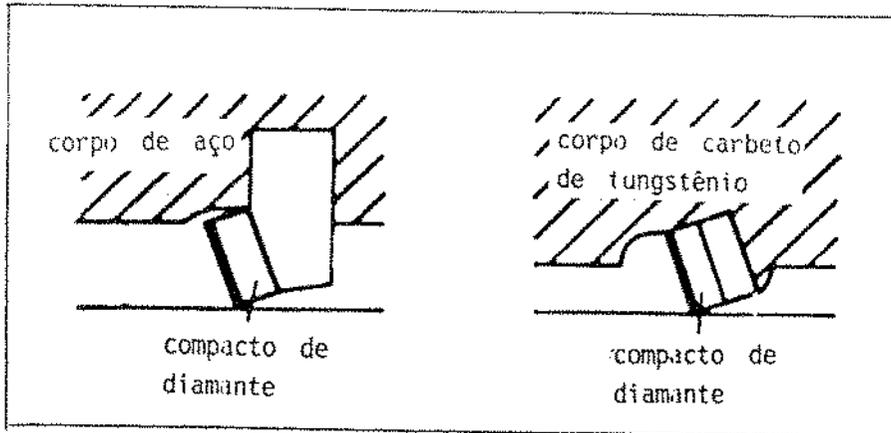


FIG. 2.2 - ESTRUTURA CORTANTE DA BROCA DE PDC (REF. 10)

substrato de carbeto de tungstênio se desgastar mais rapidamente, por abrasão, do que os diamantes. Por outro lado, o substrato de carbeto de tungstênio garante à pastilha maior resistência ao impacto, visto que a camada de diamantes é quebradiça.

2.2.1.2 - Material do Corpo : quanto ao material o corpo da broca pode ser de dois tipos: corpo de aço ('steel body') ou carbeto de tungstênio ('matrix body').

A) Corpo de Aço: foi o primeiro tipo utilizado, permitindo fabricação em série. Recebe ainda, uma camada externa de carbeto de tungstênio para torná-la mais resistente à abrasão e à erosão. Essas brocas também possuem insertos de carbeto de tungstênio para proteção do seu calibre.

B) Corpo Carbetto de Tungstênio: nessas brocas utiliza-se uma liga de cobre ('binder') como o elemento fundente que vai preencher os espaços vazios entre os grãos de carbetto de tungstênio. Devido ao seu processo artesanal de fabricação, elas podem ser moldadas a uma grande variedade de formatos, função da utilização a que se destinam (poços direcionais, perfuração rotativa, turbina, etc), além da grande flexibilidade para posicionamento dos cortadores e dos jatos. O corpo dessas brocas possui elevada resistência à abrasão, erosão e impacto, podendo ainda, caso necessário, ter sua área externa reforçada com incrustações de diamantes naturais para uma proteção suplementar que permite à broca permanecer calibrada mesmo perfurando formações abrasivas, entretanto, devido ao fato de utilizarem materiais mais nobres, são mais caras que as brocas corpo de aço.

## 2.2.2 - Características de Projeto

### 2.2.2.1 - Referente aos Cortadores

A) Inclinação de Topo ('Back Rake Angle'): se refere a inclinação ( $\alpha$ ) do cortador com a vertical (Fig 2.3a) que varia normalmente entre 0 e 25 graus. Testes de laboratório demonstraram que o decréscimo da Inclinação de Topo torna a ação de corte mais agressiva e eficiente, permitindo obter-se maiores taxas de penetração, porém, baixos valores da inclinação de topo deixam os cortadores mais vulneráveis à

quebra por impacto caso se encontrem formações mais duras.

B) Inclinação Lateral ('Side Rake Angle'): é a inclinação ( $\beta$ ) do cortador em relação ao eixo da broca (Fig 2.3b). Seu efeito é o de dirigir os cascalhos cortados para o espaço anular, estando relacionado a limpeza do fundo do poço.

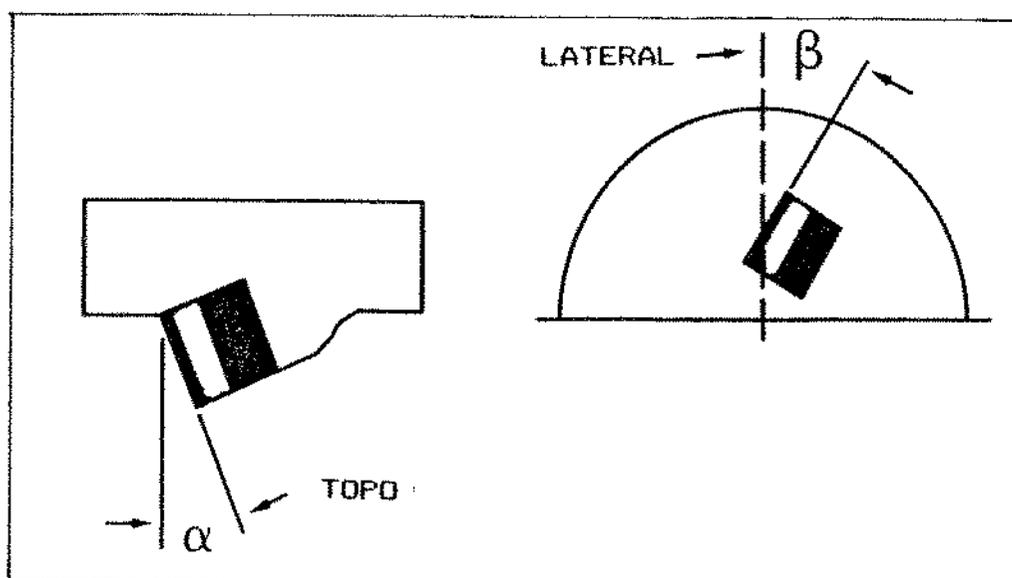


FIG 2.3 - INCLINAÇÃO DE TOPO (a) E LATERAL (b) DO CORTADOR (REF 28)

C) Tamanho: está associado com a dureza da rocha onde a broca será utilizada, formações moles permitem o uso de cortadores grandes, com diâmetro de até 5.08 cm (2 pol), com as vantagens de maior exposição e menor densidade de cortadores com maior área de diamantes. Para formações mais duras, eles são pequenos, até de 1.27 cm (0.5 pol), com as vantagens de permitir inclinação de topo variável e a boa

durabilidade dos cortadores devido à maior densidade permitida.

D) Densidade: é expressa pelo número de cortadores distribuídos pela face da broca. Se a densidade aumenta a vida útil da broca também aumenta, entretanto, a taxa de penetração diminui, pois para um mesmo peso sobre a broca quanto maior o número de cortadores menor é a parcela do peso sobre cada um deles e, portanto, menor é sua penetração na formação. A Figura 2.4 representa a relação entre a vida útil e o número de cortadores constatada por um fabricante<sup>(28)</sup> para as condições: brocas de diâmetro 8.1/2 pol (21.6 cm); perfurando arenitos de moles a médios e folhelhos; taxa de penetração entre 10 e 13 m/h com fluido de perfuração base-água.

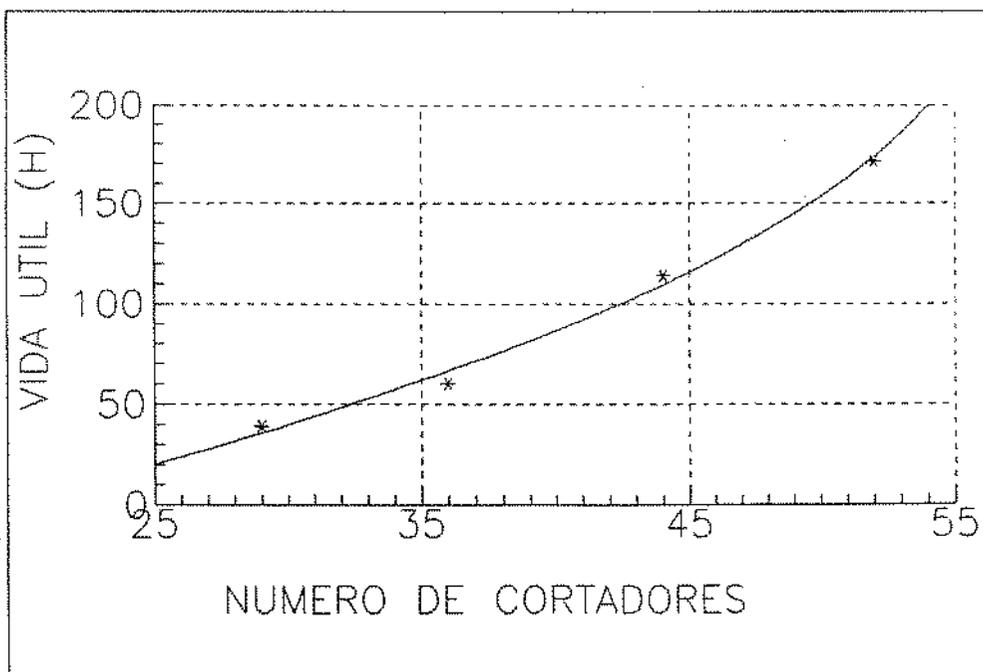


FIG 2.4 - RELAÇÃO ENTRE VIDA ÚTIL DA BROCA E NÚMERO DE CORTADORES (REF 28)

E) Exposição ('cutter exposure'): é a altura do cortador que se salienta em relação à face da broca. Além de estar associado à penetração do cortador na formação também tem relação com o espaço disponível para remoção do cascalho pelo fluido de perfuração.

2.2.2.2 - Referente ao Perfil de Fundo: está associado com a área disponível na face da broca para posicionamento dos cortadores, há basicamente três tipos:

A) Baixa Conicidade ('shallow cone profile'): a profundidade de corte de cada cortador é teoricamente a mesma, entretanto possui duas desvantagens: velocidade de rotação limitada e desgaste desigual dos cortadores. Este tipo de perfil não é utilizado caso sejam esperadas formações duras. Tem a vantagem de prover boa limpeza do fundo do poço sendo recomendado para aplicação quando se utiliza somente a mesa rotativa (Fig. 2.5a).

B) Conicidade Dupla: devido a ter uma maior área de face do que o tipo anterior, permite aumentar o número de cortadores na periferia da broca, resultando num desgaste equilibrado dos PDC (Fig. 2.5b).

C) Parabólico: devido a sua maior área também permite aumentar o número de cortadores em relação ao perfil de conicidade baixa, o que resulta numa distribuição de cargas

suave o que possibilita operar com altas rotações, sendo indicado para utilização com turbinas, em formações de dureza mole a média (Fig. 2.5c).

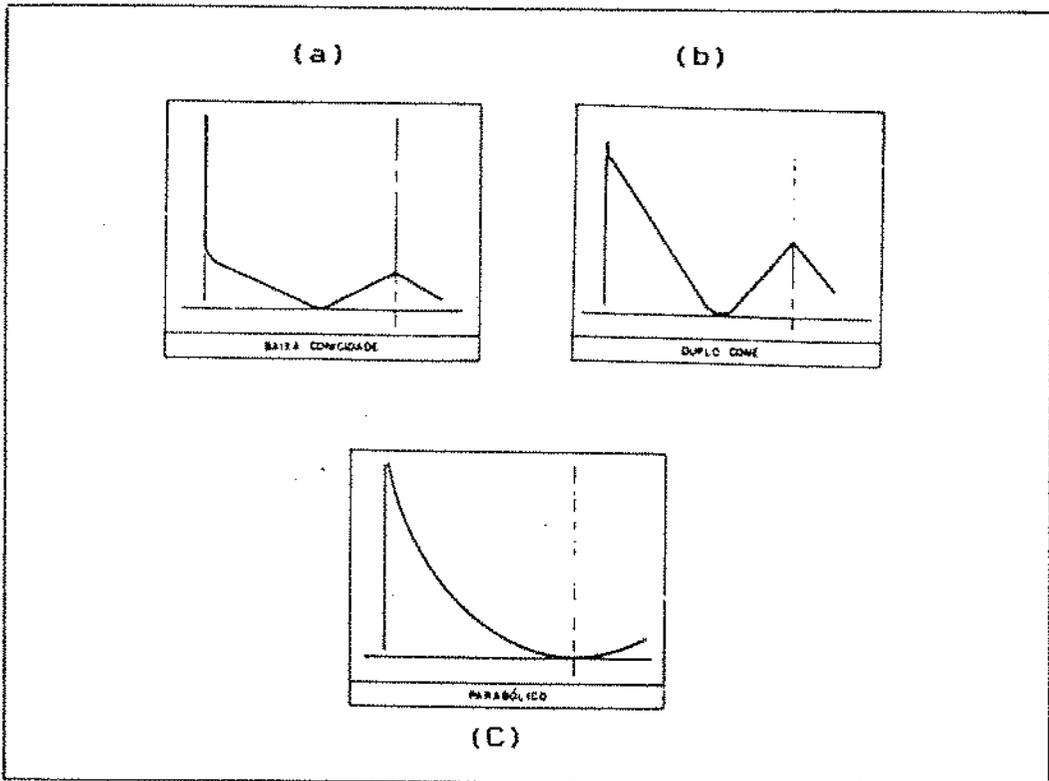


FIG 2.5 - CONICIDADE DO PERFIL: BAIXA (a), DUPLA(b) E PARABÓLICA (c) (REF. 29)

2.2.2.3 - Hidráulica: tem importância fundamental por estar associada à refrigeração dos cortadores e à limpeza do fundo do poço. As características de projeto relativas à distribuição do fluxo ao redor da broca são as seguintes:

A) Fluxo Aberto: o fluxo do fluido de perfuração sai por uma abertura no centro da broca sem que haja uma definição para seu caminho.

B) Jatos Convencionais: são colocados em número e orientação adequados, sendo cada um responsável pela limpeza e refrigeração de vários cortadores.

C) Jatos Exclusivos: a cada cortador está associado um jato para sua limpeza e refrigeração.

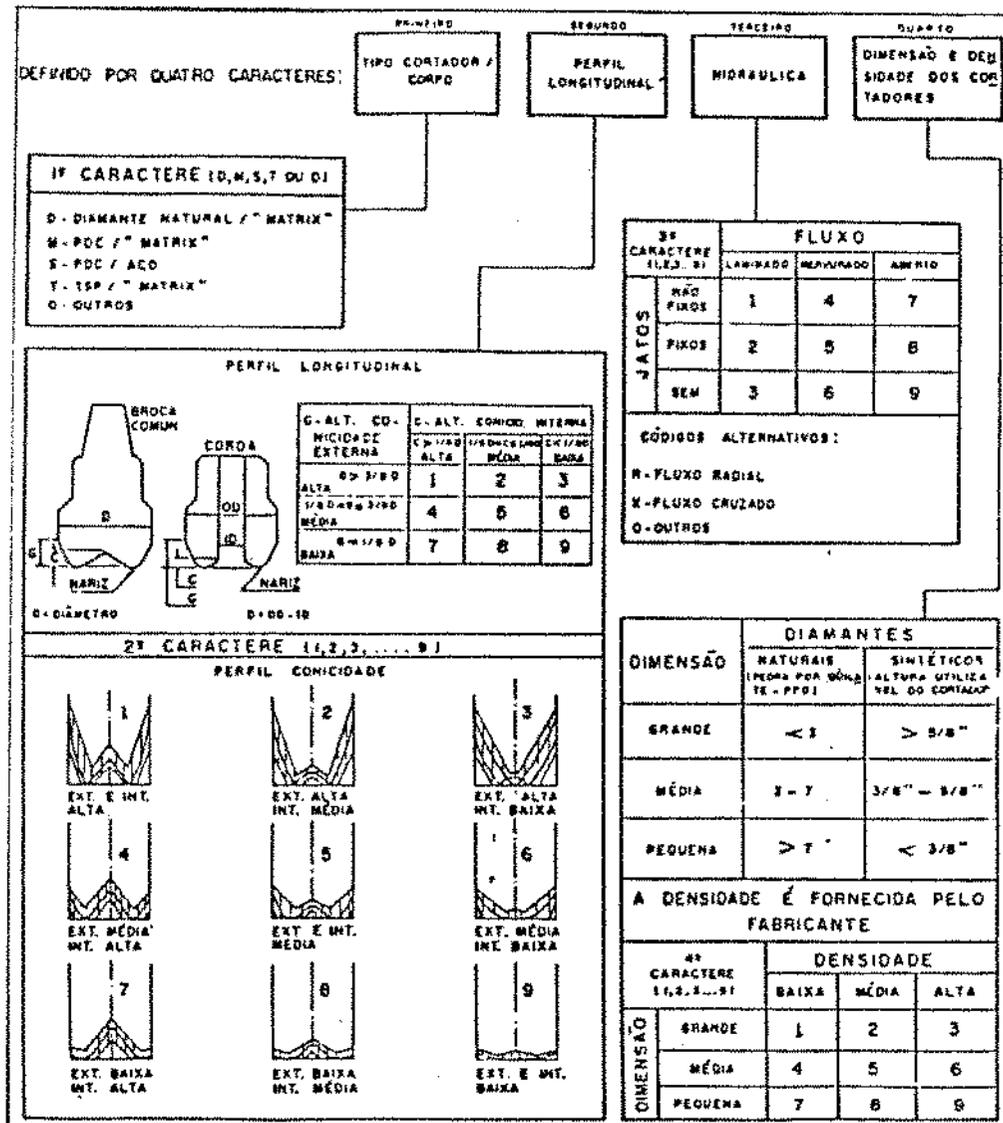
### 2.3 - CLASSIFICAÇÃO IADC DAS BROCAS DE PDC

Devido ao uso cada vez mais frequente e a existência no mercado de uma grande variedade de fabricantes e tipos de brocas de cortadores fixos, dentre as quais se incluem as de PDC, fabricantes, contratistas e operadores de perfuração se uniram para classificar esse tipo de broca. Em 1987, foi publicada<sup>(24)</sup> a Classificação IADC das Brocas de Cortadores Fixos (Quadro 2.1), que procura descrever, através de quatro dígitos:

- 1) o tipo de cortador e material do corpo,
- 2) o perfil de fundo da broca,
- 3) o tipo de hidráulica,
- 4) o tamanho e a densidade dos cortadores.

Todavia, há alguns aspectos desse tipo de brocas que os 4 dígitos do código não descrevem, tais como:

- 1) forma e tamanho do cortador;
- 2) inclinação de topo e lateral do cortador;



QUADRO 2.1 - CLASSIFICAÇÃO IADC DAS BROCAS DE CORTADORES FIXOS (REF 32)

- 3) proteção do calibre;
- 4) proteção contra a erosão;
- 5) altura da broca,

Os dois primeiros aspectos têm associação direta com o desempenho da broca. Isto nos permite concluir, que para efeito de comparar o desempenho, duas brocas de fabricantes diferentes com o mesmo código IADC perfurando no mesmo intervalo podem ter resultados completamente diferentes.

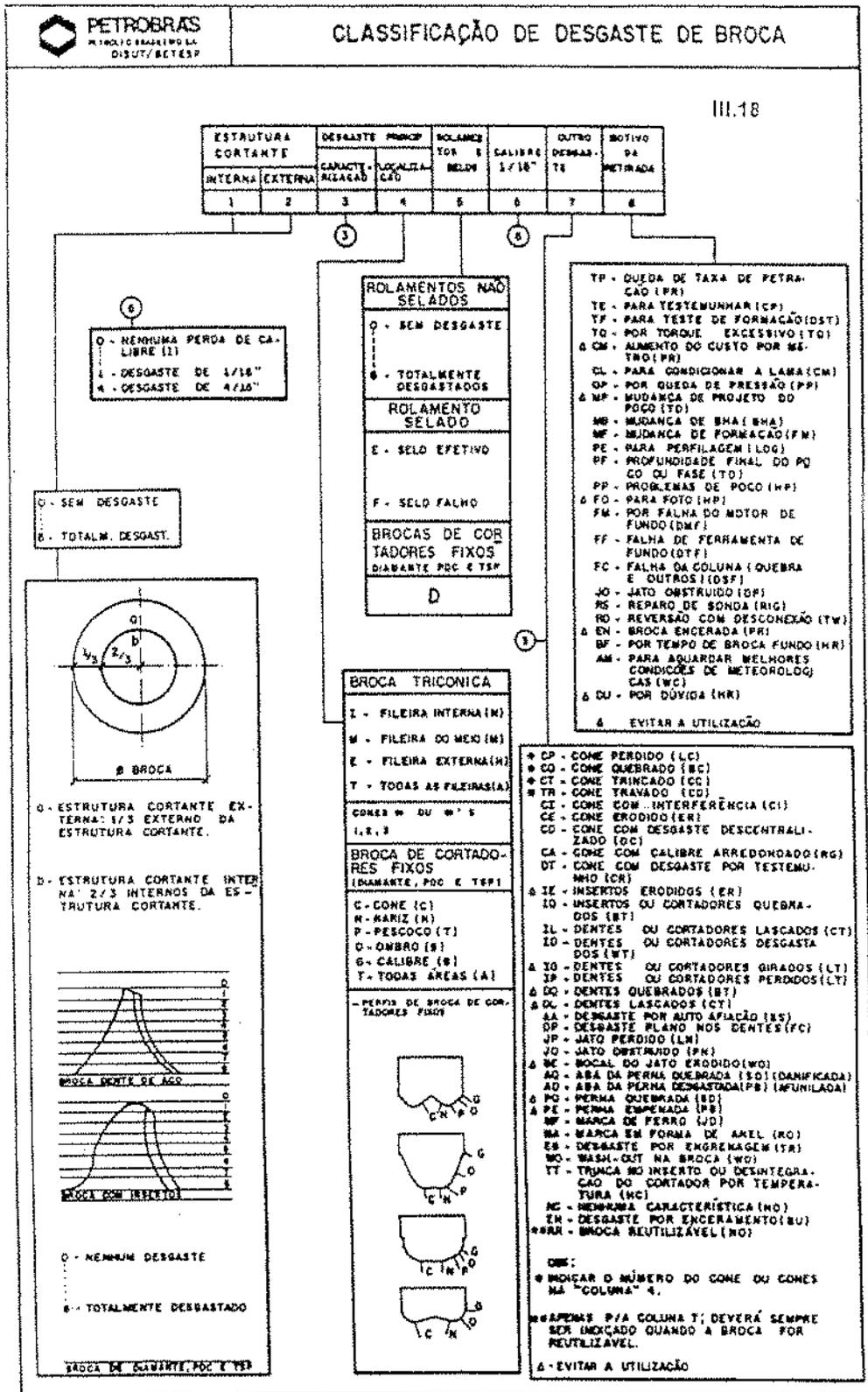
#### 2.4 - MECANISMO DE DESGASTE DOS CORTADORES

A ação dos cortadores sobre as rochas também causa o seu desgaste. Alguns dos artigos sobre o assunto<sup>(10,18,14,34)</sup> relacionam a taxa de desgaste dos cortadores com o calor gerado pelo atrito. Quando perfurando formações duras, o fluido de perfuração não consegue refrigerar a estrutura cortante da pastilha suficientemente rápido, para evitar que sejam atingidas temperaturas elevadas que causam a falha do PDC. A 650 graus centígrados inicia-se a deterioração, e entre 700 e 750 graus centígrados, o PDC experimenta uma rápida degradação térmica que quebra a aderência entre os cristais de diamante resultando numa aceleração do desgaste. Todavia, ainda não há consenso entre esses pesquisadores quanto à área de desgaste no contato entre o cortador e a rocha<sup>(10,18)</sup>.

Outros autores<sup>(5,9,11)</sup> afirmam, baseados em testes de laboratório, que em algumas situações o impacto tem uma influência maior que o calor no desgaste do PDC. Segundo eles, esse impacto se origina do que eles denominaram Rotação Excentrica ('Bit Whirl'), ou seja, durante o giro da broca, o centro instantâneo de rotação pode girar ao redor de sua face. Nessa situação, ao invés somente do movimento rotacional, os cortadores podem mover-se excentricamente. A carga de impacto associada com esse tipo de movimento pode causar o lascamento dos PDC. Normalmente esse desgaste é difícil de ser observado no campo, devido a preceder e ser mascarado pelo desgaste subsequente, o dano térmico, que se torna mais evidente quando se analisa a broca após sua retirada. Esses pesquisadores afirmam ser essa a principal razão pela qual a broca de PDC não fornece bons resultados quando perfurando em formações duras.

A análise e o registro do desgaste da broca, após sua retirada, é de extrema importância pois, com informações detalhadas e confiáveis as chances para que se consiga uma melhora no desempenho da broca, para o próximo poço, se tornam maiores.

A análise do desgaste pode dizer muito sobre o que aconteceu no decorrer da operação<sup>(33)</sup>, ou seja, se os parâmetros hidráulicos e mecânicos foram os adequados ou se a broca utilizada era a mais indicada para aquela aplicação.



QUADRO 2 - CÓDIGO IADC DO DESGASTE DAS BROCAS (REF 34)

De forma a padronizar esse registro, foi publicado em 1987 o Código IADC do Desgaste das Brocas<sup>(33)</sup>. No Quadro 2 se encontra uma adaptação<sup>(29)</sup> desse código adotado no Brasil.

## 2.5 - MÉTODO DE SELEÇÃO DE BROCAS UTILIZANDO PERFIS

Até pouco tempo atrás, os métodos de escolha de brocas, vinham-se baseado nos registros de brocas ('bit records') dos poços de correlação. O problema de se utilizarem esses registros é que eles não contém nem a litologia nem a resistência das formações atravessadas, indicando somente o desempenho da broca, no intervalo perfurado, e sob que condições (parâmetros hidráulicos e mecânicos). Perfis e não registros de brocas são indicadores do que a broca perfurou, o que os torna importantes na adequação de um Programa de Brocas para determinada área. Todavia, até recentemente, a utilização de perfis no auxílio da perfuração de poços vinha se restringindo somente à avaliação e detecção de zonas de pressão anormal e determinação de gradientes de fratura.

Em 1984, Mason<sup>(2)</sup> desenvolveu um método de escolha de brocas tricônicas baseado no Perfil Sônico, obtendo uma correlação entre o tempo de trânsito cisalhante ( $\Delta t_s$ ) do intervalo perfurado e o código IADC da broca que fornecia o menor custo por pé desse intervalo, sendo que nesse método, o tempo de trânsito cisalhante era calculado a partir do tempo de trânsito compressional ( $\Delta t_c$ ) do perfil sônico.

Sabe-se que o tempo de trânsito compressional, obtido do Perfil Sônico, tem correlação com: as propriedades elásticas da matriz da rocha, a porosidade e o tipo de fluido contido nos poros da formação. Mason, em seu artigo, afirma que estudos experimentais mostraram existir também uma correlação entre o tempo de trânsito compressional e: a dureza, a perfurabilidade e a resistência à compressão da rocha. Entretanto, como parâmetro de um método de escolha de brocas, o tempo de trânsito compressional mostrava um inconveniente, pois, litologias diferentes podiam ter o mesmo tempo de trânsito compressional, mas podiam ser eficientemente perfurados por tipos de brocas diferentes, assim, deveria-se ter um guia de seleção para cada tipo ou combinação de litologias. De modo a evitar isso, Mason propôs substituí-lo pelo tempo de trânsito cisalhante obtido a partir do tempo de trânsito compressional através da equação 2.1, proposta por Frost<sup>(23)</sup>:

$$\Delta t_s = \Delta t_c * \delta \quad (2.1)$$

onde:

$\Delta t_s$  = tempo de trânsito cisalhante ( $\mu\text{sec}/\text{pé}$ )

$\Delta t_c$  = tempo de trânsito compressional ( $\mu\text{sec}/\text{pé}$ )

$\delta$  = ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) (relação tabelada)

Mason utilizou valores de  $\delta$  tabelados, para cada tipo de litologia, obtidos em ensaios de laboratório. Ele notou que a resistência à compressão para uma mesma litologia, variava com o tamanho dos grãos do mineral. Para levar isso em conta no cálculo do tempo de trânsito cisalhante, ele propôs uma relação empírica introduzindo o fator  $\alpha$  a equação 2.1.

$$\Delta t_s = \Delta t_c * (\delta)^\alpha \quad (2.2)$$

onde:

$\alpha$  = fator função do tamanho dos grãos do mineral (tabela 2.1)

CLASSIFICAÇÃO DE WENTWORTH		$\alpha$ (adimensional)
Grão	Tamanho (mm)	
Silte	< 0.062	0.90
Muito Fino	0.062 a 0.125	0.95
Fino	0.125 a 0.250	1.00
Médio	0.250 a 0.500	1.05
Grosseiro	0.500 a 1.000	1.10
Muito Grosseiro	1.000 a 2.000	1.15
Granular	2.000 a 4.000	1.20
> Granular	> 4.000	> 1.30

TAB. 2.1 - FATOR DE CORREÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO CISALHANTE EM FUNÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS DO MINERAL (REF 2)

Para correlacionar o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão da rocha, Mason utilizou os valores

provenientes de ensaios de compressão simples obtendo, segundo ele, correlações melhores do que as que havia obtido com o tempo de trânsito compressional.

Para a escolha da broca mais econômica em função do tempo de trânsito cisalhante, Mason escolheu o campo de Blocker no Texas (EUA), onde havia uma atividade de perfuração intensa, com os topos das formações relativamente uniformes e litologias bastante diversificadas e já se havia atingido a otimização dos parâmetros hidráulicos e mecânicos. Com os dados das várias brocas empregadas para desenvolver o campo, eliminando as que perfuraram cimento ou ferro caído no poço e as que foram utilizadas em repassamentos, foi calculado o custo por pé perfurado para cada broca pela equação 2.3.

$$C_m = \frac{C_b + C_s * (t_m + t_b)}{\Delta D} \quad (2.3)$$

onde:

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

$C_s$  = custo horário da sonda utilizada (US\$/h)

$C_b$  = custo da broca utilizada (US\$)

$t_m$  = tempo de manobra (h)

$t_b$  = tempo de broca no fundo (h)

$\Delta D$  = intervalo perfurado (pé)

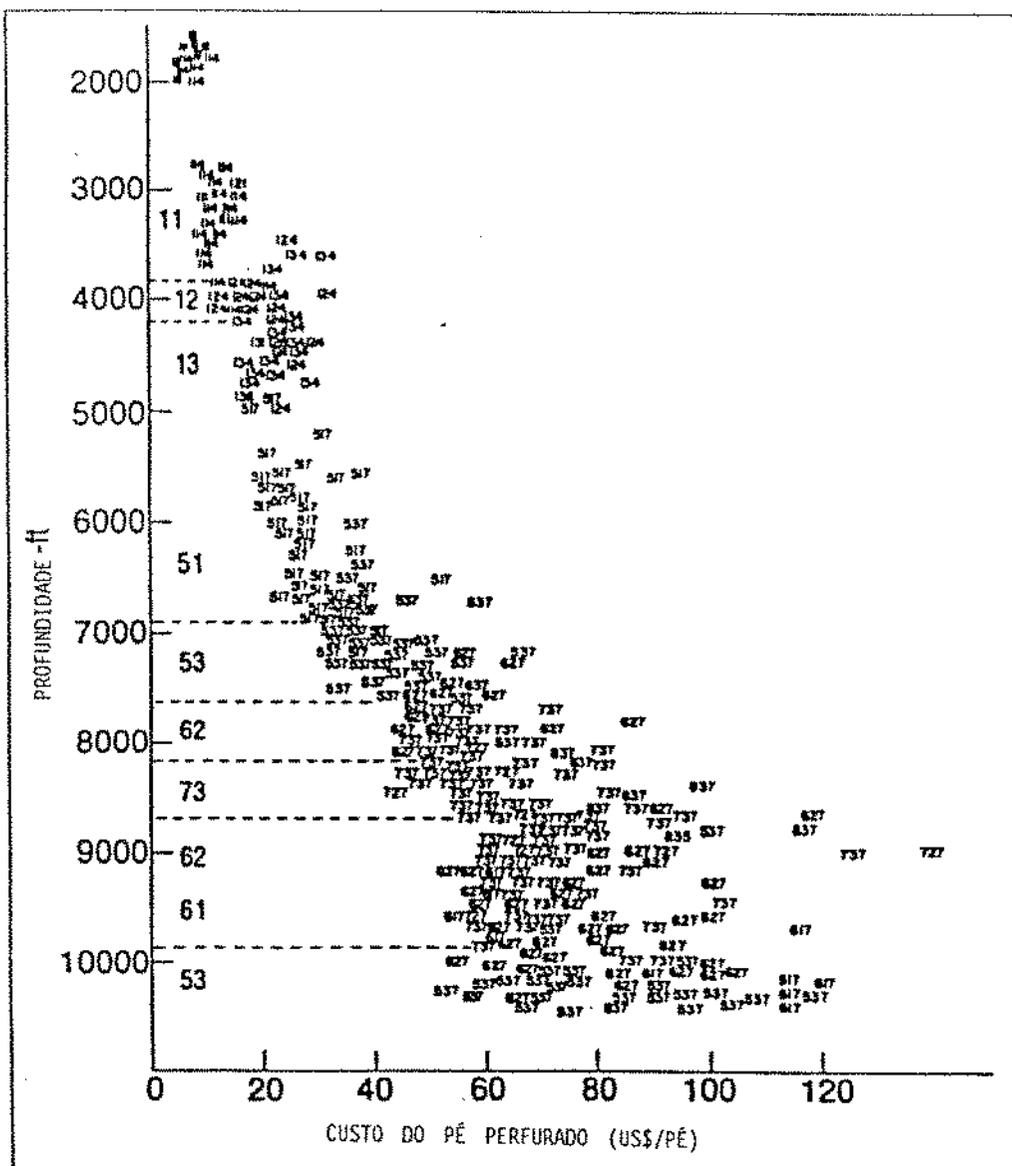


FIG 2.6 - SELEÇÃO ECONÔMICA DAS BROCAS PARA O CAMPO DE BLOCKER, TEXAS (EUA) (REF. 2)

Mason plotou o código IADC, de cada broca, num gráfico de custo por pé versus profundidade de saída da broca. As brocas que se mostraram mais econômicas foram aquelas situadas mais à esquerda no gráfico (Fig. 2.6). Desse modo, foi estabelecida uma relação entre a profundidade do intervalo onde as brocas se mostraram mais econômicas com o código IADC correspondente.

Para correlacionar o tempo de trânsito cisalhante e o código IADC das brocas bastou-lhe transportar a profundidade dos intervalos delimitados anteriormente para o gráfico do tempo de trânsito cisalhante versus profundidade. As linhas pontilhadas foram prolongadas lateralmente até interceptarem a curva do tempo de trânsito cisalhante. Estes intervalos definem os limites para os quais o tipo de broca correspondente foi o mais econômico (Fig 2.7).

Mason repetiu o teste em outros campos da Flórida, Wyoming e Michigam, nos EUA, construindo finalmente um gráfico (Fig. 2.8) correlacionando: tempo de trânsito cisalhante, tempo de trânsito do fluido contido nos poros da formação e resistência à compressão das rochas, juntamente com as retas separando os vários intervalos de código IADC das brocas recomendadas, afirmando ser esse um gráfico de aplicação universal.

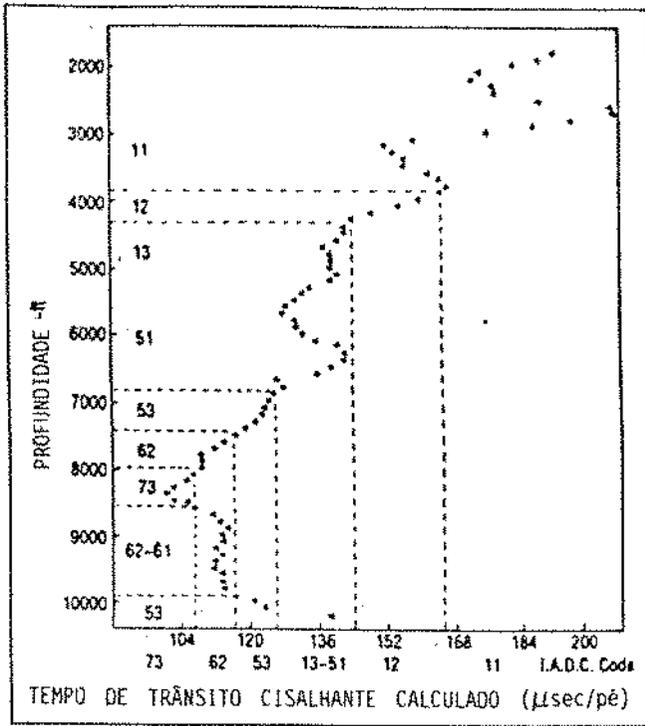


FIG 2.7 - PERFIL PARA SELEÇÃO ECONÔMICA DE BROCAS E SEUS LIMITES (REF 2)

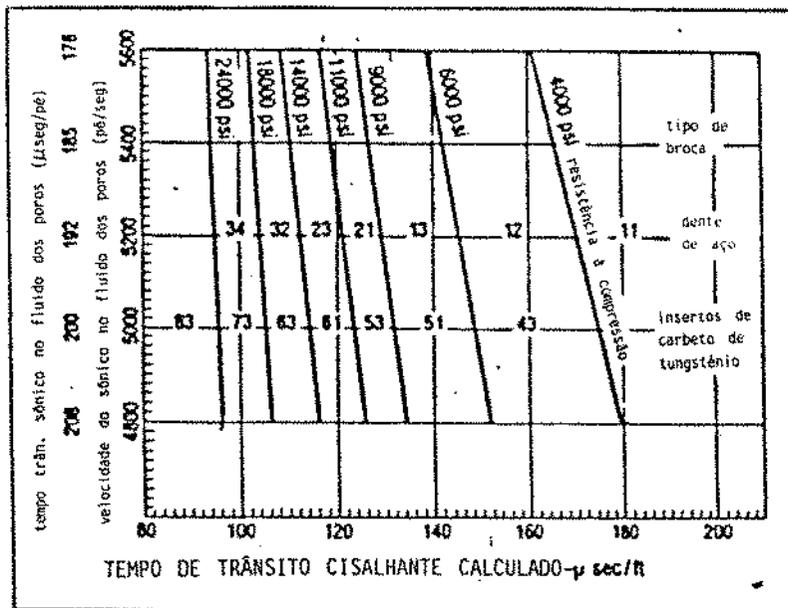


FIG 2.8 - GUIA UNIVERSAL PARA SELEÇÃO DE BROCAS DE ROLAMENTO (REF 2)

## 2.6 - MÉTODO DE SELEÇÃO BASEADO NA ENERGIA ESPECÍFICA

Rabia e outros<sup>(30,31)</sup>, observaram que utilizando o Custo do Metro Perfurado (Eq. 2.13), como parâmetro de um método de escolha de brocas, estava-se implicitamente aceitando influências de fatores, tais como, custo horário da sonda e profundidade do intervalo perfurado (refletida no tempo de manobra) que independiam do desempenho da broca.

De modo a eliminar essa influência, em 1985, esses autores propuseram um método de escolha de brocas, independente do cálculo do custo do metro perfurado, baseado no Princípio da Energia Específica.

O Princípio da Energia Específica, muito utilizado em Mecânica das Rochas para comparar a eficiência de corte por diferentes processos, pode ser definida como a energia necessária para remover um volume unitário de rocha, dependendo, obviamente do mecanismo usado pela ferramenta de corte. O cálculo da Energia Específica, adaptado pelos autores ao mecanismo de corte das brocas de rolamento, pode ser obtida através da equação 2.4.

$$E_s = K * \left( \frac{W * N}{d_b * R} \right) \quad (2.4)$$

onde:

$K$  = constante, 20 [0.00235]

$W$  = peso sobre broca ,Klbf [KN]

$N$  = rotação da Broca, RPM [RPM]

$d_b$  = diâmetro da broca, pol [m]

$R$  = taxa de penetração, pés/h [m/h]

$E_s$  = Energia Específica, pol\*Klbf/pol<sup>3</sup> [MJ/m<sup>3</sup>]

Após a utilização desse método em quatro poços nos Emirados Árabes e três no Mar do Norte, os autores concluíram que a energia específica:

a) pode ser usada como medida do desempenho da broca,

b) é compatível com o custo por metro,

c) pode ser utilizada para selecionar o tipo de broca em qualquer seção de poço.

Os autores não consideraram muito importante o valor assumido para a constante  $K$ , da equação 2.4, já que o comportamento da energia específica é mais importante que o valor da mesma.

## 2.7 - MÉTODOS DE SELEÇÃO DE BROCAS DE PDC

Diversos autores<sup>(26,27)</sup> têm sugerido Métodos de Escolha de carácter regional, específicos para uma determinada área, obtidos através da utilização sistemática de algumas brocas durante o desenvolvimento do campo, sugerindo inclusive

alterações de projeto de modo a torná-las mais adequadas às características das formações atravessadas. Porém, as conclusões obtidas por esses métodos não podem ser estendidas a outras áreas que não tenham o mesmo tipo de litologia.

Outros métodos, procuram associar uma característica da formação ao desempenho da broca. Um dos desenvolvidos nesse sentido por Goult e outros<sup>(3)</sup>, para o Golfo do México, se baseia no CEC ('cation exchange capacity'). O CEC é uma medida da reatividade dos folhelhos que corresponde ao grau de dificuldade de limpeza do fundo do poço, especialmente quando se utiliza fluido de perfuração à base de água. Altos valores de CEC indicam altos níveis de reatividade, ou seja, folhelhos com tendência de se tornarem plásticos ('swelling') por hidratação. A remoção dos cascalhos é mais difícil nesse tipo de formação podendo causar o que se denomina enceramento da broca ('bit balling'), que ocorre quando esse folhelhos plásticos aderem a sua estrutura cortante reduzindo a eficiência de corte.

Desde que o enceramento da broca e a limpeza do fundo do poço possam ser correlacionados ao CEC, este assume papel importante para a escolha do tipo de broca de PDC e da hidráulica. A decisão de maximizar a vazão ou a perda de carga, componentes da potência hidráulica no fundo do poço (HSI - Horsepower per Square Inch), torna-se função do CEC e portanto da formação. Formações compostas por folhelhos pouco reativos, com baixos valores de CEC, respondem melhor à perda

de carga enquanto folhelhos altamente reativos respondem melhor à vazão, entretanto, em ambos os casos, há um valor mínimo de HSI e vazão necessários. A medição do CEC pode ser feita na sonda, em laboratório ou ainda estimada a partir de correlações com o perfil Raio Gama.

As pesquisas desses autores, levaram a um guia de seleção de brocas de PDC, baseado na reatividade dos folhelhos (Fig. 2.9). Para esse efeito, as brocas foram classificadas em três categorias:

1 - as convencionais com cortadores de 1/2 pol [1.27 cm],

2 - as do tipo Rabo de Peixe ('fish tail') com cortadores de 1/2 pol [1.27 cm] ,

3 - as com cortadores de diâmetros maiores, 1.1/2 ou 2 pol [3.81 ou 5.08 cm], com um jato para cada cortador que, segundo Feenstra<sup>(10)</sup>, é o sistema ideal para limpeza e refrigeração do cortador.

Os autores também apresentaram as Tabelas 2.2 e 2.3, recomendando parâmetros hidráulicos para duas das categorias de brocas da classificação anterior, salientando que essas são recomendações gerais podendo variar em função do tipo de lama, ph, teor de sólidos, etc., devendo os parâmetros selecionados para cada broca estarem de acordo com os sugeridos pelo seu fabricante.

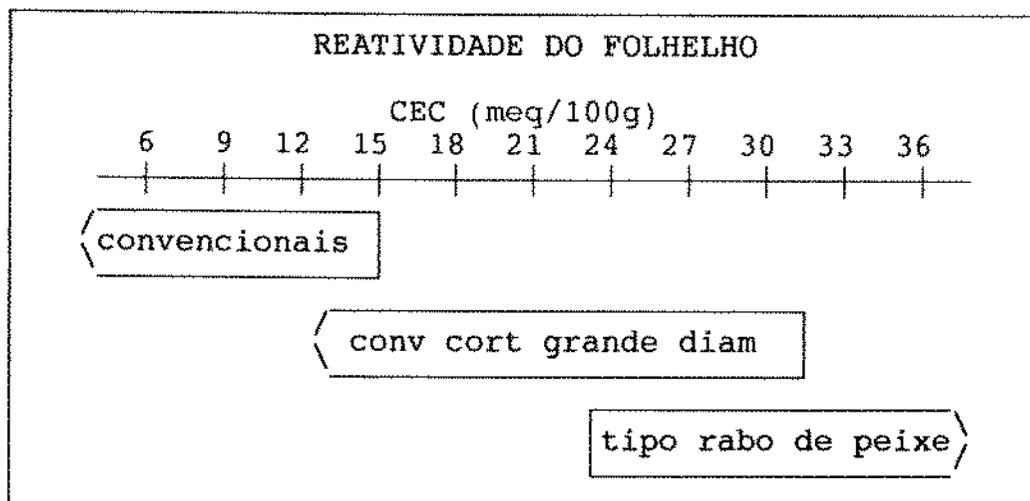


FIG 2.9 - GUIA DE SELEÇÃO DO TIPO DE BROCA DE PDC EM FUNÇÃO DO CEC PARA O GOLFO DO MÉXICO (REF. 3)

O grande mérito desse estudo foi correlacionar tipo de broca, hidráulica e enceramento, um dos grandes inimigos da broca de PDC quando perfurando em folhelhos hidratáveis com fluido de perfuração à base de água. Entretanto, o método é limitado nas opções de escolha, por classificar todas as brocas em somente três categorias, e impreciso quanto ao tipo de broca sugerida, pois dentro de uma mesma categoria dessa classificação, existem brocas com tipos e projetos diferentes que devem fornecer resultados diferentes em função de cada tipo de litologia a ser perfurada. Apesar disso, segundo os autores, o método mostrou-se útil quando utilizado no Golfo do México.

DIÂMETRO DA BROCA  (m * 10 <sup>2</sup> )	FAIXAS DE CEC (meq/100g)						
	6 A 18		18 A 24		24 A 30		
	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	
20.0 a	R	2.84	5202.	3.16	5780.	3.47	5780.
21.6	M	2.21	2312	2.52	2312.	2.84	2890.
25.1 a	R	3.79	5202.	4.10	5780.	4.42	5780.
27.0	M	3.47	2312.	3.79	2890.	4.10	3468.
31.1	R	4.42	5202.	4.73	5780.	5.05	5780.
	M	3.79	2312.	4.42	2890.	4.73	3468.
37.5 a	R	5.05	6358.	5.36	6358.	5.99	6936.
44.4	M	4.42	2312.	4.73	3468.	5.05	4046.
R = Param. Recomendados      M = Param. Mínimos							
1 (m <sup>3</sup> /s) = 1.585 * 10 <sup>4</sup> (gal/min)							
1 (kW/m) = 8.651 * 10 <sup>-4</sup> (Hp/pol <sup>2</sup> )							

TAB 2.2 - SELEÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA BROCAS DE PDC COM CORTADORES DE GRANDE DIÂMETRO (REF 3)

DIÂMETRO DA BROCA  (m * 10 <sup>2</sup> )	FAIXAS DE CEC (meq/100g)								
	6 A 18		18 A 24		24 A 30		30 a 39		
	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	vazão m <sup>3</sup> /s * 10 <sup>2</sup>	HSI kW/m <sup>2</sup>	
>= 17.1	R	1.13	3468.	1.26	3468.	1.42	4046.	1.58	4624.
	M	0.95	1734.	0.95	1734.	1.14	2312.	1.26	2890.
20.0 a 21.6	R	2.21	4046.	2.52	4046.	2.84	5780.	2.84	5780.
	M	1.89	2312.	2.21	2312.	2.21	4046.	2.52	4046.
25.1 a 27.0	R	3.47	4046.	3.79	4046.	4.10	5780.	4.73	5780.
	M	3.16	2312.	3.47	2890.	3.79	4046.	4.10	4624.
31.1	R	4.10	4624.	4.42	4624.	4.73	5780.	5.05	5780.
	M	3.47	2312.	3.79	2312.	4.10	4046.	4.10	4624.
37.5 a 44.4	R	4.73	5780.	5.36	5780.	5.68	5780.	6.31	5780.
	M	4.42	2312.	4.73	3468.	5.05	4046.	5.68	4624.
R = Param. Recomendados                      M = Param. Mínimos									
1 (m <sup>3</sup> /s) = 1.585 * 10 <sup>4</sup> (gal/min)									
1 (kW/m) = 8.651 * 10 <sup>-4</sup> (Hp/pol <sup>2</sup> )									

TAB 2.3 - SELEÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA BROCAS DE PDC TIPO RABO DE PEIXE (REF 3)

Em 1990, Dumans<sup>(1,22)</sup> apresentou um estudo propondo um método de escolha de brocas de PDC, procurando associar o tipo de broca tricônica mais adequada às características das formações de determinado intervalo, obtida por uma adaptação do Método de Mason, com o tipo da broca de PDC que apresentou o menor Custo do Metro Perfurado no mesmo intervalo. Contudo, devido ao reduzido número de brocas de um mesmo tipo, disponíveis para análise, não lhe foi possível estabelecer um local em que cada tipo de broca de PDC apresentasse, com razoável regularidade, um custo por metro inferior ao das demais brocas, nas mesmas condições de operação.

Na adaptação do método de Mason<sup>(2)</sup> para o Brasil, Dumas<sup>(1)</sup> também apresentou novos valores da relações ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) específicas para algumas das litologias mais frequentemente perfuradas de duas áreas: Tubarão (Bacia de Santos) e Bacia de Campos, onde atualmente a atividade de perfuração é mais intensa. Os valores de  $\Delta t_s$  e  $\Delta t_c$  utilizados na determinação da razão foram obtidos através perfil SDT (Sônico Digital), que registra todo o conjunto de ondas gerado.

De modo a acrescentar mais um parâmetro, para que se pudesse avaliar melhor o desempenho da broca, Dumans também propôs o cálculo da Resistência ao Cisalhamento, a partir da Resistência à Compressão, assumindo que o comportamento de falha da rocha pode ser descrito pelo Critério de Ruptura Linear de Mohr-Coulumb.

Atualmente existem vários critérios de ruptura das rochas, porém, o mais utilizado é o de Mohr-Coulumb<sup>(20,21,25)</sup> por o ser o mais simples, descrevendo a resistência ao cisalhamento através de somente dois parâmetros  $\tau_0$  e  $\phi$ , de acordo com a equação 2.5.

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n * \text{tg } \phi \quad (2.5)$$

onde:

$\tau$  = resistência ao cisalhamento da rocha (lb/pol<sup>2</sup>), [kg/m<sup>2</sup>]

$\tau_0$  = coesão interna do material (lb/pol<sup>2</sup>), [kg/m<sup>2</sup>]

$\sigma_n$  = tensão normal ao plano de falha (lb/pol<sup>2</sup>), [kg/m<sup>2</sup>]

$\phi$  = ângulo de atrito interno

O roteiro de cálculo proposto por Dumans<sup>(1,22)</sup>, para obtenção da Resistência ao Cisalhamento, está descrito a seguir.

a) Obter Arquivo de Perfis com formato de acordo com a tabela 2.4 e com código de litologia conforme a tabela 2.7.

b) Obter a tabela de valores da relação  $(\Delta t_s / \Delta t_c)$ , específica para a área em estudo. No nosso caso: área de Tubarão na Bacia de Santos (Tab.2.5)<sup>(1)</sup>; Bacia de Campos (Tab.2.6)<sup>(1)</sup>; demais áreas (Tab.2.7)<sup>(2,4)</sup>.

UNIDADE	FORMATO	TIPO DE REGITRO
-	15	nome do poço
01	2	código do registro
metros	----- - 5	profundidade
g/cm <sup>3</sup>	--- - 3	densidade
μseg/ft	----- - 5	tempo de trânsito ( $\Delta t_c$ )
-	-- 2	litologia
ohm.m	----- - 5	resistividade
-	--- - 4	raios gama
pol	-- - 3	caliper

TAB 2.4 - FORMATO DOS DADOS NO ARQUIVO DE PERFIS

CÓDIGO	LITOLOGIA	$\Delta t_s / \Delta t_c$	$\Delta t_M$	$\alpha$
06	CALCILUTITO	1.73	47.6	1.00
08	CALCARENITO	1.87	47.6	1.05
57	FOLHELHO	1.84	51.3	1.05

TAB. 2.5 - VALORES DA RELAÇÃO ( $\Delta t_s / \Delta t_c$ ) PARA A ÁREAS DE TUBARÃO (REF. 1)

CÓDIGO	LITOLOGIA	$\Delta t_s$	$\Delta t_M$	$\alpha$
49	ARENITO	$2.1465 * \Delta t_c - 26.2403$	51.3	1.00
57	FOLHELHO	$2.5553 * \Delta t_c - 55.8138$	51.3	1.05
58	MARGA	$2.4390 * \Delta t_c - 44.9024$	47.6	0.95

TAB. 2.6 - EXPRESSÕES PARA ESTIMAR  $\Delta t_s$  A PARTIR DO  $\Delta t_c$  PARA A BACIA DE CAMPOS (REF. 1)

CÓDIGO	LITOLOGIA	$\Delta t_s / \Delta t_c$	$\Delta t_M$	$\alpha$
04	COQUINA	2.00	47.6	1.00
06	CALCILUTITO	2.30	47.6	1.00
07	CALCISSILTITO	2.10	47.6	1.00
08	CALCARENITO	1.90	47.6	1.05
49	ARENITO	1.60	51.3	1.00
54	SILTITO	1.80	43.5	0.95
56	ARGILITO	1.90	52.6	0.95
57	FOLHELHO	1.70	51.3	1.05
58	MARGA	2.30	47.6	0.95
85	HALITA	2.15	66.7	1.00

TAB. 2.7 - VALORES DA RELAÇÃO  $(\Delta t_s / \Delta t_c)$  PARA OUTRAS ÁREAS  
(REF. 2 )

c) Resistência ao Cisalhamento Inicial ou Coesão ( $\tau_0$ ) será calculada através da equação 2.6, onde se necessitam as seguintes informações:

$$\tau_0 = \frac{E}{C} \left[ 0.91 v_{cl} + 1.17 \right] 10^{-10} \quad (2.6)$$

onde:

E = módulo de elasticidade (lb/pol<sup>2</sup>)

C = módulo de compressibilidade (lb/pol<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>

$V_{cl}$  = fator de argilosidade (%)

c1) Tempo de Trânsito Compressional ( $\Delta t_c$ ) obtido do Arquivo de Perfis.

c2) Tempo de Trânsito Cisalhante ( $\Delta t_s$ ) calculado com a equação 2.2 e a relação obtida no item b),

c3) Índice de Argilosidade ( $V_{cl}$ ), foram considerados os valores da Tabela 2.8 (Ref. 1).

LITOLOGIA	ÍNDICE DE ARGILOSIDADE
COQUINAS	0.03
CALCILUTITO	0.03
CALCISSILTITO	0.03
CALCARENITO	0.03
ARENITO	0.20
SILTITO	1.00
ARGILITO	1.00
FOLHELHO	1.00
MARGA	1.00
HALITA	0.03

TAB. 2.8 - ÍNDICE DE ARGILOSIDADE EM FUNÇÃO DA LITOLOGIA  
(REF.1)

c4) Tempo de Trânsito na Matriz da Rocha ( $\Delta t_m$ ), foram considerados os valores da tabela 2.7.

c5) Tempo de Trânsito dos Fluidos nos Poros ( $\Delta t_f$ ) foi considerando de 189.0  $\mu\text{seg}/\text{ft}$ , por ser o mais tradicionalmente assumido, podendo ser alterado caso valores mais específicos para a área em estudo, sejam obtidos,

c6) A Massa Específica da Amostra ( $\rho$ ) obtida do

arquivo de perfis ou estimada através das equações 2.7 e 2.8.

Para  $\Delta t_c > 100 \mu\text{seg/ft}$  (formações inconsolidadas):

$$\rho = 2.75 - 2.11 \left[ \frac{\Delta t_c - \Delta t_m}{\Delta t_c - \Delta t_f} \right] \quad (2.7)$$

onde:

$\rho$  = massa específica da amostra ( $\text{g/cm}^3$ )

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

$\Delta t_f$  = tempo de trânsito do fluido contido nos poros ( $\mu\text{seg/pé}$ )

Para  $\Delta t_c < 100 \mu\text{seg/ft}$  (formações consolidadas):

$$\rho = 3.28 - \frac{\Delta t_c}{88.95} \quad (2.8)$$

c7) O Módulo de Elasticidade ou de Young (E) calculado pela equação 2.9.

$$E = 1.34 \cdot 10^{10} \left[ \frac{\rho}{(\Delta t_s)^2} \right] \left[ \frac{3 (\Delta t_s)^2 - 4 (\Delta t_c)^2}{(\Delta t_s)^2 - (\Delta t_c)^2} \right] \quad (2.9)$$

onde:

E = Módulo de Elasticidade ( $\text{lb/pol}^2$ )

c8) O Módulo de Compressibilidade (C) calculado

pela equação 2.10.

$$C = \left[ 1.34 \cdot 10^{10} \left( \frac{1}{(\Delta t_c)^2} - \frac{4}{3 (\Delta t_s)^2} \right) \rho \right]^{-1} \quad (2.10)$$

onde:

C = Módulo de Compressibilidade (lb/pol<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>

d) A Pressão Diferencial ( $\Delta P$ ) atuante no fundo do poço (pressão exercida pelo fluido de perfuração menos pressão de poros) ou Pressão de Confinamento ( $\sigma_3$ ), estimada através da equação 2.11, considerando-se o fluido de perfuração como não penetrante:

$$\Delta P = \sigma_3 = 0.017 P (\rho_w - \rho_p) \quad (2.11)$$

onde:

$\Delta P = \sigma_3$  = Pressão Diferencial (lb/pol<sup>2</sup>)

$\rho_w$  = Densidade do Fluido de Perfuração (lb/gal)

$\rho_p$  = Densidade Equivalente à Pressão de Poros (lb/gal)

P = Profundidade do Poço (m)

e) A Resistência à Compressão da Formação ( $\sigma_1$ ), estimada através da equação 2.12.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \left[ \frac{\tau_0 \cos \phi + \sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] \quad (2.12)$$

onde:

$\sigma_1$  = Resistência à Compressão da Rocha (lb/pol<sup>2</sup>)

e1) Foram considerados valores médios do Ângulo de Atrito Interno ( $\phi$ ), em função da litologia, obtidos de ensaios de laboratório de acordo com a referência 7 (TAB. 2.9).

LITOLOGIA	$\phi$ (graus)
COQUINAS	35.9
CALCILUTITO	35.9
CALCISSILTITO	35.9
CALCARENITO	35.9
ARENITO	30.0
SILTITO	29.2
ARGILITO	29.2
FOLHELHO	29.2
MARGA	29.2
HALITA	32.0

TAB. 2.9 - VALORES MÉDIOS DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO ( $\phi$ ) EM FUNÇÃO DA LITOLOGIA (REF. 7)

f) A Resistência ao Cisalhamento ( $\tau$ ) foi calculada de acordo com a equação 2.13.

$$\tau = \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right] \cos \phi \quad (2.13)$$

onde:

$\tau$  = Resistência ao Cisalhamento da Rocha (lb/pol<sup>2</sup>)

No Anexo 2 encontra-se um fluxograma representativo do cálculo da resistência ao cisalhamento.

Dumans concluiu que a utilização 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, recomendando que fossem avaliados, em laboratório, os valores calculados de resistência à compressão e ao cisalhamento, com pressão de confinamento igual à efetiva pressão diferencial atuante no fundo do poço, durante a perfuração.

## CAPÍTULO 3

### MÉTODO PROPOSTO

#### 3.1 - INTRODUÇÃO

Baseado no que foi exposto no Capítulo 2 sobre o método de Mason de escolha de brocas de rolamento pelo perfil sônico e no método de Dumans para cálculo da Resistência ao Cisalhamento e, assumindo-se que o mecanismo de atuação das brocas de PDC é por cisalhamento da formação<sup>(3,6,10,12,15,19)</sup>, pretende-se, a partir dos Bancos de Dados de Perfis e dos desempenhos históricos das brocas de PDC utilizadas nos últimos 6 anos no Brasil, identificar os intervalos de mesma resistência ao cisalhamento em que determinado tipo de broca de PDC apresentou o melhor desempenho entre todos os outros tipos de brocas de PDC que trabalharam nas mesmas condições, ou seja, mesma resistência ao cisalhamento, adotando como medida de desempenho o Custo Estimado por Metro Perfurado ( $C_E$ ). Desse modo, de posse da resistência ao cisalhamento das formações a serem perfuradas no próximo poço, obtidas através do Perfil Sônico do poço de correlação, pode-se indicar um Programa de Brocas mais adequado a essas condições e que deve levar a uma redução do custo da perfuração.

Todavia, essa correlação não pode ser feita

diretamente com a Classificação IADC, como foi utilizado por Mason, pois as brocas tricônicas são facilmente descritas através dos três dígitos do código IADC e, portanto, um desempenho similar é esperada para brocas com um mesmo código, mesmo que de diferentes fabricantes. Infelizmente isso não é verdadeiro para brocas de PDC, pois seu código IADC, como já comentado no Capítulo 2, não define o tamanho nem a inclinação de topo e lateral do cortador, que tem grande influência no seu desempenho. Desse modo, essas brocas devem ser analisadas individualmente requerendo muitos dados para definir uma boa correlação.

### 3.2 - LIMITAÇÕES

Para este estudo foram feitas as seguintes considerações:

- \* Que as brocas de um mesmo tipo sejam sempre fabricadas seguindo as mesmas características e especificações,

- \* Que a utilização da broca tenha sido feita de maneira adequada, respeitando as recomendações quanto ao seu uso,

- \* Que todas as equipes de sonda tenham o mesmo desempenho durante a operação,

- \* Que os equipamentos da sonda não interfiram no desempenho da broca nem na sua vida útil,

- \* Que os equipamentos da sonda também não interfiram

no tempo de manobra,

\* Que os dados fornecidos pelos perfis sejam corretos, assim como a identificação litológica correspondente,

\* Que as formações sejam homogêneas, isotrópicas e linearmente elásticas para efeito de estimativa de suas características mecânicas.

\* Que o fluido de perfuração seja não penetrante,

\* Que o desempenho da broca é função somente da Resistência ao Cisalhamento da Rocha.

### 3.3 - CUSTO ESTIMADO

Normalmente os métodos de seleção de brocas, tanto as de rolamento como as de PDC, são baseados na Análise Econômica entre o Custo do Metro Perfurado ( $C_M$ ) das diversas brocas utilizadas, escolhendo-se aquela que consistentemente produz o menor custo para a mesma formação ou seção do poço. Nota-se que o Custo do Metro Perfurado, obtido da equação 2.3, é controlado por três tipos de parâmetros:

- (1) os da broca ( $C_b$ ,  $\Delta D$  e  $t_b$ ),
- (2) o da sonda ( $C_s$ ),
- (3) o da profundidade do intervalo perfurado ( $t_m$ ).

Sobre esses métodos Rabia<sup>(30,31)</sup>, como já comentado no Capítulo 2, ressaltou os seguintes aspectos:

- a determinação do tempo de manobra nem sempre pode

ser feita de maneira precisa,

- o desempenho de duas brocas só pode ser comparado quando perfurando: na mesma formação, no mesmo intervalo de profundidade e por sondas que tenham o mesmo Custo Horário.

Desse modo, quando utilizamos somente o Custo do Metro Perfurado como parâmetro indicativo do desempenho da broca, estamos implicitamente aceitando a influência de fatores, ocorridos no poço anterior referentes a profundidade do intervalo perfurado e ao tipo de sonda utilizada, que não tem relação com o seu desempenho.

Se na equação do Custo do Metro Perfurado assumirmos: o custo horário da sonda que irá perfurar o poço e o tempo de manobra para a profundidade do intervalo para o qual se está fazendo a programação, estaremos determinando o Custo Estimado por Metro Perfurado ( $C_e$ ), normalizando todas as brocas para uma mesma situação o que permitirá uma comparação mais criteriosa entre os desempenhos das brocas analisadas. Como no cálculo do Custo Estimado se utilizam os parâmetros que refletem as características de um intervalo, estaremos obtendo também uma estimativa correspondente ao gasto planejado para esse intervalo.

Para estimativa do tempo de manobra que será utilizado no cálculo do custo do metro estimado, adotou-se a expressão empírica (Equação 3.1) baseada em dados de campo:

$$t_m = \frac{3 * P_s}{1000} + 1 \quad (3.1)$$

onde:

$t_m$  = tempo de manobra (h)

$P_s$  = profundidade de saída da broca (m)

Os custos das brocas foram obtidos de tabelas de preços fornecidas pelos fabricantes de brocas.

#### 3.4 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DA FORMAÇÃO

Mesmo com a utilização do Custo Estimado, só poderíamos comparar o desempenho entre brocas que perfuraram na mesma formação. Objetivando-se comparar o desempenho entre brocas que perfuraram em formações diferentes, procurou-se correlacioná-lo a uma característica mecânica da rocha que foi perfurada, de modo que uma broca que perfurou uma formação com essa característica mecânica poderia ser indicada para perfurar uma outra formação com a mesma característica, desde que o seu desempenho tivesse sido o melhor comparado com as demais, já que ele estará associado à característica mecânica e não à formação.

Das três características mecânicas comentadas no Capítulo 2: resistência à compressão, energia específica e resistência ao cisalhamento, optou-se pela última por estar

intimamente ligada ao mecanismo de atuação das brocas de PDC sobre as rochas.

De acordo com Bourgoyne<sup>(6)</sup> a ruptura da rocha sob ação dos cortadores pode ser descrita como: uma força, vertical, é aplicada aos cortadores como resultado do peso sobre broca, uma outra força, horizontal, também é aplicada sobre o cortador como resultado do torque necessário para girar a broca. A resultante dessas duas forças, a pressão diferencial a que a rocha está submetida e as propriedades da rocha, definem o plano de falha ou plano de cisalhamento. Essa afirmação está de acordo com os resultados de testes de laboratório onde foi observado que a pressão atmosférica, o cortador PDC pode gerar falha na rocha tanto por compressão como por cisalhamento, dependendo da tensão de ruptura que é excedida primeiro. Às profundidades onde normalmente se realizam as perfurações com brocas de PDC, onde a pressão diferencial a que a rocha está submetida é alta, a falha por cisalhamento predomina sobre a falha por compressão.

A forma de atuação das brocas de PDC, o plano de falha, as tensões atuantes e a orientação das mesmas, consideradas na obtenção da resistência ao cisalhamento, estão representadas de forma esquemática<sup>(1)</sup> na Figura 3.1.

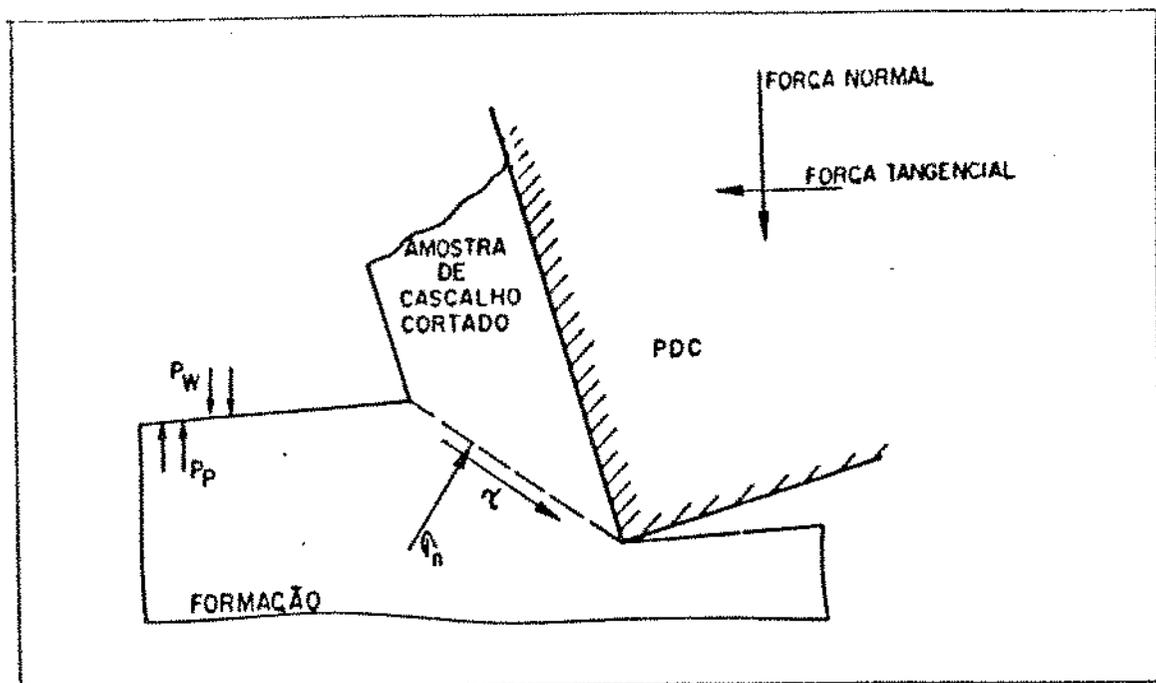


FIG 3.1 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS FORÇAS ATUANTES NO FUNDO DO POÇO CONSIDERADAS NA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (REF. 1)

### 3.5 - GERAÇÃO DO ARQUIVO DE BROCAS DE PDC

Com a adoção do Custo Estimado por Metro Perfurado ( $C_E$ ) e da Resistência ao Cisalhamento ( $\tau$ ) como parâmetros do método, o próximo passo é construir um Arquivo das Brocas de PDC já utilizadas, associando as características da broca (tipo, diâmetro e custo), a característica mecânica da rocha (resistência média ao cisalhamento do intervalo de utilização) e os parâmetros de desempenho da broca (intervalo perfurado e tempo de broca no fundo), que servirá como referência para a

escolha de brocas para os poços futuros.

Para efeito de geração do Arquivo de Brocas foram feitas as seguintes considerações:

\* Não será considerada a broca utilizada em desvios ou poços direcionais, onde os parâmetros mecânicos não são os ideais para atingir a melhor taxa de penetração, mas sim para controle de inclinação e direção do poço, além do que se reduz a possibilidade de retirada de coluna para mudança de composição de fundo,

\* Não será considerada a broca que saiu por motivos diferentes do final de vida útil tais como: enceramento, final de fase, ferro no poço, etc.

\* Só será considerada a broca que perfurou em um intervalo em que o desvio padrão da resistência ao cisalhamento seja inferior a  $1500 \text{ lb/pol}^2$  (10.3 MPa).

\* Só será considerada a broca reutilizada se o desvio padrão da resistência ao cisalhamento de todos os intervalos onde operou for inferior a  $1500 \text{ lb/pol}^2$  (10.3 MPa).

Assumiu-se como faixa limite de trabalho da broca para sua aceitação um desvio padrão da resistência ao cisalhamento de  $1500 \text{ lb/pol}^2$  (10.3 MPa) de modo que, com o número atual de brocas disponíveis para análise (125), para qualquer intervalo para o qual se pretenda selecionar uma broca de PDC, cuja faixa média de resistência ao cisalhamento se situe entre  $500$  e  $12000 \text{ lb/pol}^2$  (3.43 e 61.8 MPa), caso a broca a ser selecionada seja de diâmetro 8.5 polegadas (21.6

cm), e entre 500 e 8000 lb/pol<sup>2</sup> (3.43 e 41.2 MPa) para as de diâmetro 12.25 polegadas (31.1 cm), conste no Arquivo pelo menos uma que trabalhou nessa faixa, ou seja, assumindo-se um desvio padrão inferior a 1500 lb/pol<sup>2</sup> se reduziria o número de brocas aceitas, o que implicaria em que para algumas faixas de resistência ao cisalhamento, por falta de dados no Arquivo, o programa não fornecesse nenhuma resposta.

Com o aumento do número de brocas coletadas para análise, devido a frequência cada vez maior com que elas estão sendo utilizadas, e que tenham trabalhado em faixas diferentes de resistência ao cisalhamento, esse limite poderá ser reduzido.

Para montagem do Arquivo, foram pesquisadas todas as brocas de PDC utilizadas no Brasil nos últimos 6 anos, de forma a que fossem obtidas as de última geração. De posse dessa relação, numa primeira análise, foram identificadas todas as brocas utilizadas em poços verticais. Em seguida foram identificados todos os poços onde essas brocas foram utilizadas. Pesquisou-se, para cada poço, se havia sido corrido o Perfil Sônico no intervalo de utilização da broca, caso negativo a broca era descartada.

Para cada poço selecionado, calculava-se a Resistência ao Cisalhamento da Rocha ( $\tau$ ) para o intervalo de utilização da broca de PDC. Em seguida, observava-se, no gráfico Resistência ao Cisalhamento versus Profundidade, se

nesse intervalo a resistência ao cisalhamento pudesse ser considerada razoavelmente constante, admitindo para isso que o desvio padrão dos pontos fosse inferior ao limite estabelecido ( $1500 \text{ lb/pol}^2$ ) (10.3 MPa). Caso positivo, pesquisava-se no Registro de Brocas desse poço, para essa broca de PDC em análise, quais tinham sido os motivos de sua retirada. Caso ela tivesse sido retirada por final de vida útil coletavam-se as seguintes informações: tipo de broca, diâmetro, custo da broca, intervalo perfurado, assim como os parâmetros mecânicos e hidráulicos, desgaste da broca e método de perfuração (turbina, motor de fundo ou convencional), para que se tivesse uma idéia das condições sob as quais a broca operou. Alimentava-se o arquivo com esses dados e partia-se em seguida para a análise de outra broca. No Anexo 3, encontra-se o fluxograma de pesquisa e geração do arquivo de brocas de PDC e no Anexo 4 uma relação das brocas aceitas.

Com esse objetivo foram pesquisados 49 poços onde foram utilizadas 125 brocas de PDC, distribuídos pelas regiões, conforme a Tabela 3.1, sendo a grande maioria, 37 poços com 108 brocas, nas Bacia de Santos e Campos.

Desse total de 125 brocas, quando separadas por diâmetro, observa-se, da tabela 3.2, que a grande maioria, 116 brocas, são de diâmetro 8.1/2 pol (21.6 cm) ou 12.1/4 pol (31.1 cm).

ÁREA/BACIA	POÇOS POR ÁREA	BROCAS POR ÁREA	
		PESQUISADAS	ACEITAS
SANTOS	14	62	55
CAMPOS	23	46	30
ESP. SANTO	4	7	4
ALMADA (BA)	2	3	2
SERGIPE/ALAGOAS	1	1	1
POTIGUAR	5	6	5
	49	125	97

TAB. 3.1 - RESUMO DA PESQUISA DO ARQUIVO DE BROCAS POR ÁREA

DIÂMETRO	PESQUISADAS	ACEITAS
12.1/4"	43	34
8.1/2"	73	59
6.1/2"	2	0
6.1/8"	6	3
5.7/8"	1	1
	125	97

TAB 3.2 - RESUMO DA PESQUISA DE BROCAS POR DIÂMETRO

### 3.6 - OBTENÇÃO DA BROCA DE MÍNIMO CUSTO PARA UMA DETERMINADA FAIXA DE RESISTÊNCIA AO CISCALHAMENTO

Se diversos tipos de broca forem corridos em seções de poços que tenham a mesma resistência ao cisalhamento,

poderíamos utilizar os dados dessas brocas para estimar, para um intervalo do próximo poço que tenha resistência ao cisalhamento semelhante, qual a broca fornece o menor Custo Estimado por Metro Perfurado ( $C_e$ ), ou seja, utilizando o custo da sonda ( $C_s$ ) que vai perfurar o poço, o tempo de manobra ( $t_m$ ) estimado para essa profundidade e os parâmetros associados à broca ( $C_b$ ,  $t_b$  e  $D$ ), teríamos para cada broca um Custo Estimado. Esses valores obtidos, para cada broca, podem ser plotados num mesmo gráfico versus Resistência ao Cisalhamento, cada uma deverá ter um comportamento diferente e a que apresentar consistentemente o menor Custo Estimado para essa faixa de Resistência ao Cisalhamento será tomada como o tipo de broca mais econômica para esse intervalo.

Dessa modo, o Custo Estimado por Metro correlacionado com a Resistência ao Cisalhamento da rocha e o Desempenho da Broca, fornecerá um método conveniente de seleção de brocas de PDC. No Anexo 5 encontra-se um fluxograma do método base do Programa Computacional desenvolvido.

## CAPÍTULO 4

### APLICAÇÃO DO MÉTODO

#### 4.1 - ANÁLISE DOS GRÁFICOS

Para efeito de análise, como há um gráfico de Resistência ao Cisalhamento ( $\tau$ ) x Custo Estimado por Metro Perfurado ( $C_F$ ) para cada Custo Horário da Sonda ( $C_S$ ) e Profundidade de Entrada da Broca ( $P_e$ ), serão feitas algumas simulações fixando uma das variáveis ( $C_S$  ou  $P_e$ ) para observar o comportamento do gráfico em relação a outra variável. Foram plotados 46 brocas de diâmetros de 8.1/2 pol (21.6 cm) e 28 de 12.1/4 pol (31.1 cm), para os seis tipos de broca mais frequentemente utilizados de cada diâmetro.

No gráfico Resistência ao Cisalhamento versus Custo Estimado Por Metro da Figura 4.1, está representada a resposta do programa para as brocas de PDC de diâmetro 8.1/2 pol (21. cm), quando se altera a profundidade de entrada da broca e se mantém constante o custo horário da sonda (US\$ 3000/h), pode-se observar um aumento no Custo Estimado por Metro Perfurado quando a profundidade de entrada da broca passa de 2000 para 4000 metros (dobro). Entretanto, as posições relativas entre os custos estimados das diversas brocas

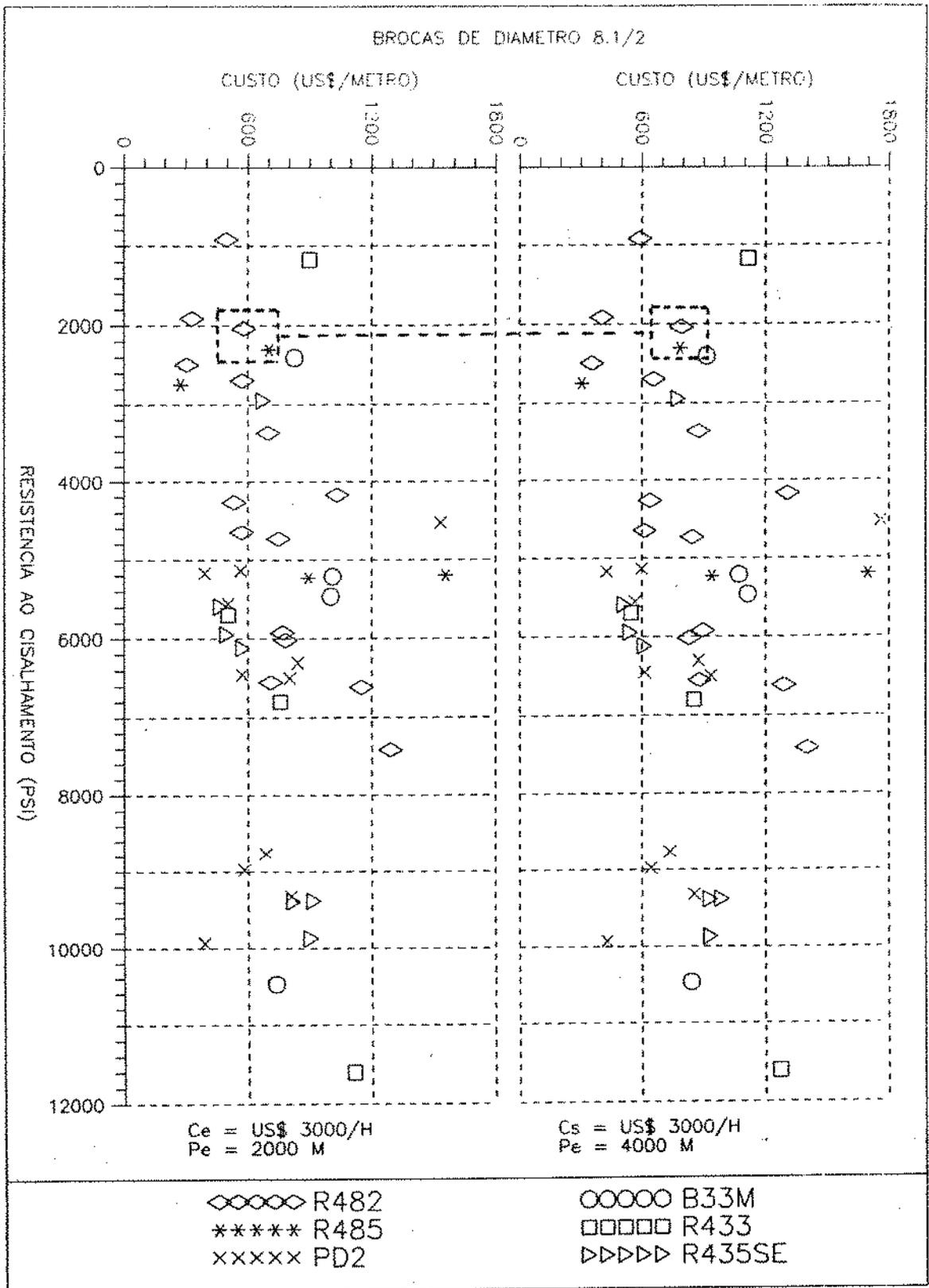


FIG 4.1 - VARIACAO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA Sonda Fixo e a Profundidade de Entrada da Broca Variando

podem-se alterar como é o caso das brocas R-482 e R-485 (em destaque) que trabalharam numa faixa de resistência ao cisalhamento entre 2000 e 2500 psi (13.8 e 17.3 MPa), em que para a profundidade de entrada de 2000 metros a broca R-482 tinha um custo estimado inferior ao da R-485, todavia, ao se alterar a profundidade de entrada da broca para 4000 metros, as situações se inverteram ficando o custo estimado da R-485 inferior ao da R-482.

No gráfico da Figura 4.2, representando a resposta do programa para as brocas de PDC do mesmo diâmetro anterior, quando se altera o custo horário da sonda e se mantém constante a profundidade de entrada da broca (4000 metros), pode-se observar, como também era de se esperar, um aumento no custo estimado quando o custo horário da sonda passa de US\$ 1500/h para US\$ 3000/h (dobro). Contudo, a posição relativa entre os custos estimados também podem se alterar, como é o caso das brocas PD-2 e R-482 (em destaque), em que as brocas passaram a ter o mesmo custo estimado com o aumento do custo horário da sonda.

Da análise das duas simulações anteriores, observa-se que a variação do Custo Estimado por Metro Perfurado é mais sensível a variação do custo horário da sonda do que a variação da profundidade de entrada da broca quando feitas na mesma proporção. Numa simulação numérica, utilizando a equação 2.3, para as seguintes condições: custo da broca de

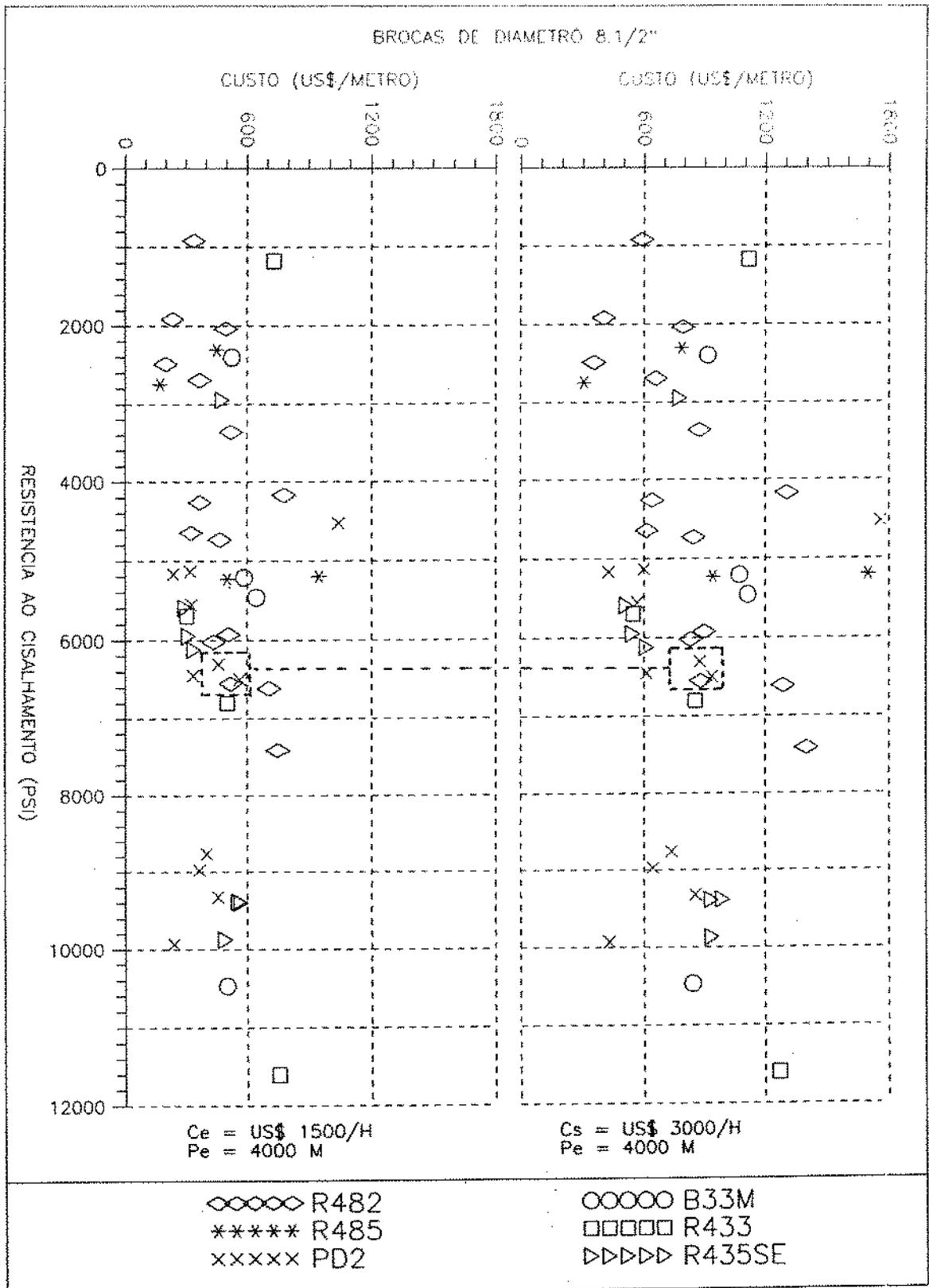


FIG 4.2 - VARIACAO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA VARIANDO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA FIXA

US\$ 50000, e perfurou intervalo de 400 metros e tempo de broca no fundo em 50 horas, fixando-se o custo horário da sonda em US\$ 2000/h, a relação entre os custos estimados, para uma profundidade de entrada de 2000 metros ( $C_{E1}$ ) ou 4000 metros ( $C_{E2}$ ) é de:  $C_{E1}/C_{E2} = 0.93$ . Para a mesma situação, fixando-se a profundidade de entrada da broca em 2000 metros, a relação entre os custos estimados para o custo horário da sonda variando de US\$ 1000/h ( $C_{E3}$ ) para US\$ 2000/h ( $C_{E4}$ ) é de:  $C_{E3}/C_{E4} = 0.65$ , confirmando a maior influência da variação do custo horário da sonda.

O gráfico da Figura 4.3 é o mesmo tipo de gráfico da Figura 4.2 para brocas de PDC de diâmetro 12.1/4 pol (31.1 cm). Quando se altera o custo da sonda de US\$ 1500/h para US\$ 3000/h mantendo-se a profundidade de entrada da broca constante (2000 metros), observa-se também, que o custo estimado aumenta com o aumento do custo horário da sonda e a posição relativa entre os custos estimados das brocas também se altera como é o caso das brocas R-410 e B-27-M (em destaque), porém, esse comportamento é atenuado se comparado com o da figura 4.2, pois, o custo da broca passa a ter relativamente mais reflexos sobre a variação do custo estimado, já que o preço médio das brocas de PDC de 8.1/2 pol (21.6 cm) é de cerca de US\$ 25000 enquanto que o das 12.1/4 pol (31.1 cm) é de cerca de US\$ 50000.

No gráfico da Figura 4.4 para brocas de 12.1/4 pol

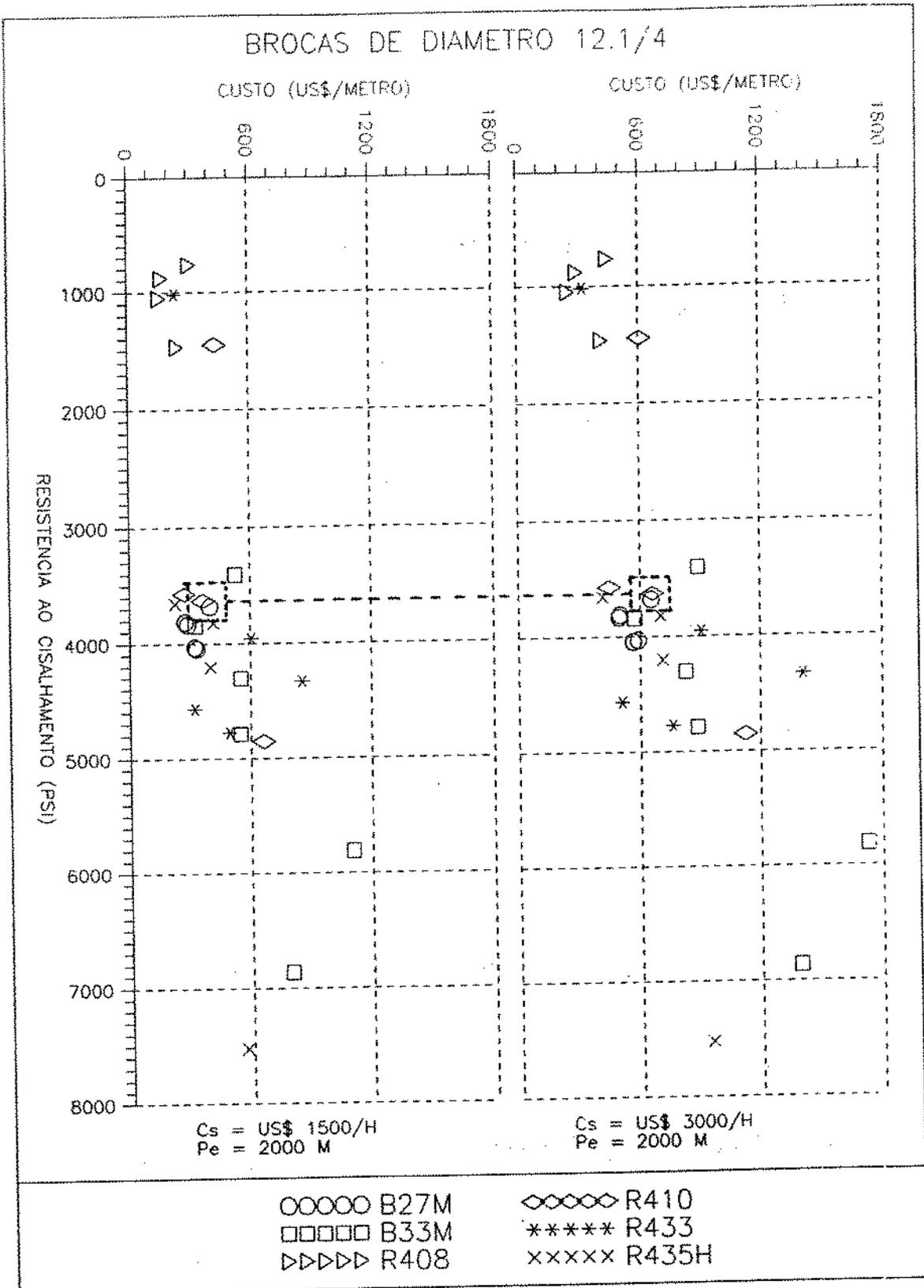


FIG 4.3 - VARIACAO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA VARIANDO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA FIXA

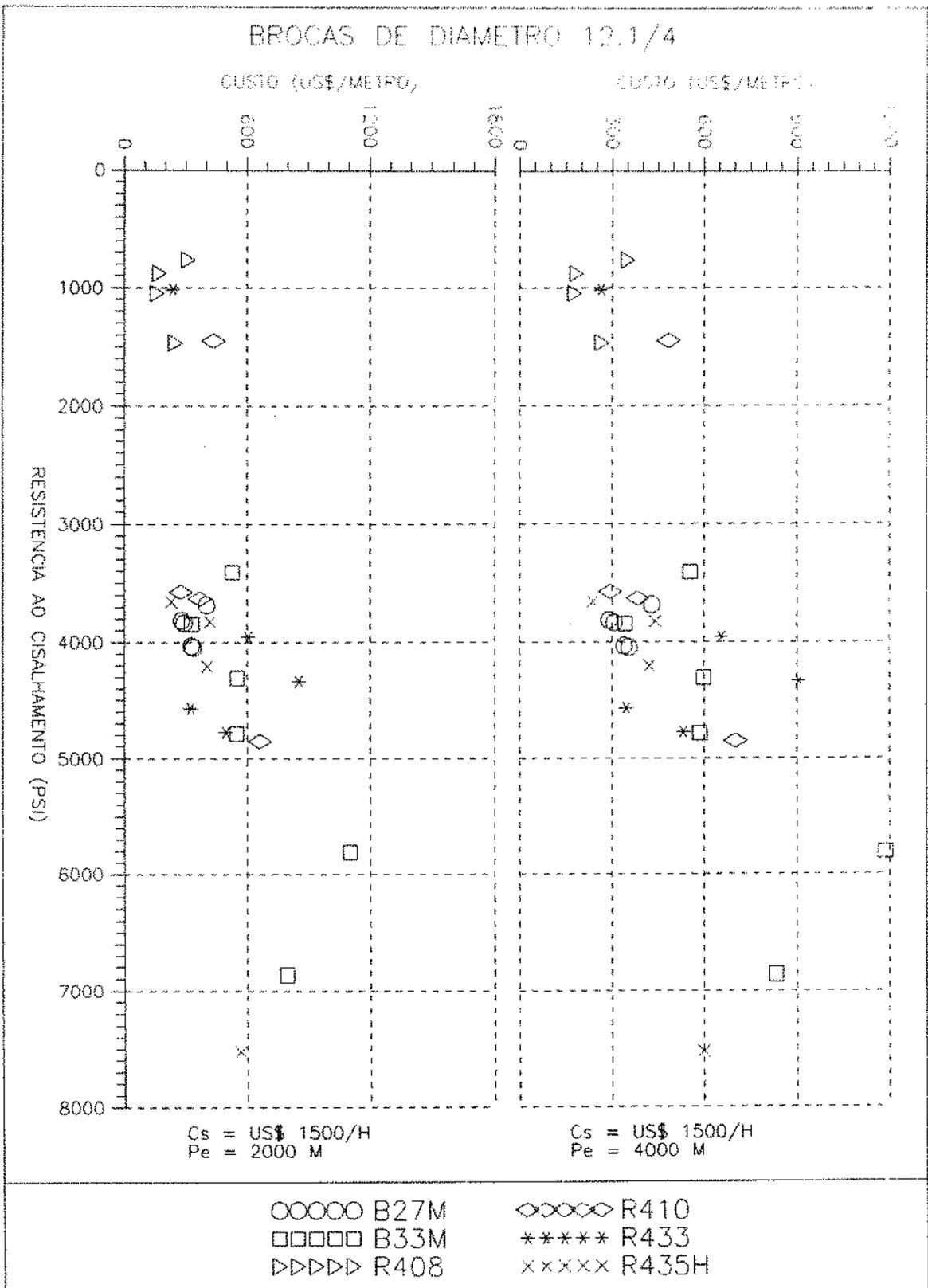


FIG 4.4 - VARIACAO DO CUSTO POR METRO ESTIMADO PARA O CUSTO DA SONDA FIXO E A PROFUNDIDADE DE ENTRADA DA BROCA VARIANDO.

(31.1 cm) fixando-se o custo da sonda em US\$ 1500/h e variando-se a profundidade de entrada da broca de 2000 metros para 4000 metros, nota-se o mesmo comportamento do custo estimado observado na figura 4.1 porém, de uma forma bem mais atenuada, ficando imperceptíveis as alterações relativas entre os custos estimados das brocas. Isso se explica devido ao fato do efeito da variação da profundidade de entrada já ser atenuado em relação à variação do custo horário da sonda, e mais atenuado pela influência do aumento do custo da broca de 12.1/4 pol (31.1 cm) em relação à de 8.1/2 pol (21.6 cm).

Podemos concluir, a partir das quatro simulações anteriores, que para o método proposto não há possibilidade de se obter um Guia de Seleção Universal, como o proposto por Mason<sup>(2)</sup> para brocas de rolamento (Fig. 2.8), 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 será diferente caso algum dos dois parâmetros anteriores seja alterado, justificando, em função disso, que a implementação do método só possa ser feita através de um Programa Computacional.

Os gráficos a seguir, entre as Figura 4.5 e 4.10, representam a relação entre resistência ao cisalhamento e custo estimado por metro perfurado para seis tipos de brocas PDC de diâmetro 12.1/4 pol (31.1 cm), para as quais se obtiveram o maior número de dados, assumindo um custo horário da sonda de US\$ 3000/h e uma profundidade de entrada da broca

de 2000 metros.

Na análise da Figura 4.5, representando as 5 brocas B-27-M consideradas não reutilizáveis, observa-se que elas trabalharam numa faixa restrita de resistência ao cisalhamento médio, entre 3600 e 4100 psi (24.8 e 28.2 MPa), com custo estimado por metro entre US\$ 500/m e US\$ 670/m. Como não se tem informações sobre sua atuação em outras faixas de resistência ao cisalhamento, não se pode afirmar ser essa a faixa em que a broca B-27-M produziria o menor custo estimado. Entretanto, vale notar que nessa faixa de atuação, as brocas obtiveram um custo estimado, indicando uma correlação razoável entre resistência ao cisalhamento e o desempenho da broca.

Na Figura 4.6, representando as 6 brocas B-33-M analisadas sendo 4 consideradas reutilizáveis, nota-se que apesar de terem trabalhado num intervalo de resistência ao cisalhamento maior que a anterior, entre 3300 e 6800 psi (22.7 e 46.9 MPa), não se pode concluir, devido aos poucos dados disponíveis estarem dispersos, qual a sua melhor faixa de operação. Contudo, observa-se que as que trabalharam numa faixa de resistência ao cisalhamento maior, entre 4300 e 6800 psi (29.6 e 46.9 MPa), são reutilizáveis, apesar de duas delas que trabalharam na faixa extrema (5800 e 6500 psi) (40.0 e 44.8 MPa) terem produzido custos elevados (US\$ 1400/m e US\$1700/m).

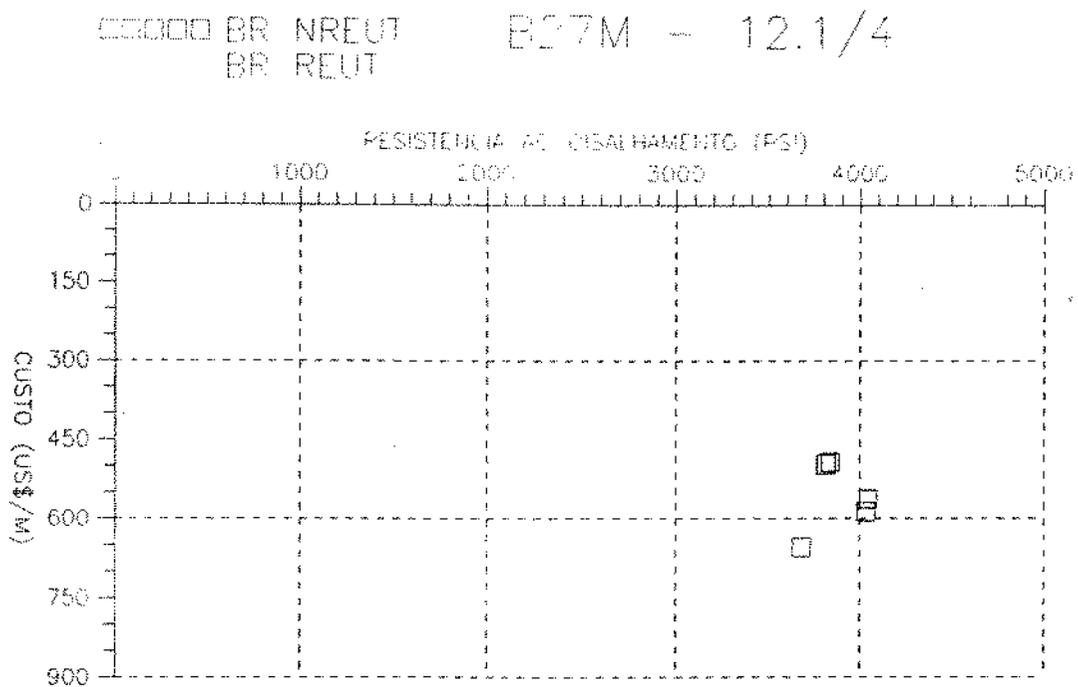


FIG 4.5 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B-27-M DE 12.1/4

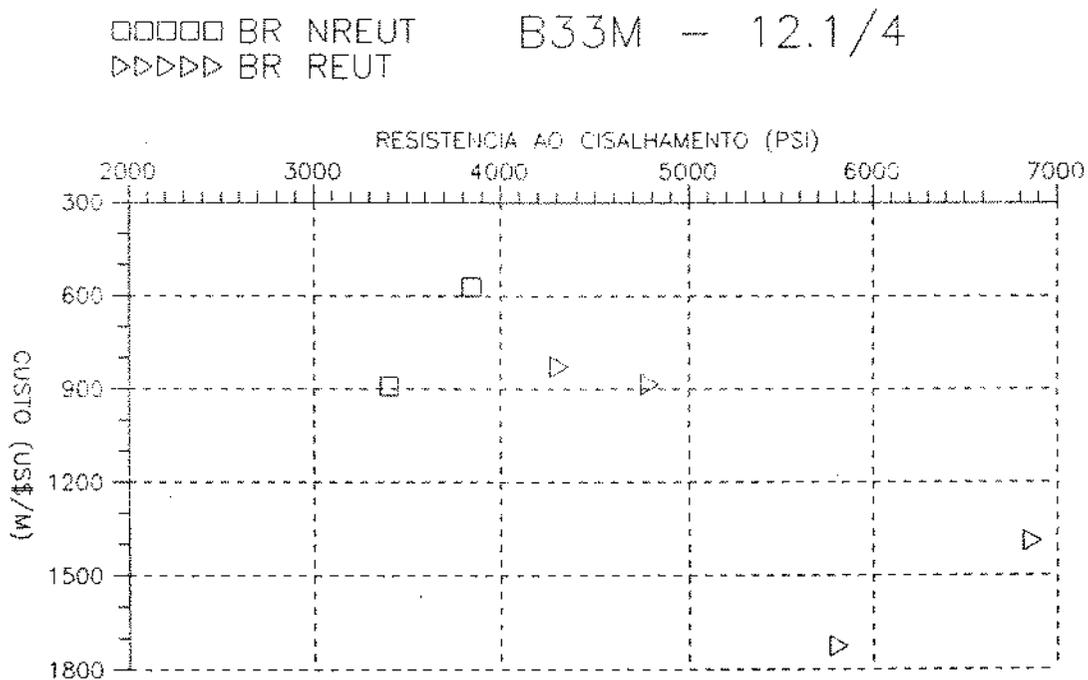


FIG 4.6 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B-33-M DE 12.1/4

Para o gráfico da Figura 4.7, representando as cinco brocas R-433 sendo uma reutilizável, nota-se que a que obteve o menor custo, US\$310/m, trabalhou numa faixa média de 1000 psi (6.9 MPa), as demais quatro brocas se encontram num intervalo entre 3900 e 4800 psi (26.9 e 33.1 MPa), sendo que as duas que trabalharam no limite superior (4500 e 4800 psi) (31.0 e 33.1 MPa) obtiveram os menores custos desse intervalo (US\$500/m e US\$750/m), a outra broca não reutilizável, apesar de ter trabalhado numa faixa de resistência ao cisalhamento um pouco inferior, 4300 psi (29.7 MPa) produziu um custo estimado bem superior as demais (US\$1400/m), possivelmente motivada por outros fatores que não o tipo de broca nem a resistência ao cisalhamento do intervalo perfurado.

Na Figura 4.8, representando o desempenho de quatro brocas R-435-H sendo uma reutilizável, nota-se que no intervalo de resistência ao cisalhamento entre 3700 e 4200 psi (25.5 e 30.0 MPa), trabalharam três brocas, sendo uma reutilizável, com custos variando de US\$400/m até US\$700/m. A que obteve o menor custo trabalhou na faixa de 3700 psi (25.5 MPa) produzindo um custo estimado de US\$ 400/h, e a que obteve o maior trabalhou na faixa extrema de 7600 psi (52.4 MPa) com custo estimado de US\$ 950/m. Seria necessário obter os dados de um maior número dessas brocas, atuando nas faixas intermediárias de resistência ao cisalhamento, para que se pudesse tirar alguma conclusão.

□□□□□ BR NREUT      R433 - 12.1/4  
 ▷▷▷▷▷ BR REUT

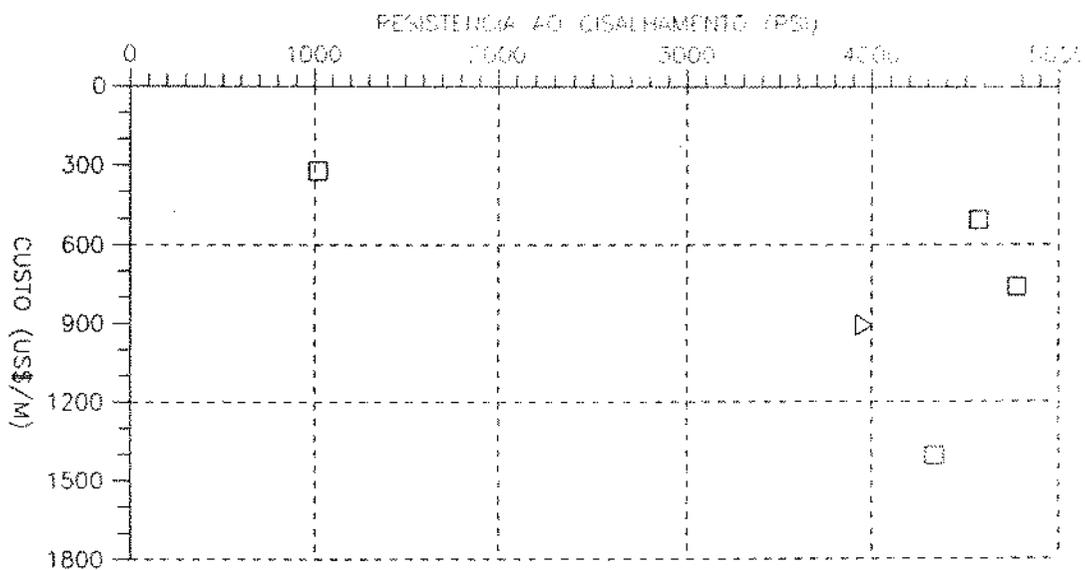


FIG 4.7 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-433 DE 12.1/4

□□□□□ BR NREUT      R435H - 12.1/4  
 ▷▷▷▷▷ BR REUT

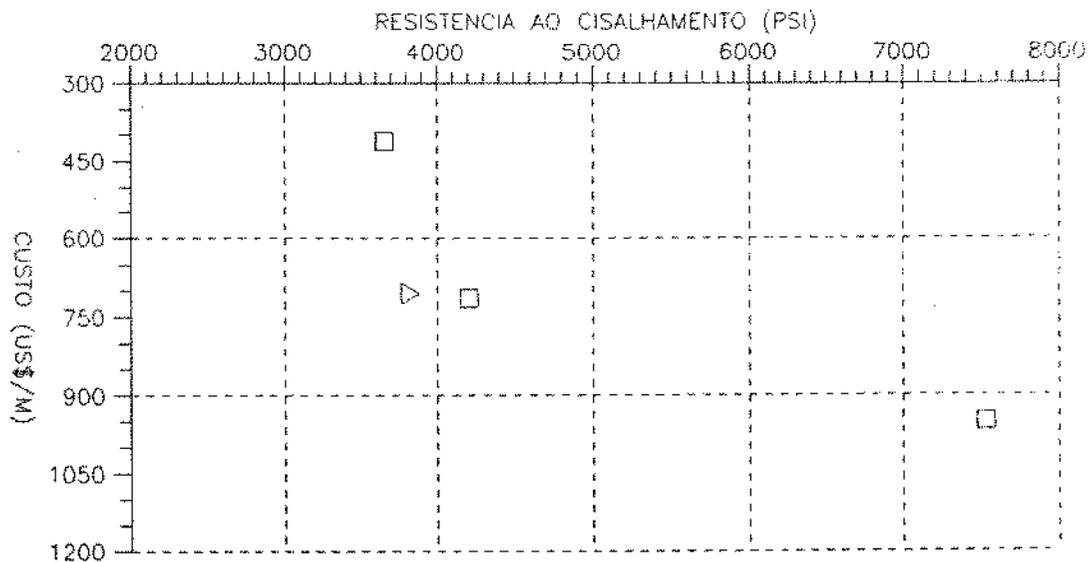


FIG 4.8 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-435H DE 12.1/4

Da análise da Figura 4.9, representando quatro brocas R-410 das quais duas são reutilizáveis, observa-se que as duas brocas que produziram os menores custos (US\$450/m e US\$600/m) são reutilizáveis, apesar de terem trabalhado em faixas diferentes (1400 e 3500 psi) (9.7 e 24.1 MPa). Observa-se também, que entre as duas brocas, sendo uma reutilizável e a outra não, que trabalharam na mesma faixa de resistência ao cisalhamento (3600 psi) (24.2 MPa), produziram custos estimados diferentes, US\$ 450/m e US\$ 670/m respectivamente, possivelmente motivada por outros fatores que não o tipo de broca nem a resistência ao cisalhamento do intervalo perfurado.

Da análise da Figura 4.10, representando quatro brocas R-408 sendo duas reutilizáveis, podemos fazer o mesmo comentário a respeito da Figura 4.5, ou seja, as brocas trabalharam numa faixa de resistência ao cisalhamento restritas, entre 600 a 1200 psi (4.1 e 8.3 MPa), produzindo custos estimados próximos, entre US\$350/m e US\$450/m, FIG 4.9 e 4.10, contudo, como não se dispõem de dados para as outras faixas não se pode afirmar ser esse em que a broca R-408 produz o menor custo.

O resumo da análise dos 6 gráficos para brocas de 12.1/4 pol (31.1 cm) indica que dois forneceram alguma correlação satisfatória, uma não pode ser explicada e três são inconclusivas.

□□□□ BR NREUT      R410 - 12.1/4  
 ▷▷▷▷ BR REUT

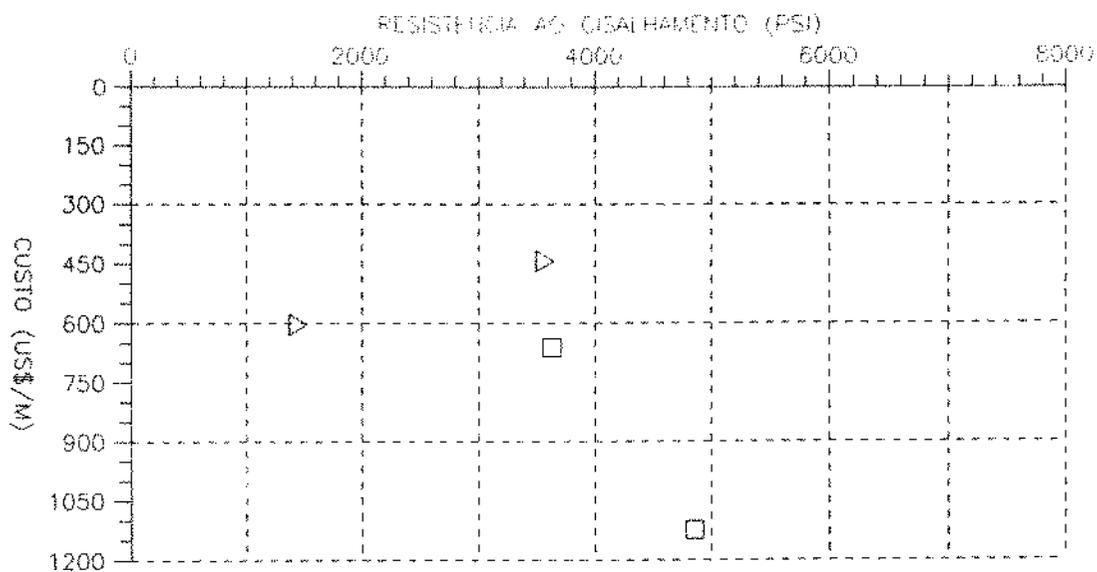


FIG 4.9 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-410 DE 12.1/4

□□□□ BR NREUT      R408 - 12.1/4  
 ▷▷▷▷ BR REUT

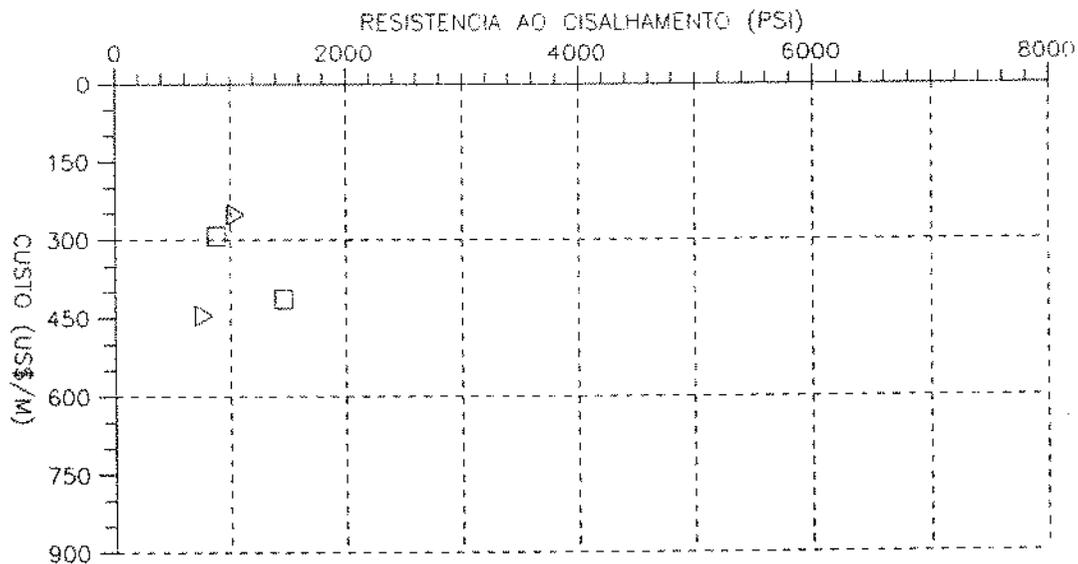


FIG 4.10 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-408 DE 12.1/4

Os gráficos a seguir entre as Figuras 4.11 e 4.16, representam a relação entre a resistência ao cisalhamento e o custo estimado do metro perfurado entre as brocas de PDC de diâmetro 8.1/2 pol (21.6 cm) de um mesmo tipo, para as quais se obtiveram o maior número de dados. Nessas seis simulações foram assumidos: o custo horário da sonda de US\$3000/h e a profundidade do intervalo perfurado de 4000 metros.

No gráfico da Figura 4.11, representando a resposta do programa para quinze brocas tipo R-482 das quais sete reutilizáveis, sendo esse o maior número de dados obtidos para um mesmo tipo de broca, podemos observar que elas trabalharam em intervalos de resistência ao cisalhamento bem diversificado, entre 900 e 5900 psi (6.2 e 40.7 MPa), produzindo custos estimados, para as condições impostas entre US\$ 300/m e US\$ 1400/m. As três brocas não reutilizáveis que produziram os máximos custos também trabalharam na faixa extrema de resistência ao cisalhamento, porém, os mínimos custos foram produzidos por quatro brocas que trabalharam na mesma faixa de resistência ao cisalhamento, entre 900 e 2500 psi (6.2 e 17.2 MPa), produzindo custos entre US\$ 350/m e US\$ 650/m, com a médio das 4 brocas de cerca de US\$ 450/m. Sendo que a que produziu o menor custo trabalhou numa faixa 2400 psi (16.5 MPa). Nesse mesmo intervalo de resistência ao cisalhamento, trabalhou mais uma broca não reutilizável, porém com custos estimado por metro superior a média anterior (US\$ 750/m). O que nos permite supor que a melhor faixa de trabalho

das brocas R-482 está entre 1000 e 3000 psi (6.9 e 20.7 MPa). Para confirmar essa suspeita seria recomendável que para o próximo poço, em um intervalo que tivesse resistência ao cisalhamento média dentro dessa faixa, se programasse a descida de outra broca R-482 utilizando os parâmetros mecânicos médios da broca que produziu o menor custo. As sete brocas reutilizáveis, trabalharam numa faixa de resistência ao cisalhamento entre 3500 e 6500 psi (24.1 e 44.8 MPa), com custo estimados variando entre US\$600/m e US\$ 1300/m.

No gráfico da Figura 4.12, representando a resposta do programa para onze brocas PD-2 das quais quatro reutilizáveis, nota-se que as três não reutilizáveis que produziram os menores custos trabalharam na mesma faixa de resistência ao cisalhamento, entre 5000 e 5600 psi (34.5 e 38.6 MPa), com custos variando entre US\$ 500/m e US\$ 600/m para as condições impostas. Outras duas brocas não reutilizáveis que trabalharam numa mesma faixa de 6400 psi (44.1 MPa) obtiveram praticamente o mesmo custo US\$ 900/m. Esses dois conjuntos de respostas demonstram uma correlação satisfatória entre o desempenho da broca e a resistência ao cisalhamento. Para o próximo poço que tivesse um intervalo de resistência ao cisalhamento média próxima de algum desses intervalos, seria recomendável a programação de uma broca PD-2, utilizando os parâmetros mecânicos da que obteve o menor custo, para confirmar essas observações.

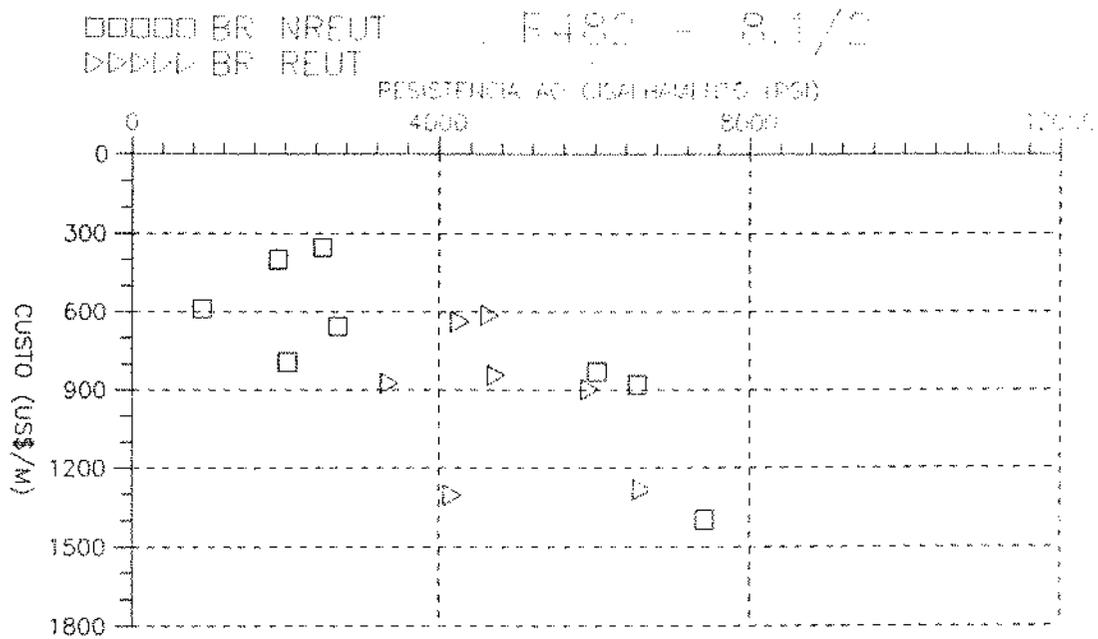


FIG 4.11 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-482 DE 8.1/2

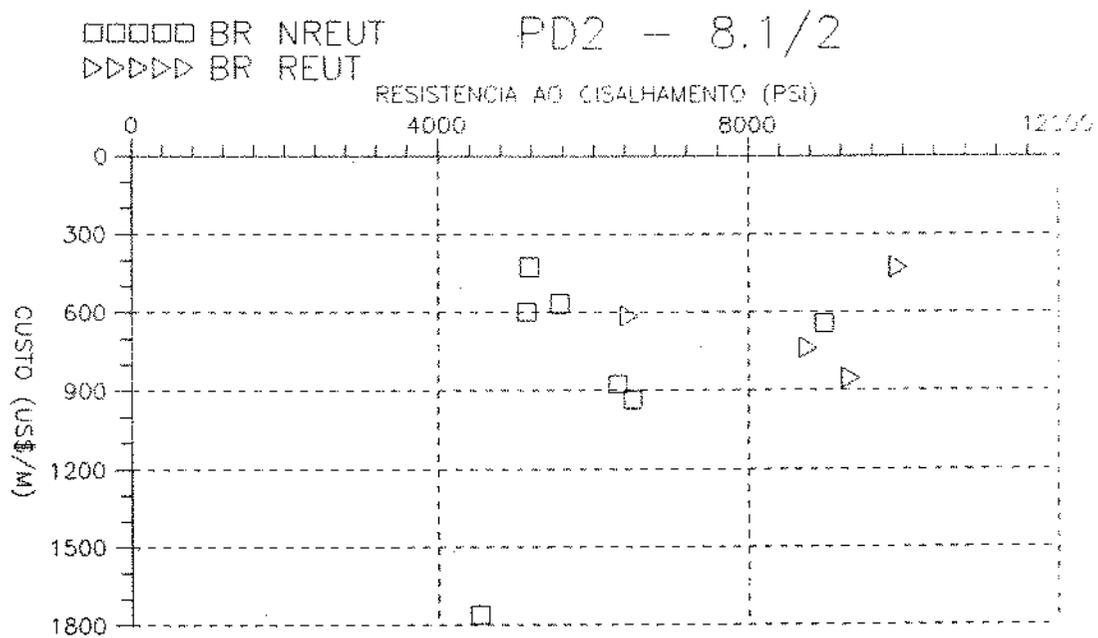


FIG 4.12 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS PD-2 DE 8.1/2

No gráfico da Figura 4.13, representando a resposta do programa para sete brocas R-435-SE sendo três não reutilizáveis, podemos observar que as duas que trabalharam na mesma faixa de resistência ao cisalhamento, entre 9400 e 9800 psi (64.8 e 67.6 MPa), apesar de terem produzido os maiores custos estimados, entre US\$ 1000/m e US\$ 1050/m, forneceram uma resposta consistente, ou seja, brocas trabalhando na mesma faixa de resistência ao cisalhamento produzindo o mesmo custo estimado.

No gráfico da Figura 4.14, representando a resposta do programa para quatro brocas R-485 sendo duas reutilizáveis, pode-se observar que duas brocas que trabalharam na faixa de resistência ao cisalhamento de 5200 psi (38.9 MPa), produziram custos completamente diferentes US\$ 1000/m e US\$ 1700/m, possivelmente motivada por outros fatores que não o tipo de broca nem a resistência ao cisalhamento do intervalo perfurado.

No gráfico da Figura 4.15, representando a resposta do programa para quatro brocas B-33-M sendo uma reutilizável, observa-se que o comportamento das duas brocas não reutilizáveis que trabalharam na mesma faixa de resistência ao cisalhamento, 5400 psi (37.2 MPa), produziram custos próximos, entre US\$ 1050/m e US\$ 1100/m, apresentando uma correlação satisfatória. A outra broca não reutilizável que trabalhou

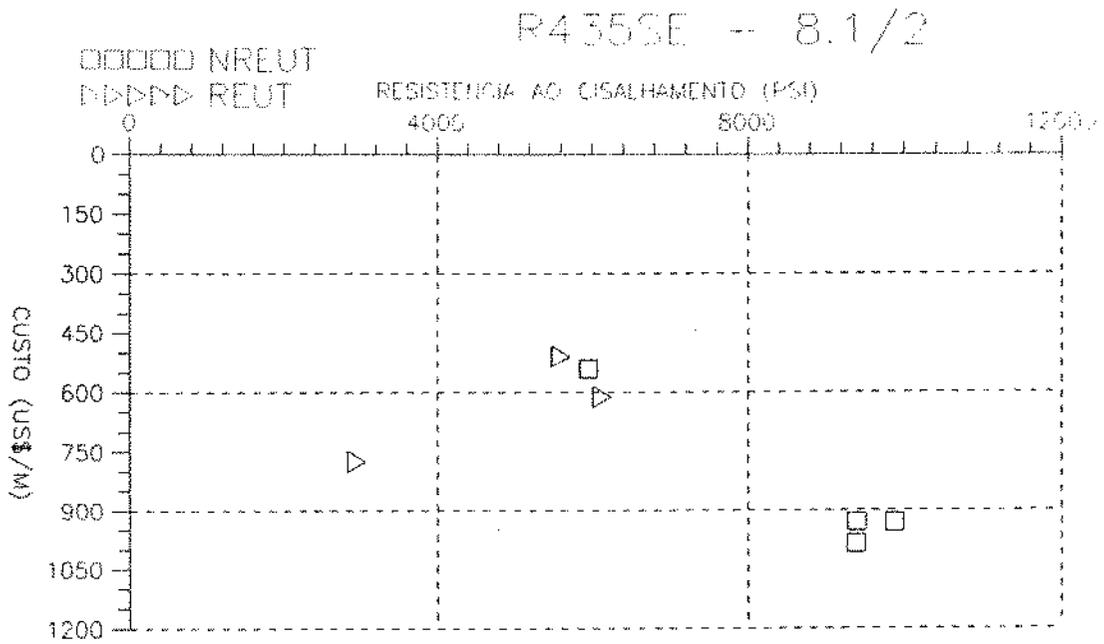


FIG 4.13 - RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS R-435SE DE 8.1/2 PESQUISADAS

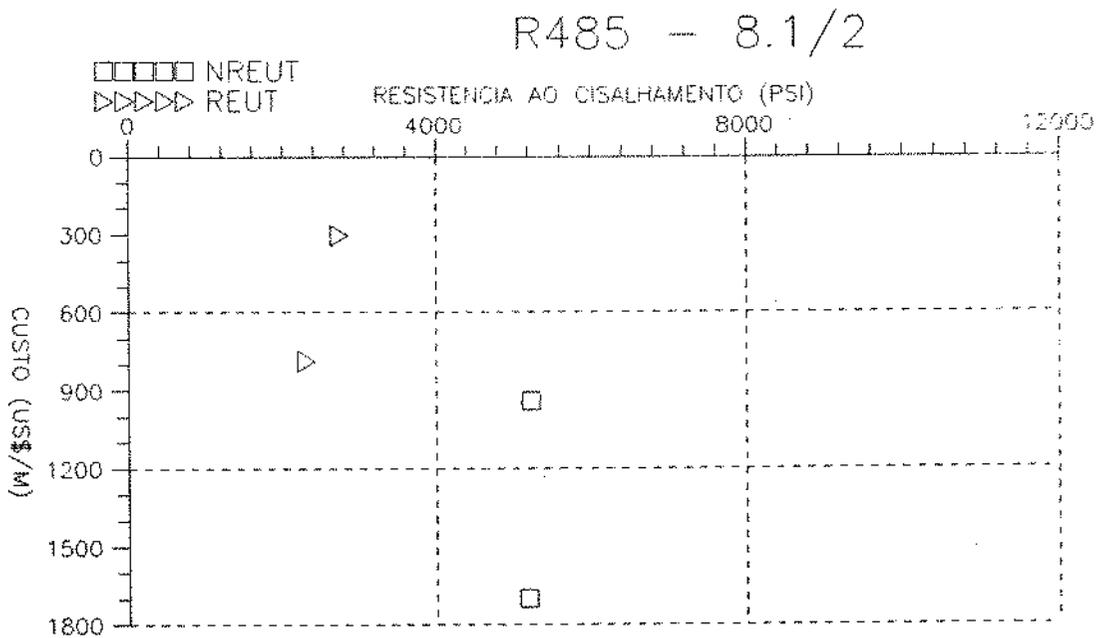


FIG 4.14 RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO PARA BROCAS R-485 DE 8.1/2 PESQUISADAS

numa resistência ao cisalhamento de 4800 psi (33.1 MPa) produziu um custo, US\$ 900/m, menor que o das duas anteriores, entretanto como só se dispõem de uma broca nessa intervalo, não se pode afirmar ser essa a faixa em que a broca B-33-M apresentará o melhor desempenho, sendo necessária a utilização de outras brocas B-33-M em outras faixas intermediárias para que se possa concluir alguma coisa.

No gráfico da figura 4.16, representando o comportamento das quatro brocas R-433 não reutilizáveis, nota-se que elas trabalharam numa faixa de resistência ao cisalhamento bastante abrangente, entre 1000 e 12000 psi (6.9 e 82.7 MPa), sendo que a que obteve o menor custo trabalhou numa faixa de 7800 psi (53.8 MPa) e produziu um custo de US\$ 550/m, entretanto, como estas brocas estão isoladas entre si, seriam necessários um maior número de dados sobre o seu comportamento em outras faixas intermediárias para que se pudesse tirar alguma conclusão.

O resumo da análise dos gráficos para brocas de diâmetro 8.1/2 pol (21.6 cm) indicam que: quatro forneceram correlações satisfatórias, uma não pode ser explicada e uma é inconclusiva.

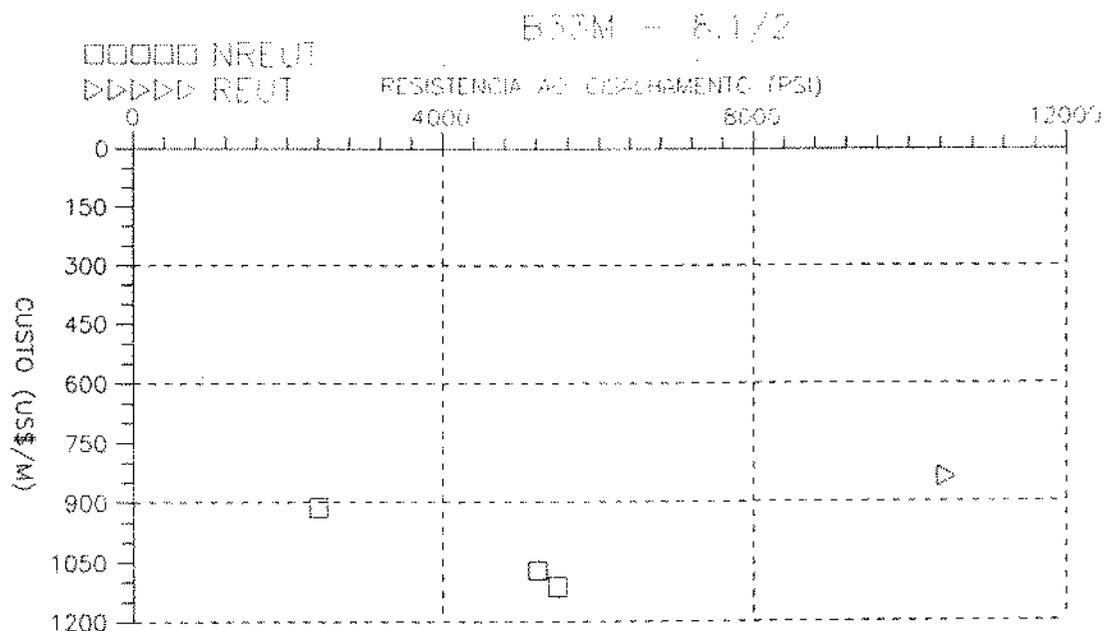


FIG 4.15- RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISCALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO DAS BROCAS B-33-M DE 8.1/2 PESQUISADAS

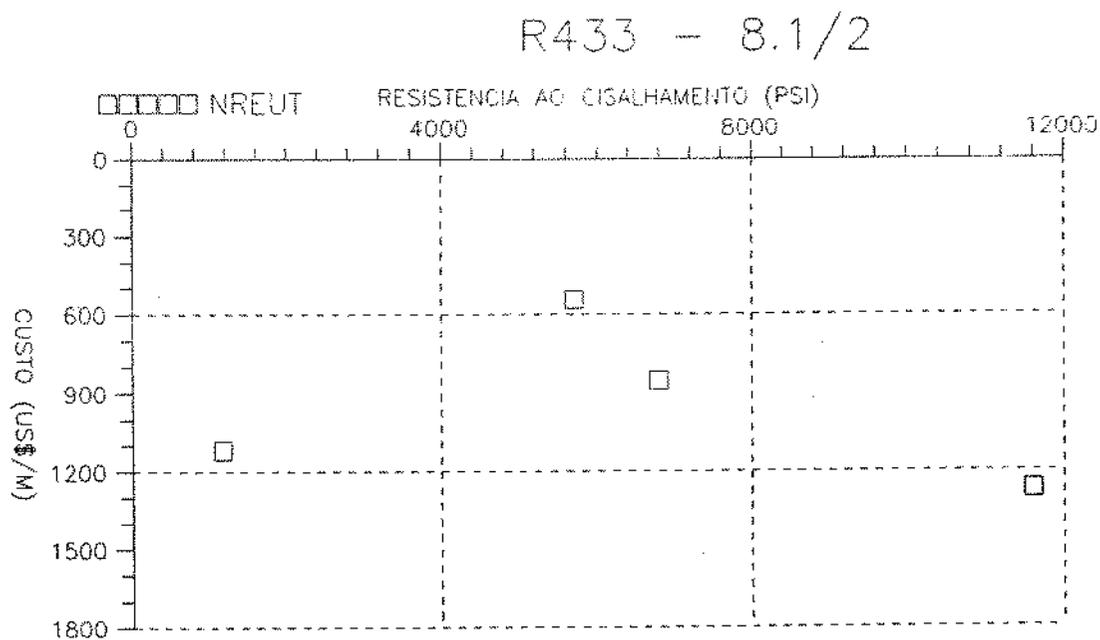


FIG 4.16 RELACAO ENTRE RESISTENCIA AO CISCALHAMENTO E CUSTO ESTIMADO PARA BROCAS R-433 DE 8.1/2 PESQUISADAS

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

A) O método apresentado pode ser aplicado também para brocas de rolamento, substituindo a resistência ao cisalhamento pela resistência à compressão.

B) Caso, no futuro, seja desenvolvida uma correlação mais representativa da resistência ao cisalhamento ou de outra característica mecânica que se constate estar mais associada ao desempenho da broca PDC, ela poderá substituir a atual, permanecendo válido o algoritmo de pesquisa desenvolvido.

C) Devido ao número reduzido de brocas de um mesmo tipo e diâmetro, na maioria dos casos estudados não foi possível associar um tipo de broca a uma faixa de resistência ao cisalhamento em que se obtivesse o seu melhor rendimento.

D) Mesmo que o cálculo da Resistência ao Cisalhamento ainda não tenha sido validada, como, respeitando as limitações, ele se baseia em procedimentos normalmente aceitos em Mecânica das Rochas e em algumas correlações obtidas em ensaios de laboratório, pode-se dizer que os

resultados são qualitativamente representativos.

E) Baseado na literatura pesquisada de que o principal mecanismo de atuação das brocas de PDC é por cisalhamento da formação e no item (D), este método de escolha de brocas de PDC indica ser promissor, e sua utilização sistemática, realimentando o Arquivo de Brocas com as informações das brocas que serão utilizadas no futuro, deverá fornecer respostas cada vez mais confiáveis.

F) O custo estimado do metro perfurado, para um dado desempenho de broca, é mais sensível ao custo da sonda do que a profundidade do intervalo perfurado.

G) A correlação entre resistência ao cisalhamento e o rendimento da broca de PDC mostrou-se razoável para algumas brocas em determinadas faixas de resistência o cisalhamento.

H) A eficácia do método só poderá ser comprovada com a sua utilização, já que atualmente não se dispõe de nenhuma outra ferramenta, desenvolvida com esse objetivo, com a qual se pudesse fazer comparações.

## 5.2 - RECOMENDAÇÕES

A) Dado ao grande número de brocas de PDC que são utilizadas nos campos de desenvolvimento como por exemplo Canto do Amaro (RN); Lagoa Suruaca (ES), etc., cujos dados não podem ser aproveitados, como descrito neste trabalho, devido a esses poços não serem perfilados, seria recomendável que, nesses poços, fosse corrido pelo menos o Perfil Sônico. Desse modo o número de informações cresceria o que possibilitaria conclusões mais embasadas.

B) Após a retirada da broca de PDC do poço, analisar cuidadosamente o seu desgaste e registrar essas informações, pois elas serão úteis para que se evite repetir erros nos poços seguintes.

C) Adaptar o cálculo da Energia Específica ao mecanismo de atuação das brocas de PDC, desse modo se poderia dispor de mais uma característica mecânica da formação e, como exposto no item (B) das Conclusões, propor um Método de Escolha de Brocas de PDC baseado na Energia Específica e utilizando o algoritmo de pesquisa desenvolvido.

D) Quando possível, programar descida de brocas de PDC nas faixas intermediárias de resistência ao cisalhamento, conforme proposta na análise dos gráficos de cada broca para aferição do método e confirmação da relação existente entre

desempenho da broca e resistência ao cisalhamento do intervalo perfurado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - Dumans C.F.F., 'Método Associativo para Escolha de Brocas Tricônicas e Brocas de Diamante Policristalino', Tese Mestrado, UNICAMP, março/1990.
- (2) - Mason K.L., 'Tricone Bit Selection Using Sonic Logs', SPE 13256, Annual Technical Conference and Exhibition, Huston, Texas, September 16-19, 1984.
- (3) - Goult A.D. et alli, 'PDC Applications in the Gulf of Mexico with Water-Based Drilling Fluids', SPE Drilling Engineering, June 1988, pg 117-124.
- (4) - Maidla E. & Ohara S., 'Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drilling Bit, Weight on Bit and Drillstring Rotation', SPE 19130, Petroleum Computer Conference, San Antonio, Texas, June 26-28, 1989.
- (5) - Sinor L.A. et alli, 'Field Testing of Low-Friction Gouge PDC Bit', SPE 20416, Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, September 23-26, 1990, pg. 125-136.
- (6) - Bourgoyné A.T. et alli, 'Applied Drilling Engeneering', SPE Text Book Series, Vol-II, 1986, 1<sup>a</sup> ed.
- (7) - Lama R.D. & Vutukuri V.S., 'Handbook on Mechanical Properties of Rocks', Trans Tech Publications, Vol-II, 1978, pg 94.
- (8) - Danbon S.H. & Domenico S.N., 'Shear Wave Exploration', Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Development, Vol-I, 1987.
- (9) - Brett J.F. et alli, 'Bit Whirl, a New Theory of PDC Bit Failure', SPE 19571, Annual Technical Conference, San Antonio, Texas, October 8-11, 1989, pg 521-536.
- (10) - Feenstra R., 'Status of Polycrystalline Diamond Compact Bits: Part 1 - Development', Journal of Petroleum Technology, June 1988, pg 675-684.
- (11) - Brett J.F et alli, 'Development of a Whirl Resistent Bit', SPE 19572, Annual Technical Conference, San Antonio, Texas, October 8-11, 1989, 537-552.

- (12)- Knowlton R.H., 'PDC Bits Using Positive Rake Cutters', SPE 19922, SPE/IADC Drilling Conference, Huston, Texas, February 27 - March 2, 1990, pg 139-143.
- (13)- Ziaja M.B., 'Mathematical Model of the Polycrystalline Diamond Drilling Process And Its Practical Application', SPE 14217, Annual Technical Conference, Las Vegas, NV, September 22-25, 1985.
- (14) Wojtanowicz A.K. & Kuru E., 'Dinamic Drilling Strategy for PDC Bits', SPE 16118, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, March 15-18, 1987, pg 595-611.
- (15)- Zeuch D.H., 'Rock Breakage Mechanisms with PDC Cutter', SPE 14219, Annual Technical Conference, Las Vegas, NV, September 22-25, 1985.
- (16)- Cerkovnik J. & Keith M., 'Mosaic Cutters Improve Lengthen Bit Performance in Variable, Abrasive Formations', Oil & Gas Journal, May 2, 1988, pg 78-84.
- (17)- Myhre K., 'Application of Bicenter Bits in Well Deepening Operations', SPE 19921, IADC/SPE Drilling Conference, Huston, Texas, February 27 - March 2, 1990, pg 131-138.
- (18)- Glowka D.A., 'Implications of Thermal Wear Phenomena for PDC bit Design and Operation', SPE 14222, Annual Technical Conference, Las Vegas, NV, September 22-25, 1985.
- (19)- Warrem T.M. & Senior A., 'Drag Bit Perfomance Modeling', SPE 15618, Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, October 5-8, 1986.
- (20)- Steiger R.P. & Leung P.H., 'Quantitative Determination of the Mechanical Properties of Shales', SPE 18024, Annual Technical Conference and Exhibition, Huston, Texas, October 2-5, 1988.
- (21)- Santos H.M.R & Fontoura S.A.B., 'Estabilidade de Poços Verticais e Inclínados', PETROBRAS / CENPES / DIPLOT, Projeto 02.02.57, Relatório Final.
- (22)- Dumans C.F.F. & Maidla E.E., 'PDC Bit Selection Method Through the Analysis of Past Bit Performance', SPE 21073, Latin American Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, RJ, October 14-19, 1990.

- (23)- Frost E.Jr. & Fertl W.H., 'Shear Wave Travel Time Determination Using and Unconventional Approach', SPE 11032, Annual Fall Technical Conference and Exhibition, New Orleans, September 26-29, 1982,
- (24)- Winters, W.J. & Doiron, H.H., 'The 1987 IADC Fixed Cutter Bit Classification System', SPE 16142, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, March 15-18, 1987, pg 807-816.
- (25)- Goodman R.E., 'Introduction of Rock Mechanics', New York, John Willey & Sons, 2<sup>o</sup> ed, 1989.
- (26)- Vennin H.C., 'Drilling Bits Optimized for the Paris Basin', Oil & Gas Journal, July 31, 1989, pg 93-96.
- (27) Wampler C & Myhre K., 'Methodology for Selecting PDC Bits Cuts Drilling Cost', Oil & Gas Journal, January 15, 1990, pg 39-44.
- (28)- Recorder J.M., 'Seminário de Brocas Diamantadas', CHRISTENSEN / UNICAMP , junho/1991
- (29)- Souza A.A & Castro F.N.C., 'Otimização da Perfuração', Módulo 10 do CAPER.
- (30)- Rabia H., 'Specific Energy as a Criterion for Bit Selection', Journal of Petroleum Technology, July 1985, pg 1225/1229.
- (31)- Rabia H. et alli, 'A New Approach to Drill Bit Selection', SPE 15894, European Petroleum Conference, London, October 20-22, 1986, pg 421-428.
- (32) Petroguia, 'Manual do Departamento de Perfuração', Petrobrás, 1- edição, Julho 1989.
- (33) Clark D.A., 'Application of the New IADC Dull Grading System for Fixed Cutter Bits', SPE 16145, SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, March 15-18, 1987, PG 851-858.
- (34) Ortega A. & Glowka D.A., 'Frictional Heating and Convective Cooling of Polycrystalline Diamond Drag Tools During Rock Cuttings', Society of Petroleum Engineers Journal, April 1984, pg 121-128.

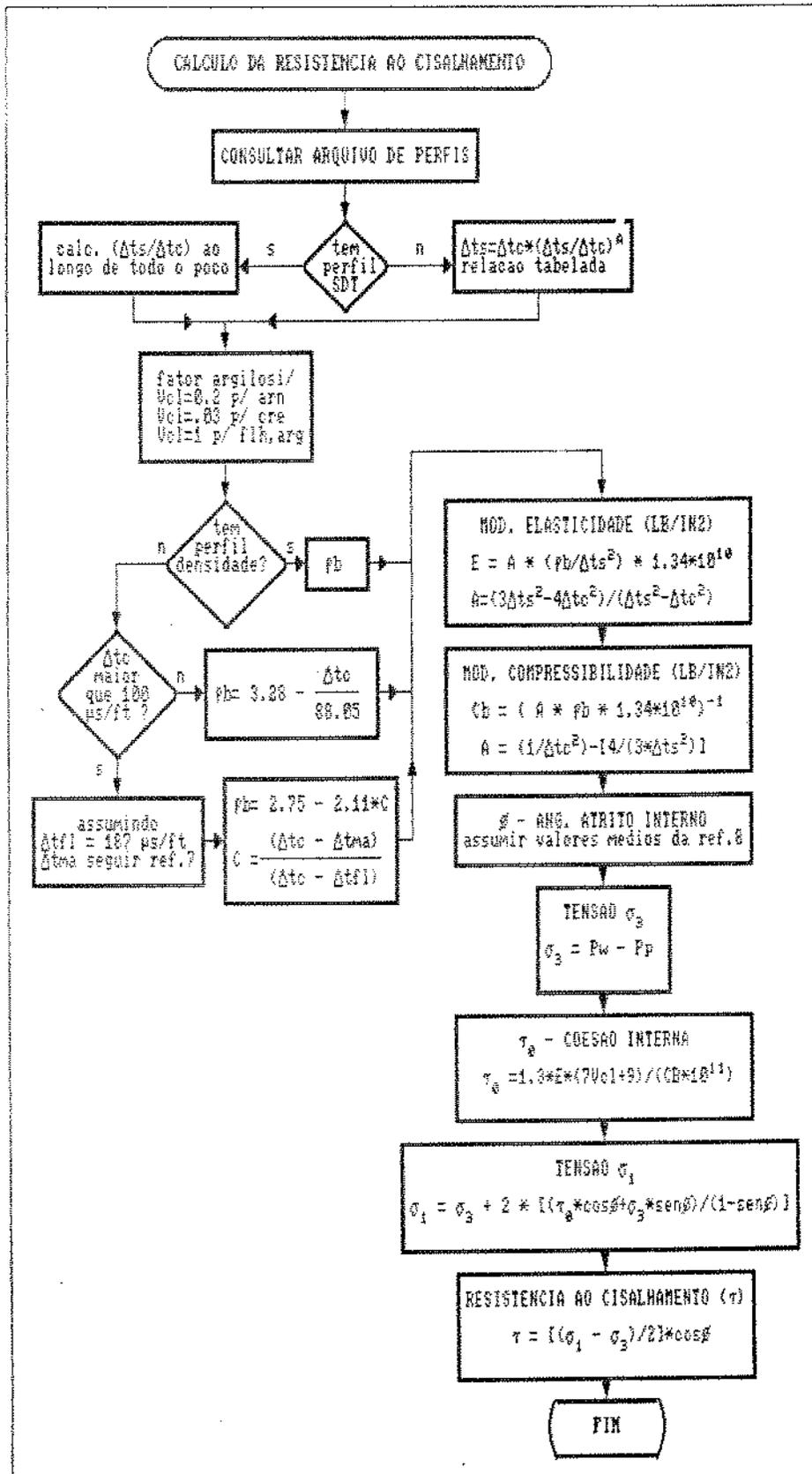
ANEXO 1

ESCALA COMPARATIVA ENTRE DUREZA E RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO DA ROCHA (REF. 28)

RESISTÊNCIA DA ROCHA (DUREZA)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO		TIPO DE ROCHA
	PSI*10 <sup>3</sup>	MPa	
MUITO MOLE	< 4	< 27.6	FOLHELHOS PLÁSTICOS, AREIAS INCONSOLIDADAS
MOLE	4 - 8	27.6 - 55.2	CALCÁREOS, ARENITOS SUJOS, FOLHELHOS MOLES, SILTITOS MOLES
MÉDIA	8 - 16	55.2 - 110.4	CALCÁREOS SUJOS, MARGAS, ARENITOS MÉDIOS, FOLHELHOS DUROS
DURA	16 - 32	110.4 - 220.8	SILTITOS DUROS, DOLOMITAS DURAS, CALCÁREOS CRISTALINOS, FOLHELHOS QUEBRADIÇOS, ARENITOS DUROS,
MUITO DURA	> 32	> 220.8	ARENITOS MUITO FECHADOS, QUARTZITOS, ROCHAS ÍGNEAS, ROCHAS METAMÓRFICAS

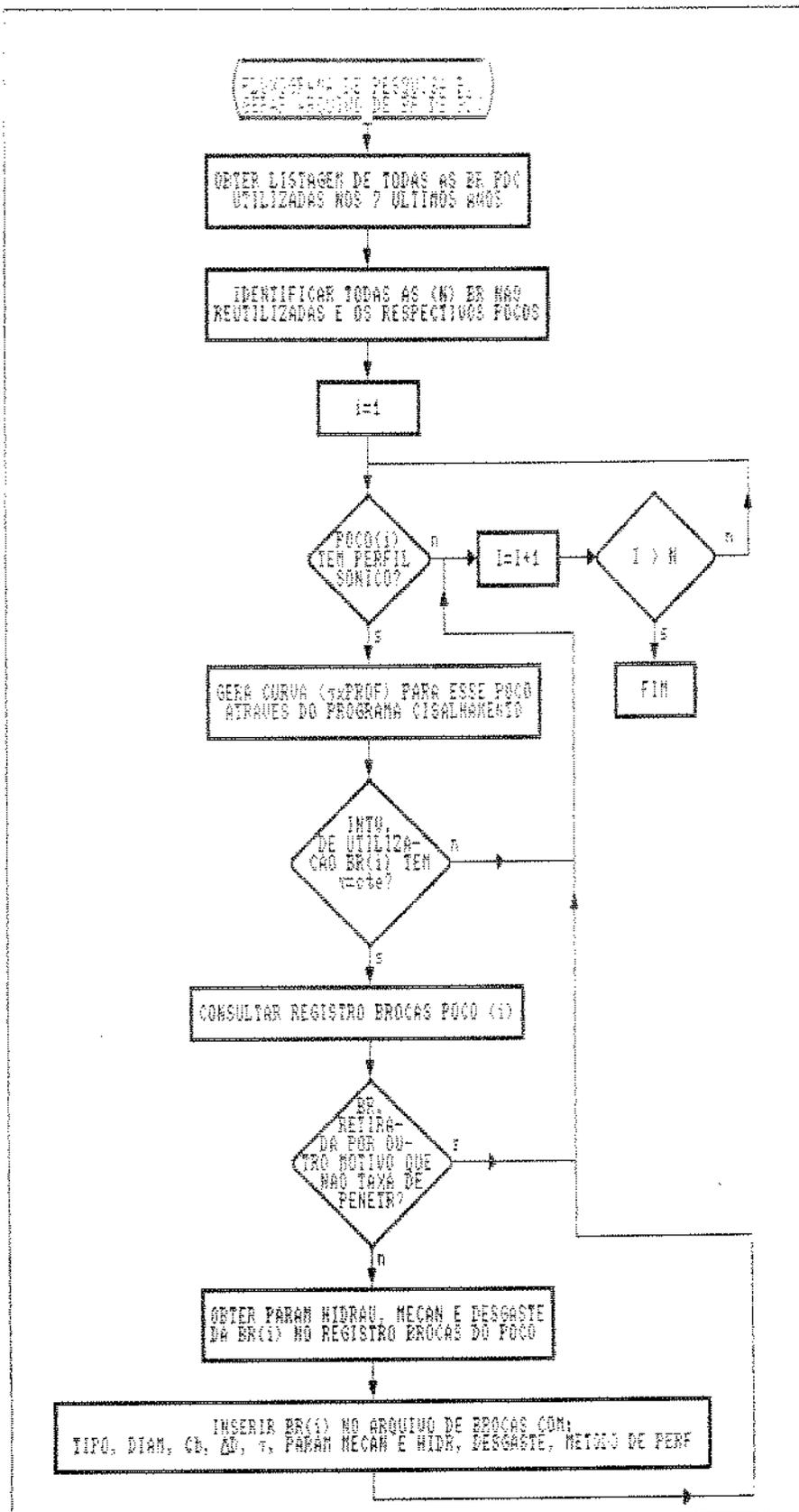
## ANEXO 2

### FLUXOGRAMA DO CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO



ANEXO 3

FLUXOGRAMA DE PESQUISA PARA GERAÇÃO DO ARQUIVO DE  
BROCAS DE PDC



ANEXO 4

RELAÇÃO DE BROCAS PESQUISADAS E ACEITAS QUE FAZEM  
PARTE DO ARQUIVO DE BROCAS DE PDC

## ANEXO 4 - A

N	DIAMETRO (pol)	TIPO DE BROCA	INTERVALO PERFURADO (AD) (m)	TEMPO DE BROCA NO FUNDO (m)	$\tau$ (lb/pol <sup>2</sup> )
1	12.250	B27M	834	112.0	3815
2	12.250	B27M	771	125.0	4034
3	12.250	B27M	572	68.5	3837
95	12.250	B27M	470	63.0	4047
87	12.250	B27M	338	49.0	3683
5	12.250	B33M	642	95.5	3845
6	12.250	B33M	261	95.0	6865
7	12.250	B33M	330	72.0	3407
71	12.250	B33M	250	48.0	4789
8	12.250	B33M	196	28.5	4308
9	12.250	B33M	111	38.5	5810
11	12.250	R408	827	56.5	880
12	12.250	R408	590	26.0	1050
13	12.250	R408	516	48.0	1467
14	12.250	R408	241	13.5	765
16	12.250	R410	664	120.5	3631
17	12.250	R410	481	46.0	3573
94	12.250	R410	247	68.0	4855
18	12.250	R410	188	13.5	1450
19	12.250	R433S	668	79.0	3254
20	12.250	R433	386	39.0	4571
21	12.250	R433	350	11.5	1019
22	12.250	R433	237	34.5	4776
23	12.250	R433	178	58.0	4337

ANEXO 4 - B

N	DIAMETRO (pol)	TIPO DE BROCA	INTERVALO PERFURADO (AD) (m)	TEMPO DE BROCA NO FUNDO (m)	$\tau$ (lb/pol <sup>2</sup> )
24	12.250	R433	177	28.0	3958
85	12.250	R435	174	69.5	6651
88	12.250	R435H	1174	133.0	3657
25	12.250	R435H	400	68.0	3827
26	12.250	R435H	289	66.0	7526
91	12.250	R435H	550	104.5	4208
28	12.250	DS26H	436	39.5	1869
29	12.250	DS33H	144	20.0	2119
31	12.250	PD11	382	46.5	1303
33	12.250	Z437	356	87.0	5141
81	8.500	B27M	495	91.5	6903
80	8.500	B27M	276	67.0	10525
27	8.500	B33M	291	80.5	5217
34	8.500	B33M	279	63.5	8909
35	8.500	B33M	206	39.5	2408
36	8.500	B33M	162	37.0	5466
98	8.500	B33M	174	25.5	10471
38	8.500	R410	190	15.5	1663
72	8.500	R433	451	58.0	5698
60	8.500	R433	187	30.0	6798
30	8.500	R433	117	26.5	11604
39	8.500	R433	83	8.0	1174
70	8.500	R433S	360	109.5	9664

## ANEXO 4 - C

N	DIAMETRO (pol)	TIPO DE BROCA	INTERVALO PERFORADO ( $\Delta D$ ) (m)	TEMPO DE BROCA NO FUNDO (m)	$\tau$ (lb/pol <sup>2</sup> )
41	8.500	R435H	446	66.0	1157
90	8.500	R435SE	613	164.5	9876
92	8.500	R435SE	484	73.0	6123
42	8.500	R435SE	417	45.5	5596
96	8.500	R435SE	410	48.5	5951
97	8.500	R435SE	260	60.5	9391
44	8.500	R435SE	179	21.5	2946
93	8.500	R435SE	160	25.0	9399
83	8.500	R435	363	103.5	12419
43	8.500	R435	350	54.5	8010
46	8.500	R482	642	107.5	4651
47	8.500	R482	566	43.5	2492
48	8.500	R482	554	130.0	6023
49	8.500	R482	384	28.5	1914
52	8.500	R482	325	48.5	2694
50	8.500	R482	288	34.0	918
51	8.500	R482	281	56.5	4734
57	8.500	R482	258	32.5	4269
82	8.500	R482	254	96.0	7421
53	8.500	R482	210	40.5	5927
69	8.500	R482	200	63.5	6615
54	8.500	R482	159	24.5	6552
59	8.500	R482	153	22.5	3365
55	8.500	R482	127	11.5	2038

## ANEXO 4 - D

N	DIAMETRO (pol)	TIPO DE BROCA	INTERVALO PERFORADO ( $\Delta D$ ) (m)	TEMPO DE BROCA NO FUNDO (m)	$\tau$ (lb/pol <sup>2</sup> )
56	8.500	R482	100	21.5	4176
45	8.500	R485	630	40.5	2747
61	8.500	R485	384	97.5	5235
75	8.500	R485	217	34.5	2308
62	8.500	R485	130	51.5	5203
10	8.500	PD2	557	87.5	5136
89	8.500	PD2	546	136.0	6307
64	8.500	PD2	516	50.0	5171
76	8.500	PD2	474	44.5	9935
32	8.500	PD2	440	67.0	6455
79	8.500	PD2	411	94.0	9325
77	8.500	PD2	370	68.0	8768
40	8.500	PD2	289	32.0	5560
15	8.500	PD2	289	39.5	8981
73	8.500	PD2	135	20.0	6501
84	8.500	PD2	80	25.0	4530
37	8.500	PS401	149	20.0	5389
78	8.500	PS450	583	82.0	9488
65	8.500	PS450	246	40.0	2446
58	8.500	Z437	744	93.5	6675
66	8.500	Z437	96	17.5	12080
67	8.500	Z437	87	27.5	4250
4	6.125	R485	474	125.5	13356
74	6.125	R485	175	115.5	13808
86	6.125	R485	102	85.0	8877
68	6.125	R485	87	38.0	3869

ANEXO 5

FLUXOGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

MÉTODO PARA OBTENÇÃO DA BROCA DE MÍNIMO CUSTO ESTIMADO POR  
METRO PARA UMA DADA FAIXA DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

