

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

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia de Campinas  
como requisito parcial à obtenção do  
título de Mestre em Engenharia de Petróleo

DUMANS

MÉTODO ASSOCIATIVO PARA ESCOLHA DE BROCAS TRICÔNICAS  
E BROCAS DE DIAMANTES POLICRISTALINOS

*Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida pelo Engº Carlos Fernando Fontenelle Dumans e  
aprovada pela comissão julgadora em 16/2/90*

12/90

Autor : Carlos Fernando Fontenelle Dumans m.º  
Orientador : Eric Edgar Maidla

Fevereiro de 1990

*Eric Edgar Maidla*  
Eric Edgar Maidla

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETROLEO

A dissertação "Método Associativo para Escolha de Brocas Tricônicas e Brocas de Diamantes Policristalinos", elaborada por Carlos Fernando Fontenelle Dumans e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora, foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 16 de Fevereiro de 1990.

Banca Examinadora:



---

Eric Edgar Maidia, Ph.D.

---

Célcso Kazuyuki Morooka, Ph.D.



---

Otto Luiz Alcântara Santos, Ph.D.

À minha mãe Maria Luiza

Ao meu pai Edison

À minha esposa Marise

Ao meu filho Eduardo

## AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS, pela oportunidade que me proporcionou na realização do Curso de Mestrado em Engenharia de Petróleo, na UNICAMP;

Ao Prof. Dr. Eric Edgar Maidla, pela orientação valiosa prestada na fase de organização desta dissertação;

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

Aos meus colegas da PETROBRAS, Manoelito de Miranda Cavalcanti, José Ricardo de Toledo Montesanti e Eduardo Celso Cesar dos Santos, pelo inestimável apoio recebido;

Aos colegas da DIPERF, da PETROBRAS, especialmente aos engenheiros Shiniti Onara, Luiz Alberto Santos Rocha, Francisco Castro, José Luis Falcão, Marcos de Lacerda Navaes, Jorge Hygino Sampaio e ao técnico Wilson Sergio de Amorim pela importante colaboração na coleta de dados;

Aos colegas do DEPEX, da PETROBRAS, especialmente aos geólogos Luis G. Condessa, Túlio R. R. Cruz e Théognis C. Rodrigues, pelos esclarecimentos e ajuda prestada na coleta de dados de perfis;

Aos geólogos Carlos Soares e Pedro Ivo S. de Assis, da Schlumberger, pela colaboração na coleta de dados de perfis;

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na elaboração deste trabalho.

## RESUMO

A escolha das brocas mais adequadas à perfuração de poços é considerada de grande importância quando se procura realizar a perfuração a custos mais baixos. São analisados diversos métodos para escolha de brocas que consideram as características das formações obtidas através de perfis, além dos métodos que utilizam dados de perfuração. Os parâmetros utilizados para seleção de brocas são apresentados de forma a permitir uma análise simultânea dos mesmos, facilitando a identificação daquele(s) que fornece(m) resultado(s) coerente(s) quando comparados com as brocas utilizadas no campo. Esta forma de apresentação também permite a associação de diversos parâmetros para a escolha de brocas. Utiliza-se como referência o método proposto por Mason para escolha de brocas, empregando o tempo de trânsito cisalhante. Calcula-se a resistência à compressão da formação empregando-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. É proposto o cálculo da resistência ao cisalhamento da formação, visando identificar locais onde determinados tipos de broca apresentaram melhor desempenho. São determinadas expressões para estimativa do tempo de trânsito cisalhante das litologias mais frequentes nas áreas analisadas. É efetuada análise de sensibilidade para verificar-se o grau de influência que diversas variáveis calculadas ou assumidas exercem no resultado final deste estudo. O método proposto é aplicado em cinco poços na área de Tubarão (Bacia de Santos) e em quatro poços na Bacia de Campos, tendo os resultados do mesmo se mostrado coerente com as brocas empregadas no campo. São identificados intervalos para uso de outros tipos de brocas pouco utilizadas na área analisada. O método proposto mostra-se útil e de fácil aplicação na escolha de brocas em áreas com diferentes características litológicas.

## ABSTRACT

Bit selection to drill wells is considered of great importance when drilling wells at lower costs is desired. Many methods for bit selection that consider formation characteristics obtained through electric logs, besides the methods which take into account drilling data, are analysed. The parameters used for bit selection are presented in a way that allows a simultaneous analysis of these same parameters, making it easy to identify the one(s) that furnish the best results when compared with the bits used in the field. This form of presentation also allows the association of many parameters for bit selection. The method proposed by Mason for bit selection, using the shear transit time, is considered as a reference point. The compressive strength of the formation is calculated using the Mohr-Coulomb rupture criteria. The determination of the formation shear strength is proposed as a mean to identify the places where some bit types present the best results. Some expressions are determined to estimate the shear transit time of the most frequent lithologies in the area analysed. A sensibility analysis is done to verify how the many variables calculated or considered affect the final results of this study. The proposed method is verified using data from five wells at Tubarão field (Santos Basin) and in four wells at Campos Basin, and the results showed good agreement with the bit records. Intervals to use other bits of short use in the area are identified. The proposed method is useful and easy to apply for bit selection in areas with different lithologic characteristics.

## INDICE

	Página
AGRADECIMENTOS .....	111
RESUMO .....	1V
ABSTRACT .....	V
ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS USADOS .....	13
LISTA DE FIGURAS .....	xiii
LISTA DE QUADROS .....	xviii
LISTA DE TABELAS .....	xix
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 Histórico do desenvolvimento das brocas .....	1
1.2 Objetivo do estudo .....	3
1.3 Justificativa para o cálculo da resistência à com- pressão e ao cisalhamento .....	4
1.4 Limites .....	5
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	
2.1 Determinação do tempo de trânsito cisalhante .....	8
2.2 Escolha de brocas tricônicas com o auxílio de perfis elétricos. ....	13
2.3 Determinação das características mecânicas da forma- ção .....	25
2.4 Aplicação e exigências operacionais de diferentes tipos de brocas PDC em lama base-água .....	34
2.5 Uso da energia específica como um critério para es- colha de brocas .....	39
2.6 Escolha de brocas PDC através da associação com os tipos de brocas tricônicas utilizadas .....	42

## CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO E APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

3.1	Dados de perfis elétricos .....	46
3.2	Escolha de broca com auxílio de perfis e dados de perfuração. ....	46
3.3	Limitações da utilização de valores tabelados de dados de perfis. ....	51
3.4	Crerérios adotados para escolha da área e dos poços analisados. ....	52
3.5	Verificação dos valores da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ para a área em análise. ....	53
3.6	Considerações a respeito do cálculo do tempo de trânsito cisalhante. ....	60
3.7	Comparação dos resultados da resistência à compressão da rocha, utilizando-se as expressões propostas por Mason e Onyia. ....	61
3.8	Cálculo da resistência à compressão e ao cisalhamento. ....	65
3.9	Resumo do método de escolha de broca. ....	72
3.10	Análise dos gráficos .....	76

## CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO

4.1	Análise de sensibilidade .....	79
4.2	Comparação dos tipos de brocas sugeridas com o uso do tempo de trânsito cisalhante e da resistência à compressão estimadas. ....	90
4.3	Análise dos resultados referentes às brocas tricônicas para a área de Tubarão, Escia de Santos. ....	93
4.3.1	Poço 1-PRS-A-PR .....	93
4.3.2	Poço 3-TB-A-PR .....	96
4.3.3	Poço 2-TB-B-PR .....	100
4.3.4	Poço 1-SPS-A-SP .....	104
4.3.5	Poço 1-SPS-B-SP .....	106



4.4	Intervalo em que as brocas tricônicas utilizadas se mostraram mais econômicas. ....	115
4.5	Análise das brocas PDC através da associação com os tipos de brocas tricônicas sugeridas .....	118
4.6	Aplicação do método na Bacia de Campos, RJ. ....	126
4.6.1	Determinação das expressões para estimativa do tempo de trânsito na Bacia de Campos, RJ..	128
4.6.2	Análise dos resultados referentes às brocas tricônicas. ....	130
4.6.2.1	Área de Vermelho .....	137
	a) Poço RJS-E .....	137
	b) Poço RJS-F .....	141
4.6.2.2	Área de Fango .....	145
	a) Poço RJS-G .....	145
	b) Poço RJS-H .....	150

CAPITULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1	Conclusões. ....	155
5.2	Recomendações. ....	158
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	160

## ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS USADOS

A	-menor leitura do perfil de raios gama
a	-constante de projeto de broca (adimensional)
B	-maior leitura do perfil de raios gama no intervalo de interesse
b	-constante de projeto de broca (adimensional)
$b_{1,2,3}$	-coeficientes a determinar do modelo proposto por Ohara
BHC	-perfil normalmente utilizado para obtenção do tempo de trânsito compressional
C	-leitura média do perfil de raios gama no intervalo de interesse
c	-constante de projeto de broca (adimensional)
$C_b$	-custo da broca (US\$)
$C_b$	-módulo de compressibilidade ( $\text{lb/pol}^2$ ) <sup>-1</sup>
CEC	-Cation Exchange Capacity (Capacidade de Troca Catiônica)
$C_f$	-custo por pé (ou metro) perfurado (US\$/pé ou US\$/m)
$C_r$	-taxa horária da sonda (US\$/hr)
D	-profundidade (pés)
$D_b$	-diâmetro da broca (pol)
E	-módulo de Young ( $\text{lb/pol}^2$ )
$E_s$	-energia específica ( $\text{pol-lbf/pol}^3$ )
F <sub>j</sub>	-força nos jatos da broca (lbs)
f	-intervalo perfurado pela broca (pés ou metros)
g	-tamanho médio dos grãos
GR	-perfil utilizado na medição da radioatividade da formação para identificação de folhelhos e arenitos.
H	-altura do dente normalizado ( $\sqrt{8}$ )
IADC	-International Association of Drilling Contractors

$I_m$	-força modificada de impacto (lbf)
$K$	-constante adimensional
$K_{1,2,3,7}$	-coeficientes a determinar dos modelos propostos por Onyia.
$N$	-velocidade de rotação da broca (rpm)
$p$	-pressão no fundo do poço (lb/pol <sup>2</sup> )
PDC	-Polycrystalline Diamond Compacts (Compactos de Diamantes Policristalinos)
$P_p$	-pressão de poros da formação existente no fundo do poço (lb/pol <sup>2</sup> )
$P_w$	-pressão exercida pelo fluido de perfuração no fundo do poço (lb/pol <sup>2</sup> )
$R$	-taxa de penetração (pés/hr)
$R_{max}$	-valor máximo da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ em folhelhos a baixas profundidades
$R_{min}$	-valor mínimo da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ em folhelhos a maiores profundidades
$R_t$	-resposta do perfil de indução profundo (ohm-m)
$S_c$	-resistência à compressão (lb/pol <sup>2</sup> )
SDT	-perfil utilizado para obtenção de tempo de trânsito cisalhante, que registra o trem de ondas completo.
$V_{cl}$	-índice de argiloidade
$T_b$	-tempo de broca-fundo (hrs)
$T_m$	-tempo de manobra (hrs)
$w$	-peso sobre broca (klbs)
$X_1$	-resistência à compressão para fluido nos poros com velocidade de trânsito de 5600 pés/seg (lb/pol <sup>2</sup> )
$X_2$	-resistência à compressão para fluido nos poros com velocidade de trânsito de 4800 pés/seg (lb/pol <sup>2</sup> )
$Y_1$	-tempo de trânsito no fluido contido nos poros ( $\mu$ seg/pé)
$\Delta P$	-diferencial de pressão (lb/pol <sup>2</sup> )

$\Delta T_c$	-tempo de trânsito compressional ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$\Delta T_s$	-tempo de trânsito cisalhante ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$\Delta T_{fl}$	-tempo de trânsito do fluido contido nos poros ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$\Delta T_{ma}$	-tempo de trânsito da matriz da rocha ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$(\Delta T_s)_e$	-tempo de trânsito cisalhante estimado ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$\Delta T_{c_{log}}$	-tempo de trânsito compressional medido por qualquer perfil sônico
$(\Delta T_s/\Delta T_c)$	-razão obtida através da utilização de perfis não acústicos
$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{calc}$	-razão calculada levando em conta o efeito da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ e o volume de argila para folhelhos e arenitos.
$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{SD}$	-expressão que melhor reflete o comportamento da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ para arenito em determinado local.
$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{sh}$	-expressão que melhor reflete o comportamento da razão $\Delta T_s/\Delta T_c$ para folhelho em determinado local.
$\rho_b$	-massa específica da amostra considerada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\rho_{cl}$	-massa específica da amostra úmida ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\rho_{cl_{min}}$	-massa específica da amostra de folhelho no ponto onde foi determinado $R_{max}$
$\rho_{cl_{max}}$	-massa específica da amostra de folhelho no ponto onde foi determinado $R_{min}$
$\rho_{fl}$	-massa específica do fluido contido nos poros ( $\mu\text{seg}/\text{pé}$ )
$\rho_m$	-massa específica do fluido de perfuração ( $\text{lb}/\text{gal}$ )
$\rho_{ma}$	-massa específica da matriz da rocha ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$\phi$	-porosidade
$\phi_N$	-resposta do perfil de neutron na profundidade de interesse
$\phi_{Ncl}$	-resposta do perfil neutron em argila

$\phi_{Nmin}$	-resposta do perfil neutron em folhelhos no ponto onde foi determinado $R_{min}$
$\phi_{Nmax}$	-resposta do perfil neutron em folhelhos no ponto onde foi determinado $R_{max}$
$\phi_e$	-porosidade efetiva do reservatório
$\phi_{tot}$	-porosidade total
$\phi_{SD}$	-porosidade do arenito
$\tau$	-tensão de cisalhamento no plano de falha (lb/pol <sup>2</sup> )
$\tau_0$	-tensão de cisalhamento inicial (lb/pol <sup>2</sup> )
$\sigma_c$	-resistência à compressão "in-situ" (lb/pol <sup>2</sup> )
$\sigma_n$	-tensão normal ao plano de falha (lb/pol <sup>2</sup> )
$\sigma_{ult}$	-resistência à compressão da rocha (lb/pol <sup>2</sup> )
$\sigma_1$	-tensão de ruptura à compressão (lb/pol <sup>2</sup> )
$\sigma_3$	-pressão de confinamento atuando no fundo do poço (lb/pol <sup>2</sup> )
$\theta$	-ângulo de atrito interno
$\alpha$	-fator do tamanho do grão ou partícula
$\epsilon$	-dutilidade da rocha (adimensional, %)
$\phi$	-coeficiente de excentricidade do cone
$\mu$	-viscosidade do fluido de perfuração (cp)
$\nu$	-coeficiente de Poisson

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Seleção econômica das brocas, para o campo de Blocker, Texas ref. [16].....	22
2.2 Perfil de seleção econômica da broca e seus limites ref. [16] .....	23
2.3 Guia para seleção de brocas tricônicas ref. [16] .	24
2.4 Guia para seleção de broca PDC ref. [21].....	36
3.1 Comportamento da energia específica e do custo por metro versus profundidade média, no poço 3-TB-A-PRS. ....	50
3.2 Comportamento do tempo de trânsito compressional e cisalhante versus profundidade para diferentes litologias, no poço 1-PRS-A-PR. ....	56
3.3 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para calcarenito, na área de Tubarão. ....	57
3.4 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para calcissiltito, na área de Tubarão. ....	58
3.5 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, na área de Tubarão, PR. ....	59
3.6 Comparação dos resultados de resistência à compressão, utilizando as equações derivadas por Mason e Onyia, para a poço 3-TB-A-PRS. ....	64
3.7 Representação gráfica do círculo de Mohr e da envoltória de ruptura. ....	66
3.8 Representação esquemática da forma de atuação das brocas PDC e das tensões atuando no fundo do poço, consideradas neste estudo. ....	71
3.9 Círculo de Mohr com os valores conhecidos de pressão de confinamento ( $\sigma_3$ ), tensão de ruptura à compressão ( $\sigma_1$ ) e envoltória de Mohr-Coulomb. ....	72

Figura	Página
3.10 Forma adotada para análise simultânea dos diversos parâmetros utilizados no método associativo de escolha de brocas. ....	77
4.1 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208 $\mu\text{seg/pé}$ , utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ...	81
4.2 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para massa específica da amostra variando de $-/+ 10\%$ em relação ao valor estimado/medido da mesma, utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ....	82
4.3 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para ângulo de atrito interno variando de $-/+ 10$ graus em relação a média adotada para cada litologia, utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ....	84
4.4 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tempo de trânsito cisalhante variando de $+/- 10\%$ em relação ao valor estimado do mesmo, utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ....	86
4.5 Comparação dos intervalos sugeridos para uso de diversos tipos de broca, para tempo de trânsito cisalhante variando de $-/+ 10\%$ em relação ao valor estimado do mesmo, considerando tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208 $\mu\text{seg/pé}$ , no poço 3-TB-A-PRS. ....	87
4.6 Comparação dos intervalos sugeridos para uso de diversos tipos de broca em função do código IADC, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208 $\mu\text{seg/pé}$ , no poço 3-TB-A-PRS. ....	88
4.7 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tensão de cisalhamento inicial variando de $-/+ 10\%$ em relação ao valor estimado da mesma, utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ....	89
4.8 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para diferencial de pressão atuando no fundo do poço de 0 e 1000 $\text{lb/pol}^2$ , utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS. ....	91

4.9	Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço 1-PRS-A-PR. ....	94
4.10	Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-PRS-A-PR. ....	95
4.11	Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço 3-TB-A-PRS. ....	97
4.12	Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 3-TB-A-PRS. ....	98
4.13	Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço 3-TB-B-PRS. ....	101
4.14	Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 3-TB-B-PRS. ....	102
4.15	Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço 1-SPS-A-SP. ....	105
4.16	Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-SPS-A-SP. ....	107
4.17	Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço 1-SPS-B-SP. ....	109
4.18	Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-SPS-B-SP. ....	111
4.19	Estabelecimento dos intervalos, onde as brocas tricônicas utilizadas se mostraram mais econômicas, para a área de Tubarão, PR. ....	117
4.20	Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para arenito, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos. ....	127



Figura	Página
4.21 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos. ....	128
4.22 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para marga, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos. ....	129
4.23 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para marga, no poço RJS-A, Bacia de Campos. ....	131
4.24 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para conglomerado, no poço RJS-A, Bacia de Campos. ....	132
4.25 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, no poço RJS-A, Bacia de Campos. ....	133
4.26 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para siltito, no poço RJS-A, Bacia de Campos. ....	134
4.27 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para arenito, no poço RJS-A, Bacia de Campos. ....	135
4.28 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de $189 \mu\text{seg}/\text{pé}$ , no poço RJS-E. ....	138
4.29 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RJS-E. ....	139
4.30 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de $189 \mu\text{seg}/\text{pé}$ , no poço RJS-F. ....	143
4.31 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RJS-F. ....	144
4.32 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de $189 \mu\text{seg}/\text{pé}$ , no poço RJS-G. ....	147

Figura	Página
4.33 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RJS-G. ....	148
4.34 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 $\mu$ seg/pé, no poço RJS-H. ....	152
4.35 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RJS-H. ....	153

## LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
2.1 Classificação IADC de brocas tricônicas ref. [13] .	16
2.2 Equivalência entre brocas tricônicas, através dos códigos IADC, estabelecidos pelos respectivos fabricantes ref. [14] .....	17
2.3 Classificação IADC de brocas de cortadores fixos ref. [13] .....	38
2.4 Comparação do código IADC de brocas tricônicas e brocas de cortadores fixos ref. [13] .....	43
2.4A Comparação do código IADC de brocas tricônicas e brocas de cortadores fixos ref. [13]. .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página	
2.1	Relação entre leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas, apresentada por Dernbach.....	15
2.2	Relação entre leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia com o código IADC de brocas tricônicas ref. [15] .....	18
2.3	Fator de correção do tempo de trânsito cisalhante, em função do tamanho do grão ref. [16].....	20
2.4	Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC com cortador de grande diâmetro ref. [21] .....	37
2.5	Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC tipo rabo de peixe ref. [21] .....	37
3.1	Topo das formações, em metros, nos poços analisados na área de Tubarão (Bacia de Santos). .....	53
3.2	Índice de correlação linear entre valores de $\Delta T_s$ e $\Delta T_c$ , em função da litologia. ....	55
3.3	Comparação dos valores de $\Delta T_s/\Delta T_c$ encontrados para a área de Blocker Field (Texas) e de Tubarão (Bacia de Santos). ....	60
3.4	Coeficientes obtidos por Onyia para cálculo da resistência à compressão da rocha com dados de perfis. ....	62
4.1	Brocas PDC analisadas na área de Tubarão, por poço*, com os códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, no intervalo onde as primeiras foram utilizadas. ....	120
4.2	Brocas PDC analisadas na área de Tubarão, com os códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, no intervalo onde as primeiras foram utilizadas. ....	121
4.3	Expressões para estimativa de $\Delta T_s$ em função da litologia e correspondentes índices de correlação linear entre $\Delta T_s$ e $\Delta T_c$ , obtidas na Bacia de Campos. ....	126

4.4	Expressões para estimativa de $\Delta T_s$ em função da litologia e correspondentes índices de correlação linear entre $\Delta T_s$ e $\Delta T_c$ , para o poço RJS-A.....	130
4.5	Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-E. ....	137
4.6	Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-F. ....	142
4.7	Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-G. ....	146
4.8	Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-H. ....	151

## CAPITULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 Histórico do desenvolvimento das brocas

Desde 1909 <sup>1</sup>, quando H. R. Hughes patenteou a primeira broca tricônica, muitas inovações vem sendo introduzidas no projeto de brocas. Estas inovações, impulsionadas pelo crescente custo da perfuração, tem tido um efeito significativo em certos projetos de brocas. Daí a considerável importância dada ao planejamento cuidadoso e à otimização dos programas de brocas.

Nos últimos 18 anos, desde o desenvolvimento e aceitação das brocas de rolamento "journal" (tipo mancal), crescente ênfase tem sido dada à performance dos vários tipos de broca na base do custo por metro perfurado.

No início da década de 70, foram iniciadas experiências com diamantes policristalinos, como elemento de corte em brocas que atuavam por raspagem ("drag bits"), entre as quais destacam-se as brocas PDC (Compactos de Diamantes Policristalinos). Estas brocas não apresentam nenhuma parte móvel que possa soltar no fundo do poço e são projetadas para destruir a rocha por cisalhamento. Como a rocha requer significativamente menos energia para romper por cisalhamento, em relação a quantidade de energia necessária à ruptura por compressão, é possível a perfuração de maneira mais eficiente, com menos peso. Pelo fato

da broca atuar por raspagem, torna-se necessária uma alta resistência dos elementos cortantes à abrasão, para que seja mantida uma estrutura afiada de corte, por um tempo razoável de vida útil.

O início do uso comercial das brocas PDC ocorreu nos campos petrolíferos do Mar do Norte, em 1976. Naquela oportunidade, obteve-se sucesso na perfuração de evaporitos e carbonatos, quando já haviam decorridos 70 anos de uso das brocas tricônicas pela indústria do petróleo, e grande quantidade de conhecimentos havia sido acumulada sobre os projetos de tais brocas e parâmetros de perfuração, para situações específicas. A aplicação das brocas PDC estava limitada, principalmente:

- a) a maiores profundidades;
- b) a poços de pequeno diâmetro;
- c) a perfuração sobre-balanceada;
- d) a utilização com motores de fundo;
- e) a poços perfurados com lama base-óleo.

Desde o início dos anos 80, novos aperfeiçoamentos têm sido incorporados às brocas PDC, o que vem permitindo ampliar, significativamente, as áreas viáveis à sua utilização<sup>2</sup>. Em meados dos anos 80, efetuaram-se alguns estudos de viabilidade de aplicação de brocas PDC no Brasil<sup>3,4</sup>.

Atualmente, além das aplicações anteriormente citadas, as brocas PDC têm sido utilizadas: junto a ferramentas de acompanhamento e controle de perfuração direcional; na perfuração de sapata de revestimento; para iniciar desvio do

poço ("build-up"); para perfuração do poço com diâmetro maior que o diâmetro nominal da broca. Esta última aplicação tem sido feita, principalmente, frente às zonas de sal, com o uso de broca excêntrica, visando a reduzir a possibilidade de prisão da ferramenta, pelo fechamento do poço.

No Mar do Norte<sup>5</sup>, 70 % da metragem total perfurada, nos últimos anos, foi feita com a utilização de brocas PDC, muitas vezes aliada aos sistemas de acompanhamento e controle da perfuração direcional, em grande parte viabilizadas pelo alto custo da operação na área. No Brasil, a maior utilização de brocas PDC ocorreu no Distrito de Perfuração do Sudeste, localizado em Macaé, RJ, tendo sido de 13 % a metragem total perfurada no ano de 1988 com essas brocas.

## 1.2 Objetivo do estudo

A escolha dos tipos de brocas mais adequados para perfurar um poço é de grande importância, especialmente quando se procura realizar a perfuração a custos mais baixos. A escolha inadequada de uma broca acarreta custos adicionais desnecessários, pois o rendimento e/ou vida útil da mesma serão menores, sendo necessária a utilização de maior número de brocas, bem como maior tempo de manobra, para perfuração de um poço, isto sem contar o desgaste dos equipamentos da sonda e consumo de combustível, tudo isto a um alto custo. A escolha de broca tem sido feita com base em quadro de brocas de poços anteriormente perfurados. É um processo lento e oneroso, até



estabelecer-se o programa de brocas mais adequado à área, dentro da tecnologia disponível no momento. Caso não sejam testados diferentes tipos de brocas e não sejam avaliados o custo para perfurar-se cada metro com a nova broca, pode-se persistir em uma escolha inadequada, por um longo período.

À medida que novas brocas (com melhorias no projeto ou construídas com novos materiais) se tornam disponíveis para utilização, parte-se para novos processos de tentativas, até identificar-se as áreas onde se obtém melhores resultados (menor custo por metro), do que com as brocas anteriormente empregadas.

Com o aprimoramento das características de projeto e dos materiais das brocas PDC, a utilização economicamente viável das mesmas tem sido uma realidade em diversos locais. Devido ao elevado custo das referidas brocas, que chegam até a custar duas ou três vezes mais que o valor de uma broca tricônica de rolamento "journal" e insertos de tungstênio, de mesmo diâmetro, faz-se necessária a identificação, de maneira mais rápida e eficiente, dos locais adequados à sua utilização.

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de escolha destas brocas (PDC), procurando-se identificar as características mecânicas das formações geológicas onde as mesmas se mostraram economicamente viáveis.

1.3 Justificativa para o cálculo da resistência à compressão e ao cisalhamento.

Diversos autores<sup>6,7</sup> têm se referido aos locais mais adequados à utilização de brocas PDC, de uma maneira qualitativa, havendo quase unanimidade de que tais brocas têm se mostrado economicamente viáveis em locais onde as formações se caracterizam como não abrasivas, variando de moles a média-duras. Alguns autores<sup>8</sup> citam as brocas tricônicas, que eram utilizadas nestes locais, antes das brocas PDC se mostrarem economicamente viáveis.

Um dos principais mecanismos de destruição da rocha exercido por brocas tricônicas, entre os vários existentes, é o da compressão. A determinação da resistência à compressão da rocha, através de modelos de perfuração ou com dados de perfis, abre um vasto campo para a melhoria dos critérios de escolha de brocas tricônicas ou refinamento dos critérios já existentes.

Como o principal mecanismo de atuação de brocas PDC para destruição das rochas é o de cisalhamento, propõe-se calcular a tensão de ruptura ao cisalhamento, e incluir este parâmetro, junto aos demais já disponíveis, de acordo com um critério de escolha de brocas PDC. Este critério leva em consideração as características das formações adequadas ao uso de determinada broca tricônica, e procura associar à broca PDC que apresentou menor custo por metro, no mesmo intervalo.

#### 1.4 Limites.

A escolha da broca é somente uma parte do processo de perfuração, cuja eficiência dependerá também de parâmetros

hidráulicos e mecânicos, da formação e de outras variáveis que afetam a taxa de penetração.

A quantificação das características das formações geológicas deve ser entendida como uma aproximação, haja vista a anisotropia apresentada pelas diversas litologias atravessadas.

Algumas técnicas de perfilagem irão funcionar para uma área e deixarão de funcionar para outras áreas<sup>p</sup>. Não se deve assumir que uma técnica seja válida para outras áreas, sem antes testar a mesma.

As correlações para escolha de broca em uma área não significa, necessariamente, que as mesmas sejam válidas para outras áreas. Antes de utilizar-se a correlação em uma área diferente daquela para a qual foi desenvolvida, e tenha apresentado bons resultados, a mesma deve ser testada para verificar sua validade em outro local.

Parte-se do pressuposto que as brocas de um mesmo tipo sejam sempre fabricadas seguindo as mesmas características e especificações.

Pressupõe-se que a utilização da broca tenha sido feita de forma adequada, respeitadas todas as recomendações quanto ao seu uso.

Como as características mecânicas das formações podem ser obtidas de correlações que utilizam dados coletados por perfis elétricos e unidades supervisoras de sonda ("mud-logging"), tais correlações poderão ser melhores quando consideradas as formações e as condições locais de perfuração.

Considerou-se os dados fornecidos pelos perfis como corretos, assim como a identificação litológica correspondente.

Em função do reduzido número de poços e metros em que se dispunha do tempo de trânsito cisalhante, geralmente medidos a maiores profundidades e/ou em formações compactadas, optou-se pela utilização de correlações, para estimativa do tempo de trânsito cisalhante, a partir do tempo de trânsito compressional.

O modelo a ser investigado carece de dados comprobatórios, apesar de algumas das expressões apresentadas terem sido obtidas de ensaios de laboratório.

## CAPITULO 2

## REVISÃO DA LITERATURA

## 2.1 Determinação do tempo de trânsito cisalhante.

Frost et alii<sup>10</sup>, em 1982, propuseram uma série de relações para a determinação da razão  $\Delta Ts/\Delta Tc$  em folhelhos, utilizando informações obtidas através de perfis não-acústicos. O cálculo do tempo de trânsito cisalhante é feito utilizando-se o tempo de trânsito compressional, pela seguinte equação:

$$(\Delta Ts)_e = \Delta Tc_{log} (\Delta Ts/\Delta Tc) \quad (2.1)$$

onde:

$(\Delta Ts)_e$  = tempo de trânsito cisalhante estimado.

$\Delta Tc_{log}$  = tempo de trânsito compressional medido por qualquer perfil sônico.

$(\Delta Ts/\Delta Tc)$  = razão obtida através da utilização de perfis não-acústicos.

Frost constatou pequena quantidade de dados existentes na literatura disponível sobre a razão  $\Delta Ts/\Delta Tc$ , para folhelhos. As expressões sugeridas por Frost et alii estão voltadas para o cálculo da razão  $\Delta Ts/\Delta Tc$ , em folhelhos e arenitos.

Uma das relações apresentadas utilizou o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), conforme a seguinte equação:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} = \left[ \frac{1 - \nu}{0.5 - \nu} \right]^{0.5} \quad (2.2)$$

Frost fez referência a resultados obtidos pela equação (2.2) que foram compatíveis com o observado por Rundle para folhelhos oleosos.

Outra relação genérica leva em consideração a massa específica da amostra de argila, conforme a seguinte equação:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} = R_{\max} - \frac{[ (R_{\max} - R_{\min}) (\rho_{cl} - \rho_{cl\min}) ]}{(\rho_{cl\max} - \rho_{cl\min})} \quad (2.3)$$

onde:

$\rho_{cl}$  = massa específica da amostra úmida.

$R_{\max}$  = valor máximo da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , em folhelhos a baixas profundidades.

$R_{\min}$  = valor mínimo da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , em folhelhos a maiores profundidades.

$\rho_{cl\min}$  = massa específica da amostra de folhelho no ponto onde foi determinado  $R_{\max}$ .

$\rho_{cl\max}$  = massa específica da amostra de folhelho no ponto onde foi determinado  $R_{\min}$ .

Frost afirma que este método pode ser estendido a outros registros de perfis, tais como: perfil neutron, perfil de resistividade ou de indução, e perfis sintéticos, baseados em transformações matemáticas devidamente selecionadas. Segundo Frost, a expressão que utiliza a porosidade obtida do perfil neutron tem a seguinte forma:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} = R_{\max} - \frac{[ (R_{\max} - R_{\min}) (\phi_{Ncl} - \phi_{Nmax}) ]}{(\phi_{Nmin} - \phi_{Nmax})} \quad (2.4)$$

onde:

$\phi_N$  = resposta do perfil de neutron na profundidade de interesse.

$R_{\max}$  = valor máximo da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , em folhelhos a baixas profundidades.

$R_{\min}$  = valor mínimo da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , em folhelhos a maiores profundidades.

$\phi_{Ncl}$  = resposta do perfil neutron em argila.

$\phi_{Nmin}$  = resposta do perfil neutron, em folhelhos, no ponto onde foi determinado  $R_{\min}$ .

$\phi_{Nmax}$  = resposta do perfil neutron, em folhelhos, no ponto onde foi determinado  $R_{\max}$ .

Ao utilizar-se a equação (2.4) acima, o comportamento da porosidade calculada através do perfil neutron versus

profundidade deve ser determinada.

Para o cálculo da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  em areias contendo argila, Frost sugere a seguinte expressão:

$$\phi_e = \phi_{tot} (1 - V_{cl}) \quad (2.5)$$

onde:

$\phi_{tot}$  = porosidade total.

$\phi_e$  = porosidade efetiva do reservatório.

$V_{cl}$  = índice de argilosidade (= 1.0 para formações com 100 % de argila).

A porosidade total, utilizando dados do perfil sônico, é calculada da seguinte forma:

$$\phi_{tot} = (\Delta T_c - \Delta T_{ma}) / (\Delta T_{fl} - \Delta T_{ma}) \quad (2.6)$$

onde:

$\Delta T_c$  = tempo de trânsito compressional.

$\Delta T_{ma}$  = tempo de trânsito da matriz da rocha.

$\Delta T_{fl}$  = tempo de trânsito do fluido contido nos poros.

A porosidade para arenitos, utilizando-se dados do perfil densidade, pode ser calculada usando a seguinte fórmula, que pode ser refinada através de correções quando existirem hidrocarbonetos.



$$\phi_{SD} = (\rho_{ma} - \rho_b) / (\rho_{ma} - \rho_{fl}) \quad (2.7)$$

e

$$\phi_e = \phi_{SD} (1 - V_{cl}) \quad (2.8)$$

onde:

$V_{cl}$  = índice de argilosidade.

$\rho_{ma}$  = massa específica da matriz da rocha.

$\rho_{fl}$  = massa específica do fluido contido nos poros.

$\rho_b$  = massa específica da amostra considerada.

$\phi_{SD}$  = porosidade do arenito.

Pode-se estabelecer o comportamento da massa específica da amostra de folhelho ( $\rho_{SH}$ ), em função da profundidade e/ou tendência de compactação.

Frost apresentou expressões para a estimativa do comportamento da razão  $\Delta T_s / \Delta T_c$  em arenitos portadores de água e em folhelhos na U.S. Gulf Coast:

$$\left[ \frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} \right]_{SD} = 1.39 + \phi_e \quad (2.9)$$

e

$$\left[ \frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} \right]_{SH} = 6.416 - 1.78 \rho_{SH} \quad (2.10)$$

Frost conclui que qualquer arenito contendo argila pode ter a razão  $\Delta T_s / \Delta T_c$ , calculada da seguinte forma:

$$\left( \frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} \right)_{\text{calc}} = \left( \frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} \right)_{\text{SD}} (1 - V_{\text{cl}}) + \left( \frac{\Delta T_s}{\Delta T_c} \right)_{\text{SH}} V_{\text{cl}} \quad (2.11)$$

onde:

$V_{\text{cl}}$  = índice de argilicidade.

$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{\text{calc}}$  = razão calculada levando em conta o efeito da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  e o índice de argilicidade para folhelhos e arenitos.

$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{\text{SD}}$  = expressão que melhor reflete o comportamento da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para arenito em determinado local, obtida por regressão.

$(\Delta T_s/\Delta T_c)_{\text{SH}}$  = idem para folhelho.

Segundo Edelmann et alii<sup>11</sup>, os valores da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  variam, na prática, no range:

$$1.4 \leq \Delta T_s/\Delta T_c \leq 10 \quad (2.12)$$

2.2 Escolha de brocas tricônicas com o auxílio de perfis elétricos.

Dernbach<sup>12</sup>, em 1962, propôs um método para escolha de brocas tricônicas, com a ajuda de perfis elétricos, utilizando o perfil de raios gama (GR) e o perfil sônico (BHC), os quais fornecem, respectivamente, o conteúdo de argila e uma medida

indireta da porosidade, que tem influência na resistência da rocha. Desta maneira, procurava identificar formações com características semelhantes, assim como associar à broca que apresentava o melhor desempenho. Para tornar o método mais simples, Dernbach dividiu as rochas em três grupos: arenitos, folhelhos e rochas carbonáticas (calcarenito, dolomita, anidrita e outras combinações). A pista do perfil onde está registrado o "gamma-ray" (GR) é dividida em dez unidades. O método consiste em dividir a pista onde está registrado o GR em cem unidades e, a partir daí, calcular o índice de argilosidade por intervalos. Este índice de argilosidade ( $V_{cl}$ ) é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{cl} = \frac{C - A}{B - A} \times 100 \quad (2.13)$$

onde:

A = menor leitura dos raios gama, ao longo de todo o perfil (leitura de arenito limpo ou calcáreo).

B = maior leitura no intervalo de interesse. Esta leitura deve ser feita em pequenos intervalos, já que a mesma irá variar em diferentes trechos do perfil.

C = leitura média do perfil de raios gama no intervalo de interesse.

Caso o índice de argilosidade seja superior a 40%, o

intervalo pode ser tratado como se tivesse 100% de argila. Em função do tempo de trânsito compressional, da argilosidade e litologia, Dernbach sugere o código IADC para escolha de brocas tricônicas, mostrado na Tabela 2.1.

LEITURA DO SÔNICO ( $\mu$ seg/pé)	TIPO DE BROCA (IADC)	ARGILOSIDADE/LITOLOGIA
65-70	2.1	Formações superficiais argilosas e/ou pouco consolidadas.
70-75	1.3	
72-85	1.2	
75-80+	1.1	
80+	5.1	0 - 20 %
75+	5.3	
70+	6.1	
65+	6.3	
60-65	7.3 & 3.1	
55-60	8.3 & 3.4	
70+	5.1	20 - 30 %
65+	5.3	
60+	6.1	
60	6.3	
65+	5.1	30 - 40 %
60+	5.3	
47-65	6.3	Calcáreo/Dolomita
52-65	6.1	
55+	5.3	

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

No Quadro 2.1 é mostrada a classificação IADC para brocas tricônicas tricônicas<sup>13</sup>. O Quadro 2.2 compara brocas tricônicas de diversos fabricantes, com os códigos IADC correspondentes<sup>14</sup>.

IADC CLASSIFICAÇÃO DE BROCAS TRICÔNICAS DEFINIDO POR QUATRO CARACTERES											
		1º SÉRIE (1 e 2)	2º TIPO (3 e 4)	3º MODELO (5 e 6)	4º COMPLEMENTO (7 e 8)						
BROCA TRICÔNICA	SÉRIE	FORMAÇÃO (DESTINADA)	O.D. E	MODELO (1, 7, 8 e 9 VAGOS)							COMPLEMENTO (INFORMAÇÃO ADICIONAL ESPECÍFICA)
				(1) MOLAMENTO CONVENCIONAL	(2) MOL. CONVENC. REFRIGERAÇÃO E AR	(3) MOL. CONVENC. MOL. CALIBRE	(4) MOLAMENTO SELADO	(5) MOL. SEL. COM PROTEÇÃO NO CALIBRE	(6) MOLAMENTO JOURNAL	(7) MOL. JOURNAL COM PROTEÇÃO NO CALIBRE	
DENTELADO	1	MOLE	1 2 3 4								A - PARA PERFURAÇÃO E AP. JOURNAL COM JATO PARA CRIAR CÂMERA DE AR; B - VAGO; C - JATO CENTRAL; D - PARA MELHOR CONTROLE DIRECIONAL; E - JATO COM EXTENSÃO; F - VAGO; G - PROTEÇÃO EXTRA NO CORPO QUANTO AO CALIBRE; H e I - VAGOS; J - JATOS EXTENDIDOS NO LUGAR DE UM CORO PARA UTILIZAÇÃO EM POÇO DIRECIONAL; K, L, M, N, O, P, Q - VAGOS; R - CORPO COM SOLDAS REFORÇADAS PARA PERFURAÇÃO A PERCUSSÃO; S - SEM DETALHAMENTO ADICIONAL; T, U, V e W - VAGOS; X - INSERTO TIPO CINZEL; Y - INSERTO TIPO CÔNICO; Z - OUTROS TIPOS DE INSERTO
	2	MÉDIA	1 2 3 4								
	3	DURA	1 2 3 4								
INSÉRTOS	4	MOLE	1 2 3 4								
	5	MÉDIA / MOLE	1 2 3 4								
	6	MÉDIA / DURA	1 2 3 4								
	7	DURA	1 2 3 4								
	8	EXTREMAMENTE DURA	1 2 3 4								

Quadro 2.1 Classificação IADC de brocas tricônicas, ref. (13)

**BROCAS DE DENTES DE AÇO**  
(Classificação de acordo com o tipo de tratamento e formação)

	MUGHESI			REEE			SECURITY			EMITH			C.B.V.		
	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar
MOLE	J1	X3A	R1		S11	Y11	S33D	S33S	S3S	F2S	S2S	D5	F4F1	S4F1	M11
	J2	X3	R2	FP12	S12	Y12	S33F	S33	S3	FD1	SD1	D1	F4F2	S4F2	M12
	J3	X10	R3	FP13	S13	Y13	S44SF	S44	S4	FDG	SDG	D2	F4F3	S4F3	M13
MÉDIA	J4	X4	R4	FP1	S21	Y21	M44N1	M44N	M4N				F4F4	S4F4	M41
				DPS		Y22							F4F5	S4F5	M42
					S2B		M44L1	M44L	M4L		S12	S2M	F4F6	S4F6	M43
DURA	J7			F310	S310	Y31	H77	H77	H7	H7	S14	S14H	F4F7	S4F7	M71
	J8	XWR		F34			H77C1	H77C	H77C				F4F8	S4F8	M71

**BROCAS COM INSERTOS DE CARBONETO DE TUNGSTÊNIO**

(Classificação de acordo com o tipo de tratamento e formação)

	MUGHESI			REEE			SECURITY			EMITH			C.B.V.		
	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar	Journal	Sealed	Ar
MOLE	J11												F151		
	J22			HH53	FP53	S53	Y53JA	M53F	M53	M53JA	F4	F43	J53	H53A	F152
	J33	X33	HH53	FP53	S53		Y53JA	M53F	M53	M53JA	F4	F43	J53	H53A	F153
MÉDIA	J44	X44	HH44	FP44	S44	Y44JA	M44F	M44	M44JA	F4	F43	J44	H44A	F154	
				FP52B		Y52BJA	M52F	M52	M52JA	F4	F43	J44	H44A	F155	
	J55		HH55	FP55	S55	Y55JA	M55F	M55	M55JA	F4	F43	J55	H55A	F156	
DURA	J77			FP77	S77		Y77JA	M77F	M77	M77JA	F4	F43	J77	H77A	F177
	J77		HH77	FP77	S77	Y77JA	M77F	M77	M77JA	F4	F43	J77	H77A	F177	
	J99		HH99	FP99		Y99JA	M99F	M99	M99JA	F4	F43	J99	H99A	F199	

Código IADC

BROCAS DE DENTES DE AÇO				
Formação	Código IADC	1	4	6
		Não Sealed	Sealed	Journal
MOLE	1-1	R1	X3A	J1
	1-2	R2	X3	J2
	1-3	R3	X10	J3
MÉDIA	2-1	R4	X4	J4
	2-2	DPS		
DURA	3-1			J7
	3-2	R7		
	3-4		XWR	J8

BROCAS COM INSERTOS DE CARBONETO DE TUNGSTÊNIO				
Formação	Código IADC	1	4	6
		Ar	Sealed	Journal
MOLE	4-3			J11
	5-1			J22
	5-3	HH33	X33	J33
MÉDIA	6-1	HH44	X44	J44
	6-2			J55
DURA	7-3	HH77		J77
	9-3	HH99		J99

Quadro 2.2 Equivalência entre brocas tricônicas, através dos códigos IADC, estabelecidos pelos respectivos fabricantes, ref. [14]

Pinheiro & Linhares<sup>15</sup> aplicaram este método na Bacia de Campos, RJ. Os autores apresentaram a Tabela 2.2, para escolha de brocas tricônicas, já adaptada para as condições da Bacia de Campos.

LEITURA DO SÔNICO ( $\mu$ seg/pé)	TIPO DE BROCA (IADC)	ARGILOSIDADE/LITOLOGIA
65-75	2.1 ou 5.1	Formações superficiais pouco consolidadas: arenito, calcáreo, folhelho, argila, marga.
75-85	1.3	
85-95	1.2	
95+		
70-80+	5.1	0 - 20 %
60-70	5.3	
65+	5.1	20 - 30 %
55-65	5.3	
90+	4.3 ou 1.1	30 - 40 %
65-90	5.1	
55-65	5.3	
45-50	5.1	Calcáreo/Dolomita/ Anidrita.
50-60	5.3	
60+		
60+	5.1	Basalto
55-60	5.1	

Tabela 2.2 Relação entre leitura do perfil sônico, argilosidade e litologia, com o código IADC de brocas tricônicas, ref. [15]

Mason<sup>16</sup>, em 1984, utilizando dados de perfil sônico, desenvolveu uma correlação entre a escolha econômica de brocas tricônicas e o tempo de trânsito cisalhante calculado. Mostrou também que a dureza da formação e a resistência à compressão correlacionam-se com o tempo de trânsito cisalhante. Estudos experimentais mostraram que a velocidade compressional do perfil sônico correlaciona-se com a dureza da rocha, com a perfurabilidade e com a resistência da mesma, bem como ser necessário se fazer a distinção entre litologias. Diferentes tipos de litologia podem ter a mesma velocidade compressional, mas são perfuradas melhor com diferentes tipos de brocas. Como uma maneira de se distinguir os diferentes tipos de litologia, Mason partiu da equação (2.1) proposta por Frost et alii.

Os valores da razão  $(\Delta T_s/\Delta T_c)$ , utilizados por Mason, foram valores tabelados. Como a resistência da formação, para uma mesma litologia, varia com o tamanho dos grãos, foi desenvolvida uma relação empírica, que leva em conta a variação do tamanho dos grãos na velocidade de trânsito cisalhante, ou seja:

$$(\Delta T_s)_e = \Delta T_{c_{log}} (\Delta T_s/\Delta T_c)^{\alpha} \quad (2.14)$$

onde:

$(\Delta T_s)_e$  = tempo de trânsito cisalhante estimado.

$\Delta T_{c_{log}}$  = tempo de trânsito compressional medido por qualquer



perfil sônico.

$(\Delta T_s/\Delta T_c)$  = valores tabelados da razão entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para diversas litologias.

$\alpha$  = fator do tamanho do grão ou partícula.

Os valores de  $\alpha$  utilizados por Mason são apresentados na Tabela 2.3, abaixo:

CLASSIFICAÇÃO DE WENTWORTH		FATOR DE CORREÇÃO DA RAZÃO
Grão	Tamanho (mm)	$\Delta T_s/\Delta T_c$ , $\alpha$ (adimensional)
Silte	< 1/16	0.90
Muito-fino	1/16 a 1/8	0.95
Fino	1/8 a 1/4	1.00
Medio	1/4 a 1/2	1.05
Grosseiro	1/2 a 1.0	1.10
Muito grosseiro	1.0 a 2.0	1.15
Granular	2.0 a 4.0	1.20
> Granular	> 4.0	> 1.30

Tabela 2.3 Fator de correção do tempo de trânsito cisalhante, em função do tamanho do grão, ref. [16]

Como a correlação entre o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão da rocha mostrou-se boa, Mason escolheu a velocidade de trânsito cisalhante como parâmetro de perfil, no desenvolvimento de um procedimento para a escolha de

brocas. Mason utilizou resultados de resistência à compressão obtidos de testes à compressão uniaxial, para correlacionar com tempo de trânsito cisalhante.

A área escolhida por Mason foi a de Blocker Field, Texas, devido ser uma área com litologia bastante diversificada, além de ter o topo das formações aproximadamente no mesmo plano, e ser um campo densamente perfurado nos últimos anos. Algumas hipóteses foram feitas, entre as quais ressaltamos :

- a) que a melhor broca foi utilizada para perfurar determinado intervalo;
- b) que a broca foi utilizada em condições corretas, isto é, peso sobre a broca, rotação, lama e hidráulica corretos, além de dispor-se do registro das descidas mais econômicas (melhores descidas).

Para o cálculo do custo foi utilizada a seguinte expressão :

$$C_f = \frac{(T_m + T_b) C_r + C_b}{f} \quad (2.15)$$

onde:

$T_m$  = tempo de manobra (hrs).

$T_b$  = tempo de broca-fundo (hrs).

$C_r$  = taxa horária da sonda (US\$/hr).

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

$f$  = intervalo perfurado pela broca (pés ou metros).

$C_f$  = custo por pé (ou metro) perfurado (US\$/pé ou US\$/m)

O código IADC, de cada broca, foi então plotado num gráfico de custo por pé versus profundidade de saída da broca. As brocas que se mostraram mais econômicas foram as situadas mais à esquerda dos códigos IADC plotados (Figura 2.1). O intervalo onde as brocas se mostraram mais econômicas foi estabelecido com os correspondentes códigos IADC.

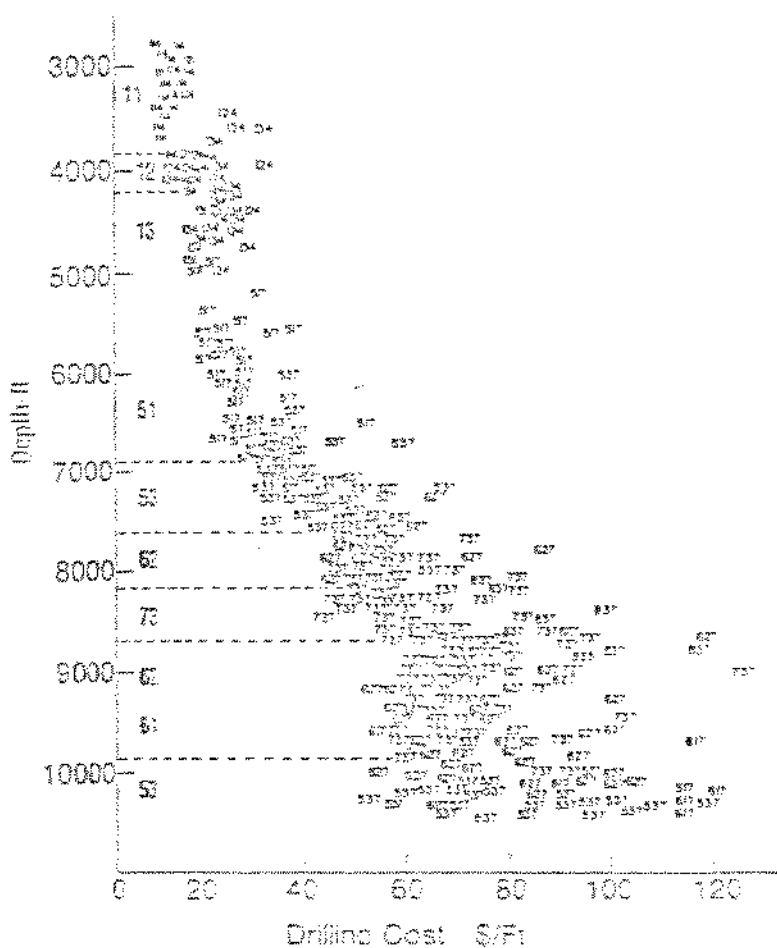


Figura 2.1 Seleção econômica das brocas, para o campo de Blocker, Texas, ref. [15]

Para estabelecer-se a correspondência de aplicação destas brocas com o tempo de trânsito cisalhante calculado pela equação (2.14), bastou transportar os intervalos delimitados anteriormente para o gráfico de tempo de trânsito cisalhante versus profundidade. As linhas pontilhadas foram estendidas lateralmente até interceptarem a curva de tempo de trânsito cisalhante. Estes intervalos definem os limites para os quais o tipo de broca correspondente foi o mais econômico (Figura 2.2).

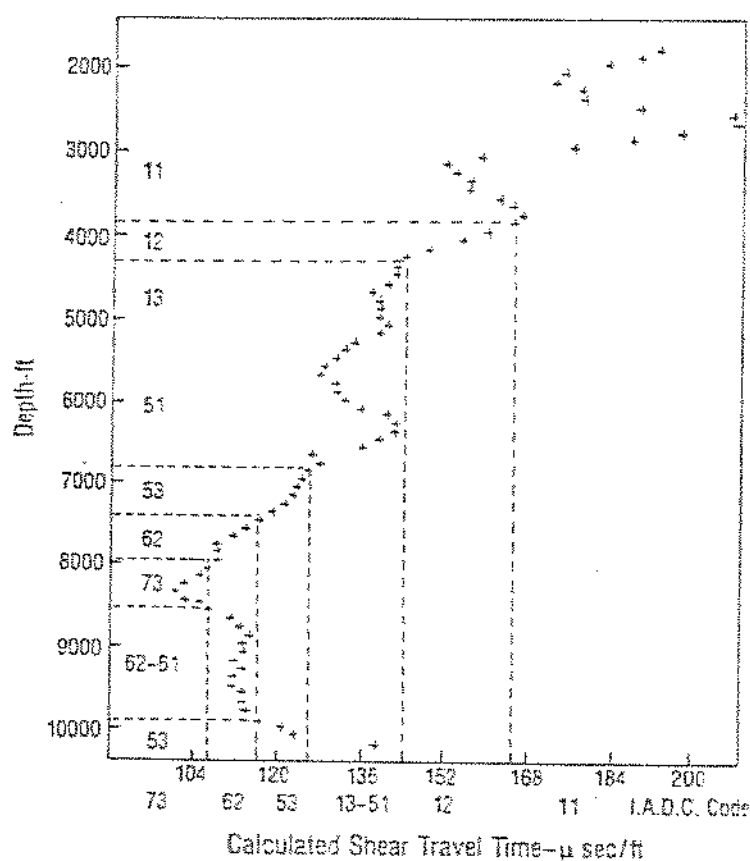


Figura 2.2 Perfil de seleção econômica da broca e seus limites,

ref. [16]

Esse procedimento foi utilizado em outros campos da Flórida, Wyoming e Michigan, nos E.U.A., e novos limites de tempo de trânsito cisalhante foram determinados para a classificação de brocas mais econômicas para cada intervalo nestas áreas.

Mason apresentou um gráfico, correlacionando o tempo de trânsito cisalhante versus tempo de trânsito no fluido contido nos poros, com retas de resistência à compressão da rocha, indicando os locais de melhor aplicação das brocas com os códigos IADC especificados, afirmando ser este gráfico de aplicação universal (Figura 2.3).

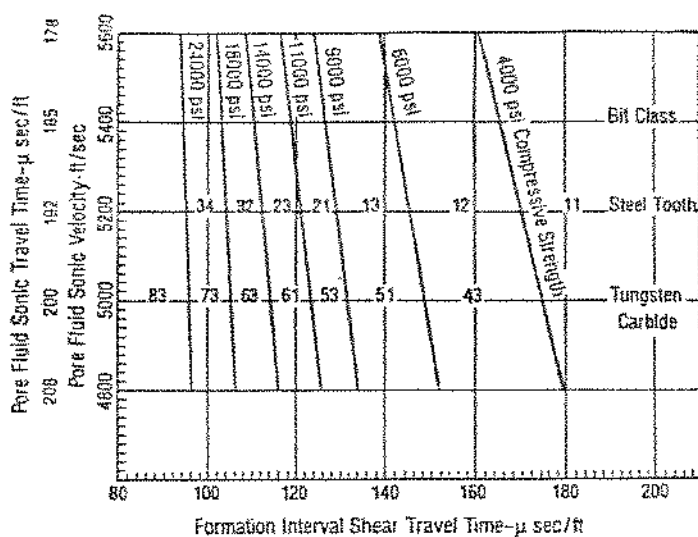


Figura 2.3 Guia para seleção de brocas tricônicas, ref. [16]

### 2.3 Determinação das características mecânicas da formação.

Em 1986, Walker et alii<sup>17</sup>, propuseram um modelo de predição da taxa de penetração para uma broca tricônica (IADC 5-3-7), como função do peso sobre a broca, profundidade e propriedades da rocha medidas em laboratório. A resistência à compressão "in-situ" foi determinada através da simulação das condições de fundo de poço. Os efeitos da pressão de confinamento nas propriedades da rocha são bem conhecidos. Quando a pressão de confinamento aumenta, a resistência e a ductilidade da rocha também aumentam.

A representação da resistência da rocha em função da pressão de confinamento é dada pela envoltória de Mohr. Considerando a envoltória de ruptura linear, o valor da resistência à compressão "in-situ" é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_c = p + 2 \frac{\tau_0 + p \tan \epsilon}{\cos \epsilon - \tan \epsilon + \sin \epsilon \tan \epsilon} \quad (2.16)$$

onde:

$\sigma_c$  = resistência à compressão "in-situ" (lb/pol<sup>2</sup>).

$\tau_0$  = resistência ao cisalhamento inicial (lb/pol<sup>2</sup>).

$\epsilon$  = ângulo de atrito interno.

$p$  = pressão de fundo do poço (lb/pol<sup>2</sup>).

A expressão obtida em laboratório para a taxa de penetração foi a seguinte:

$$R = 14 + 54 W - 56 p + 31 \phi - 10 g - 16 \sigma_c + 46 p^2 - 31 p W \quad (2.17)$$

onde:

R = taxa de penetração (ft/hr).

W = peso sobre a broca (lbs).

p = pressão no fundo do poço (lb/pol<sup>2</sup>).

$\phi$  = porosidade.

g = tamanho médio dos grãos (pol).

$\sigma_c$  = resistência à compressão in situ (lb/pol<sup>2</sup>).

Em 1987, Winters et alii<sup>16</sup> apresentaram um modelo que relaciona a taxa de penetração das brocas tricônicas ao projeto da mesma, e às condições de operação e características mecânicas das rochas. A ductilidade é identificada como um fator de maior influência no desempenho da broca. A excentricidade ("offset") dos cones é apontada como uma importante característica de projeto para a perfuração de rochas dúteis. Partindo de um modelo proposto por Warren, em 1984, para o cálculo da taxa de penetração e levando-se em conta o efeito da ductilidade da rocha e a excentricidade dos cones em relação ao eixo da broca, Winters et alii chegaram à seguinte expressão:

$$R = \left[ \frac{\sigma_{ult} D_b^2}{N W} \left( \frac{a \sigma_{ult} D_b \epsilon}{W} + \frac{\Phi}{\epsilon} \right) + \frac{b}{N D_b} + \frac{c \rho_m \mu D_b}{I_m} \right]^{-1}$$

(2.18)

onde:

R = taxa de penetração (pés/hr).

$\sigma_{ult}$  = resistência à compressão da rocha (lb/pol<sup>2</sup>).

$D_b$  = diâmetro da broca (pol).

N = velocidade de rotação (RPM).

a, b, c = constantes de projeto de broca (adimensional).

W = peso sobre broca (Klbs).

$\epsilon$  = ductilidade da rocha (adimensional, %).

$\Phi$  = coeficiente de excentricidade do cone (1/L).

$\rho_m$  = peso específico do fluido de perfuração (lb/gal).

$\mu$  = viscosidade do fluido de perfuração (cp).

$I_m$  = força de impacto modificada (lbf).

As constantes a, b, c e  $\Phi$  são determinadas através de regressão de dados de laboratório, para cada código IADC de classificação de brocas. Os valores de ductilidade da rocha ( $\epsilon$ ), caso não medidos diretamente de testemunhos, devem ser estimados para ser possível a solução da equação anterior.

Onyia<sup>19</sup>, em 1988, comenta ser o modelo de Warren, de taxa de penetração para brocas tricônicas, utilizado extensamente



para prever a resistência à perfuração da rocha, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_{ult} = \left[ \frac{W}{a D_b^2 \epsilon} \left( \frac{N}{R} - \frac{b}{D_b} - \frac{c N \rho_m \mu D_b}{I_m} + \frac{\Phi^2}{4 a \epsilon^2} \right) \right]^{.5} - \frac{\Phi W}{2 a D_b \epsilon^2} \quad (2.19)$$

onde a nomenclatura é a mesma da equação (2.18). Winters et alii mostraram que a resistência da rocha, calculada pela equação acima, correlaciona muito bem com a resistência à compressão da rocha obtida em laboratório, através de testes triaxiais padrões, com uma pressão de confinamento igual ao efetivo diferencial de pressão atuando no fundo do poço.

Onyia enumerou algumas implicações destes resultados:

- a) A resistência à compressão da rocha pode ser estimada através de dados de perfuração. Na forma atual, a equação é utilizada em análises posteriores.
- b) Baseada na resistência da rocha, o modelo pode ser utilizado de maneira a prever a taxa de penetração.
- c) Se a resistência é correlacionável com as propriedades obtidas de perfil, existe a possibilidade de prever não somente a resistência da rocha a partir de perfis, mas também a taxa de penetração para uma área antes de perfurá-la.
- d) Estes perfis de resistência da rocha podem ser

utilizados para avaliar o desempenho da perfuração e a escolha de brocas.

e) Esta técnica pode ser usada com ferramentas de MWD (Measurements While Drilling), utilizando dados de perfuração e da formação para prever a resistência da rocha durante a perfuração. Um pré-registro contínuo da resistência da rocha e taxa de penetração como correlação para outras locações pode ser construído, baseado apenas em dados provenientes de perfis.

O modelo de Winters et alii se mostrou aplicável com o uso das constantes de projeto de brocas apropriadas, para todos os tipos de brocas tricônicas.

Onyia, em 1988, apresentou uma nova abordagem na aplicação de perfis elétricos, caso exista uma boa correlação entre a taxa de penetração ou a resistência à compressão e qualquer outro parâmetro registrado por perfil. Para um poço de pesquisa perfurado em Rogers County, Oklahoma, E. U. A., a concordância de tendências entre a resistência à compressão das rochas calculada e perfis elétricos mostrou-se boa em vários tipos de litologia como folhelhos, arenitos, calcarenitos, dolomita, granito e outras litologias mistas. Combinando os perfis de indução profundo, raios gama, densidade e acústico, obteve-se a seguinte expressão, cujos coeficientes foram calculados por regressão linear múltipla:

$$\sigma_{ult} = K1 + K2 \log_{10}(R_t) + K3 GR + K4 \rho_b + K5 \Delta Tc \quad (2.20)$$

onde:

$\sigma_{ult}$  = resistência à compressão (lb/pol<sup>2</sup>).

$K1(=1,5)$  = coeficientes a determinar através de regressão múltipla.

$R_t$  = resposta do perfil de indução profundo (ohm-m).

GR = resposta do perfil de raios gama (API).

$\rho_b$  = resposta do perfil densidade (g/cm<sup>3</sup>).

$\Delta Tc$  = resposta do perfil de tempo de trânsito compressional ( $\mu$ seg/pé).

Onyia comenta ser bastante questionável a relação direta entre a resposta do perfil de indução ( $R_t$ ) e a resistência da rocha, já que, teoricamente, a maioria das rochas sedimentares não são condutoras. O fator governante na relação entre o resultado do perfil de indução e a resistência à compressão da formação pode ser atribuída à porosidade, e ao efeito do fluido contido na formação.

Onyia apresentou também a seguinte relação para cálculo da resistência à compressão da rocha, com bons resultados, frente a arenitos consolidados, folhelhos e calcarenitos:

$$\sigma_{ult} = \frac{1.00}{K6 (\Delta Tc - K7)^2} + 2.00 \quad (2.21)$$

onde:

$\sigma_{ult}$  = resistência à compressão da rocha ( $lb/pol^2$ ).

$K$  ( $i=6,7$ ) = coeficientes a determinar através de regressão não linear.

$\Delta T_c$  = tempo de trânsito compressional ( $\mu seg/pé$ ).

Esta equação tem a vantagem de necessitar somente de informação do tempo de trânsito compressional, obtida de testemunho ou de perfil sônico (BHC). Em outros casos, Onyia sugere o uso da equação (2.20).

Onyia, ao contrário de Mason, não obteve boa correlação entre resistência à compressão e o tempo de trânsito cisalhante. Onyia alerta, dizendo que os modelos apresentados não são totalmente imunes aos problemas comuns encontrados na interpretação de perfis. Os resultados podem ser influenciados por:

- a) água conata na formação;
- b) tipo de fluido na formação;
- c) problemas comuns de qualidade de perfis como poços alargados e tipos de lama;
- d) sedimentos inconsolidados.

Tendo ciência das fontes possíveis de erro e sendo fornecidos bons dados, as equações apresentadas podem ser utilizadas para predizer a resistência à compressão da rocha.

Onyia sugere que a porosidade é o fator determinante na relação entre a resistência da rocha, taxa de penetração e os dados de perfis.

Ohara<sup>20</sup>, em 1989, baseado na Figura 2.3, obteve a resistência à compressão em função do tempo de trânsito cisalhante da formação, para velocidade no fluido contido nos poros de 4800 e 5600 pés/seg. Para facilidade computacional, efetuou interpolação linear entre as duas equações, chegando à seguinte expressão:

$$S_c = \frac{-(5600 - Y_1)(X_1 - X_2)}{800} + X_1 \quad (2.22)$$

onde:

$$X_1 = [\exp(-0.02666 \Delta T_s)] 262862.527975$$

$$X_2 = [\exp(-0.021465 \Delta T_s)] 171069.787403$$

sendo:

$S_c$  = resistência à compressão (lb/pol<sup>2</sup>).

$\Delta T_s$  = tempo de trânsito cisalhante ( $\mu$ seg/pé).

$X_1$  = resistência à compressão para fluido nos poros com velocidade de trânsito de 5600 pés/seg (lb/pol<sup>2</sup>).

$X_2$  = resistência à compressão para fluido nos poros com velocidade de trânsito de 4800 pés/seg (lb/pol<sup>2</sup>).

$Y_1$  = tempo de trânsito no fluido contido nos poros ( $\mu$ seg/pé).

Ohara correlacionou a resistência à compressão versus

profundidade para a análise de brocas descidas em alguns poços na área de Alagoas, concluindo que os resultados foram consistentes com o observado na prática. Verificou, nos poços analisados, que quando uma broca estava em divergência com o recomendado, o seu rendimento medido através da taxa de penetração média foi mais baixo em relação as brocas descidas anterior e posteriormente, dentro de uma mesma litologia.

Para o cálculo do tempo de trânsito cisalhante ( $\Delta T_s$ ), Ohara adotou alguns valores de  $\alpha$  e ( $\Delta T_s/\Delta T_c$ ) apresentados no trabalho de Mason.

Ohara analisou diversos modelos disponíveis na literatura que levavam em conta a resistência da rocha na previsão da taxa de penetração. Ohara propôs novo modelo de perfuração, desenvolvido através de análise dimensional, levando em consideração a resistência da rocha à compressão. A equação final do modelo proposto por Ohara é a seguinte:

$$\frac{R}{N D_b} = \exp \left\{ b_1 + \ln \left[ \frac{W}{S_c D_b^2} \right]^{b_2} + \left[ -\frac{\Delta P}{S_c} \right]^{b_3} + \left[ 2 - \frac{D}{D_b} 5.0 \times 10^{-5} \right]^{b_4} + \ln \left[ \frac{F_j}{S_c D_b^2} \right]^{b_5} + \left[ -\frac{H}{D_b} \right]^{b_6} \right\} \quad (2.23)$$

onde:

$b_i$  = coeficientes a determinar (adimensionais).

$R$  = taxa de penetração (pés/hr).

$W$  = peso sobre broca (klbs).

$N$  = velocidade de rotação da broca (rpm).

$\Delta P$  = diferencial de pressão poço formação (lb/pol<sup>2</sup>).

$D$  = profundidade (pés).

$F_j$  = força nos jatos da broca (lbf).

$S_c$  = resistência à compressão da rocha (lb/pol<sup>2</sup>).

$H$  = altura do dente normalizado ( $\sqrt{8}$ ).

$D_b$  = diâmetro da broca (pol).

Ohara, utilizando a resistência à compressão da rocha sugerida por Mason, validou seu modelo para um poço na área de Alagoas.

#### 2.4 Aplicação e exigências operacionais de diferentes tipos de brocas PDC em lama base-água.

Gault et alii<sup>21</sup>, em 1988, apresentaram o resultado de um estudo desenvolvido para a área do Golfo do México, cujo objetivo foi o de determinar a aplicação e as exigências operacionais de diferentes tipos de brocas PDC, essenciais à utilização bem sucedida das mesmas, em lama base-água. A redução observada no custo por metro foi significativa. O sucesso obtido na utilização destas brocas PDC foi o resultado

da união do projeto de broca e da hidráulica, adequados a composição da formação, usando a relação entre reatividade do folhelho e performance da broca.

Para efeito do estudo, as brocas foram classificadas em 3 categorias : 1) brocas PDC convencionais com cortadores de 1/2 pol de diâmetro; 2) brocas PDC tipo rabo de peixe ("fishtail") com cortadores de 1/2 pol; 3) brocas PDC com cortadores de maior diâmetro (1, 1 1/2 ou 2 pol) com um jato para cada cortador.

A composição do folhelho e a reatividade com fluidos de perfuração base-água podem ser relacionados por meio da capacidade de troca catiônica (CEC). Como o encrramento da broca e os problemas de limpeza do poço são uma função da reatividade do folhelho, os valores de CEC podem ser usados como uma ferramenta para união do projeto de broca e das exigências de hidráulica à composição da formação. A reatividade do folhelho a sistemas base-água doce é função do conteúdo de mineral de argila.

Os valores de CEC podem ser determinados na sonda ou em laboratório. Outra maneira de obter-se o valor do CEC é através do perfil dos espectros de raios gama. Os resultados deste perfil têm sido relacionados com as medidas feitas em testemunhos e permitem o registro do CEC em todo o intervalo perfurado.

O desempenho das brocas PDC tem sido relacionado com



valores de CEC do folhelho. Dados de campo indicaram que quando os valores de CEC decrescem, a taxa de penetração aumenta.

Gault et alii apresentaram um guia para seleção de brocas PDC (Figura 2.4), correlacionando o tipo de broca com o valor de CEC, podendo ser esperado um bom desempenho da broca, no caso dos valores de CEC corresponderem à parte retangular do tipo da broca em uso.

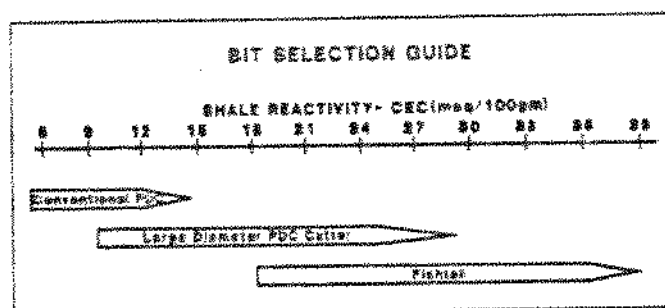


Figura 2.4 Guia para seleção de broca PDC, ref. [21]

Foram também apresentadas as Tabelas 2.4 e 2.5, destinadas à seleção dos parâmetros hidráulicos para brocas PDC com cortadores de maior diâmetro e para brocas PDC tipo rabo de peixe, respectivamente.

HYDRAULIC SELECTION CHART FOR A LARGE-DIAMETER-CUTTER PDC BIT*				
Bit Diameter (in.)	Hydraulic Requirements	CEC Ranges, meq/100 g		
		6 to 18	18 to 24	24 to 30
7½ to 8½	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	450, 4.5	500, 5.0	550, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	350, 2.0	400, 2.0	450, 2.5
9¾ to 10¾	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	600, 4.5	650, 5.0	700, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	550, 2.0	600, 2.5	650, 3.0
12¼	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	700, 4.5	750, 5.0	800, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	600, 2.0	700, 2.5	750, 3.0
14¾ to 17½	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	800, 5.5	850, 5.5	950, 6.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	700, 2.0	750, 3.0	800, 3.5

\*These are general guidelines subject to variations of pH, mud type, and solids, etc. Each case should be reviewed on a well-by-well basis with the bit manufacturer.

Tabela 2.4 Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC com cortador de grande diâmetro, ref. [21]

HYDRAULIC SELECTION CHART FOR A FISHTAIL PDC BIT*					
Bit Diameter (in.)	Hydraulic Requirements	CEC Ranges, meq/100 g			
		6 to 18	18 to 24	24 to 30	30 to 38
≥ 6¾	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	180, 3.0	200, 3.0	225, 3.5	250, 4.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	150, 1.5	150, 1.5	180, 2.0	200, 2.5
7¾ to 8¾	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	350, 3.5	400, 3.5	450, 5.0	450, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	300, 2.0	350, 2.0	350, 3.5	400, 3.5
9¾ to 10¾	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	550, 3.5	600, 3.5	650, 5.0	750, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	500, 2.0	550, 2.5	600, 3.5	650, 4.0
12¼	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	650, 4.0	700, 4.0	750, 5.0	800, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	550, 2.0	600, 2.0	650, 3.5	650, 4.0
14¾ to 17½	Recommended, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	750, 5.0	850, 5.0	900, 5.0	1,000, 5.0
	Minimum, gal/min, hhp/in. <sup>2</sup>	700, 2.0	750, 3.0	800, 3.5	900, 4.0

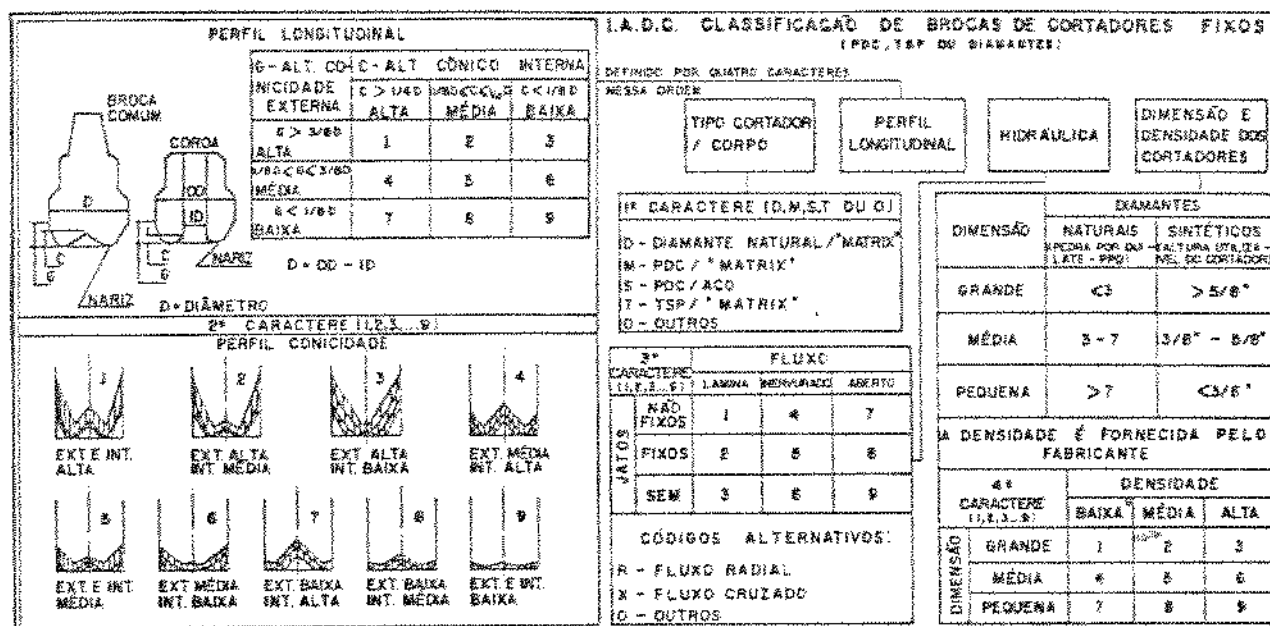
\*These are general guidelines subject to variations of pH, mud type, and solids, etc. Each case should be reviewed on a well-by-well basis with the bit manufacturer.

Tabela 2.5 Seleção de parâmetros hidráulicos para broca PDC tipo rabo de peixe, ref. [21]

Os autores concluem que as teorias de hidráulica para brocas tricônicas não são aplicáveis nesta nova geração de

brocas, e que os valores do CEC parecem ser uma ferramenta viável para predição de quando se utilizar brocas PDC, bem como na escolha do tipo de broca e exigências hidráulicas relacionadas com a composição da formação.

O Quadro 2.3 mostra a classificação IADC para brocas de cortadores fixos, entre as quais incluem-se as brocas PDC<sup>13</sup>.



Quadro 2.3 Classificação IADC de brocas de cortadores fixos.

ref. [13]

## 2.5 Uso da energia específica como um critério para escolha de broca.

Em 1985, Rabia<sup>22</sup> apresentou um critério para escolha de broca, baseado no princípio da energia específica, e comparou os resultados do mesmo com os obtidos através do custo por metro. A energia específica pode ser definida como a energia requerida para remover um volume unitário de rocha.

Como os critérios para escolha de broca, baseados no custo por metro, utilizam a equação (2.15), Rabia ressaltou os seguintes aspectos dos mesmos:

- a) Para um dado custo de broca e intervalo perfurado, o custo por metro é altamente sensível ao custo horário da sonda, tempo de manobra e tempo de broca-fundo;
- b) A determinação do tempo de manobra nem sempre pode ser feito de maneira precisa;
- c) O tempo de broca-fundo é linear e diretamente proporcional ao custo por metro;
- d) O custo horário da sonda tem grande efeito no custo por metro. Para uma determinada seção do poço, em um campo perfurado por diferentes sondas com diferentes custos horários, a mesma broca irá produzir diferentes custos por metro, assumindo-se o mesmo tempo de broca-fundo para todas as sondas;
- e) Ao assumir-se um custo horário igual para todas as

sondas, determina-se um custo por metro equivalente para as mesmas. Nesse caso, o custo por metro não é real e não corresponde ao gasto atual ou planejado.

A seleção da broca é feita escolhendo-se aquela que consistentemente produz o menor custo por metro, em certa formação ou seção do poço.

Para avaliar-se o desempenho da broca durante a perfuração, pode-se calcular o custo por metro cumulativo. Este cálculo pode ser feito com a equação (2.15), com a metragem e tempo de broca-fundo acumulados. Quando o valor do custo por metro cumulativo começa a aumentar, é assumido, normalmente, que a broca deve ser retirada. Este procedimento apresenta basicamente as seguintes desvantagens:

- a) Imprecisão na estimativa do tempo de manobra;
- b) Falta de informações precisas, quanto a mudanças na formação, que afetam a taxa de penetração atual e futura.

Rabia apresenta como alternativa ao procedimento analisado acima, o uso da energia específica. Após analisar quatro poços de desenvolvimento, em Abu Dhabi, E. Árabes Unidos, concluiu o seguinte, a respeito do critério proposto:

- a) A energia específica é uma medida da performance da broca e é diretamente compatível com o custo por metro.
- b) A energia específica pode ser utilizada para selecionar o tipo de broca adequado para qualquer seção do poço, e locais para mudanças mais acentuadas do tipo

de broca, a partir dos gráficos de energia específica ( $E_s$ ) x profundidade. A  $E_s$  também pode ser utilizada como um critério para retirada da broca em uso. Para essa aplicação, a energia específica é uma ferramenta com maior significado que outros meios disponíveis, como o custo por metro cumulativo.

c) Em poços exploratórios, a  $E_s$  é uma ferramenta conveniente para a determinação da profundidade de retirada da broca em uso. Locais de assentamento de sapata de revestimento e localização de zonas com pressão anormal podem ser determinadas do gráfico  $E_s$  x profundidade.

Em 1986, Rabia et alii<sup>23</sup>, apresentaram a dedução da fórmula para cálculo da  $E_s$ , concluindo que a mesma pode ser expressa da seguinte forma:

$$E_s = K \frac{W N}{D_b R} \quad (2.24)$$

onde:

K = constante adimensional.

W = peso sobre broca (Klbs).

N = velocidade de rotação (rpm).

R = taxa de penetração (pés/hr).

$D_b$  = diâmetro da broca (polegadas).

$E_s$  = energia específica (pol-lbf/pol<sup>3</sup>)

Os autores consideraram de menor importância o valor assumido para a constante K, já que o comportamento da energia específica é mais importante que o próprio valor da mesma.

Rabia et alii, aplicaram o critério em três poços no Mar do Norte, assumindo, arbitrariamente, a constante K igual a 2,0, e concluíram que: a) a energia específica, calculada pela equação (2.24), é um método válido para análise do desempenho de brocas e também uma ferramenta válida para escolha de broca; b) são necessários estudos adicionais da energia específica no campo, para provar a simplicidade, precisão e utilidade do método, ao responsável pela escolha de broca.

## 2.6 Escolha de brocas PDC através da associação com os tipos de brocas tricônicas utilizadas.

Nos Quadros 2.4 e 2.4A, são mostrados a comparação entre o código IADC de brocas tricônicas e brocas de diamante, de diversos tipos e diferentes fabricantes, entre as quais enquadram-se as brocas PDC. O número entre parêntesis, ao lado do tipo da broca, corresponde à classificação IADC para brocas de cortadores fixos. Nesse quadro verificamos que, além da descrição das formações onde as brocas PDC apresentaram melhores resultados, utilizou-se o código IADC das brocas tricônicas, devido a maior quantidade de informações referente ao desempenho das mesmas, procurando caracterizar, com maior

TABELA COMPARATIVA DE BROCAS - IADC												
FORMAÇÕES	BROCAS TRICÔNICAS		CBY - SMITH			BAKER HUGHES			DIAMANT BOARD STRATABIT			
	IADC		PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL	PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL	PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL	
	INSERTO	DENTE DE AÇO										
SEDIMENTOS INCONSOLIDADOS E SUPERFICIAIS: AREIAS . ARGILAS SILTOS		11	PS300 (S371) PS351 (S375) PS370 (S375)			B9M (M315) B10M (M315) B11M (M345)			PD11 (S314) PD11X2 (S314) PD12 (S311) TD2040 (M314) TD2065 (M315)			
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS DE BAIXA RESISTÊNCIA, POUCO COMPACTADOS, FRAQUEIS E NÃO ABRASIVOS. SAIS . MARGA ANIDRITAS . ARGILAS SILTOS . CAOLIN	43	11 12 13	PS100 (S945) PS160 (S975) PS250 (S744) PS400 (S646) PS450 (S745) PS300 (S371) PS351 (S375)			B15M (M674)			PD2 (S675) PD4 (S672) PD7 (S774) PD11X2 (S314) PD12 (S311) TD102 (M345) TD2040 (M314) TD2065 (M315)			
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS MODERADAMENTE RESISTENTES, POUCO ABRASIVOS E MEDIANAMENTE ESPESOS E DUCTIS. SILTOS ARGILOSOS ANIDRITAS . FOLHELHOS CARBONATOS POROSOS	43 51 52	21	PS100 (S945) PS160 (S975) PS450 (S745)	DM510 (D2R1) DM510 (D5R1) DM810 (D3R1)		B22M (M675)	HD20 (D5R1)	P15 (T5X7)	PD1 (S679) PD2 (S675) PD4 (S672) PD21 (S545) LX221 (M254) LX222 (M254) LX272 (M255) TD103 (M345)			
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS RESISTENTES, COMPACTADOS ABRASIVOS E DUCTIS. FOLHELHOS SILTOSOS DOLOMITA . CALCÁREO ARENITOS CALCÍFEROS	53 54	31		DM510 (D2R1) DM520 (D2X5) DM810 (D5E1) DM620 (D5X5)	CM610 (T5R7)	B33M (M646)	HD40 (D5X8)	P18 (T5X8)		Y816 (D4X2) Y817 (D3X2) Y8583 (D5P2) Y8603 (D5X5)		
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS MUITO RESISTENTES, COMPACTADOS E ABRASIVOS, NÃO DUCTIS. FOLHELHOS . CARBONATOS CALCÁREOS	62 63 64			DM120 (D9X8) DM420 (D8X8) DM520 (D27X5) DM620 (D5X5)	CM620 (T5X8)		HD80 (D5X8)	P41 (T5X8)		T8521 (D8X8) T8601 (D5X8) T8603 (D5X5)	TT17 (T3X2) TT703 (T2X6)	
SEDIMENTOS E PRECIPITADOS EXTREMAMENTE RESISTENTES, DUCIS, COMPACTADOS E ABRASIVOS. XISTOS, DOLOMITAS, CALCÁREO, NÃO ALTERADO E ELÁSTICOS. ARENITOS QUARTZOSOS DE GRANULOMETRIA FINA, DURO E MUITO DURO.	71 72 73 74			DM120 (D9X8) DM420 (D8X8)						T8521 (D8X8) T8601 (D5X8)	TT703 (T2X6)	

Quadro 2.4 Comparação do código IADC de brocas tricônicas e brocas de cortadores fixos, ref. [13]



TABELA COMPARATIVA DE BROCAS - IADC											
FORMAÇÕES	BROCAS TRICÔNICAS		EASTMAN CHRISTENSEN			HYCALDO/CAMCO			SECURITY		
	IADC		PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL	PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL	PDC	DIAMANTE NATURAL	PDC TERMICAMENTE ESTÁVEL
	INSERTO	DENTE DE AÇO									
SEDIMENTOS INCONSOLIDADOS E SUPERFICIAIS: . AREIAS . ARGILAS . SILTES		11	R4315 (M844) R545 (M612) R593 (M572)			DS18 (M366) DS29 (M346) HM101 (M845) RM38 (M346)			SX13 (S712)		
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS DE BAIXA RESISTÊNCIA, POUCO COMPACTADOS, FRÁGEIS E NÃO ABRASIVOS: . SAIS . MARGA . ANIDRITAS . ARGILAS . SILTITOS . CAOLIM	43	11 12 13	R4335 (M845) R482 (M675) R516 (M342)	D18 (D1X2) D38 (D2R1) T18P (D1X2)		DS18 (M366) DS23 (S846) DS25 (S844) DS28 (S845) DS29 (M346) HM101 (M845) RM38 (M346) RM54 (M774)	901 (D4R1) RD22 (D2X6)		MX42 (M545) MX44 (M646) SX22 (S375)		
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS MODERADAMENTE RESISTENTES, POUCO ABRASIVOS E MEDIANAMENTE ESPESSOS E DÚCTeis: . SILTE-ARGILOSOS . ANIDRITAS . FOLHELHOS . CARBONATOS PORCSOS	43 51 52	21	R820 (M256) R417 (M346) R418 (M346) R435G (M646)	D262 (D2R3) D311 (D2R2)	S226 (T4XB)	DS18 (M366) DS23 (S846) DS26 (S845) HM101 (M845) RM54 (M774) RM66 (M545) RM74 (M775) RSB2 (S675)	730 (D4X4) 901 (D4R1) RD33 (D2R5) RD53 (D4R5)		MX42 (M545) MX44 (M646) MX54 (M266) SX32 (S675)		
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS RESISTENTES, COMPACTADOS ABRASIVOS E DÚCTeis: . FOLHELHOS SILTOSOS . DOLOMITA . CALCAREO . ARENITOS CALCIFEROS	53 54	31		D41 (D4X6) D331 (D2X3) T51P (D2X3)	S5226 (T4XB) S245 (T2XR)	DS23 (S846)	S25 (D7X7) 730 (D4X4) 901 (D4R1) RD44 (D2X6) RD64 (D2X6)				
SEDIMENTOS PRECIPITADOS E EVAPORITOS MUITO RESISTENTES, COMPACTADOS E ABRASIVOS, NÃO DÚCTeis: . FOLHELHOS . CARBONATOS . CALCAREOS	62 63 64				S279 (D560)		S25 (D7X7) 730 (D4X4)				
SEDIMENTOS E PRECIPITADOS EXTREMAMENTE RESISTENTES, DURIOS, COMPACTADOS E ABRASIVOS: . XISTOS, DOLOMITAS, . CALCAREO, NÃO ALTERADO . E ELÁSTICOS . ARENITOS QUARTIZOSOS DE GRANULOMETRIA FINA, DURO E MUITO DURO.	71 72 73 74				S279 (D560)		S25 (D7X7)				

Quadro 2.4A Comparação do código IADC de brocas tricônicas e brocas de cortadores fixos, ref. [13]

nitidez, os locais onde as brocas PDC têm maior potencial de apresentar bons resultados.

Devido a grande flexibilidade de alterações no projeto, oferecida pelas brocas PDC<sup>24</sup>, e a frequência com que são lançados novos projetos, existem vários tipos de brocas que não constam dos Quadros 2.4 e 2.4A. Alguns autores<sup>6</sup> têm afirmado ser viável a adaptação de um projeto de broca PDC à uma determinada área, a fim de obter-se maior rendimento da perfuração. O retorno financeiro, segundo esses autores, tem sido plenamente satisfatório, mesmo considerando-se os resultados iniciais.

## CAPÍTULO 3

## DESENVOLVIMENTO E APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

## 3.1 Dados de Perfis Elétricos.

Os dados de perfis elétricos estão disponíveis, de metro em metro, com a respectiva identificação litológica em fitas magnéticas. As informações disponíveis no arquivo de perfis são: profundidade (m); massa específica da formação ( $\text{g/cm}^3$ ); tempo de trânsito compressional ( $\mu\text{seg/pé}$ ); código de identificação litológica; resistividade (ohm-m); raios gama (API); caliper (polegadas).

Nem todos os perfis são corridos em todo o poço. Por este motivo, algumas informações acima citadas são disponíveis apenas para um trecho do poço. Os perfis normalmente corridos ao longo de todo o poço são o sônico e o de raios gama (GR).

Um dos perfis utilizados neste trabalho foi o sônico digital (SDT) que registra o trem de ondas completo e dele é obtido o tempo de trânsito compressional e cisalhante. Este perfil é utilizado somente frente às zonas de interesse e próximo as mesmas. Poucos poços dispõem dessa informação.

## 3.2 Escolha de broca com auxílio de perfis e dados de perfuração.

O resultado do método proposto por Dernbach, por levar em

consideração o perfil de raios gama para determinação da fração de argila, pode ser afetado caso a formação apresente radioatividade anormal. A Tabela proposta por Pinheiro & Linhares já foi adaptada às condições da Bacia de Campos. Apesar de ser um método simples, a sua utilização requer uma visualização prévia do perfil, o que dificulta sua automatização.

O método proposto por Mason leva em consideração a resistência à compressão da rocha e as brocas mais adequadas à perfuração das mesmas. Considerando que, segundo Mason, a Figura 2.3 é aplicável a qualquer área, o método torna-se de fácil automatização. A precisão do método é dependente da estimativa do tempo de trânsito cisalhante das formações analisadas.

O critério adotado por Mason para delimitação do intervalo indicado como mais viável a utilização de determinado tipo de broca, ou seja, a utilização do custo por pé versus profundidade de saída da broca, apresenta as seguintes limitações:

- a) O topo do intervalo indicado reflete a profundidade de saída da primeira broca deste tipo. O topo do intervalo poderia ser definido, com mais precisão, como a profundidade de entrada desta broca;
- b) A definição da base do mesmo intervalo, utilizando a profundidade de saída, dá a idéia que, caso seja feita uma troca de brocas muito próximo da base, ainda vale a pena repetir-se o mesmo tipo de broca, o que nem sempre é

verdadeiro, dependendo da dureza da formação.

O método de Mason será adotado, em parte, no desenvolvimento deste estudo, onde serão utilizados os intervalos de melhor aplicação de brocas com os respectivos códigos IADC, em função da resistência à compressão da formação. As expressões apresentadas por Onyia para cálculo da resistência à compressão também serão utilizadas e comparadas com o critério apresentado por Mason.

No cálculo do custo por metro, utilizou-se a seguinte expressão empírica (baseada em dados de campo), para estimativa do tempo de manobra:

$$T_m = \frac{3 P}{1000} + 1 \quad (3.1)$$

onde:

$T_m$  = tempo de manobra (hrs).

$P$  = profundidade de saída da broca (metros).

O custo das brocas foram obtidos de tabelas de preços, fornecidas pelos fabricantes e, quando não se dispunha dessa informação para uma determinada broca, adotou-se para a mesma o valor de outras brocas com características semelhantes.

A fim de se evitar, em parte, as limitações do critério adotado por Mason para determinação do intervalo mais viável à utilização de determinado tipo de broca, será calculada a profundidade média do intervalo perfurado pela broca, conforme a seguinte expressão:

$$\text{Prof. Média} = \frac{\text{Prof. entrada da broca} + \text{Prof. saída da broca}}{2} \quad (3.2)$$

Com a utilização das profundidades médias, aumentam as possibilidades da broca, descida próximo aos limites do mesmo intervalo e de acordo com o recomendado, de continuar apresentando bom desempenho. Desta forma, fica assegurada que, pelo menos na metade da metragem da broca, esta venha ser utilizada nas condições que justificaram a sua escolha.

Mason utilizou o custo por metro x profundidade para identificar os intervalos mais viáveis a utilização de determinado tipo de broca. Rabia propôs a utilização da energia específica, já que a mesma mostrou ser compatível com o custo por metro. Serão utilizadas as equações (2.24) e (2.15), para o cálculo da energia específica e custo por metro, e os resultados mostrados versus profundidade.

Os valores da velocidade de rotação e peso sobre broca foram obtidos do arquivo com dados do boletim diário de perfuração, e representam valores médios e/ou mais frequentes, observados durante a utilização da broca. A taxa de penetração foi calculada dividindo-se a metragem perfurada pelo tempo de broca-fundo.

Adotou-se o mesmo valor utilizado por Rabia, para a constante K (= 2.0).

A Figura 3.1 mostra o comportamento da energia específica e do custo por metro versus profundidade média, para o poço

3-TB-A-PRS.

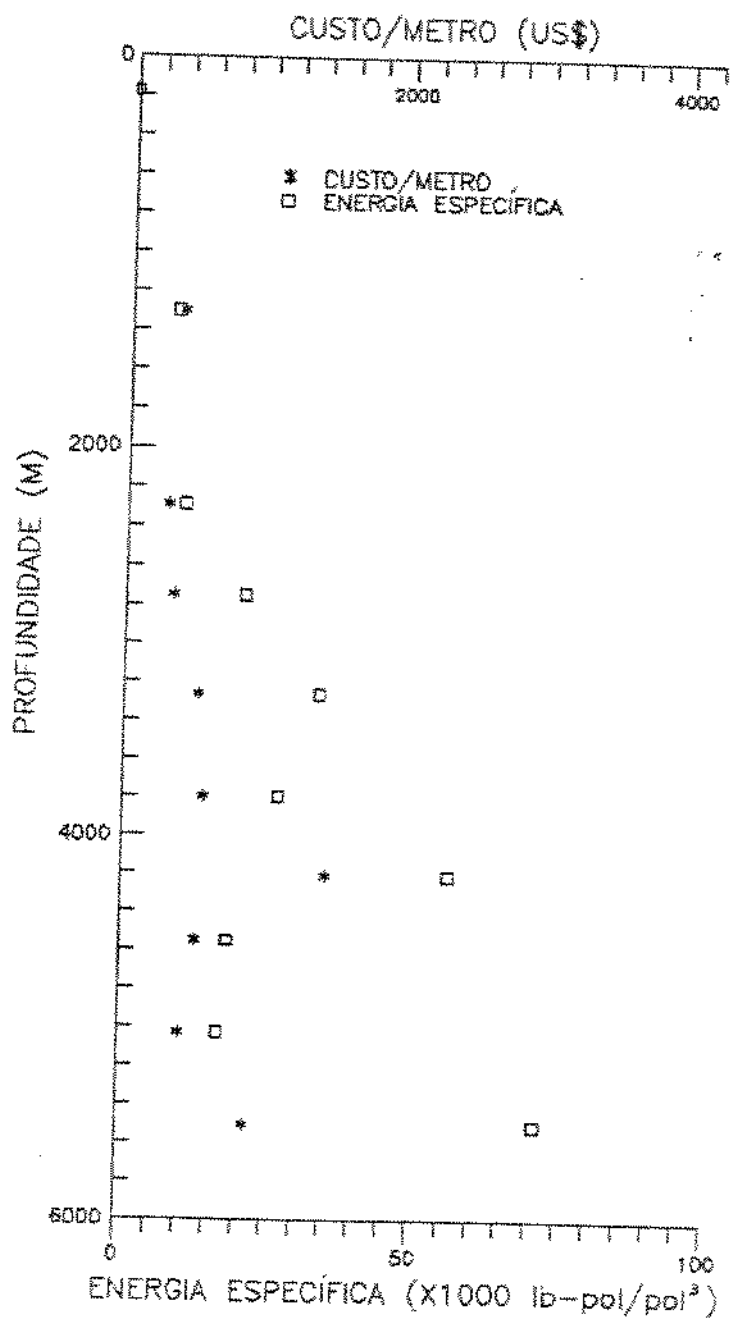


Figura 3.1 Comportamento da energia específica e do custo por metro versus profundidade média, no poço 3-TB-A-PRS.

Pode-se observar que o comportamento da energia específica foi semelhante ao apresentado pelo custo por metro. A variação entre os valores extremos da energia específica foi bastante acentuada, em relação à variação dos valores extremos do custo por metro.

O estabelecimento dos intervalos de melhor aplicação de determinado tipo de broca será feito plotando-se o custo por metro versus profundidade média, e escolhendo-se as brocas de menor custo por metro.

### 3.3 Limitações da utilização de valores tabelados de dados de perfis.

Os valores apresentados no trabalho de Mason, da razão entre o tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para diversos tipos de litologias, devem ser entendidos como valores médios representativos para as litologias onde as medidas foram feitas. A utilização dos mesmos de maneira indiscriminada, para o cálculo do tempo de trânsito cisalhante, pode levar a resultados não representativos da área em estudo.

A mesma cautela deve ser tomada em relação às outras propriedades relacionadas às rochas.

Os valores da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  apresentados por Pickett<sup>25</sup> tem sido considerados como representativos em diferentes regiões, segundo diversos autores.

O tempo de trânsito cisalhante para uma determinada



litologia pode ser afetado: a) pela existência de fissuras; b) pela razão entre dimensões dos poros; c) pela anisotropia; d) pela quantidade de minerais que fazem parte da amostra; e) pela porosidade e razão entre dimensões dos grãos dos minerais.

O refinamento dos valores tabelados, através da substituição por valores próprios à área, permite maior aproximação dos resultados dos modelos desenvolvidos com o propósito de inferir as características das diversas formações atravessadas, sem a necessidade de analisar testemunhos continuamente, sendo bastante oneroso este último processo.

### 3.4 Critério adotado para escolha da área e dos poços analisados

A área escolhida foi a de Tubarão (Bacia de Santos), onde se dispunha de maior quantidade de dados relacionados às formações, dados estes úteis ao desenvolvimento deste estudo.

Uma outra razão para a escolha dessa área foi o sucesso recente obtido na utilização das brocas PDC e a diversidade de brocas testadas. O fato dos poços serem verticais, minimiza a possibilidade da retirada da coluna para troca da composição de fundo, como pode ocorrer em poços direcionais, evitando-se, com isto, que a broca saia do poço antes de atingir o final de sua vida útil. É conveniente a análise das brocas utilizadas somente uma vez, pois se considera o seu custo integral, estando refletido o seu desempenho, desde nova, até seu total desgaste. Outra vantagem de analisar-se o desempenho das brocas em poços verticais é o fato de, durante a sua utilização, ser

mínima a possibilidade de restrição da variação de parâmetros mecânicos, motivado por problema de controle de inclinação do poço, mesmo considerando os menores valores de peso-sobre-broca, utilizados em brocas PDC, quando comparado com brocas tricônicas.

Só foram consideradas brocas de PDC utilizadas nos últimos cinco anos, visando com isto contar com os mais recentes avanços obtidos nos projetos, no processo de fabricação das brocas e na tecnologia de diamantes policristalinos, pelo menos nas brocas disponíveis para análise.

Na Tabela 3.1 abaixo, é mostrado o topo das formações para os poços analisados na área de Tubarão (Bacia de Santos).

POÇOS		1-SPS-A	1-SPS-B	1-PRS-A	3-TB-A	3-TB-B
FORMAÇÕES						
MARAMBAIA		277	161	171	171	172
SANTOS		1941	2242	2450	2457	2435
ITAJAÍ		4101	3367	3426	3434	3429
GUARUJÁ	SUP	Não identificado	4875	4446	4483	4643
	INF		5172	4565	4640	4840

Tabela 3.1 Topo das formações, em metros, nos poços analisados na área de Tubarão (Bacia de Santos).

3.5 Verificação dos valores da razão  $\Delta T_s / \Delta T_c$  para a área em análise.

Em função das ponderações efetuadas no item anterior,

procurou-se determinar a razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para a área em estudo. Os valores de  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$  utilizados na determinação da razão foram obtidos do perfil SDT (sônico digital), que registra todo o conjunto de ondas gerado. Infelizmente, este perfil só foi utilizado frente à zona de interesse e próximo da mesma, nos dois únicos poços da área onde, até o momento, foram corridos este perfil. Caso este perfil fosse corrido ao longo de um poço, seria possível estabelecer a forma de variação para o local da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , para litologias que sofrem influência da composição, compactação, idade geológica, etc... como é o caso de folhelhos, em função de outras variáveis obtidas através de perfis. Todos os pontos disponíveis dos dois poços foram utilizados, metro a metro, para a determinação da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para a área. Como estes dados não fazem parte do arquivo de dados de perfis, obteve-se os tempos de trânsito das próprias fitas onde estes dados foram utilizados para estudos das características elásticas da zona produtora. Como nestas fitas não se dispunha da identificação litológica, foi necessário recorrer, simultaneamente, a esta fita e ao arquivo de perfis, para identificar-se a litologia correspondente às profundidades onde foram registrados o  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$ . Muito cuidado deve ser tomado ao recorrer-se aos dados dos perfis, já que pode haver uma defasagem nas profundidades dos mesmos. Esta defasagem poderia ter como consequência a distorção nos resultados da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , por associar-se uma litologia a certa profundidade, com leitura de perfil de outra litologia na mesma profundidade. Obteve-se resultados característicos para

as litologias de folhelho, calcarenito e calcissiltito, com dados disponíveis dos poços 1-PRS-A-PR e 3-TB-A-PRS. A razão obtida para siltito estava fora do "range" de variação da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , além de ter apresentado um baixo índice de correlação linear<sup>26</sup> e, por estes motivos, não foi utilizada. O comportamento do tempo de trânsito compressional e do tempo de trânsito cisalhante versus profundidade do poço 1-PRS-A-PR, é mostrado na Figura 3.2.

Nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 são mostradas as relações entre o tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para calcarenito, calcissiltito e folhelho, respectivamente. Os índices de correlação linear, obtidos entre os valores de  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$  para cada litologia analisada, são mostrados na Tabela 3.2, abaixo:

LITOLOGIA	ÍNDICE DE CORRELAÇÃO LINEAR
CALCARENITO	0.96
CALCISSILTITO	0.73
FOLHELHO	0.88

Tabela 3.2 índice de correlação linear entre valores de  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$ , em função da litologia.

Na Tabela 3.3 são comparados os valores da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  utilizados no trabalho do Mason e os valores médios obtidos para o campo de Tubarão (Bacia de Santos).

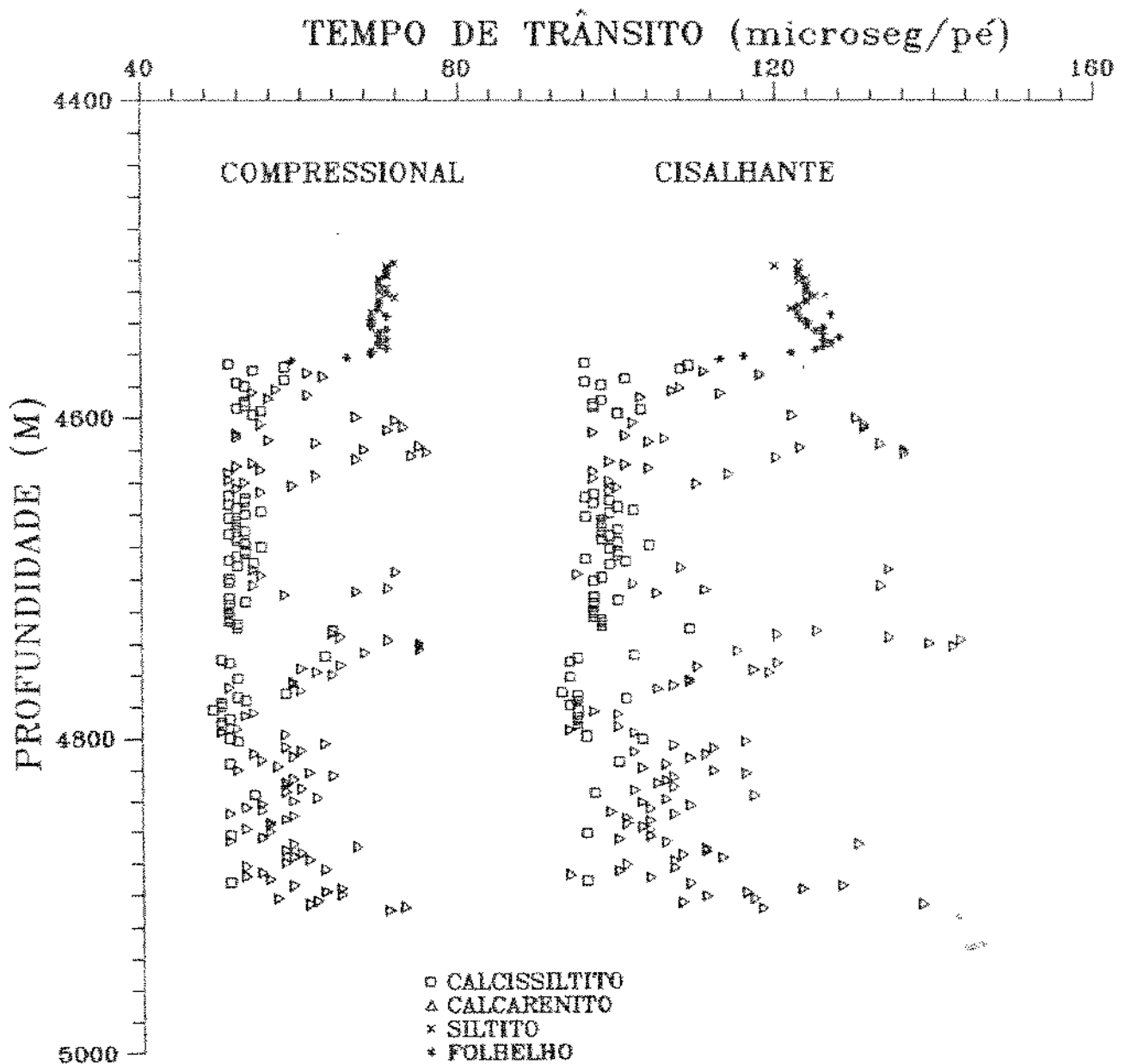


Figura 3.2 Comportamento do tempo de trânsito compressional e cisalhante versus profundidade para diferentes litologias no poço 1-PRS-A-PR.

## ÁREA DE TUBARÃO

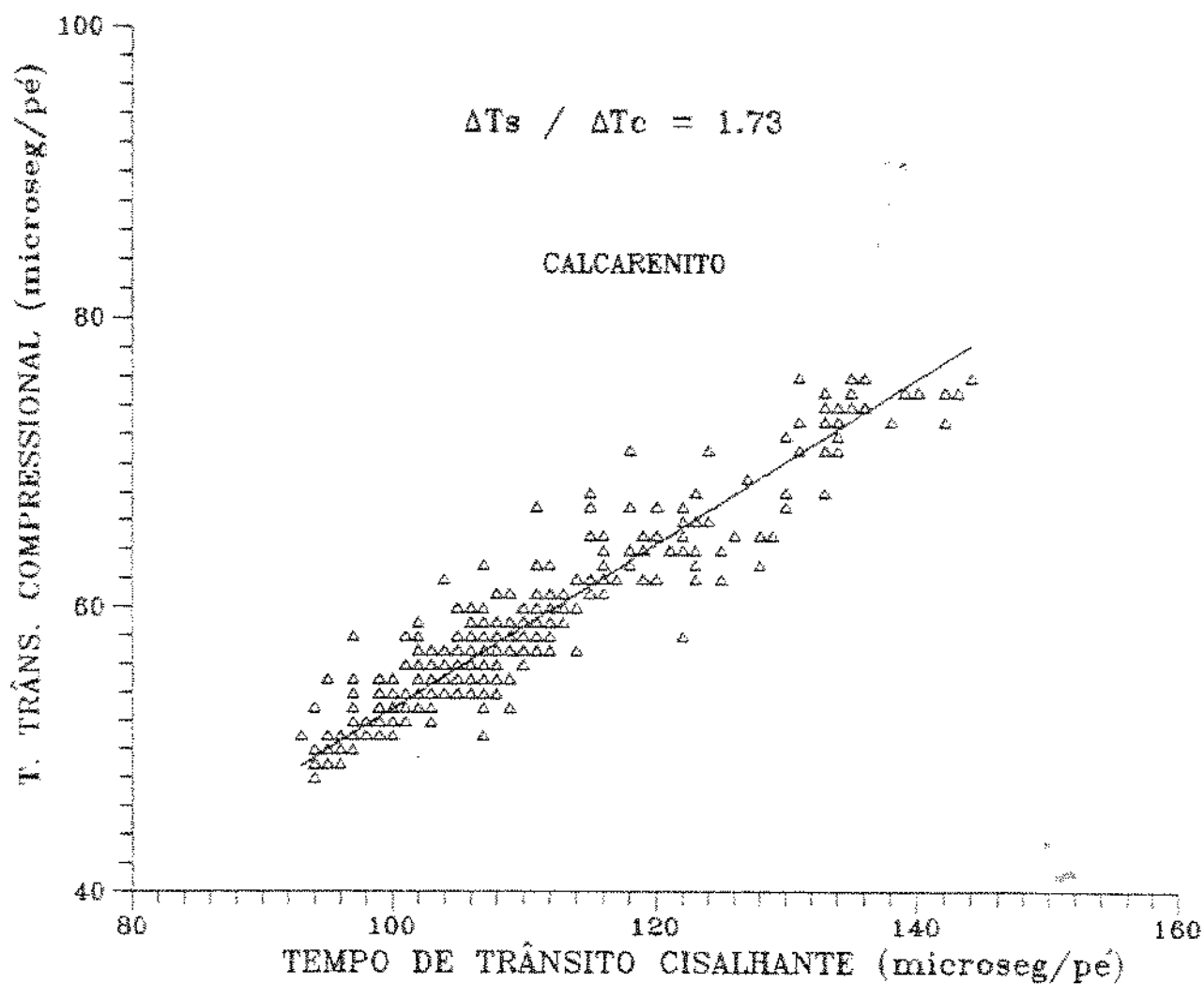


Figura 3.3 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para calcarenito, na área de Tubarão.

## ÁREA DE TUBARÃO

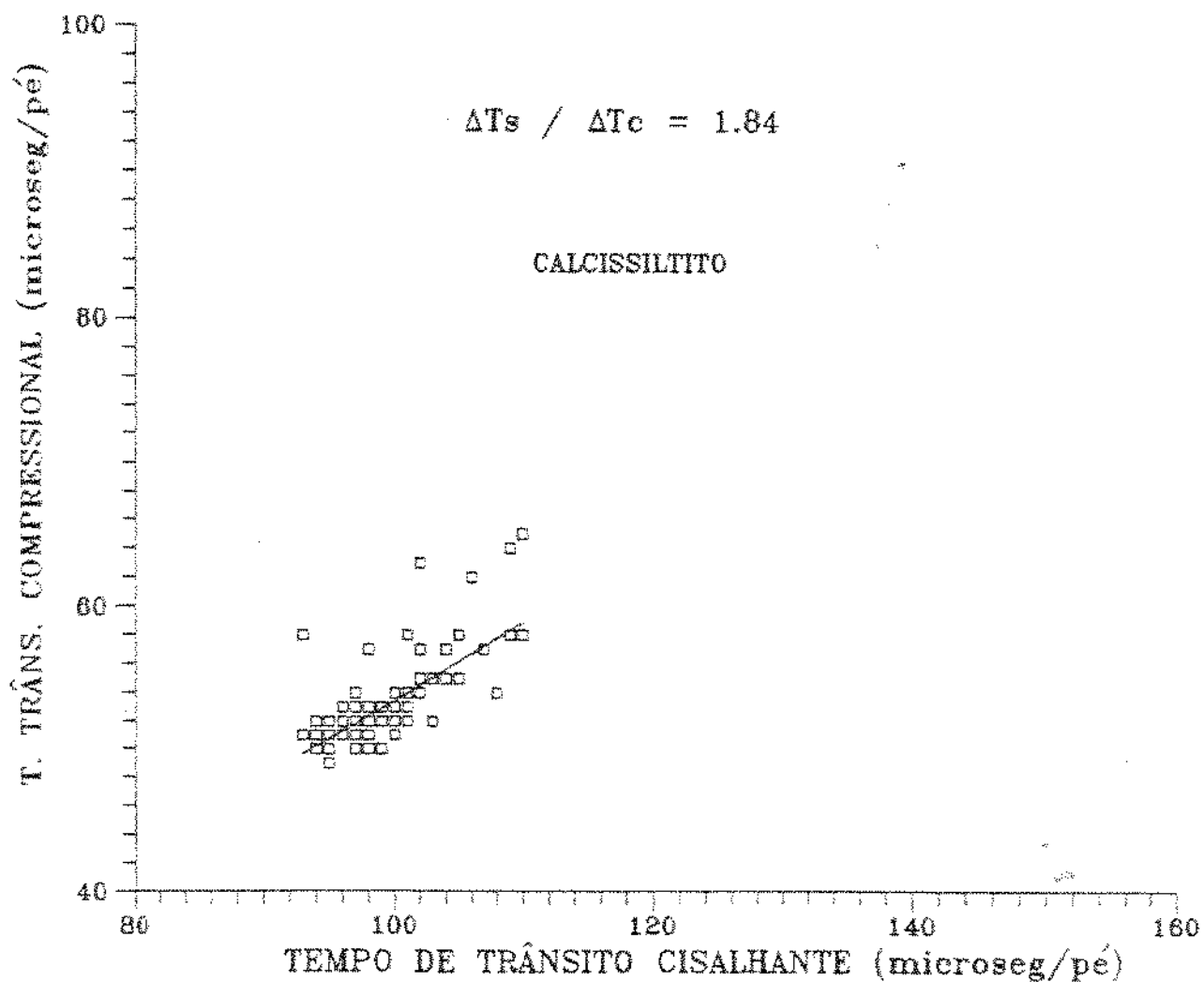


Figura 3.4 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para calcissiltito, na área de Tubarão.

## ÁREA DE TUBARÃO

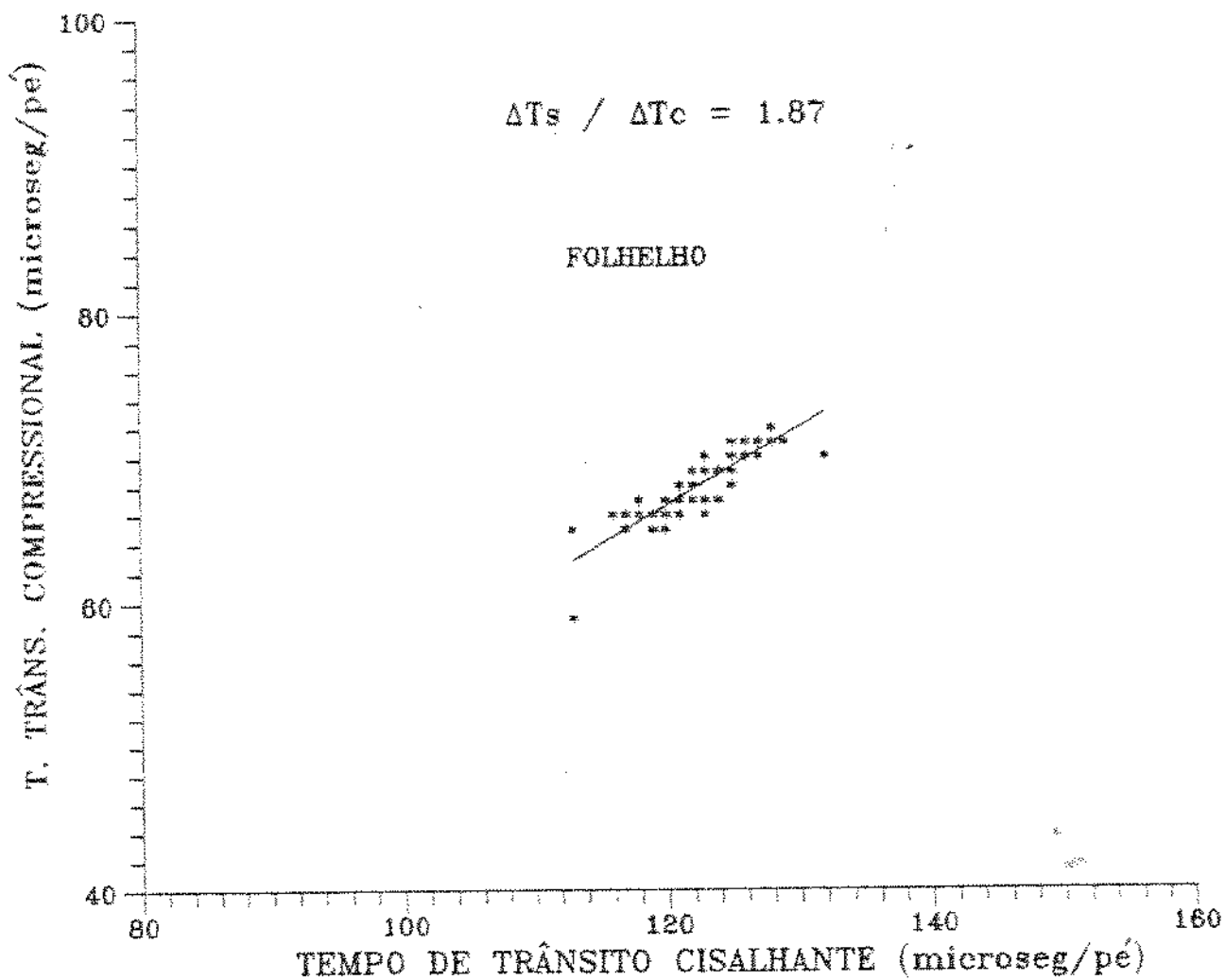


Figura 3.5 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, na área de Tubarão, PR.



RAZÃO $\Delta T_s/\Delta T_c$		
ÁREA	Blocker Field (Texas)	Tubarão (B. de Santos)
LITOLOGIA		
CALCARENITO	1.90-2.30	1.73
CALCISSILTITO	2.10	1.84
FOLHELHO	1.70-1.75	1.87

Tabela 3.3 Comparação dos valores de  $\Delta T_s/\Delta T_c$  encontrados para a área de Blocker Field (Texas) e de Tubarão (Bacia de Santos).

Os valores encontrados para a razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  nas rochas carbonáticas estão compatíveis com os publicados por Pickett.

O valor encontrado para folhelho foi também encontrado por Rundle et alii, segundo Frost.

### 3.6 Considerações a respeito do cálculo do tempo de trânsito cisalhante.

A equação (2.2) proposta por Frost para o cálculo de  $\Delta T_s/\Delta T_c$  requer o conhecimento do coeficiente de Poisson que, no caso de perfil, requer o conhecimento do tempo de trânsito cisalhante, que é a variável que nos interessa calcular, em último caso. Outra maneira de utilizar-se a expressão seria com o uso de dados de laboratório ou por métodos indiretos, tendo sido o último o empregado por Frost para verificar a validade da equação proposta.

As equações (2.3) e (2.4), também propostas por Frost, requerem informações nem sempre disponíveis, devido ao pouco uso de ferramentas para o registro do conjunto de ondas completo, ao longo de todo o poço.

A equação (2.10), obtida para a área da U.S. Gulf Coast para folhelhos, apresentou resultados compatíveis, em alguns pontos, aos obtidos para a área em estudo, no intervalo onde se dispunham de dados para comparação.

Como não foi possível a determinação da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para arenitos, devido a inexistência de informação de tempo de trânsito cisalhante frente a essa litologia, adotou-se o valor de 1.70, intermediário entre os valores encontrados por Pickett.

Sempre que possível, serão utilizados os valores determinados das razões  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para cada litologia da área em análise.

A partir do conhecimento da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  para uma dada litologia, utilizou-se a equação (2.14) para o cálculo do tempo de trânsito cisalhante. Os valores do fator de tamanho dos grãos ( $\alpha$ ) foram assumidos igual a 1.0. O efeito do tamanho dos grãos já está refletido na razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  calculada.

3.7 Comparação dos resultados da resistência à compressão da rocha, utilizando-se as expressões propostas por Mason e Onyia

Para a determinação da resistência à compressão das diversas litologias, utilizou-se a equação obtida do trabalho

de Mason e as expressões derivadas por Onyia.

Na equação (2.22), considerar-se-á água salgada contida nos poros, com tempo de trânsito de 189  $\mu$ seg/pé, constante ao longo do poço, já levando em consideração no cálculo do tempo de trânsito cisalhante as razões de  $\Delta T_s/\Delta T_c$ , determinadas para a área em análise.

Serão utilizadas as equações (2.20), (2.21), e (2.22) e será considerada como válida, para efeito de comparação, a utilização dos coeficientes determinados por Onyia para a área de Rogers County, Oklahoma, mostrados na Tabela 3.4 a seguir:

COEFICIENTES PARA ÁREA DE ROGERS COUNTY, OKLAHOMA	
COEFICIENTES	EQUAÇÃO
K1 = 10.7616	2.20
K2 = 7.9018	
K3 = -0.0187	
K4 = -2.0149	
K5 = -0.0383	
K6 = 5.15E-5	2.21
K7 = 23.8700	

Tabela 3.4 Coeficientes obtidos por Onyia para cálculo da resistência à compressão da rocha com dados de perfis.

Os valores calculados pela equação (2.20) só serão plotados quando a resistividade da formação for igual ou superior a 3.5 ohm-m. Os coeficientes da Tabela anterior foram calculados com

dados de resistividade superiores a 3.5 ohm-m.

Na Figura 3.6 são mostrados os resultados do cálculo da resistência à compressão para o poço 3-TB-A-PRS. As diferenças entre os valores calculados pelas equações (2.20), (2.21), e (2.22) podem ser explicadas, levando-se em conta que:

a) a equação (2.22) só é válida para valores de tempo de trânsito cisalhante iguais ou inferiores a 180  $\mu$ seg/pé. A utilização da equação (2.22) com valores de tempo de trânsito acima de 180  $\mu$ seg/pé resulta em valores muito baixos de resistência à compressão. A maiores profundidades, os valores fornecidos pela equação (2.22) aproximam-se dos valores fornecidos pelas equações (2.20) e (2.21);

b) Os valores de resistência à compressão utilizados por Mason foram obtidos através de ensaios à compressão simples, enquanto que os valores de resistência à compressão utilizados por Onyia foram obtidos através de dados de perfuração, com resultados próximos aos medidos em laboratório, em testes triaxiais, com pressão de confinamento igual ao efetivo diferencial de pressão atuando no fundo do poço.

c) Os coeficientes das equações (2.20) e (2.21) foram determinados através de regressão múltipla, conforme foi comentado no Capítulo 2, para a área de Rogers County, Oklahoma, que, provavelmente, apresenta características litológicas diferentes daquelas apresentadas pela litologia da área em análise.

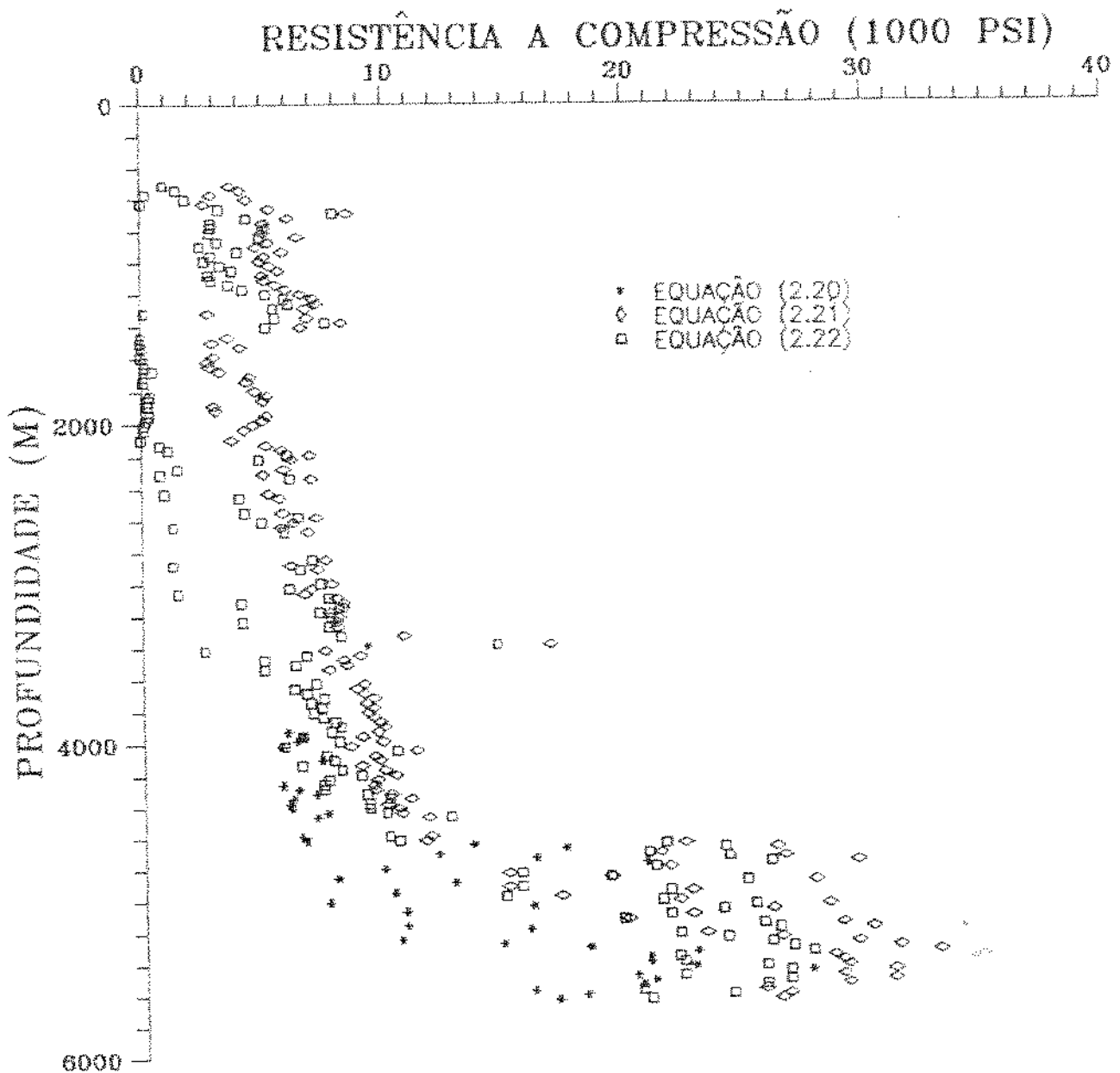


Figura 3.8 Comparação dos resultados de resistência à compressão, utilizando as equações derivadas de Mason e Onyia, para o poço 3-IB-A-PRS.

Pelo fato de não dispormos de dados de ductilidade ( $\epsilon$ ) das formações locais e das constantes de projeto (a, b, c e  $\Phi$ ) para cada código IADC de broca tricônica, não poderemos utilizar a equação (2.19), do modelo de Winters et alii, para cálculo da resistência à compressão da rocha e posteriormente ajustar as diversas constantes das equações (2.20) e (2.21) através de regressão múltipla. Por este motivo, serão utilizados os coeficientes determinados por Onyia e verificado sua validade com dados de campo.

O procedimento de se ajustar os coeficientes das equações para as condições locais é o mais adequado, devendo-se avaliar, posteriormente, os resultados fornecidos pelas equações através de dados de laboratório ou de métodos indiretos, quando possível.

### 3.8 Cálculo da resistência à compressão e ao cisalhamento.

Para o cálculo da resistência à compressão e da tensão de cisalhamento no plano de falha será utilizado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, cuja representação gráfica é mostrada na Figura 3.7 a seguir:

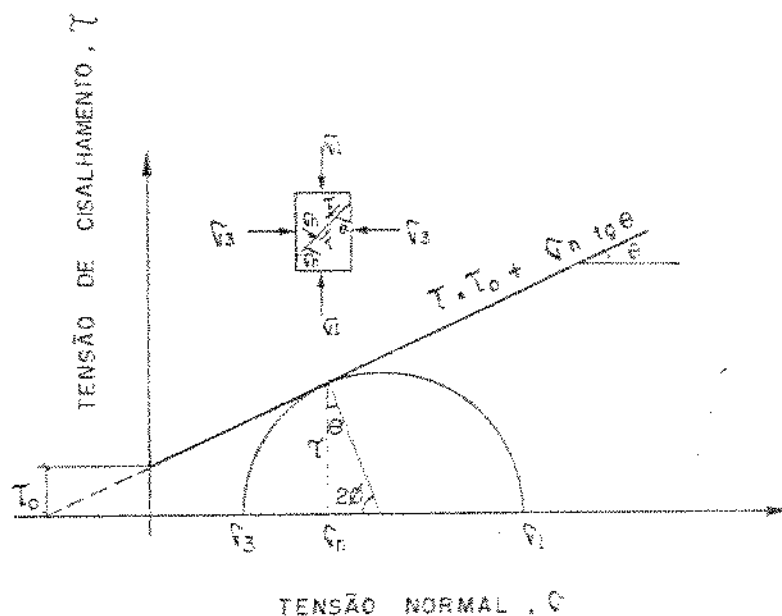


Figura 3.7 Representação gráfica do círculo de Mohr e da envoltória de ruptura.

onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento na ruptura (lb/pol<sup>2</sup>).

$\tau_0$  = resistência à coesão do material (lb/pol<sup>2</sup>).

$\sigma_n$  = tensão normal ao plano de falha (lb/pol<sup>2</sup>).

$\epsilon$  = ângulo de atrito interno.

O cálculo da tensão de cisalhamento inicial ou coesão interna do material é derivado de um modelo empírico, baseado no trabalho de Deere & Miller (1969) e elaborado por Coates & Denoo (1981)<sup>27</sup>. É feito da seguinte forma:

$$\tau_0 = \frac{0.025 E}{Cb \cdot 10^6} \left[ 0.008 V_{cl} + 0.0045 (1 - V_{cl}) \right] \quad (3.3)$$

onde:

$\tau_0$  = tensão de cisalhamento inicial (lb/pol<sup>2</sup>).

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

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

$V_{cl}$  = índice de argilosidade.

O módulo de elasticidade (E) será calculado com a seguinte expressão<sup>19</sup>:

$$E = \left[ \frac{\rho_b}{\Delta T_s^2} \right] \left[ \frac{3 \Delta T_s^2 - 4 \Delta T_c^2}{\Delta T_s^2 - \Delta T_c^2} \right] 1.34 \times 10^{10} \quad (3.4)$$

O módulo de compressibilidade (Cb) será calculado com a seguinte expressão<sup>19</sup>:

$$Cb = \left[ \rho_b \left( \frac{1}{\Delta T_c^2} - \frac{4}{3 \Delta T_s^2} \right) 1.34 \times 10^{10} \right]^{-1} \quad (3.5)$$

Nos trechos do poço onde não foi corrido o perfil de densidade, o cálculo da massa específica da amostra será feito da seguinte forma<sup>28</sup>:

Para  $\Delta T_c \geq 100$   $\mu$ seg/pé

$$\rho_b = 3.28 - \frac{\Delta T_c}{89.95} \quad (3.6)$$



Para  $\Delta T_c < 100 \mu\text{seg/pé}$

$$\rho_b = 2.75 - 2.11 \left[ \frac{(\Delta T_c - \Delta T_{ma})}{(\Delta T_c + \Delta T_{fl})} \right] \quad (3.7)$$

onde:

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

$\Delta T_c$  = tempo de trânsito compressional da amostra ( $\mu\text{seg/pé}$ ).

$\Delta T_{fl}$  = tempo de trânsito no fluido contido nos poros ( $\mu\text{seg/pé}$ ).

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

A fração do volume de argila é calculada frente à zona produtora, a cada intervalo de 20 cm, utilizando técnicas especiais de processamento de perfis. Os dados de perfis foram recuperados de metro em metro, e os resultados dos cálculos serão plotados a cada trinta metros. Será assumido, frente a arenitos, um valor médio para índice de argilosidade ( $V_{cl}$ ) igual a 0.20. Frente a folhelhos, margas, siltito e argilito, o valor de  $V_{cl}$  é igual a 1.0. Em rochas carbonáticas, o valor de  $V_{cl}$  varia, de zero a cinco por cento, motivo pelo qual será assumido um valor intermediário de 0.03.

O ângulo de atrito interno ( $\theta$ ), assume diversos valores, a depender da litologia, e são valores médios obtidos através de uma série de ensaios de laboratório<sup>29</sup>. A Schlumberger (empresa de serviços de perfilagem) considerava no perfil MechPro<sup>30</sup> um ângulo de atrito interno fixo, já embutido no programa, igual a  $30^\circ$ . Um novo perfil, denominado RocPro, utilizado no cálculo de

propriedades das rocha, permite a entrada de somente um único valor, para o ângulo de atrito interno.

O critério de ruptura de Mohr foi escolhido em função de ser prático, bem como ser o mais conhecido. O mesmo foi utilizado no perfil MechPro, sendo substituído pelo critério de Griffith, pois, o primeiro, fornece valores conservadores frente aos arenitos competentes, e se aproximam frente à formações pouco consolidadas<sup>30</sup>.

Assumindo uma envoltória de ruptura linear e sendo conhecido o ângulo de atrito interno para diversas litologias, bem como o valor de  $\tau_0$ , fornecido pela equação (3.3), pode-se calcular a resistência à compressão "in-situ" da rocha, conhecendo-se a sua pressão de confinamento. Para o cálculo da resistência à compressão da rocha será utilizada a equação (2.16), com a seguinte forma:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \left[ \frac{\tau_0 + \sigma_3 \tan \theta}{\cos \theta - \tan \theta + \sin \theta \tan \theta} \right] \quad (3.8)$$

onde:

$\sigma_1$  = resistência à compressão "in-situ" (lb/pol<sup>2</sup>).

$\sigma_3$  = pressão de confinamento atuando no fundo do poço (lb/pol<sup>2</sup>).

$\tau_0$  = tensão de cisalhamento inicial (lb/pol<sup>2</sup>).

$\theta$  = ângulo de atrito interno.

Adotou-se a tensão de compressão como positiva e considerou-se fluido não penetrante.

No cálculo da resistência à compressão, será considerada a pressão de confinamento igual ao diferencial de pressão atuando no fundo do poço ( $\Delta P$ ), isto é:

$$\sigma_s = \Delta P \quad (3.9)$$

O diferencial de pressão atuando no fundo do poço ( $\Delta P$ ) é calculado com a seguinte expressão:

$$\Delta P = P_w - P_p \quad (3.10)$$

onde:

$P_w$  = pressão exercida pelo fluido de perfuração no fundo do poço ( $\text{lb/pol}^2$ ).

$P_p$  = pressão de poros da formação existente no fundo do poço ( $\text{lb/pol}^2$ ).

Sendo conhecida a resistência à compressão da rocha, para determinada pressão de confinamento, pode-se calcular a tensão de cisalhamento atuando no plano de falha, quando da ruptura da rocha.

Conforme comentado no Capítulo 1, as brocas PDC foram projetadas para perfurar, principalmente, pelo mecanismo de raspagem. A forma de atuação dessas brocas no fundo do poço, o plano de falha, as tensões atuantes e orientação das mesmas, consideradas nesse estudo, estão representados, de forma esquemática, na Figura 3.8, a seguir.

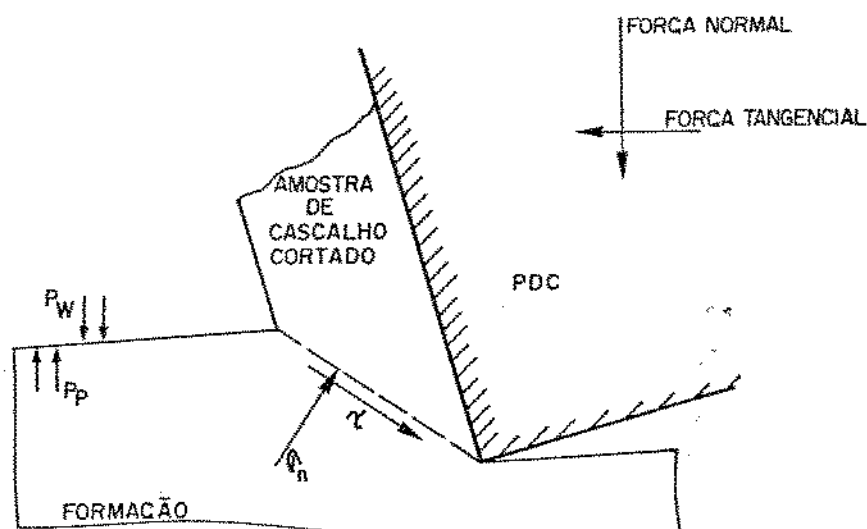


Figura 3.8 Representação esquemática da forma de atuação das brocas PDC e das tensões atuando no fundo do poço, consideradas neste estudo.

A Figura 3.9 mostra o círculo de Mohr com os valores conhecidos de pressão de confinamento ( $\sigma_3$ ), tensão de ruptura à compressão da rocha ( $\sigma_1$ ), calculada pela equação (3.8), e a envoltória de Mohr-Coulomb. Conhecido os valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  e  $\theta$ , determina-se o valor da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ), atuando no plano de falha, com a seguinte expressão:

$$\tau = \left[ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right] \cos \theta \quad (3.11)$$

onde:

$\tau$  = tensão de cisalhamento no plano de falha (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>).

$\theta$  = ângulo de atrito interno da rocha.

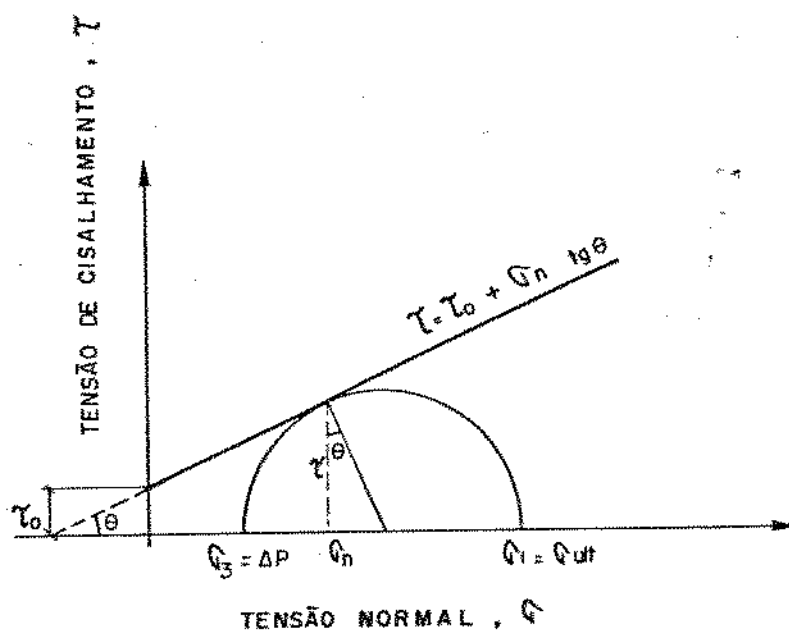


Figura 3.9 Círculo de Mohr com os valores conhecidos de pressão de confinamento ( $\sigma_3$ ), tensão de ruptura à compressão ( $\sigma_1$ ) e envoltória de Mohr-Coulomb.

Assumiu-se um valor igual a 500 lb/pol<sup>2</sup> para diferencial de pressão atuando no fundo do poço, durante a perfuração.

### 3.9 Resumo do método de escolha de broca.

Com o objetivo de facilitar a compreensão do método, será apresentado, a seguir, um roteiro, com as diversas etapas necessárias à aplicação do mesmo:

- a) Consultar o arquivo de perfis para identificar as litologias perfuradas.

b) Com o auxílio de perfis que registram o tempo de trânsito compressional e cisalhante, determinar expressões e/ou constantes para estimativa do tempo de trânsito cisalhante, específicos para a área em análise, ao longo de todo o poço, em função de dados de perfis.

c) Calcular a tensão de cisalhamento inicial  $\tau_0$  (equação 3.3). São necessários os seguintes parâmetros:

c.1) Tempo de trânsito compressional- obtido do arquivo de dados de perfis;

c.2) Tempo de trânsito cisalhante- calculado com as expressões obtidas no item b) acima e/ou com a equação (2.14);

c.3) Índice de argilosidade- assumidos seguintes valores: 0.2 para arenitos, 0.03 para rochas carbonáticas e 1.0 para folhelhos e argilas;

c.4) Tempo de trânsito na matriz da rocha- assumido valores normalmente utilizados em perfilagem, ref. [30].

c.5) Tempo de trânsito no fluido contido nos poros- assumido 189  $\mu\text{seg}/\text{pé}$ , correspondente ao tempo de trânsito na água do mar;

c.6) Massa específica da amostra- obtido do arquivo de perfis ou estimados através das equações (3.6) e (3.7);

c.7) Módulo de elasticidade- calculado com a equação (3.4);

c.8) Módulo de compressibilidade- calculado com a

equação (3.5);

d) Assumir valores médios de ângulo de atrito interno apresentados na ref. [29]

e) Estimar diferencial de pressão atuando no fundo do poço (pressão de confinamento), através da equação (3.10).

f) Calcular a resistência à compressão da rocha, através da equação (3.8).

g) Calcular a resistência ao cisalhamento, no plano de falha assumido, através da equação (3.11).

h) Calcular o custo por metro perfurado pela broca, através da equação (2.15). Informações necessárias:

h.1) Custo da broca- obtido da tabela de preços do fabricante;

h.2) Custo horário da sonda- valor mais representativo para as sondas da área em análise;

h.3) Metragem perfurada pela broca- obtida do arquivo com dados do boletim diário de perfuração ou do arquivo com dados de "mud-logging";

h.4) Tempo de broca fundo- obtido do arquivo com dados do boletim diário de perfuração ou do arquivo com dados de "mud-logging";

h.5) Tempo de manobra- estimado através da equação (3.1).

i) Calcular a profundidade média de utilização de cada broca, através da equação (3.2). Informações necessárias:

i.1) Profundidades de entrada ou saída das brocas,

obtidas do arquivo com dados do boletim diário de perfuração ou do arquivo com dados de "mud-logging".

j) Utilizando a Figura 2.3, estabelecer intervalos de melhor utilização de brocas tricônicas, identificados através do código IADC, em função do valor assumido para tempo de trânsito no fluido contido nos poros.

k) Colocar em forma de gráfico, os seguintes parâmetros:

k.1) Custo por metro x profundidade média em que cada broca foi utilizada, identificando as mesmas;

k.2) Tempo de trânsito compressional x profundidade;

k.3) Tempo de trânsito cisalhante x profundidade, com linhas verticais indicando os locais de utilização de brocas tricônicas, identificados através do código IADC;

k.4) Resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os locais de utilização de brocas tricônicas, identificados pelos códigos IADC;

k.5) Resistência ao cisalhamento x profundidade medida.

#### Análise das brocas tricônicas

l) Comparar as brocas tricônicas utilizadas e sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e/ou resistência à compressão, e verificar validade do método, na área em análise.

m) Propor um programa de brocas tricônicas para o próximo poço a ser perfurado e acompanhar o desempenho das brocas



sugeridas.

#### Análise das brocas PDC

n) Identificar os intervalos de resistência ao cisalhamento onde determinados tipos de brocas PDC apresentaram menores custos por metro perfurado.

o) Na falta de dados de campo sobre utilização de brocas PDC, proceder com a análise da maneira sugerida para brocas tricônicas e utilizar os quadros 2.4 e 2.4A ou outros equivalentes, para escolha da broca PDC.

#### 3.10 Análise dos gráficos.

A forma adotada, para a análise simultânea dos diversos parâmetros utilizados no método associativo de escolha de brocas, foi a mostrada na Figura 3.10. Esta forma de apresentação permite identificar as brocas que apresentaram os menores custos por metro perfurado, em um determinado intervalo, e associar o desempenho das mesmas às características das formações perfuradas, através da análise simultânea dos diversos parâmetros. À medida que forem surgindo novos métodos de escolha de brocas, baseado nas características das formações geológicas, os mesmos podem ser incorporados, junto aos já apresentados, na forma de um instrumento útil e de fácil aplicação na escolha de brocas. Este procedimento também pode ser útil na verificação da coerência das brocas sugeridas por diferentes métodos, e na escolha daquele que estiver fornecendo melhores resultados para a área em análise, isto é,

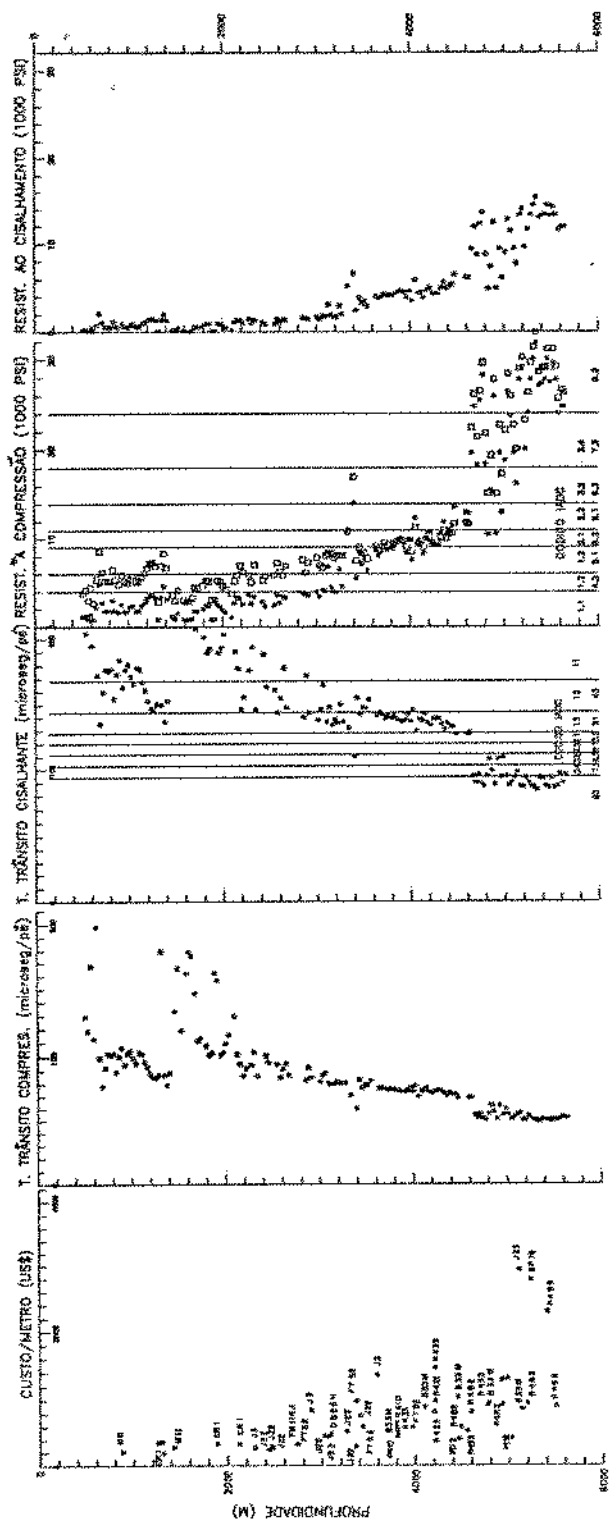


Figura 3.10 Forma adotada para análise simultânea dos diversos parâmetros utilizados no método associativo de escolha de brocas.

sugerindo brocas que apresentam os melhores rendimentos quando empregadas no campo.

Nas análises feitas a seguir, procedeu-se da maneira comentada acima. Para que não ficasse sacrificada a apresentação dos diversos parâmetros, desmembrou-se o gráfico em duas partes. A primeira, contendo o custo por metro, tempo de trânsito compressional e tempo de trânsito cisalhante versus profundidade, com os intervalos mais viáveis, segundo Mason, à utilização de determinado tipo de broca tricônica (código IADC). A segunda, contendo o custo por metro, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento estimadas versus profundidade, com as linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis, segundo Mason, à utilização de determinado tipo de broca tricônica.

## CAPÍTULO 4

## APLICAÇÃO DO MÉTODO

## 4.1 Análise de sensibilidade.

Com o objetivo de verificar-se o grau de influência que diversas variáveis calculadas ou assumidas exerciam no resultado final deste estudo, efetuou-se uma análise de sensibilidade à variação dos diversos parâmetros. Foram utilizadas as seguintes variáveis nesta análise: a) tempo de trânsito no fluido contido nos poros; b) massa específica da amostra da formação; c) ângulo de atrito interno para diversas litologias ; d) tempo de trânsito cisalhante da formação; e) coesão interna da formação; e f) diferencial de pressão atuando no fundo do poço. Escolheu-se para a apresentação dos resultados da análise o poço 3-TB-A-PRS, apesar de terem sido observadas as mesmas variações em todos os outros poços analisados.

Na análise de sensibilidade da resistência à compressão, utilizou-se a equação (3.8). O cálculo da resistência ao cisalhamento foi feito utilizando-se a equação (3.11).

Foi feita a análise da variação de cada parâmetro individualmente, isto é, quando analisou-se a sensibilidade à variação de cada parâmetro, as demais variáveis assumidas,

medidas e/ou estimadas, apresentavam os valores que normalmente seriam considerados neste estudo, caso não se estivesse procedendo a uma análise de sensibilidade.

Os pontos com \* e □ representam, respectivamente, o menor e o maior valor assumido para cada parâmetro, levados em consideração nesta análise.

As linhas verticais que aparecem nos gráficos de tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão representam os intervalos mais viáveis a aplicação dos diversos tipos de brocas tricônicas, identificadas pelos respectivos códigos IADC, obtidas da Figura 2.3 que, segundo Mason, é de aplicação universal.

A seguir, serão mostradas as figuras correspondentes à cada um dos parâmetros acima citados, com os correspondentes valores extremos, levados em consideração nesta análise.

A Figura 4.1 mostra o comportamento das resistências à compressão e ao cisalhamento, estimadas com o uso da equação (3.8), quando considerou-se o tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208  $\mu\text{seg}/\text{pé}$ . A resistência à compressão estimada pela equação (3.8), e a resistência ao cisalhamento, não mostraram-se sensíveis à variação, dentro dos limites considerados do tempo de trânsito no fluido contido nos poros. A resistência à compressão é utilizada no cálculo da resistência ao cisalhamento.

A Figura 4.2 mostra o comportamento da resistência à

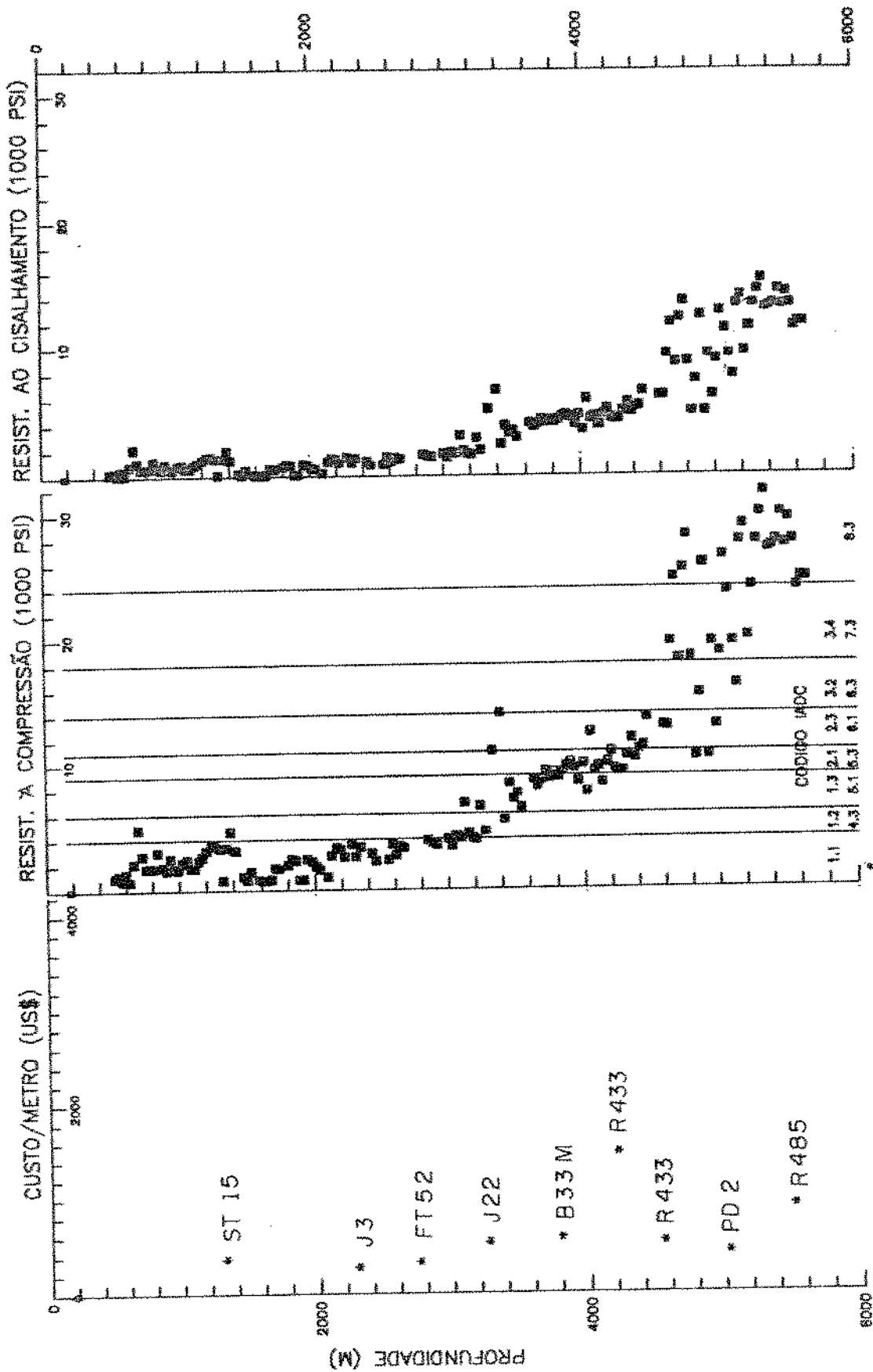


Figura 4.1. Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208 microseg/pé, utilizando a equação (3.8), no poço 3-TB-A-PRS.

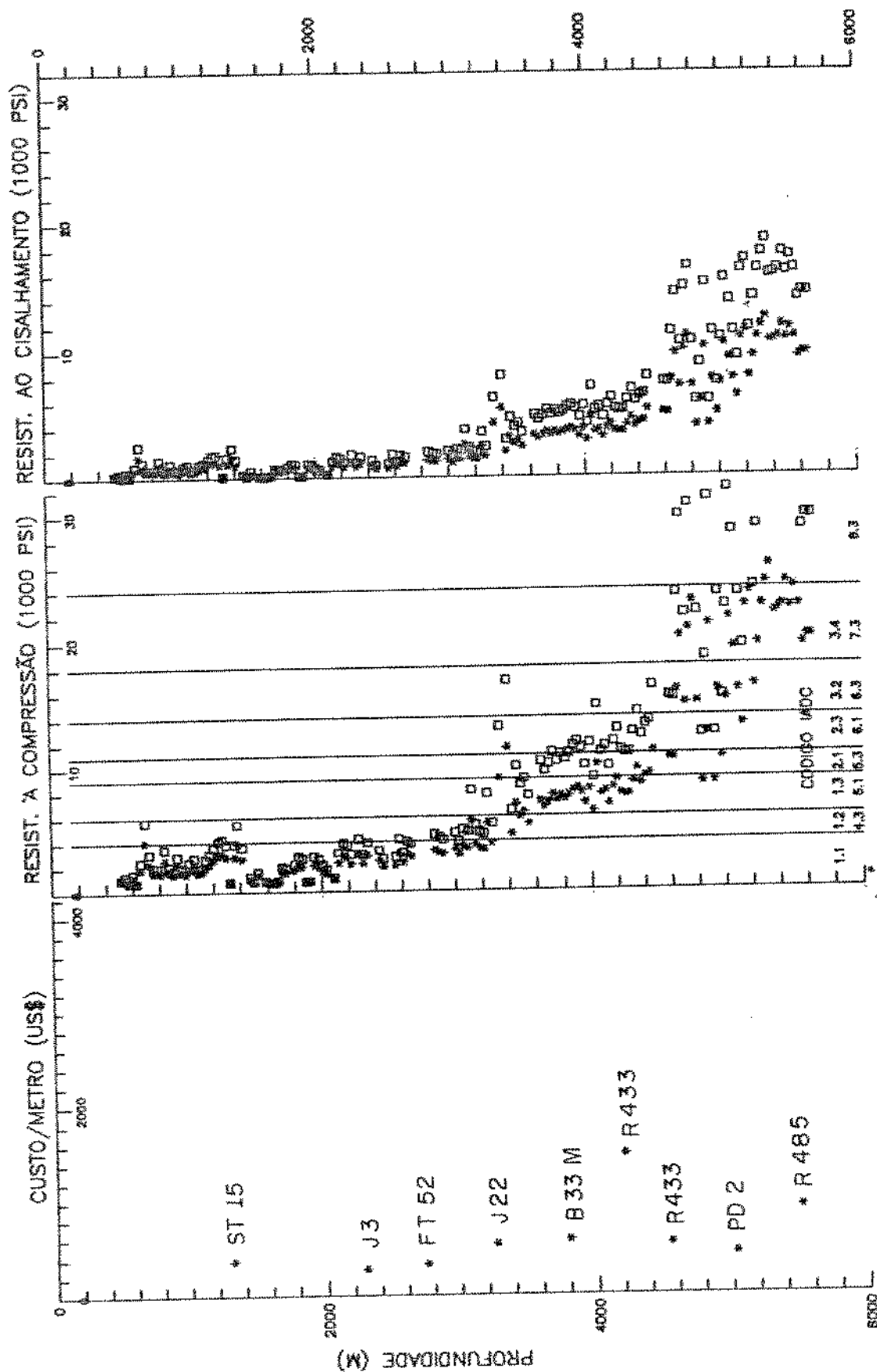


Figura 4.2 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da forma-  
 são para massa específica da amostra variando de  $-/+ 10\%$  em relação  
 ao valor estimado/medido da mesma, utilizando a equação (3.8), no peso  
 3-TB-A-PRS.

compressão e ao cisalhamento, estimadas com o uso da equação (3.8), considerando-se a massa específica da amostra 10 % menor e 10 % maior, do que os valores estimados e/ou medidos através de perfis.

A resistência à compressão, estimada pela equação (3.8), mostrou-se sensível à variação da massa específica da formação, já que a última afeta o cálculo do módulo de elasticidade (equação 3.4) e o cálculo do módulo de compressibilidade (equação 3.5), valores estes utilizados na equação (3.3), podendo até mesmo resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

A resistência ao cisalhamento também mostrou-se sensível à variação da massa específica da formação, de forma menos acentuada que o observado na resistência à compressão.

A Figura 4.3 mostra o comportamento das resistências à compressão e ao cisalhamento estimadas, quando utiliza-se valor de ângulo de atrito interno inferior e superior a 10 %, com relação à média adotada para as litologias em uso, empregando a equação (3.8). A resistência à compressão mostrou-se sensível à variação do ângulo de atrito interno, podendo até mesmo resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

A resistência ao cisalhamento estimada também mostrou-se sensível, em menor escala, quando comparada com a resistência à compressão, à variação dos ângulos de atrito interno, de acordo com os valores utilizados.



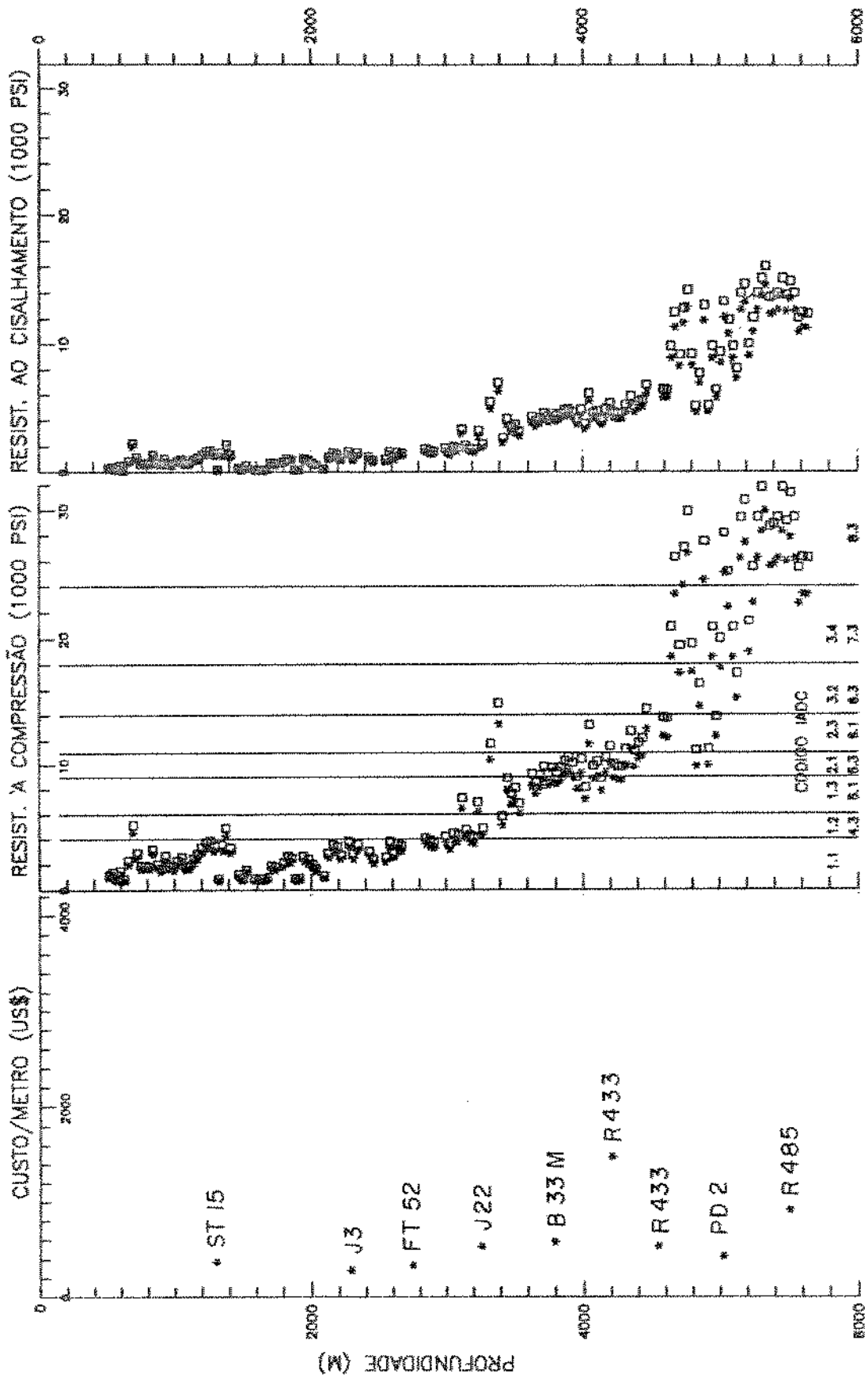


Figura 4.3 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para ângulo de atrito interno variando de -/+ 10 graus em relação a média adotada para cada litologia, utilizando a equação (3.6), no poço 3-1B-A-PRS.

A Figura 4.4 mostra o comportamento das resistências à compressão e ao cisalhamento estimadas, para tempo de trânsito cisalhante da formação, variando de mais 10 % e menos 10%, em relação ao valor estimado do mesmo, quando se utiliza a equação (3.8).

A resistência à compressão mostrou-se sensível à variação do tempo de trânsito cisalhante da formação.

A resistência ao cisalhamento também mostrou-se sensível, com menor intensidade, em relação a resistência à compressão, à variação do tempo de trânsito cisalhante, quando calculada com a equação (3.8).

A Figura 4.5 mostra o comportamento do tempo de trânsito cisalhante com valores variando de menos 10 % e mais 10 %, em relação ao valor estimado do mesmo, e as brocas sugeridas (código IADC), para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208  $\mu\text{seg}/\text{pé}$ .

A Figura 4.6 mostra o comportamento do tempo de trânsito cisalhante estimado e as sugestões de brocas (código IADC), para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 178 e 208  $\mu\text{seg}/\text{pé}$ .

A Figura 4.7 mostra o comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento para o valor da resistência ao cisalhamento inicial, variando de menos 10 % e mais 10 %, em relação ao valor estimado da mesma, com o uso da equação (3.8). A resistência à compressão mostrou-se sensível à variação do

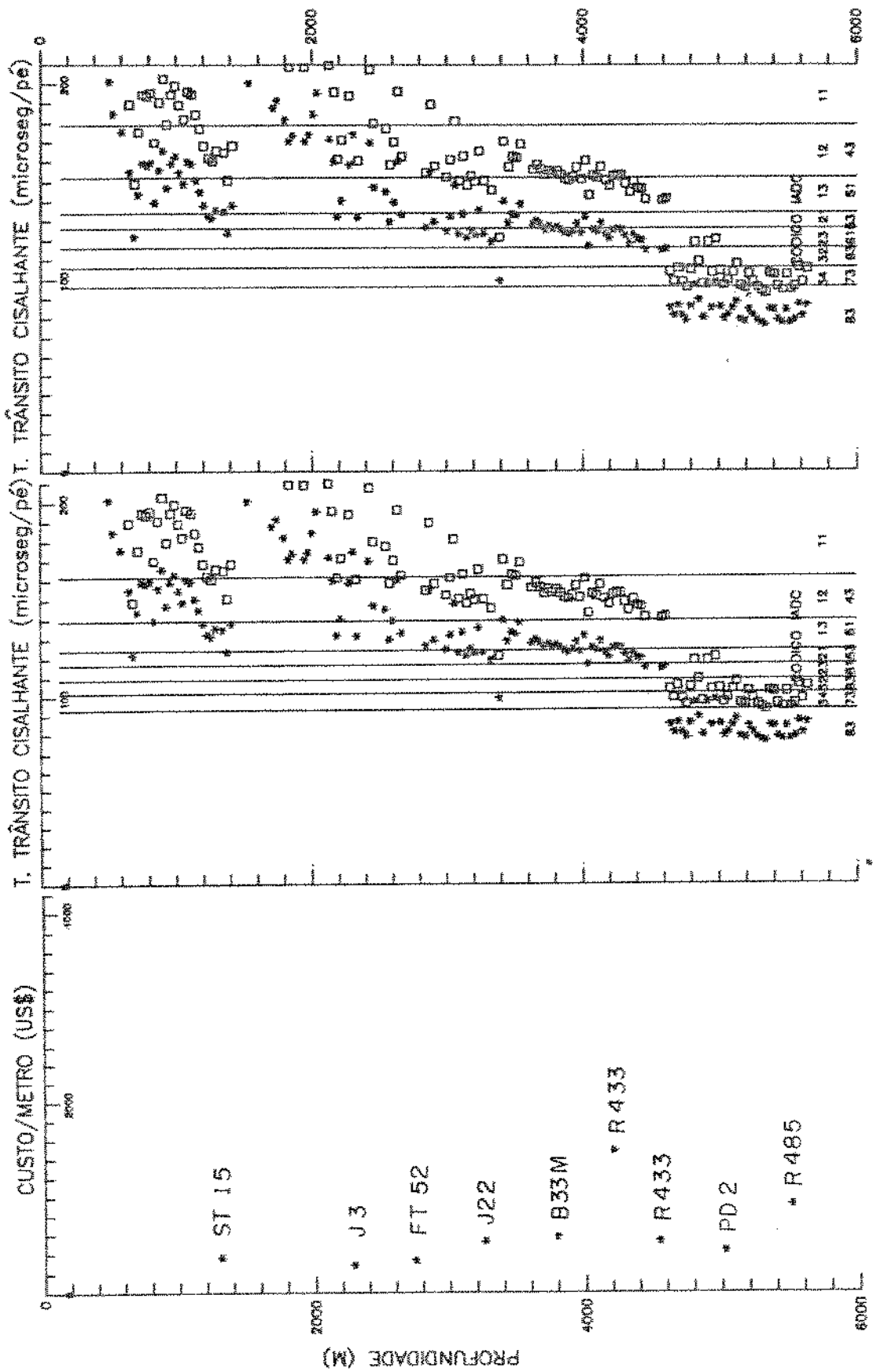


Figura 4.5 Comparação dos intervalos sugeridos para uso de diversos tipos de broca, para tempo de trânsito cisalhante variando de  $-/+ 10\%$  em relação ao valor estimado do mesmo, considerando tempo de trânsito no fluido dos poros de 178 e 208 microseg/pé, no poço 3-TB-A-PRS

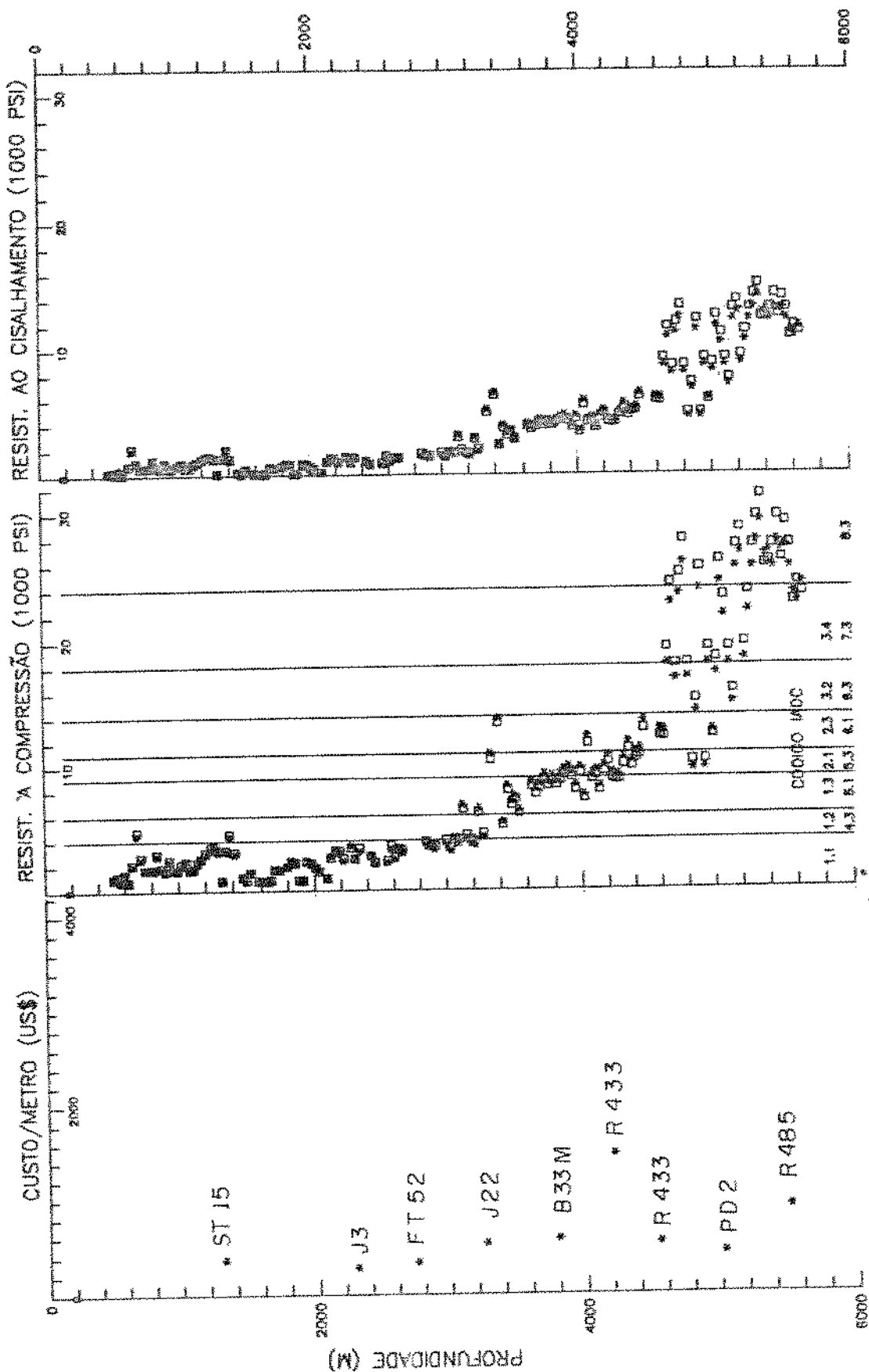


Figura 4.4 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tempo de trânsito cisalhante variando de +/- 10% em relação ao valor estimado do mesmo, utilizando a equação (3.8), no peso 3-TB-A-PRS.

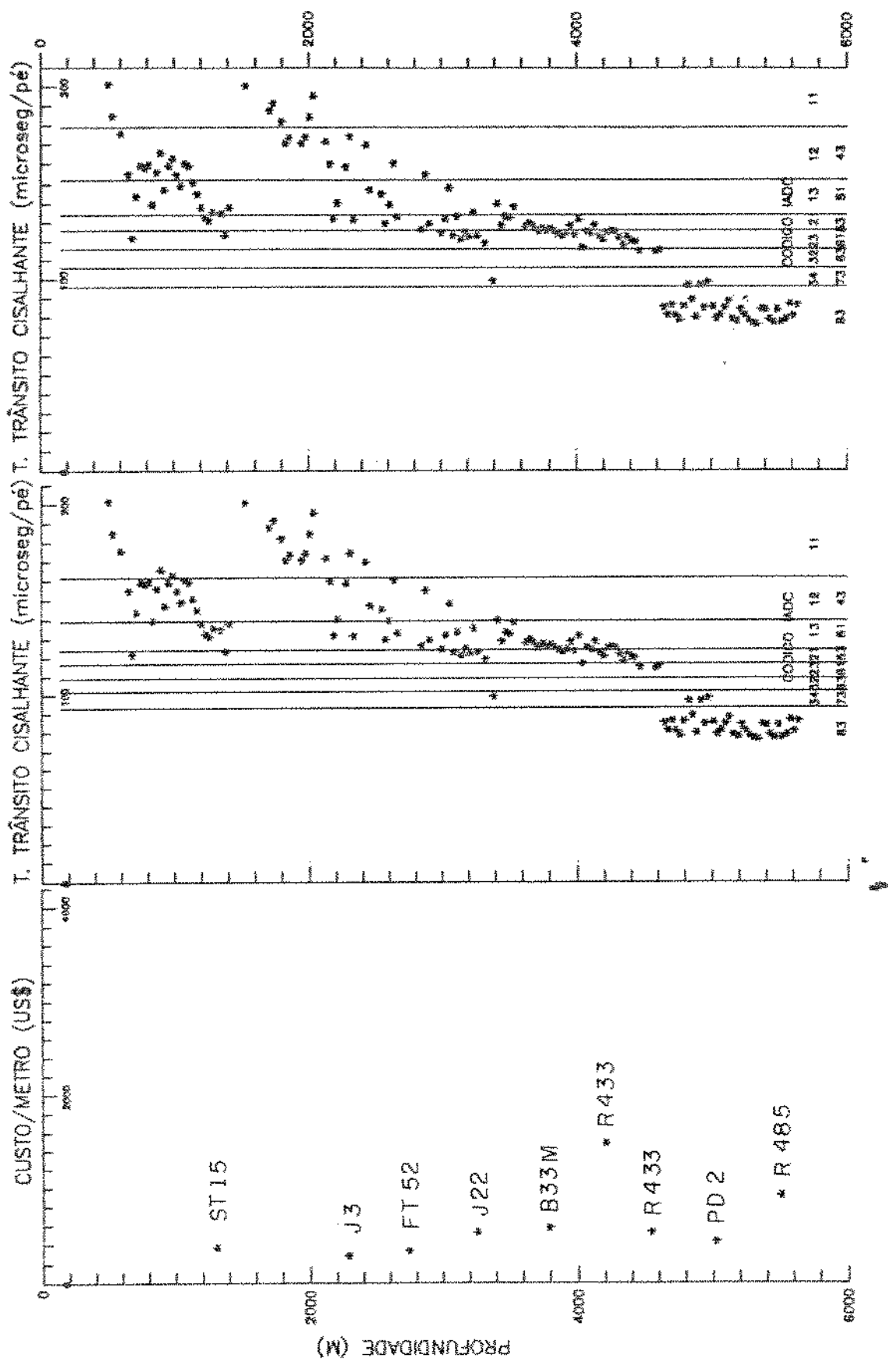


Figura 4.6 Comparação dos intervalos sugeridos para uso de diversos tipos de broca em função do código ADC, para tempo de trânsito no fluido sentido nos poros de 178 e 208 microseg/pé, no poço 3-1B-A-PRS.

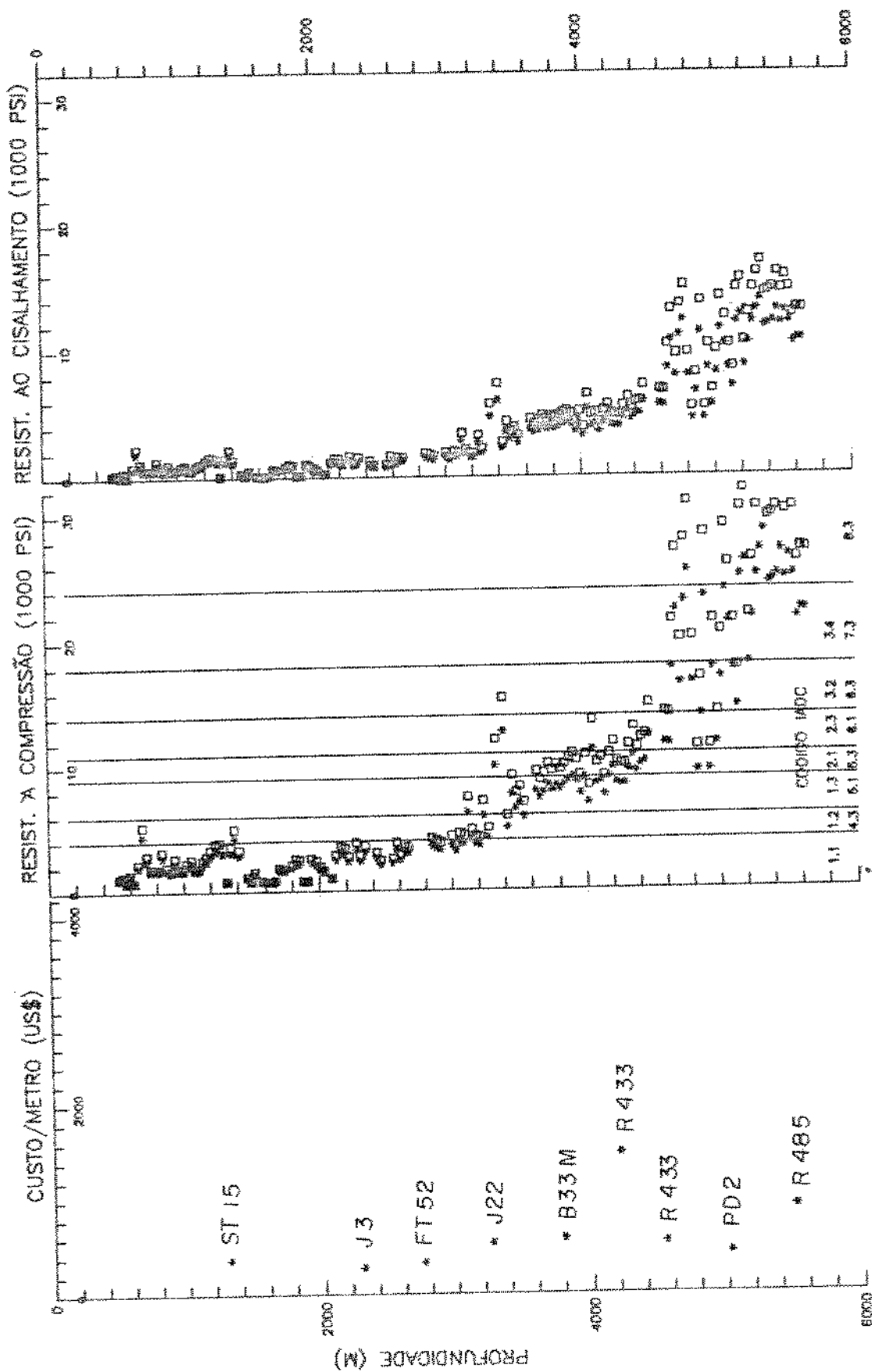


Figura 4.7 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para tensão de cisalhamento inicial variando de  $-10\%$  a  $+10\%$  em relação ao valor estimado da mesma, utilizando a equação (3.8), no caso 3-TB-A-PRS.

valor da resistência ao cisalhamento inicial, já que a última afeta diretamente os resultados da equação (3.8), podendo até mesmo resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

A resistência ao cisalhamento também mostrou-se sensível à alteração dos valores de resistência ao cisalhamento inicial, como era de se esperar, já que o último corresponde ao coeficiente linear da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Figura 4.8 mostra o comportamento das resistências à compressão e ao cisalhamento estimadas com a equação (3.8), quando se utiliza diferencial de pressão atuando no fundo do poço, durante a perfuração, de 0 e 1000 lb/pol<sup>2</sup>.

A resistência à compressão mostrou-se sensível à variação do diferencial de pressão atuando no fundo do poço, podendo até mesmo resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

A variação observada na resistência ao cisalhamento foi menor do que a variação observada na resistência à compressão.

4.2 Comparação dos tipos de brocas sugeridas com o uso do tempo de trânsito cisalhante e da resistência à compressão estimadas.

Como já havia sido comentado no Capítulo 3, a resistência à compressão estimada, utilizando-se a equação (2.21) , fornece

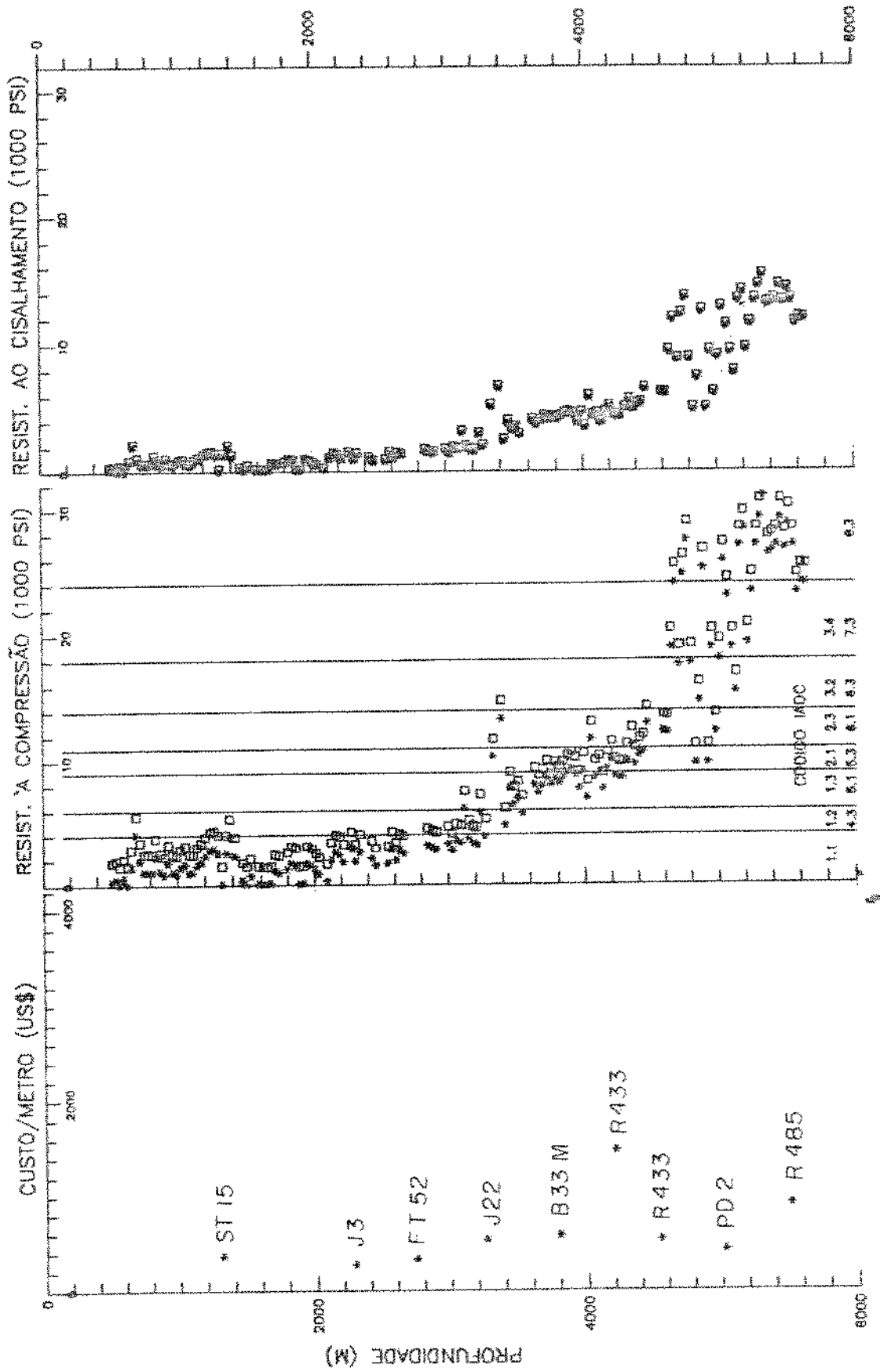


Figura 4.8 Comportamento da resistência à compressão e ao cisalhamento da formação para diferencial de pressão atuando no fundo do poço, de 0 e 1000 lb/pol<sup>2</sup>, utilizando a equação (3.8), no poço 3-1B-A-PRS.



valores mais altos que os calculados com a equação (2.22) obtida do trabalho de Mason, em quase todos os pontos. Como utilizaremos o tempo de trânsito cisalhante para escolhermos o tipo de broca mais indicado, segundo limites propostos por Mason, não utilizaremos a equação (2.22), já que, dentro de limites práticos, os resultados serão os mesmos, com menores aproximações, em parte decorrentes do uso da mesma. Pelo fato da equação (2.22) fornecer valores mais baixos de resistência à compressão do que a equação (2.21), o tipo de broca sugerido pela primeira tende a ser mais indicada para as formações menos resistentes do que as recomendadas com o uso da equação (2.21).

Os valores de resistência à compressão, estimados com a equação (2.21), foram maiores, na maioria dos casos, do que os valores calculados com a equação (3.8). A maiores profundidades, os resultados aproximam-se, chegando até a coincidir, em alguns poços, considerando os valores estimados e/ou assumidos ao longo deste estudo.

Nos itens seguintes, sempre que for citada a resistência à compressão, estaremos nos referindo aos valores calculados com o emprego da equação (3.8), ficando os resultados calculados com a equação (2.21) e plotados junto aos resultados da equação (3.8) apenas como referência.

Esses resultados foram observados em todos os poços analisados neste estudo.

#### 4.3 Análise dos resultados referentes às brocas tricônicas para a área de Tubarão, Bacia de Santos.

##### 4.3.1 Poço 1-PRS-A-PR.

A Figura 4.9 mostra o custo por metro x profundidade média, das brocas utilizadas no poço 1-PRS-A-PR, e o tempo de trânsito cisalhante estimado da formação x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificadas através do código IADC.

A Figura 4.10 mostra o custo por metro versus profundidade média, das brocas utilizadas no poço 1-PRS-A-PR e a resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificados através do código IADC.

A primeira broca tricônica, código IADC 5.1.7 (J22), utilizada a partir da profundidade onde se dispunha de informações de perfis (2100 m), está em desacordo com o recomendado, quando utilizamos o tempo de trânsito cisalhante como parâmetro de escolha do tipo de broca. A broca recomendada neste caso é a de código IADC 1.2 ou 4.3. Quando utilizamos a resistência à compressão como o parâmetro para a escolha do tipo de broca, o recomendado situa-se entre uma broca com código IADC 1.1 e IADC 1.3 ou 5.1, tendo sido a última opção a

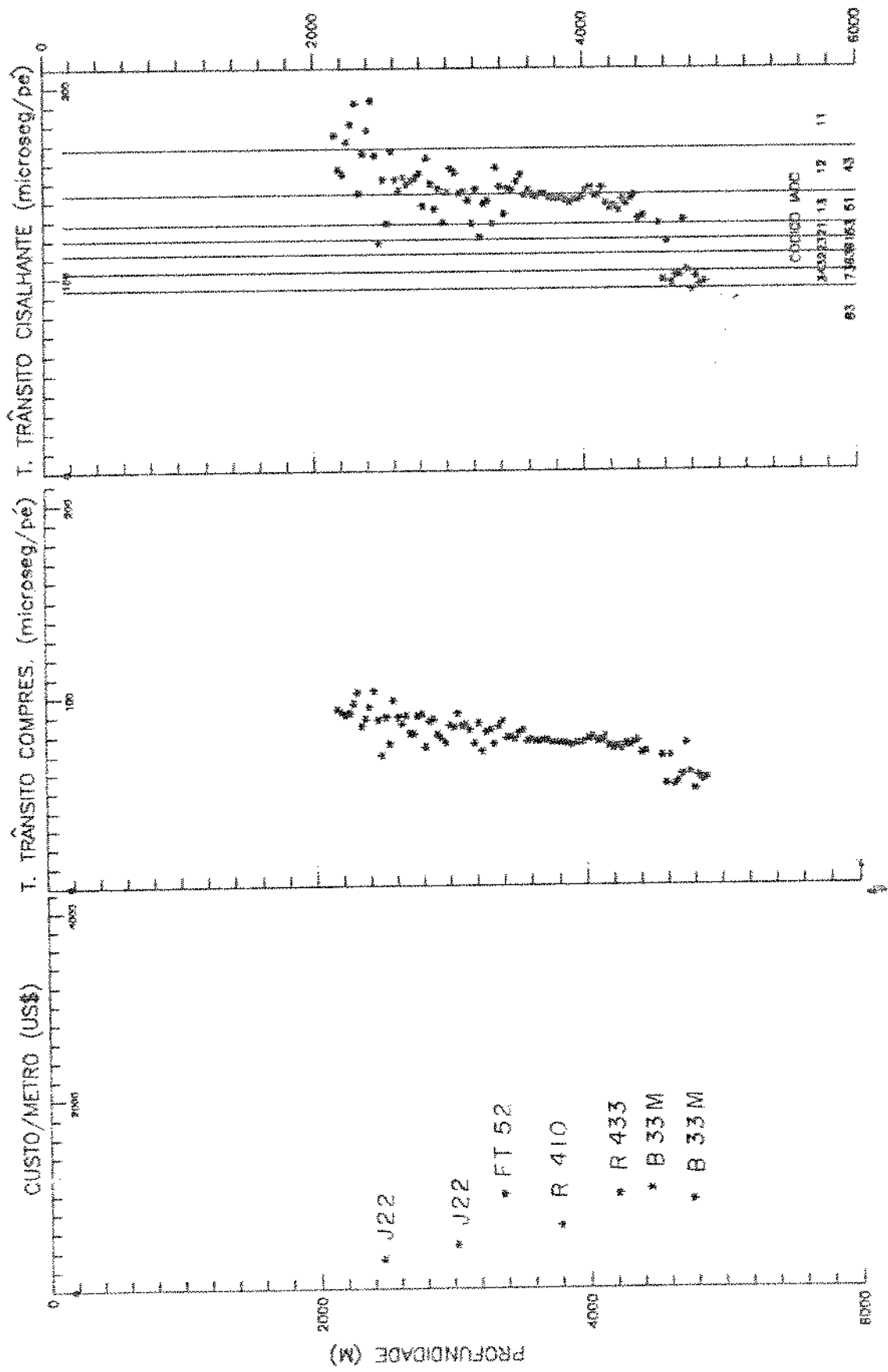


Figura 4.9 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço 1-PRS-A-PR.

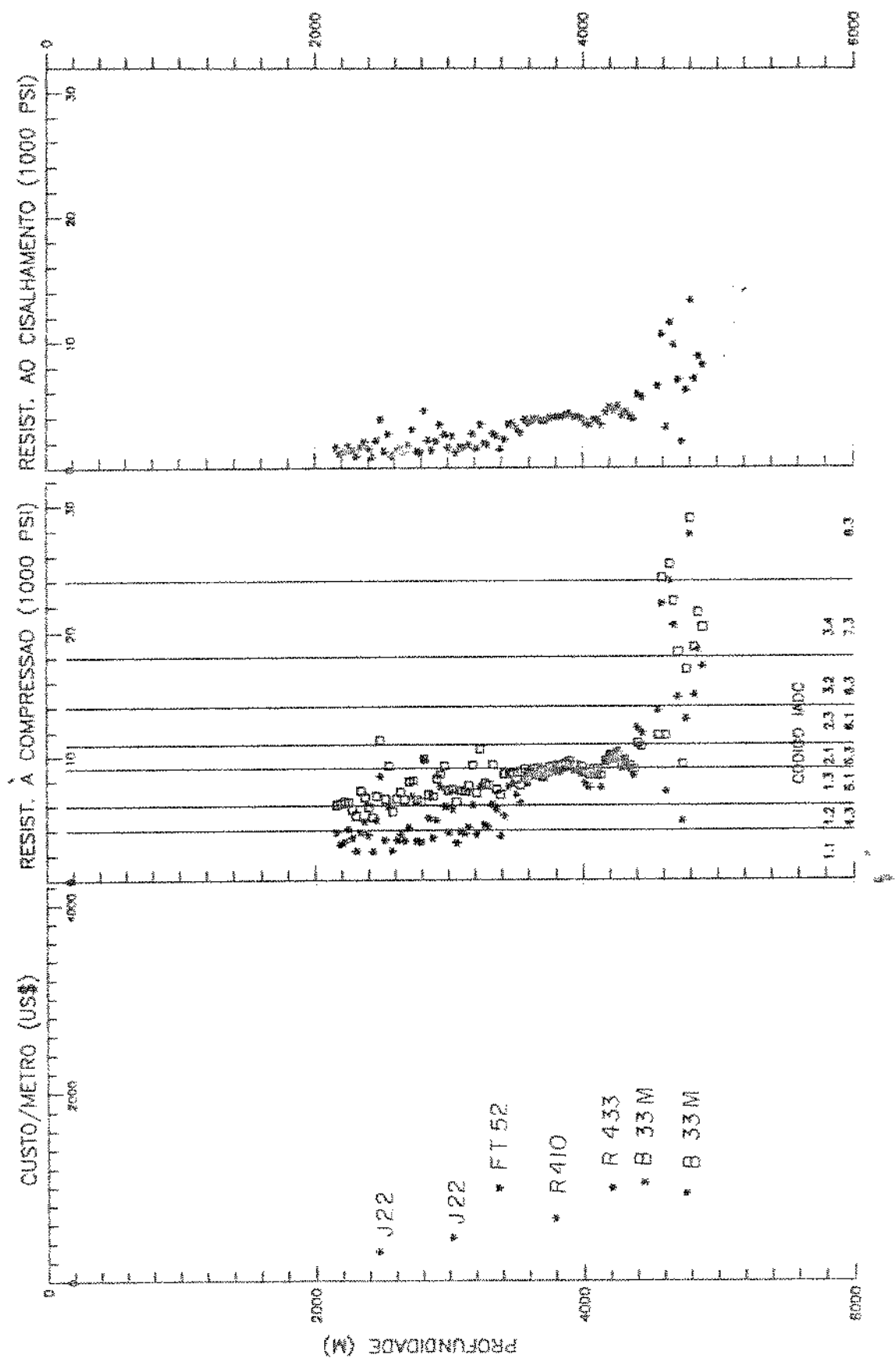


Figura 4.10 Comparação entre os brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-PPS-A-PR.

utilizada no campo. Apesar de ter sido feita a opção pela broca com código IADC 5.1 e a mesma ter apresentado um custo por metro baixo, em relação as demais brocas, não podemos afirmar que tenha sido a escolha mais correta, já que não temos informações quanto ao desempenho de brocas com código IADC 1.1 e 4.3 ou 1.2, nas mesmas condições.

Quanto às segunda e terceira brocas tricônicas utilizadas, código IADC 5.1.7 (J22 e FTS2), pode-se observar que as mesmas estão de acordo com o recomendado, quando consideramos o tempo de trânsito cisalhante. Ao utilizarmos a resistência à compressão para a escolha da broca, o recomendado situa-se entre as brocas de código IADC 4.3 e 5.1.

#### 4.3.2 Poço 3-TB-A-PRS.

A Figura 4.11 mostra o custo por metro x profundidade média, das brocas utilizadas no poço 3-TB-A-PRS, e o tempo de trânsito cisalhante estimado da formação x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificadas através do código IADC.

A Figura 4.12 mostra o custo por metro versus profundidade média, das brocas utilizadas no poço 3-TB-A-PRS e a resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificados através do

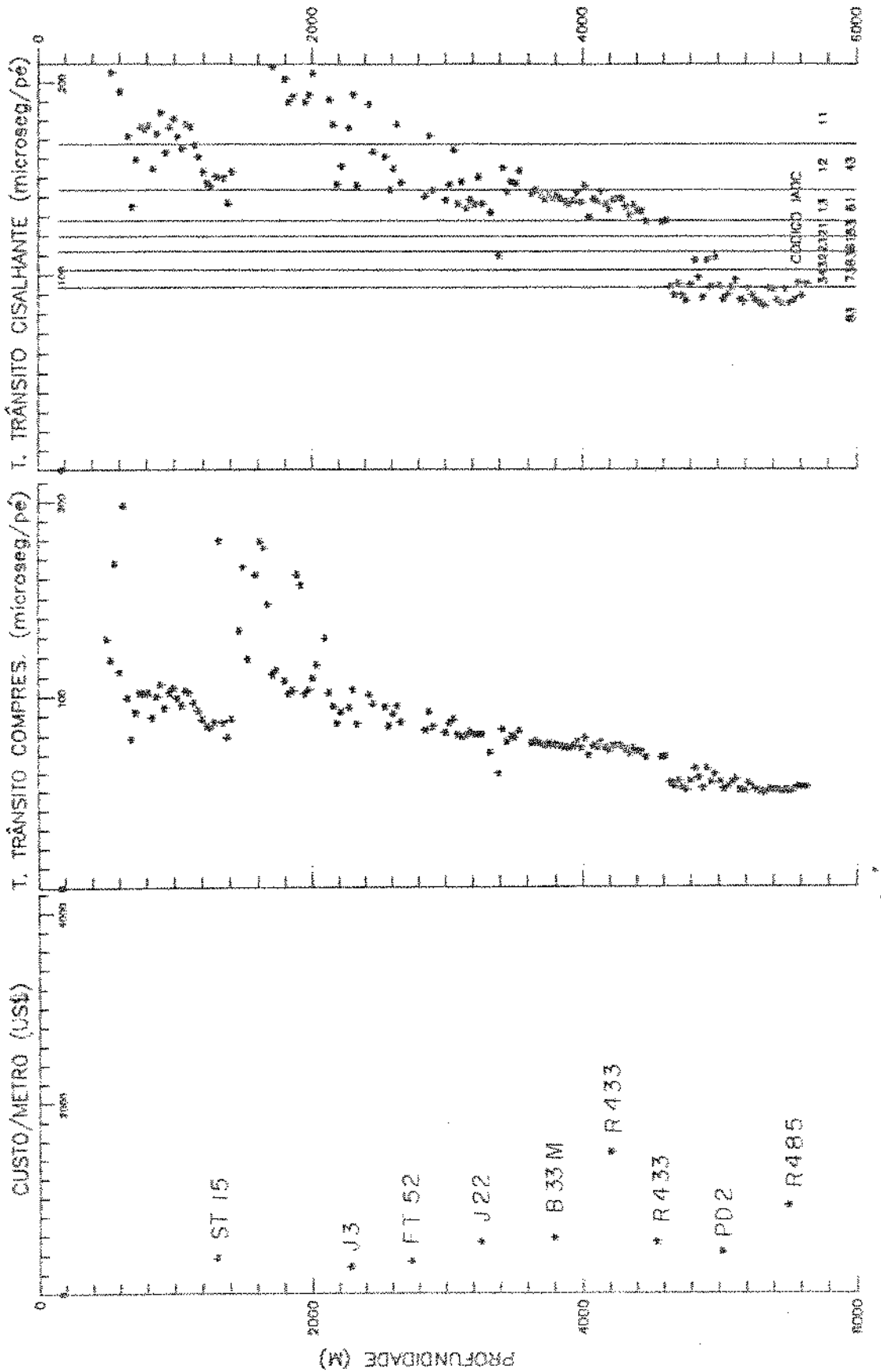


Figura 4.11 Comparação entre os broços utilizados no campo e sugeridos por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço 3-1B-A-PRS.

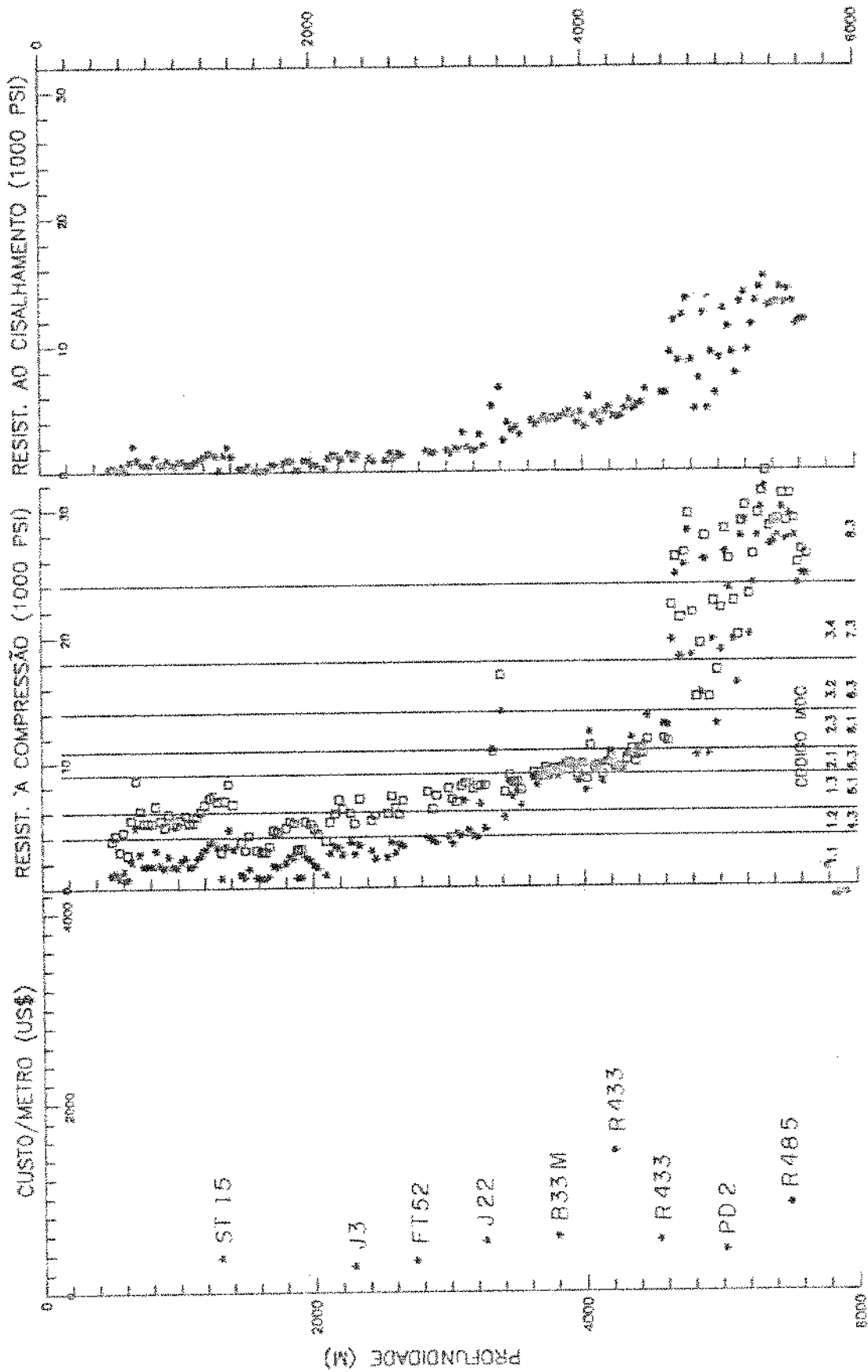


Figura 4.12 Comparação entre os brocos utilizados e os sugeridos utilizando as equações (3.8) e (2.21), no page 3-18-A-PRS.

código IADC.

A primeira broca tricônica apresentada, código IADC 4.4.5 (ST15), está em desacordo com o recomendado, apesar de ter perfurado toda a fase de 17 1/2 polegadas e ter apresentado uma boa metragem (1612 m), em 187.5 horas, com taxa de penetração média de 8,6 m/hr. O recomendado, segundo Mason, é o uso de brocas com código IADC 1.1 e 4.3 ou 1.2, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante. Quando utilizado a resistência à compressão, o recomendado é o uso de brocas com código IADC 1.1.

A segunda broca mostrada, código IADC 1.3.6 (J3), está em desacordo com o recomendado, ao utilizar-se o tempo de trânsito cisalhante. A broca recomendada nestas condições é a de código IADC 4.3 ou 1.2. Apesar de ter apresentado um custo por metro menor do que as demais brocas neste poço, não se pode afirmar que tenha sido a melhor escolha, já que não são disponíveis informações a respeito do desempenho de brocas com código IADC 4.3 ou 1.2, nas mesmas condições. Quando se utiliza a resistência à compressão, a broca indicada é a do código IADC 1.1.

A terceira e quarta broca descidas, código IADC 5.1.7 (FT82 e J22), estão de acordo com o recomendado, quando considerado o tempo de trânsito cisalhante. Utilizando-se a resistência à compressão, as brocas indicadas variam de código IADC 1.1 a 4.3 ou 1.2.



#### 4.3.3 Poço 3-TB-B-PRS.

A Figura 4.13 mostra o custo por metro x profundidade média, das brocas utilizadas no poço 3-TB-B-PRS, e o tempo de trânsito cisalhante estimado da formação x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis a utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificadas através do código IADC.

A Figura 4.14 mostra o custo por metro versus profundidade média, das brocas utilizadas no poço 3-TB-B-PRS e a resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificados através do código IADC.

A primeira broca apresentada, código IADC 5.1.5 (X22), está em desacordo com o recomendado, quando se utiliza o tempo de trânsito cisalhante. O recomendado neste caso, segundo Mason, é o uso de brocas com código IADC 1.1 e 4.3 ou 1.2. Vale ressaltar que esta broca teve a seu favor o fato de ter perfurado toda a fase de 17 1/2" com uma boa metragem e um longo tempo de broca-fundo (1502 m em 169.5 hrs), com taxa de penetração média de 8.88 m/hr. Outros poços da área já perfuraram trecho equivalente com duas brocas e tempo de broca-fundo de 105 hrs, utilizando brocas com código IADC 1.1.1, com taxa de penetração média de 15 m/hr. O fato de existir um pequeno trecho em que seria recomendável o uso de

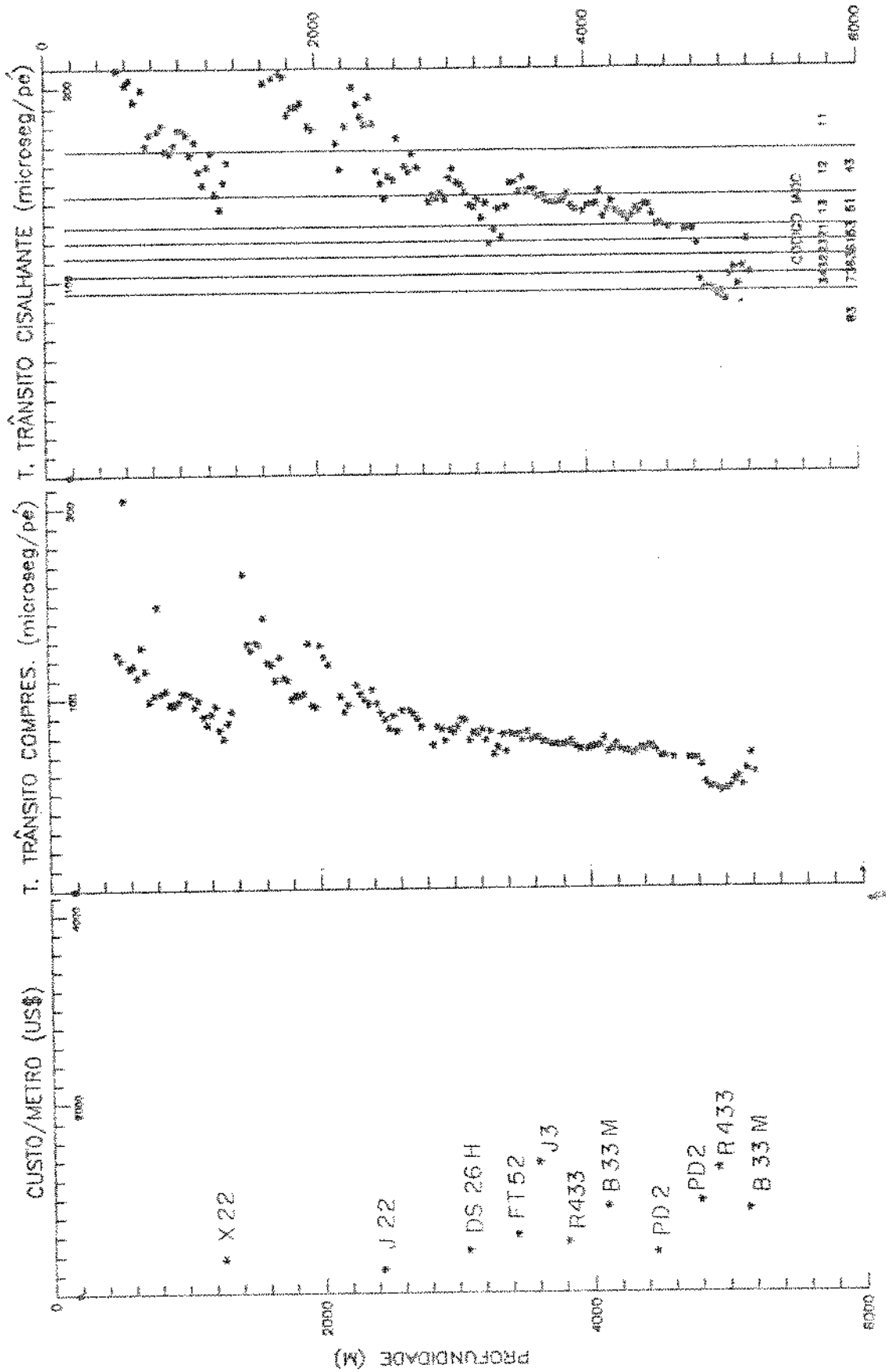


Figura 4.13 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para, tempo de trânsito no fluido confinado nos poros de 189 microseg/pe, no poço 3-1B-B-PRS.

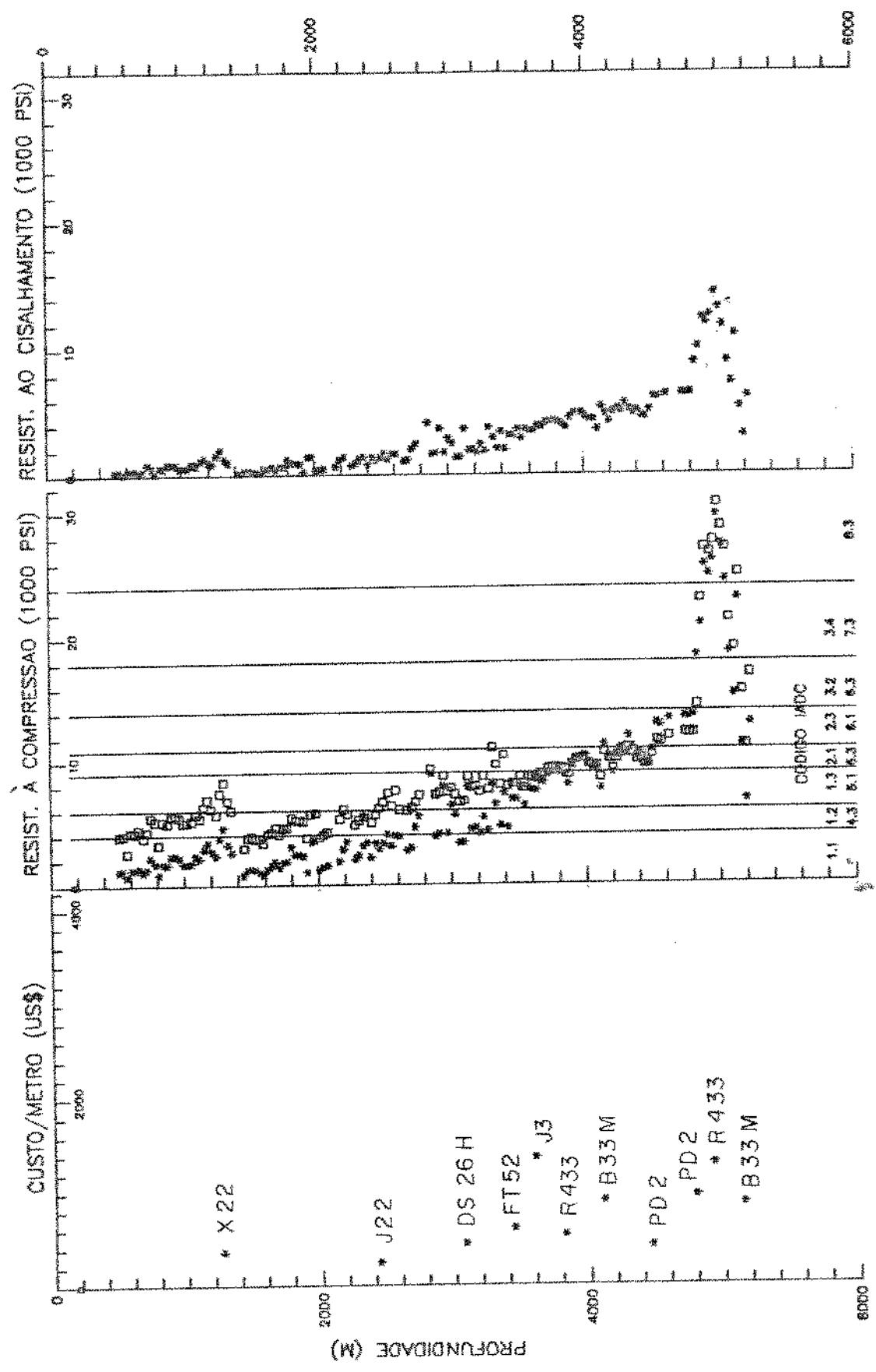


Figura 4.14 Comparação entre os brocos utilizados e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 3-TB-B-PRS.

broca com código IADC 1.3 ou 5.1, não significa, necessariamente, que o mesmo não possa ser perfurado alterando-se os parâmetros mecânicos, até passar por este intervalo. Como não se dispõe, mais uma vez, de informações quanto ao uso de brocas com código IADC 4.3 ou 1.2, nas mesmas condições, não podemos afirmar ser esta a melhor opção, conforme sugerido, para perfurar-se toda a fase. Quando utilizamos a resistência à compressão, o indicado são brocas com código IADC 1.1.

A segunda broca apresentada, código IADC 5.1.7 (J22), está em desacordo com o sugerido pelo tempo de trânsito cisalhante. O recomendado, segundo Mason, é o uso de brocas com código IADC 1.2 ou 4.3, já que a metade inferior do intervalo perfurado pela broca, que apresenta maior resistência à compressão que o intervalo superior, situa-se nesta classificação. A escolha da broca com código IADC 1.1 mostrou-se adequada para a metade superior mas, possivelmente, devido à maior resistência da formação subsequente, acarretou em maior desgaste dos dentes. Quando se utiliza a resistência à compressão, a broca recomendada é a de código IADC 4.3 ou 1.2, já que metade do trecho mais duro perfurado pela broca enquadra-se no intervalo em que é sugerido o uso destas brocas.

A terceira broca tricônica apresentada, com código IADC 5.1.7 (FT52), perfurou em um intervalo onde é recomendado, no início, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante, o

uso de brocas com código IADC 5.3 ou 2.1, já que a broca perfurou boa parte de sua metragem, neste intervalo mais duro, em que é sugerido este tipo de broca. No final do intervalo é indicado como viável o uso de broca com código IADC 4.3 ou 1.2. Caso esta última sugestão tivesse sido utilizada, poderia ter havido uma quebra ou desgaste prematuro dos dentes, por ser um trecho em que possivelmente não seria viável economicamente a utilização, por longo tempo, de parâmetros abaixo do recomendável. Quando utilizamos a resistência à compressão, a broca indicada é a de código IADC 5.1 ou 1.3, apesar de, no início do intervalo, ser sugerido broca com código IADC 4.3 ou 1.2.

A quarta broca tricônica apresentada, código IADC 1.3.6 (J3), está em desacordo com o recomendado quando se utiliza o tempo de trânsito cisalhante. O recomendado são brocas com código IADC 4.3 e 1.2. Quando se utiliza a resistência à compressão estimada, observa-se que a broca está de acordo com o recomendado, apesar da mesma ter apresentado um rendimento atipicamente baixo, possivelmente decorrente de algum outro motivo, que não a escolha inadequada do tipo de broca.

#### 4.3.4 Poço 1-SPS-A-SP.

A Figura 4.15 mostra o custo por metro x profundidade média das brocas utilizadas no poço 1-SPS-A-SP, e o tempo de

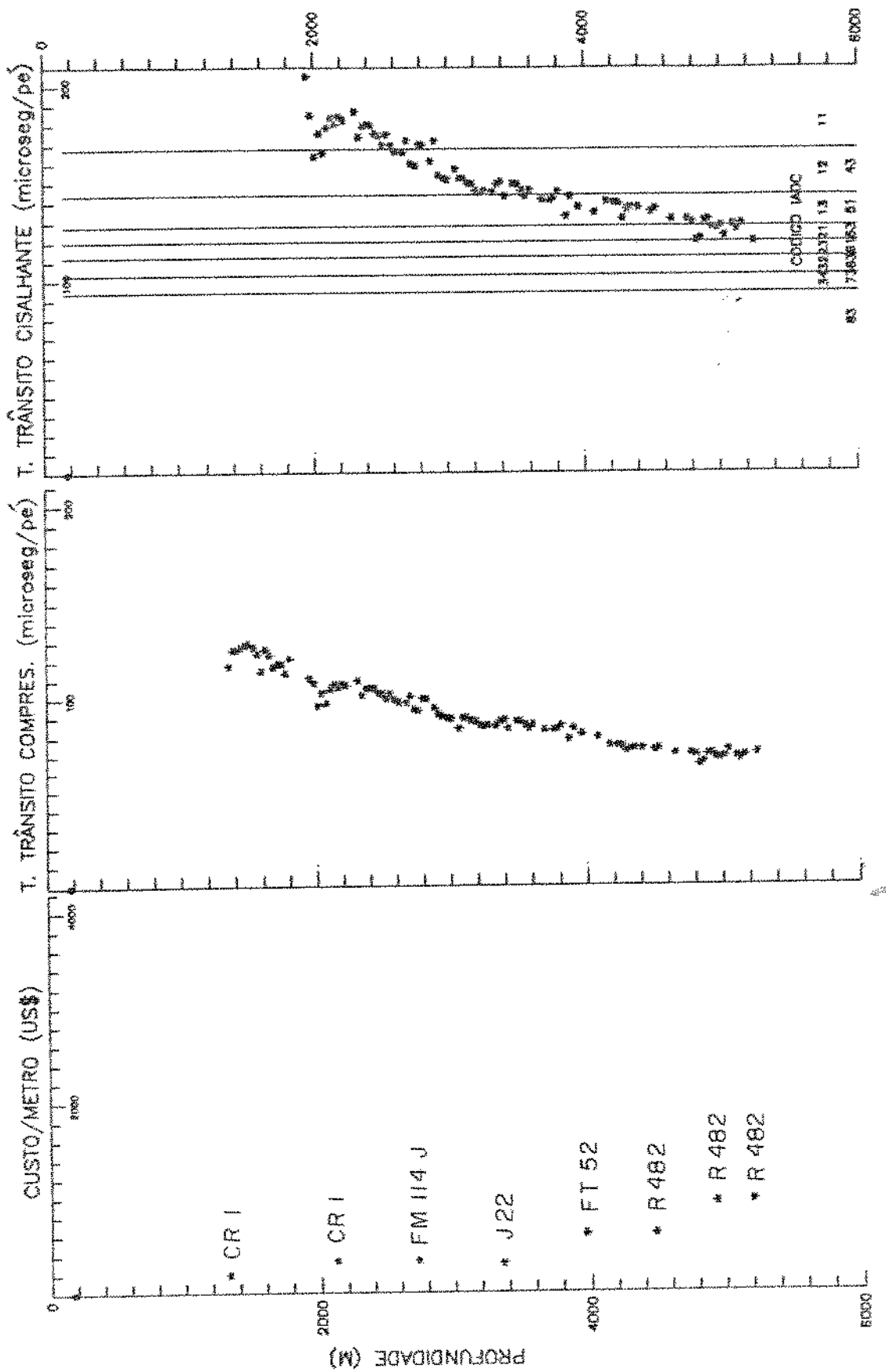


Figura 4.15 Comparação entre os brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para, tempo de trânsito no fluido confido nos poros de 189 microseg/pé, no poço 1-SPS-A-SP.

trânsito cisalhante estimado da formação x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificadas através do código IADC.

A Figura 4.16 mostra o custo por metro versus profundidade média, das brocas utilizadas no poço 1-SPS-A-SP e a resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificados através do código IADC.

A primeira broca tricônica apresentada, código IADC 1.1.1 (CR1), está de acordo com o recomendado quando analisamos o tempo de trânsito cisalhante. Os dados do tempo de trânsito cisalhante excederam o limite do gráfico, estando os mesmos situados em intervalo onde é indicado o uso de brocas com código IADC 1.1.. Considerando-se a resistência à compressão estimada, a broca utilizada está de acordo com o recomendado.

A segunda broca tricônica apresentada, código IADC 1.1.1 (CR1), está de acordo com o recomendado, quando se utilizou o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão para escolha do tipo de broca indicada.

A terceira broca tricônica apresentada, código IADC 1.1.6 (FM11-4J), foi descida em um intervalo onde, no início, o código IADC da broca sugerida, empregando o tempo de trânsito cisalhante, está de acordo com o utilizado, sendo que, na

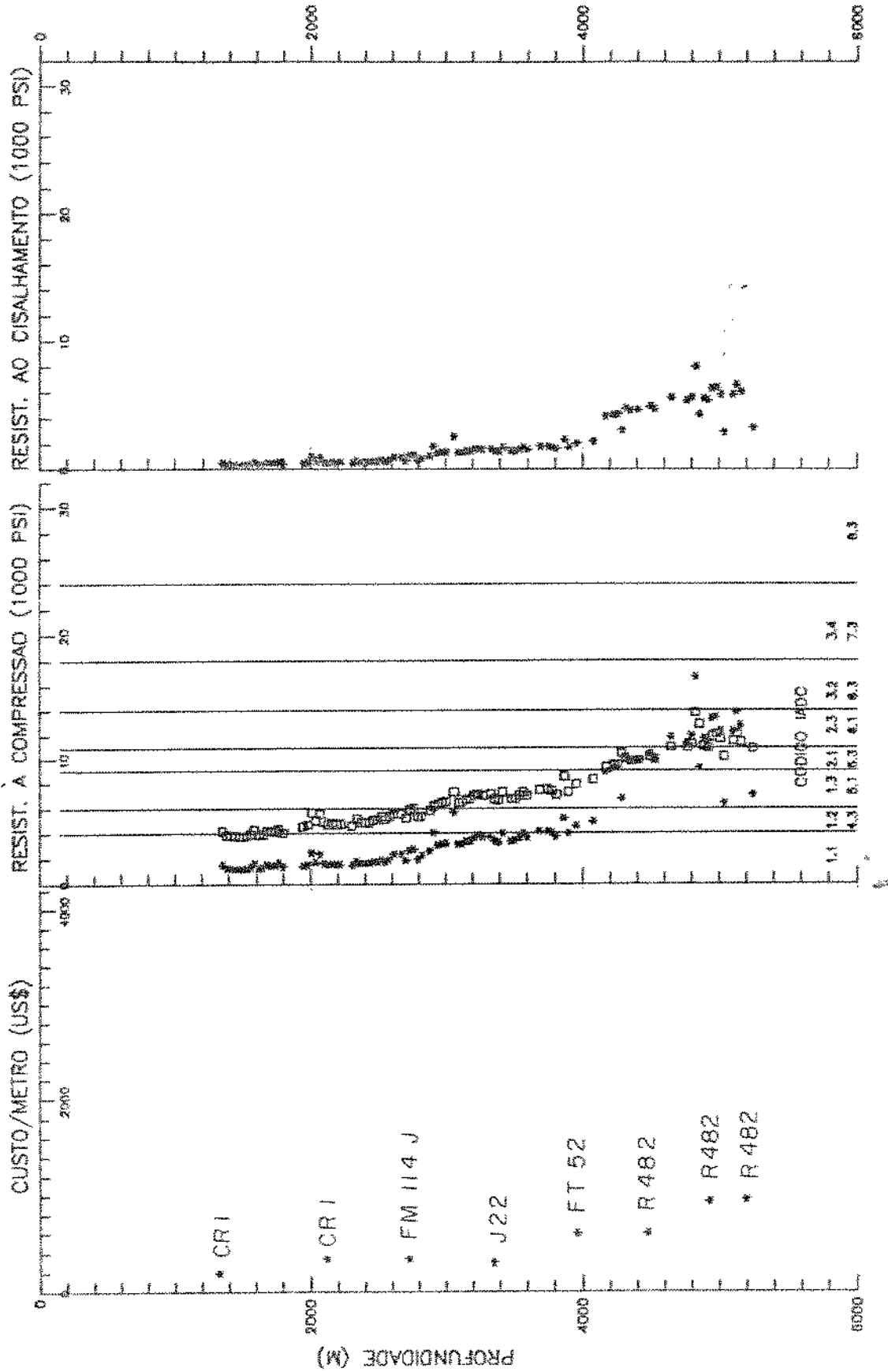


Figura 4.16 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-SPS-A-SP.



metade inferior do mesmo intervalo, a broca mais indicada seria a de código IADC 4.3 ou 1.2. Em uma análise global da escolha feita, a mesma encontra-se em desacordo com o indicado, já que a broca sugerida, segundo Mason, seria a de código IADC 4.3 ou 1.2. Analisando-se a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido.

A quarta broca apresentada, código IADC 5.1.7 (J22), está em desacordo com o recomendado, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante. O tipo de broca sugerido para perfurar-se todo o intervalo é a de código IADC 4.3 ou 1.2. Quando se considera a resistência à compressão, a broca recomendada é a de código IADC 1.1.

A quinta broca apresentada, código IADC 5.1.7 (FT52), está de acordo com o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante, para escolha do tipo de broca recomendado. Quando se utiliza a resistência à compressão, a broca indicada é a de código IADC 4.3 ou 1.2.

#### 4.3.5 Poço 1-SPS-B-SP.

A Figura 4.17 mostra o custo por metro x profundidade média, das brocas empregadas no poço 1-SPS-B-SP, e o tempo de trânsito cisalhante estimado da formação x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificadas através do código IADC.

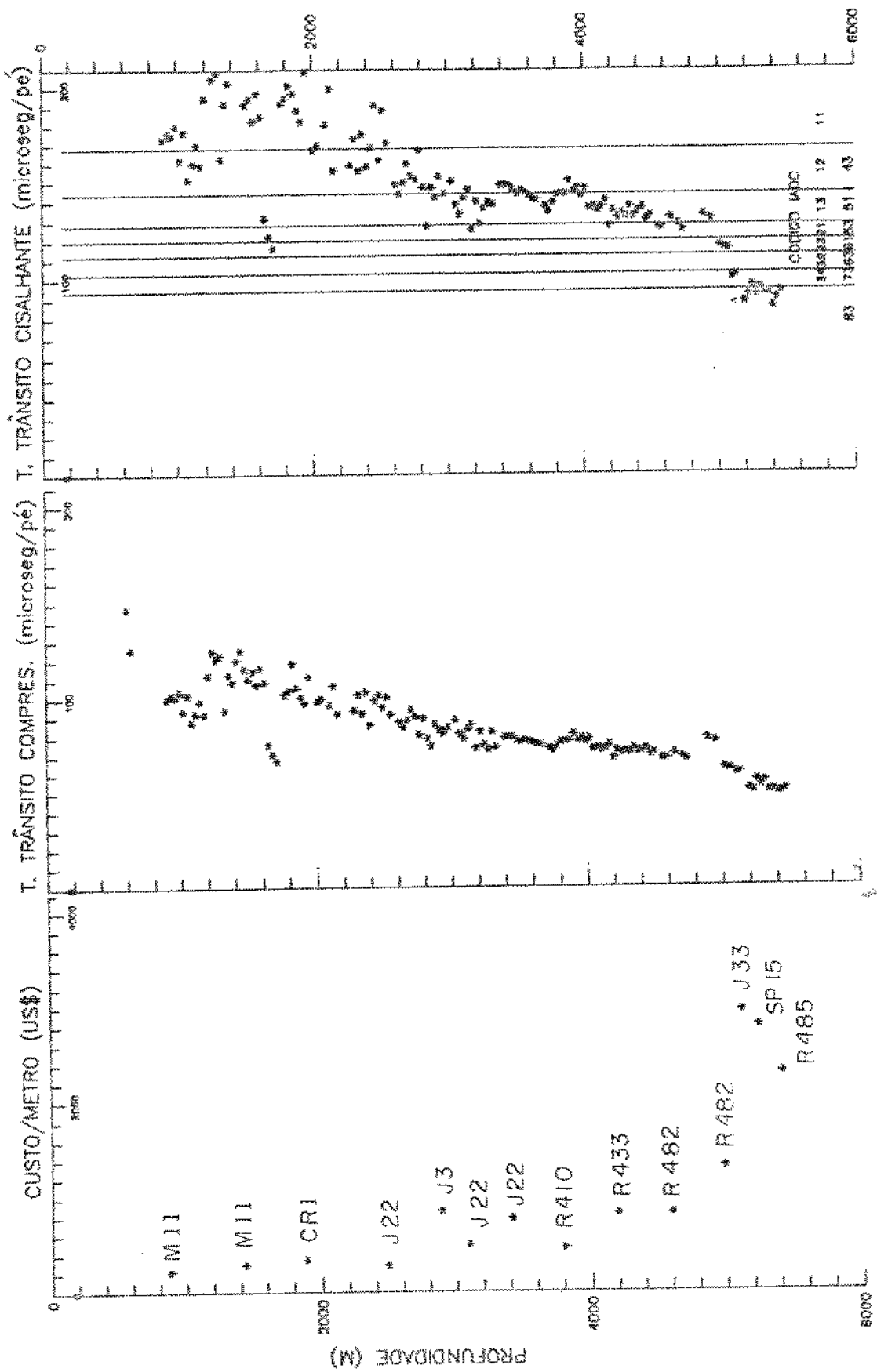


Figura 4.17 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço 1-SPS-B-SP.

A Figura 4.18 mostra o custo por metro versus profundidade média, das brocas utilizadas no poço 1-SPS-B-SP, e a resistência à compressão x profundidade, com linhas verticais indicando os intervalos mais viáveis à utilização de determinado tipo de broca tricônica, identificados através do código IADC.

A primeira broca apresentada, código IADC 1.1.1 (M11), empregada para perfurar um trecho onde o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante, varia entre os códigos IADC 1.1 e IADC 1.2 ou 4.3, não está de acordo com o que seria indicado para perfurar-se todo intervalo. A não disponibilidade de informações referentes ao desempenho de brocas com código IADC 4.3 ou 1.2, nas mesmas condições, ao longo de todo o intervalo perfurado pela broca, impede que se avalie a consistência dessa sugestão. Considerando-se a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o indicado.

A segunda broca apresentada, código IADC 1.1.1 (M11), está de acordo com o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A terceira broca apresentada, código IADC 1.1.1 (CR1), está de acordo com o sugerido, na maior parte do intervalo perfurado, quando se utiliza o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão. Observa-se que na profundidade aproximada de 1700 m, existe pequeno intervalo

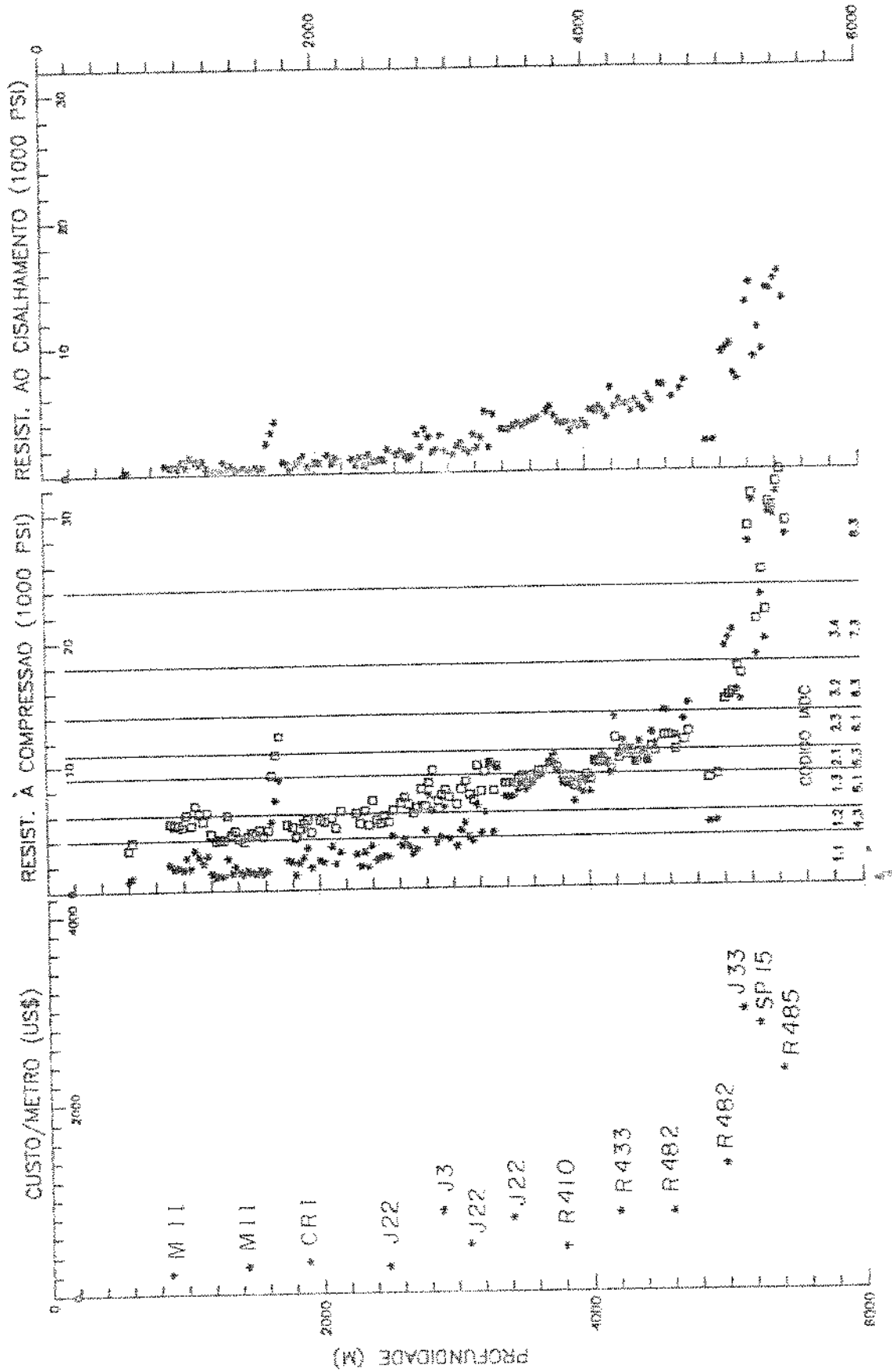


Figura 4.18 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas utilizando as equações (3.8) e (2.21), no poço 1-SPS-B-SP.

onde é recomendado o uso de brocas adequadas à perfuração de formações mais duras. Confirmada a existência no campo do intervalo com tamanha diferença nas características, cabe verificar a viabilidade de perfurar-se com diferentes parâmetros mecânicos até atravessar o mesmo. Apesar desta broca ter concluído a perfuração da fase de 17 1/2 polegadas, a mesma apresentou uma taxa de penetração média de 10.46 m/hr, inferior à da broca anterior, em condições semelhantes, cuja taxa de penetração média foi de 12.56 m/hr.

A quarta broca apresentada, código IADC 5.1.7 (J22), está em desacordo com o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. A broca indicada, nesse caso, é a de código IADC 4.3 ou 1.2. Quando se utiliza a resistência à compressão, é indicado o uso de brocas com código IADC 1.1.

A quinta broca apresentada, código IADC 1.3 (J3), está em desacordo com o sugerido, quando se analisa o tempo de trânsito cisalhante. A broca indicada é a de código IADC 4.3 ou 1.2. Quando se utiliza a resistência à compressão, a broca descida está de acordo com o sugerido.

A sexta broca apresentada, código IADC 5.1.7 (J22), está de acordo com o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. Quando utiliza-se a resistência à compressão, o tipo de broca indicada é a de código IADC 4.3 ou 1.2.

A sétima broca apresentada, código IADC 5.1.7 (J22),

perfurou um intervalo de transição em que a broca mais indicada, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão, variou de código IADC 4.3 ou 1.2 a código IADC 5.1 ou 1.3. A broca mais indicada para perfurar-se o mesmo intervalo é a de código IADC 5.1.

A oitava broca apresentada, código IADC 5.3.7 (J33), perfurou um intervalo de transição das características da formação, onde a broca indicada é a de código IADC 5.3 ou 3.2, tanto pelo tempo de trânsito quanto pela resistência à compressão.

Com base na análise feita acima, para cada poço da área em estudo, vale ressaltar os seguintes aspectos:

- a) as brocas tricônicas escolhidas, em alguns casos, apresentaram código IADC próprio à perfuração de formações mais duras do que as brocas indicadas através do tempo de trânsito cisalhante e as indicadas através da resistência à compressão;
- b) o intervalo situado entre 500 e 2100 m, aproximadamente, foi perfurado com brocas de 17 1/2 polegadas de diâmetro. As brocas sugeridas para a perfuração deste intervalo foram as de código IADC 1.1 e IADC 1.2 ou 4.3. Na maioria dos poços analisados foram utilizadas brocas com código IADC 1.1, que corresponde à broca indicada para perfuração de formações mais moles. A broca de código IADC 5.1.5 utilizada, bem como a de código

IADC 4.4.5, apesar de terem perfurado toda a fase, avançaram com uma taxa de penetração quase a metade da apresentada por outras brocas utilizadas e com um custo por metro ligeiramente superior. A broca de código IADC 4.3, intermediária entre as de código IADC 1.1 e 5.1, que parece ser a mais indicada à perfuração de alguns intervalos, não foi testada;

c) o intervalo de 2100 a 4100 m, aproximadamente, foi perfurado com brocas de 12 1/4 polegadas de diâmetro. As brocas sugeridas para a perfuração deste intervalo foram as de códigos IADC 1.1, IADC 4.3 ou 1.2, e IADC 5.1 ou 1.3. Quando a broca sugerida correspondia às de código IADC 1.1 e 4.3 ou 1.2, a broca utilizada no poço, na profundidade correspondente, foi a de código IADC 1.3 ou 5.1. Esta broca é indicada para formações mais duras que as brocas sugeridas;

d) Em função do comentado nos itens b) e c) acima, observa-se a falta de informações quanto ao desempenho das brocas com código IADC 1.2 ou 4.3. Estas brocas seriam as mais indicadas para perfuração de formações com dureza intermediária entre as formações viáveis ao uso de brocas com código IADC 1.1 e IADC 1.3 ou 5.1, caso não existam intercalações de maior dureza que possam provocar a quebra dos dentes das mesmas;

e) O método de escolha de brocas tricônicas, ora

utilizado, mostrou-se coerente com o observado no campo, tendo em vista os aspectos comentados no item d) acima, para as fases de 17 1/2 e 12 1/4 polegadas, onde se dispunha de maior quantidade de dados para análise.

Um aspecto importante a comentar são os altos valores da resistência à compressão, estimados com o uso da equação (3.8) e da equação (2.21) ; e os baixos valores do tempo de trânsito cisalhante, observados na parte mais profunda do poço, fazendo com que sejam sugeridas brocas com códigos IADC indicadas para formações de alta resistência à compressão. brocas estas não utilizadas na área. O código IADC da broca empregada na perfuração de formações com maior resistência à compressão, nos poços analisados, foi o 5.3. Analisando-se a tabela sugerida por Pinheiro & Linhares, observa-se que a broca indicada à perfuração de formações com maior resistência à compressão é a de código IADC 6.1, broca esta de pouca utilização na área. Infelizmente não se dispõe de informações, nessa parte do poço, que permitam associar as características das formações à broca mais adequada à perfuração das mesmas, motivo este suficiente para não se poder afirmar serem as brocas sugeridas as mais indicadas.

4.4 Intervalo em que as brocas tricônicas utilizadas se mostraram mais econômicas.



Após ter sido feita a análise individual das brocas utilizadas em cada poço com os correspondentes dados de perfil, torna-se conveniente o agrupamento de todas as brocas em um mesmo gráfico, para melhor identificar os intervalos em que as mesmas mostraram-se mais econômicas. Para melhor avaliar a correspondência das brocas utilizadas nesses intervalos, com as sugeridas pelo método, escolheu-se os dados de perfil de um poço que fosse representativo da área em análise. Escolheu-se os dados do poço 3-TB-A-PR.

O custo por metro de todas as brocas analisadas, o tempo de trânsito compressional, o tempo de trânsito cisalhante, a resistência à compressão e ao cisalhamento da formação, estão plotados versus profundidade na Figura 4.19. Os intervalos indicados no quadro de custo por metro, identificados com o código IADC, foram estabelecidos em função das brocas utilizadas que apresentaram o menor custo por metro.

Conforme foi comentado anteriormente, o fato de determinadas brocas terem sido utilizadas não significa, necessariamente, que tenham sido as mais adequadas. No primeiro intervalo, onde as brocas que se mostraram mais econômicas foram as de código IADC 1.1, existem trechos onde é sugerido o uso de brocas com código IADC 4.3. A não disponibilidade de dados impede afirmar ser esta sugestão a mais adequada. No segundo intervalo, onde as brocas que se mostraram mais econômicas foram as de código IADC 5.1, existem trechos onde é

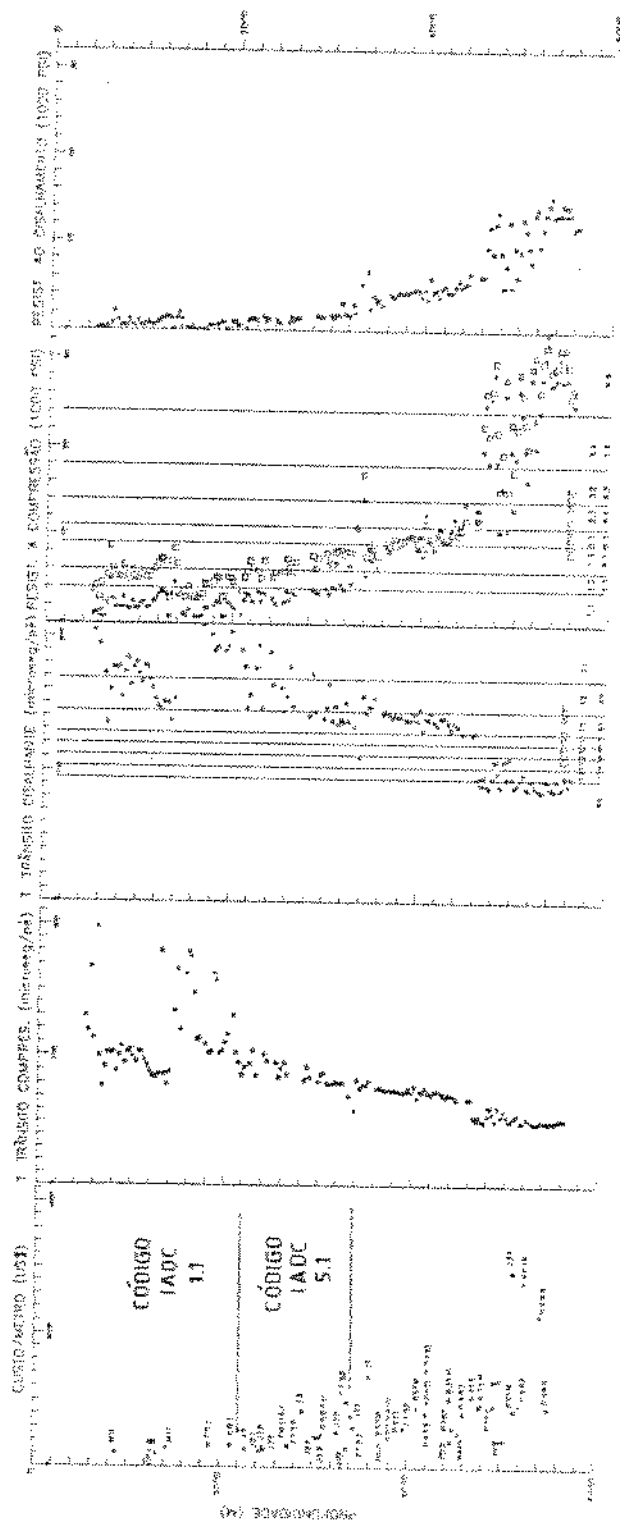


Figura 4.19 Estabelecimento dos intervalos onde as brocas  
trilôncicas utilizadas se mostraram mais econômicas,  
para a área de Tubarão, PE.

uso de brocas com código IADC 4.3 seria o mais indicado. Da mesma forma que no primeiro intervalo, a não disponibilidade de dados, sobre o desempenho de brocas com código IADC 4.3 nas mesmas condições, impede a afirmação de ser esta alternativa a mais adequada.

Logo abaixo do segundo intervalo, observa-se o uso de inúmeros tipos de brocas PDC. Vale ressaltar que a base do segundo intervalo coincidiu com um maior aumento da resistência à compressão da formação à aproximadamente 3400 m que, logo a seguir, volta a tendência de crescimento normal com a profundidade para a área, neste intervalo. Esta variação da resistência da formação, com a conseqüente redução do desempenho das brocas tricônicas utilizadas, deve ter estimulado a utilização de brocas PDC, visando melhorar o rendimento da perfuração.

Quanto à parte mais profunda do poço, a pequena quantidade de dados referentes ao desempenho de brocas tricônicas, bem como a pequena representatividade dos existentes, impede que sejam estabelecidos novos intervalos onde as mesmas apresentaram menor custo por metro.

#### 4.5 Análise de brocas PDC através da associação com os tipos de brocas tricônicas sugeridas.

Visando facilitar a análise dos locais onde as brocas PDC

foram utilizadas, agrupou-se as mesmas com os códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas para estes locais, na Tabela 4.1, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão obtida com a equação (3.8).

Baseado na Tabela 4.2, observa-se que foram utilizados oito tipos de brocas PDC. Para as brocas SP15 e DS26H, dispõe-se de apenas uma informação sobre o desempenho das mesmas, em local onde, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante, foram indicadas brocas com código IADC 8.3 e 4.3/5.1, respectivamente. Ao considerar-se a resistência à compressão, as brocas foram utilizadas em locais onde o indicado foram brocas com código IADC 4.3/5.1 e 6.3/8.3. As duas brocas R410 utilizadas foram testadas em condições semelhantes, onde, com o uso do tempo de trânsito cisalhante, as brocas sugeridas para esses intervalos foram as de código IADC 5.1 e 4.3. Na maior parte do intervalo perfurado foi indicado o uso de brocas com código IADC 5.1. As taxas de penetração das duas brocas foram bastante diferentes (5.51 e 10.46 m/h), possivelmente motivadas por outros fatores que não a escolha do tipo de broca. No intervalo em que foi utilizada, a broca R410 que apresentou maior taxa de penetração também forneceu o menor custo por metro. Quando se considera a resistência à compressão, as brocas foram utilizadas em locais onde o indicado foram brocas com código IADC 5.1 e 5.1/5.3.

POÇO	DIAM. (pol)	BROCA	METR. (m)	TBF (h)	T. P. (m/h)	CÓDIGO IADC	
						T. TRANS. CISALH.	RESIST. COMPRES
1-PRS-A	12.25	R410	664	120.5	5.51	51/43	51
	12.25	R433	177	28.	6.32	51	53
	8.5	B33M	291	80.5	3.61	51/53	51/63
	8.5	B33M	279	63.5	4.39	.73	51/63
3-TB-A	12.25	B33M	628	93.5	6.72	51	51/53
	12.25	R433	178	58.	3.07	51	53
	8.5	R433	451	58.	7.78	51/73/83	53/73/83
	8.5	PD2	474	44.5	10.65	83/73	53/83
	8.88	R485	474	125.5	3.78	83/73	83
3-TB-B	12.25	DS26H	425	37.5	11.33	43/51	43/51
	12.25	R433	386	39.	9.89	51	51/53
	12.25	B33M	196	28.5	6.88	51	53
	8.5	PD2	516	50.	10.32	51/63	53/61
	8.5	PD2	135	20.	6.75	53	61
	8.5	R433	117	26.5	4.41	53	61/83
	8.5	B33M	174	25.5	6.82	63/73	63/83
1-SPS-A	8.5	R482	642	107.5	5.97	51	51/53/61
	8.5	R482	210	40.5	5.18	53	53/61
	8.5	R482	159	24.5	6.49	53	51/61
1-SPS-B	12.25	R410	481	46.	10.46	51/43	51/53
	12.25	R433	237	34.5	6.87	51	51/61
	8.5	R482	554	130.	4.26	51/53	53/61
	8.5	R482	200	63.5	3.15	51/53/61	43/73
	6.125	SP15	173	143.5	1.21	73/83	63/83
	6.125	R485	175	115.5	1.52	83	73/83

Tabela 4.1 Brocas PDC analisadas na área de Tubarão, por poço, com os códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e resist. à compressão, no intervalo onde as primeiras foram utilizadas.

BROCA	DIÂM. (pol)	POÇO	METR. (m)	TBF (h)	T. P. (m/h)	CÓDIGO IADC	
						T. TRANS. CISALH.	RESIST. COMPRES
R410	12.25	1-PRS-A	664	120.5	5.51	51/43	51
"	12.25	1-SPS-B	481	46.	10.46	51/43	51/53
B33M	8.5	1-PRS-A	291	80.5	3.61	51/53	51/61
"	8.5	1-PRS-A	279	53.5	4.39	73	51/83
"	12.25	3-TB-A	628	93.5	6.72	51	51/53
"	12.25	3-TB-B	196	28.5	6.88	51	53
"	8.5	3-TB-B	174	25.5	6.82	63/73	63/83
PD2	8.5	3-TB-A	474	44.5	10.65	83/73	53/83
"	8.5	3-TB-B	516	50.0	10.32	51/53	53/61
"	8.5	3-TB-B	135	20.0	6.75	53	61
R433	12.25	1-PRS-A	177	28.	6.32	51	53
"	12.25	3-TB-A	178	58.0	3.07	51	53
"	12.25	3-TB-B	386	39.	9.89	51	51/53
"	12.25	1-SPS-B	237	34.5	6.87	51	51/61
"	8.5	3-TB-A	451	58.0	7.78	51/73/83	53/73/63
"	8.5	3-TB-B	117	26.5	4.41	53	61/83
R482	8.5	1-SPS-A	642	107.5	5.97	51	51/53/61
"	8.5	1-SPS-A	210	40.5	5.18	53	53/61
"	8.5	1-SPS-A	159	24.5	6.49	53	51/61
"	8.5	1-SPS-B	554	130.0	4.26	51/53	53/61
"	8.5	1-SPS-B	200	63.5	3.15	51/53/61	43/73
R485	5.88	3-TB-A	474	125.5	3.78	83/73	83
"	6.125	1-SPS-B	175	115.5	1.52	83	73/83
DS26H	12.25	3-TB-B	425	37.5	11.33	43/51	43/51
SP15	6.125	1-SPS-B	173	143.5	1.52	83	63/83

Tabela 4.2 Brocas PDC analisadas na área de Tubarão, com os códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, no intervalo onde as primeiras foram utilizadas.

O mesmo pode ser dito para as duas brocas R485 testadas, onde as brocas tricônicas indicadas, tanto pelo tempo de trânsito cisalhante quanto pela resistência à compressão, foram as de código IADC 7.3/8.3. Apesar da pequena diferença de diâmetro das brocas R485, a taxa de penetração das duas brocas foi bastante diferente (1.52 e 3.78 m/h), tendo as mesmas apresentado, aproximadamente, os mesmos tempos de broca-fundo (115.5 e 125.5 hr). Outros fatores influenciaram no rendimento da broca, já que as características das formações são semelhantes. A broca que apresentou a maior taxa de penetração também forneceu um custo por metro bastante próximo aos menores custo por metro apresentados por brocas situadas acima do intervalo onde a mesma foi utilizada.

Quanto às três brocas PD2 testadas, observa-se que as mesmas foram utilizadas em locais onde as brocas sugeridas teriam diferentes códigos IADC, quando analisados o tempo de trânsito cisalhante ou a resistência à compressão. As brocas tricônicas indicadas para perfurar os intervalos onde se utilizou as brocas PD2 foram as de código IADC 8.3 e 7.3; 5.1 e 5.3; e 5.3, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. Quando se utiliza a resistência à compressão, os tipos de brocas sugeridos são as de código IADC 5.3 a 8.3; 5.3 e 6.1; e 6.1. É interessante ressaltar que duas brocas PD2 apresentaram resultados semelhantes em formações, cujas características indicavam o uso de brocas tricônicas com códigos IADC bastante

diferentes (7.3/8.3) e (5.1/8.3), com o uso do tempo de trânsito cisalhante. As brocas PD2 foram as que resultaram nos menores custos por metro perfurado por brocas PDC, nas condições em que as mesmas foram utilizadas.

Utilizou-se brocas R433 em seis intervalos, onde o código IADC das brocas tricônicas indicadas com mais frequência foi 5.1, sendo que duas brocas foram utilizadas em local de transição das características da formação, cujo código IADC das brocas mais indicadas variou de 5.1 a 8.3, quando utilizado o tempo de trânsito cisalhante. Quando se utilizou a resistência à compressão, o código IADC mais frequente foi 5.3 sendo que no intervalo de transição, o código IADC das brocas mais indicadas variou de 5.3 a 8.3. As brocas R433 também apresentaram desempenhos bastante diferentes, para os mesmos diâmetros, em intervalos onde foram indicadas brocas com os mesmos códigos IADC. A broca R433 que apresentou o menor custo por metro na fase de 12 1/4 polegadas foi utilizada no intervalo em que a broca tricônica indicada foi a de código IADC 5.1, enquanto que, na fase de 8 1/2 polegadas, a broca que apresentou menor custo por metro, atuou em um intervalo de transição onde as brocas tricônicas indicadas foram as de código IADC 5.1/7.3/8.3.

Foram utilizadas cinco brocas R482, onde os códigos IADC das brocas sugeridas com mais frequência, considerando-se tempo de trânsito cisalhante, foram 5.1 e 5.3. Duas brocas perfuraram



um intervalo de transição das características da formação, cujo código IADC das brocas mais indicadas variou de 5.1 a 6.1, quando se utilizou o tempo de trânsito cisalhante. Quando se considerou a resistência à compressão, o código IADC das brocas sugeridas com mais frequência variou entre 5.3 e 6.1. Já no intervalo de transição, o código IADC das brocas mais indicadas variou de 4.3 a 7.3. As brocas R482 apresentaram um desempenho bastante irregular quanto à metragem e ao tempo de broca-fundo, apesar da taxa de penetração não ter apresentado comportamento tão aleatório, quando considerados os mesmos códigos IADC das brocas tricônicas sugeridas para perfurar-se os mesmos intervalos. A menor taxa de penetração foi observada quando se utilizou a broca em intervalo indicado para brocas tricônicas com código IADC variando de 5.1 a 6.1, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante e de 4.3 a 7.3, quando considera-se a resistência à compressão.

Utilizou-se brocas B33M em cinco intervalos, onde os códigos IADC das brocas tricônicas indicadas, com mais frequência, quando se considerou o tempo de trânsito cisalhante, foram 5.1 e 7.3. Duas brocas foram utilizadas em locais cujo código IADC das brocas indicadas variou de 5.1 a 5.3 e de 6.3 a 7.3. Quando se considerou a resistência à compressão, o código IADC das brocas sugeridas com mais frequência foi 5.1 e 5.3, sendo que códigos IADC 6.1, 6.3 e 8.3 também foram sugeridos. As brocas B33M foram utilizadas em

situações diferentes, onde o melhor desempenho ocorreu na fase de 12 1/4 polegadas, no intervalo em que o código IADC da broca indicada, considerando-se o tempo de trânsito cisalhante, foi 5.1.

Com base na Tabela 4.2 e conforme foi analisado acima, vale ressaltar alguns aspectos relacionados com o desempenho das brocas PDC na área em estudo:

- a) O reduzido número de brocas de cada tipo, disponíveis para análise, bem como a diversidade de condições em que as mesmas foram utilizadas, não permitiu que ficasse estabelecido um local, em que cada tipo de broca apresentasse, com razoável regularidade, um custo por metro inferior às demais brocas, nas mesmas condições;
- b) Os tipos de brocas utilizadas representam um universo pequeno em relação à variedade de brocas PDC, atualmente existentes;
- c) Mesmo as brocas que apresentaram um baixo custo por metro, não podem ser consideradas como as melhores, para perfurar-se o intervalo em que as mesmas foram utilizadas, pelos motivos expostos nos itens a) e b) acima.

#### 4.6 Aplicação do método na Bacia de Campos, RJ.

#### 4.6.1 Determinação das expressões para estimativa do tempo de trânsito cisalhante, na Bacia de Campos, RJ.

A fim de verificarmos os resultados do método na Bacia de Campos, RJ, foram determinadas as expressões que representam o comportamento do tempo de trânsito cisalhante em função do tempo de trânsito compressional. Utilizou-se os registros do tempo de trânsito cisalhante dos seguintes poços: RJS-A, RJS-B, RJS-C e RJS-D.

Nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 são mostradas as relações entre o tempo de trânsito cisalhante e o tempo de trânsito compressional para arenito, folhelho e margas, respectivamente.

Na Tabela 4.3 abaixo são mostradas as expressões obtidas para cada litologia indicada, com os respectivos índices de correlação linear, considerando-se os dados dos quatro poços:

LITOLOGIA	EXPRESSÕES	ÍNDICE DE CORRELAÇÃO LINEAR
ARENITO	$\Delta T_s = 2.1455 \Delta T_c - 26.2403$	0.98
FOLHELHO	$\Delta T_s = 2.5553 \Delta T_c - 53.8138$	0.96
MARGA	$\Delta T_s = 2.4390 \Delta T_c - 44.9024$	0.93

Tabela 4.3 Expressões para estimativa de  $\Delta T_s$ , em função da litologia, e correspondentes índices de correlação linear entre  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$ , obtidas na Bacia de Campos.

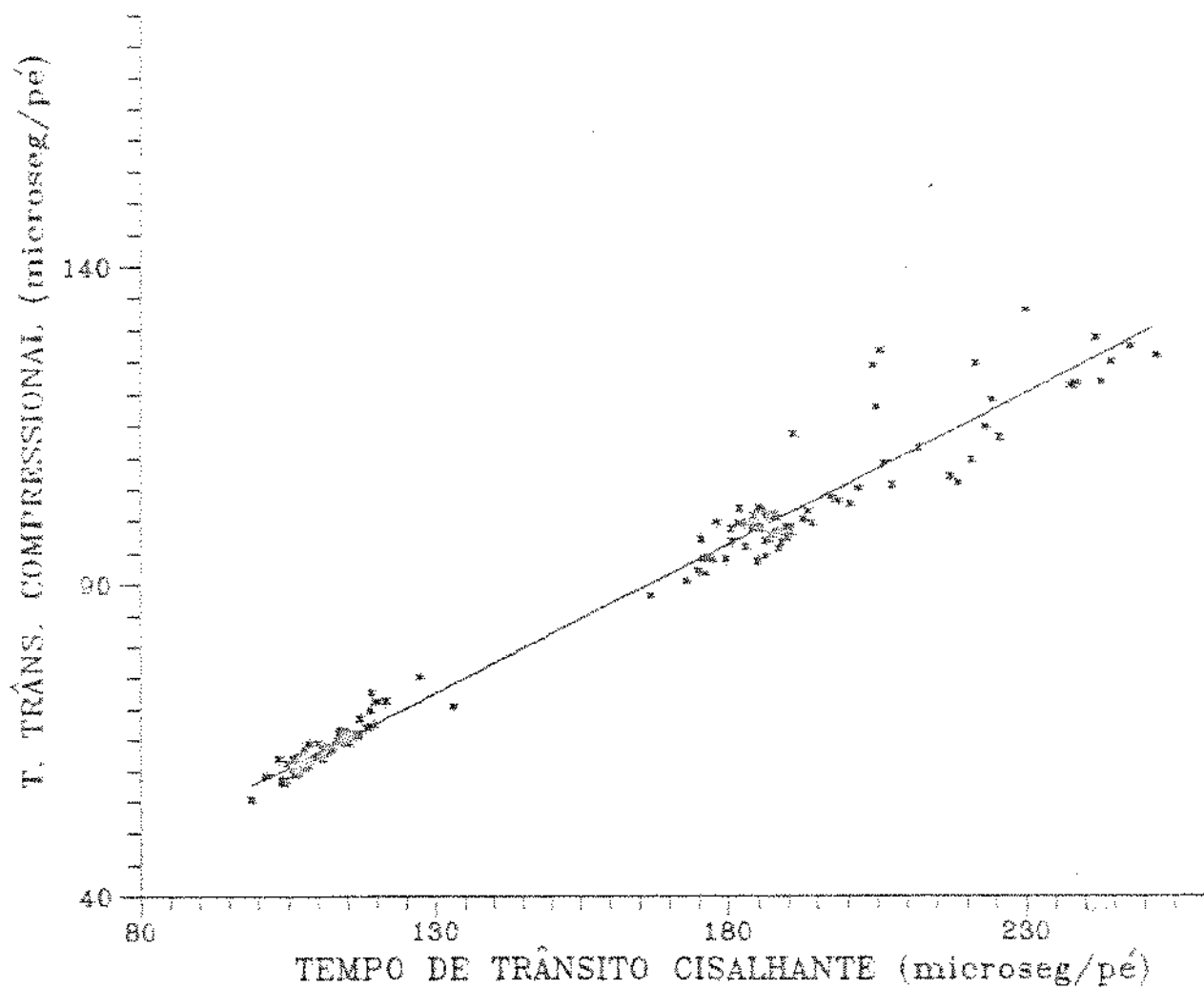


Figura 4.20 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para arenito, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos.

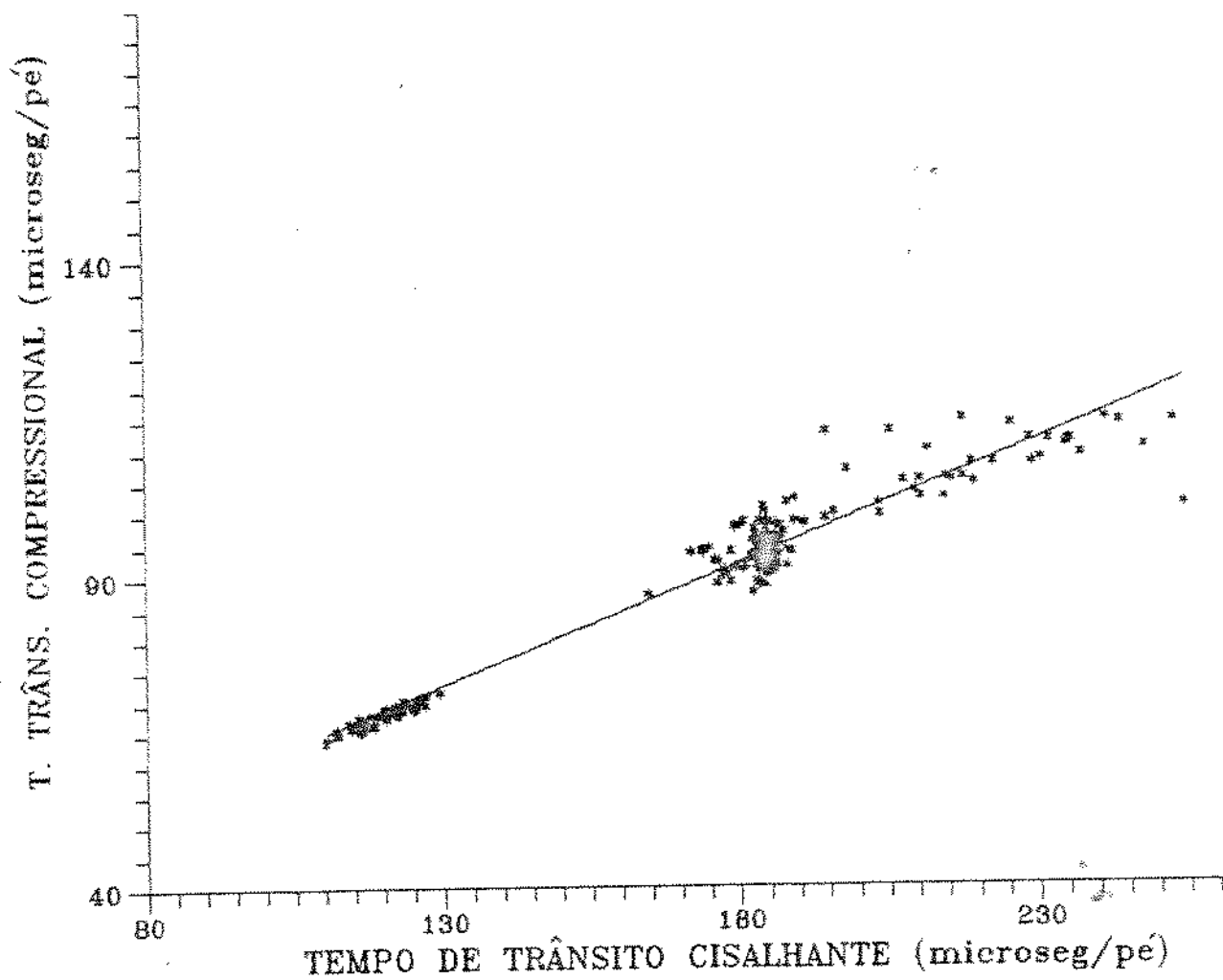


Figura 4.21 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos.

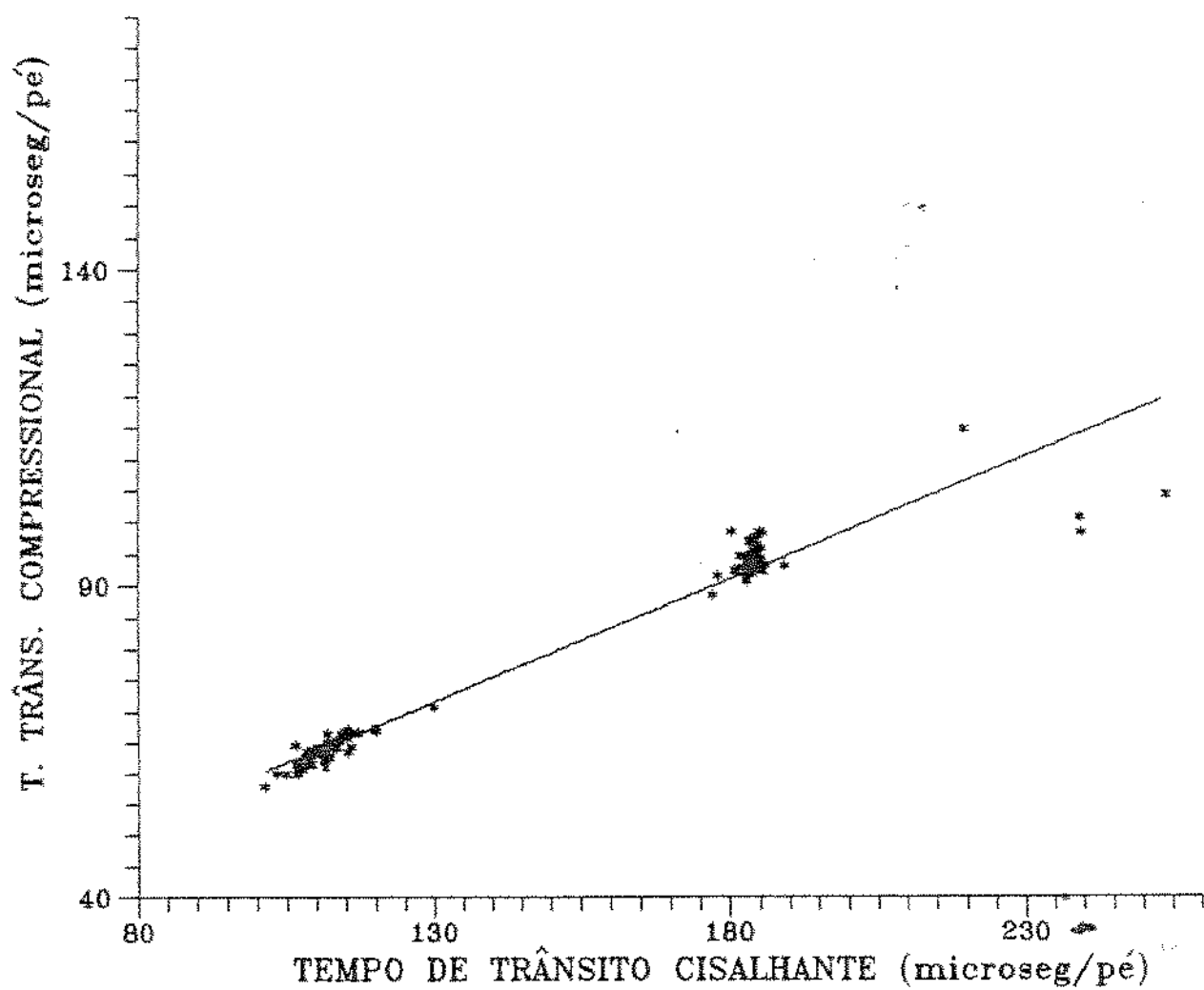


Figura 4.22 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para marga, obtida de poços da área de Macaé, Bacia de Campos.

Na Tabela 4.4 são mostradas as expressões obtidas para o poço RJS-A que, isoladamente, apresentou mais que o dobro de dados que todos os outros poços juntos, dados estes obtidos a grandes profundidades.

LITOLOGIA	EXPRESSÕES	ÍNDICE DE CORRELAÇÃO LINEAR
ARENITO	$\Delta T_s = 1.5151 \Delta T_c + 14.5909$	0.92
SILTITO	$\Delta T_s = 2.4526 \Delta T_c - 41.4352$	0.98
FOLHELHO	$\Delta T_s = 2.6310 \Delta T_c - 59.0706$	0.94
MARGA	$\Delta T_s = 2.4504 \Delta T_c - 44.8297$	0.88
CONGLOMERADO	$\Delta T_s = 2.0824 \Delta T_c - 21.9600$	0.86

Tabela 4.4 Expressões para estimativa de  $\Delta T_s$  em função da litologia e correspondentes índices de correlação linear entre  $\Delta T_s$  e  $\Delta T_c$ , para o poço RJS-A.

Nas Figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27, são mostradas as relações entre o tempo de trânsito cisalhante e o tempo de trânsito compressional para marga, conglomerado, folhelho, siltito e arenito, respectivamente, no poço RJS-A.

#### 4.6.2 Análise dos resultados referentes às brocas tricônicas.

Em procedimento semelhante ao realizado para a área de Tubarão, Bacia de Santos, onde se analisou, para cada poço,

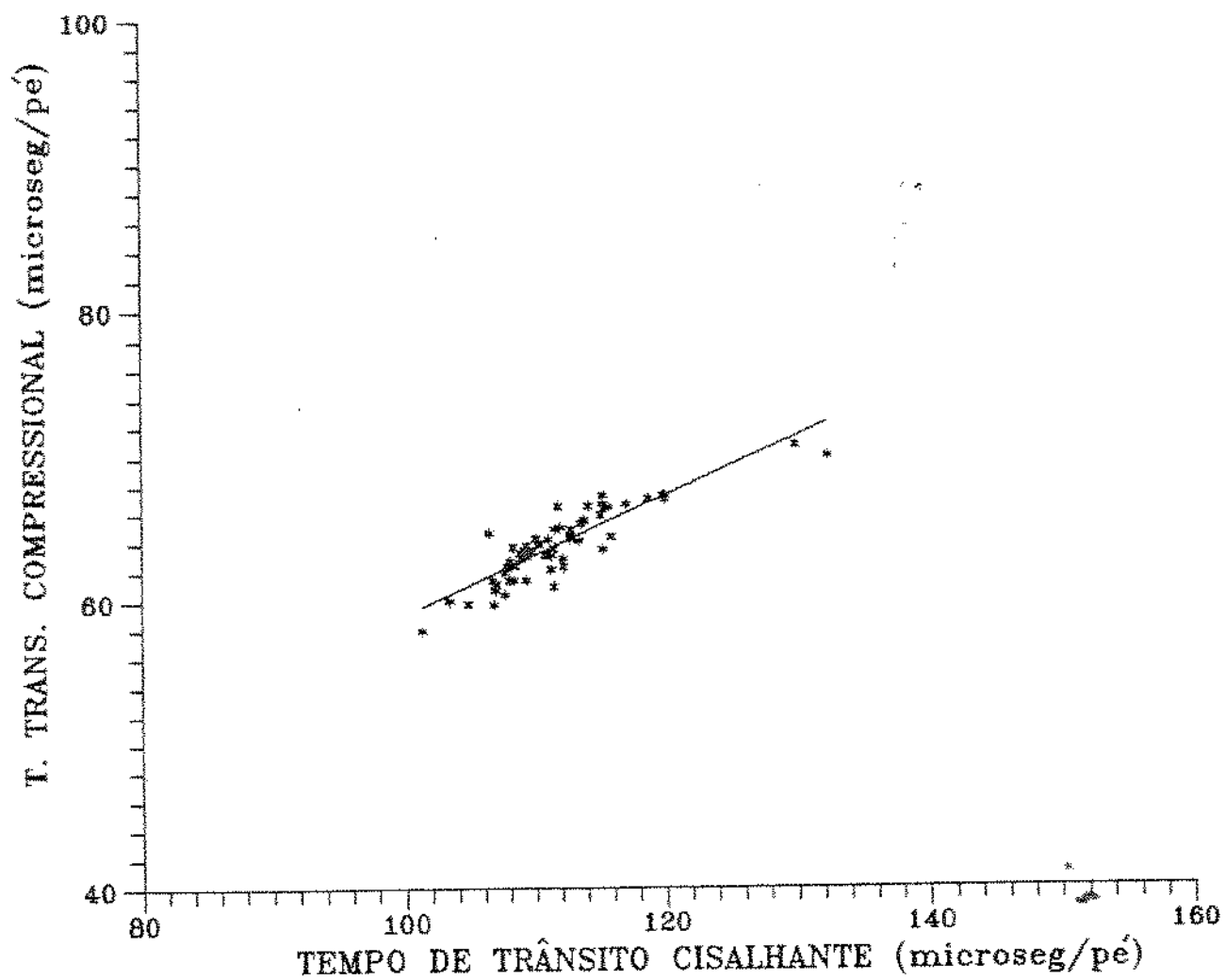


Figura 4.23 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para marga, no poço RJS-A, Bacia de Campos.



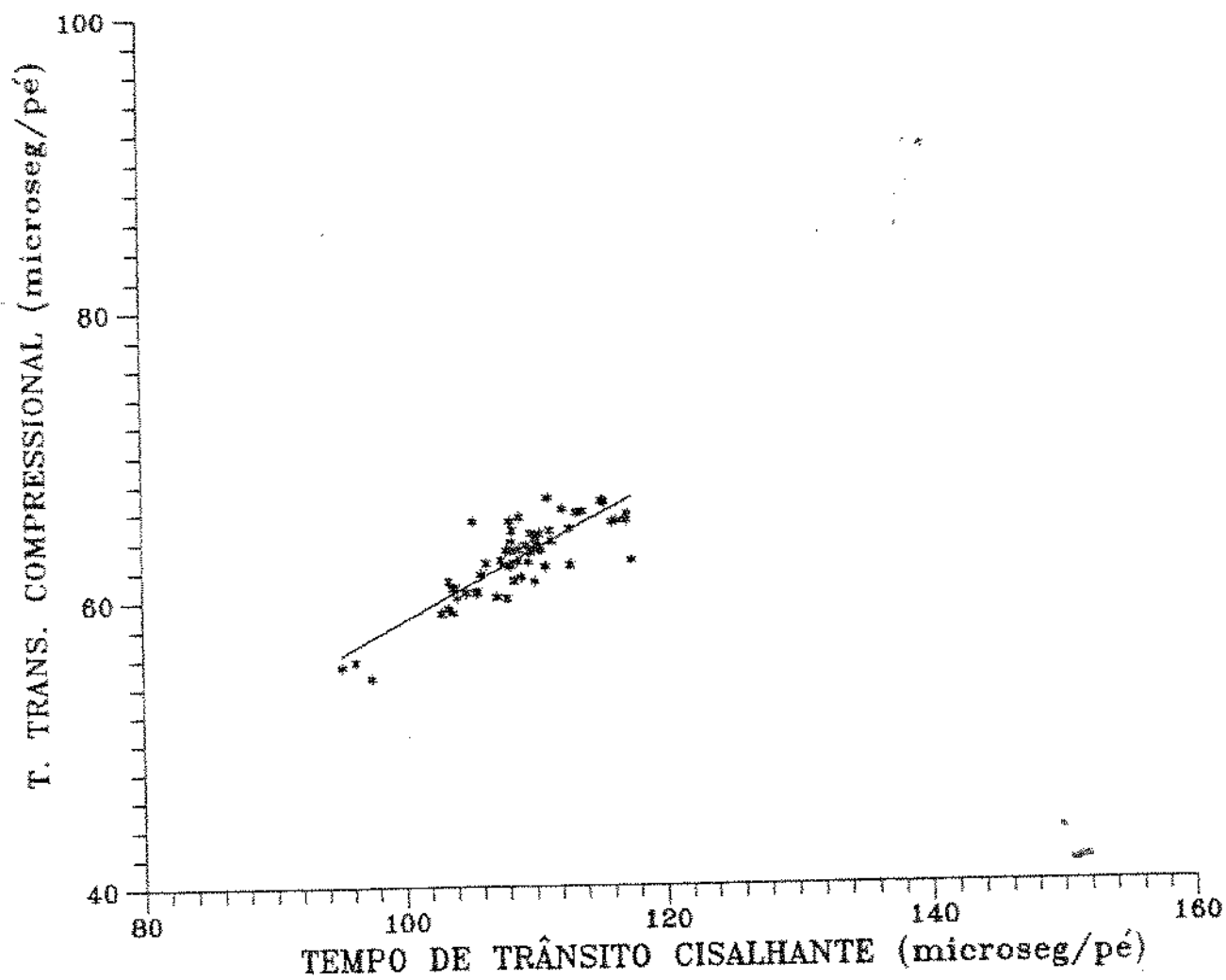


Figura 4.24 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para conglomerado, no poço RJS-A, Bacia de Campos.

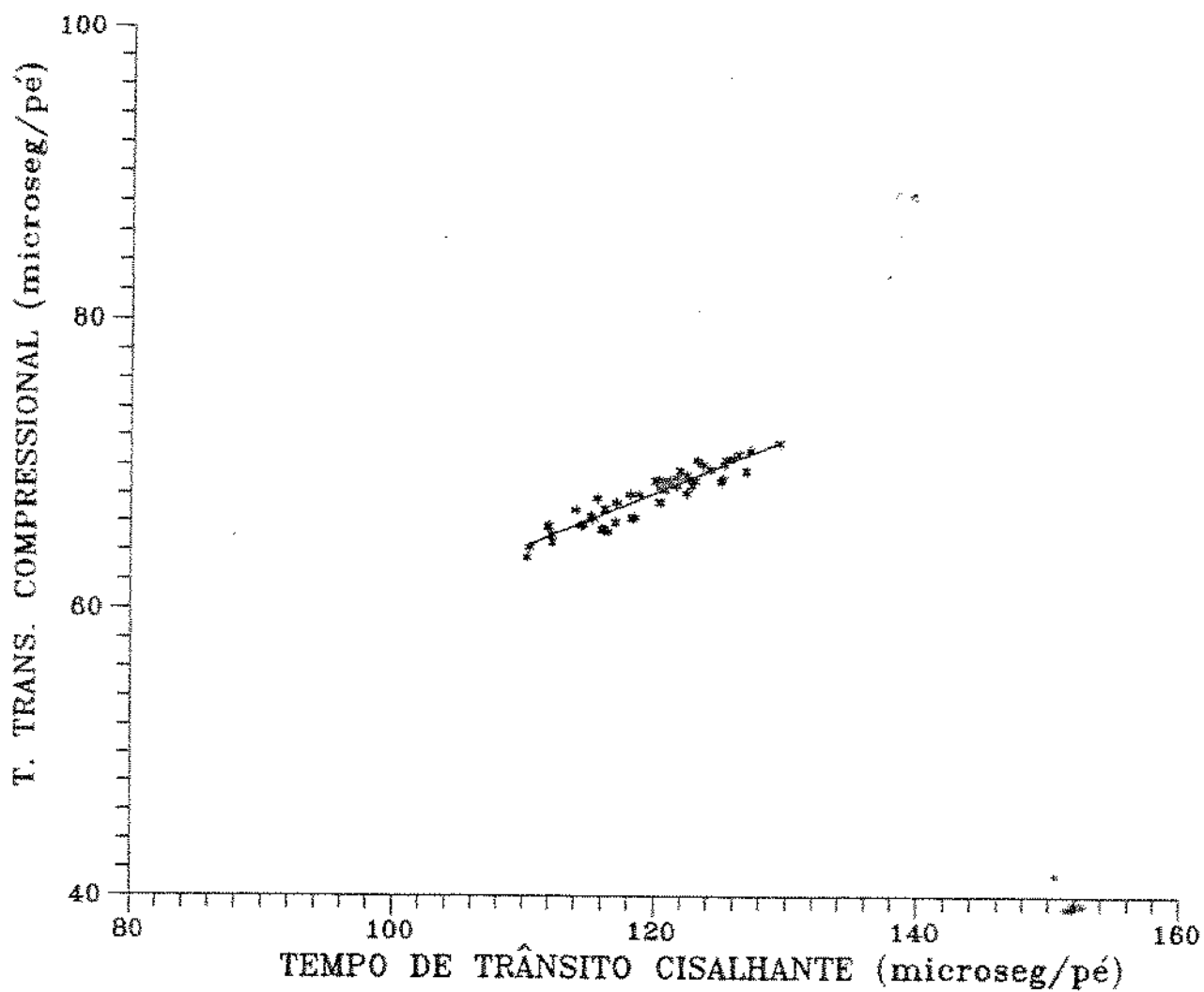


Figura 4.25 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para folhelho, no poço RJS-A, Bacia de Campos.

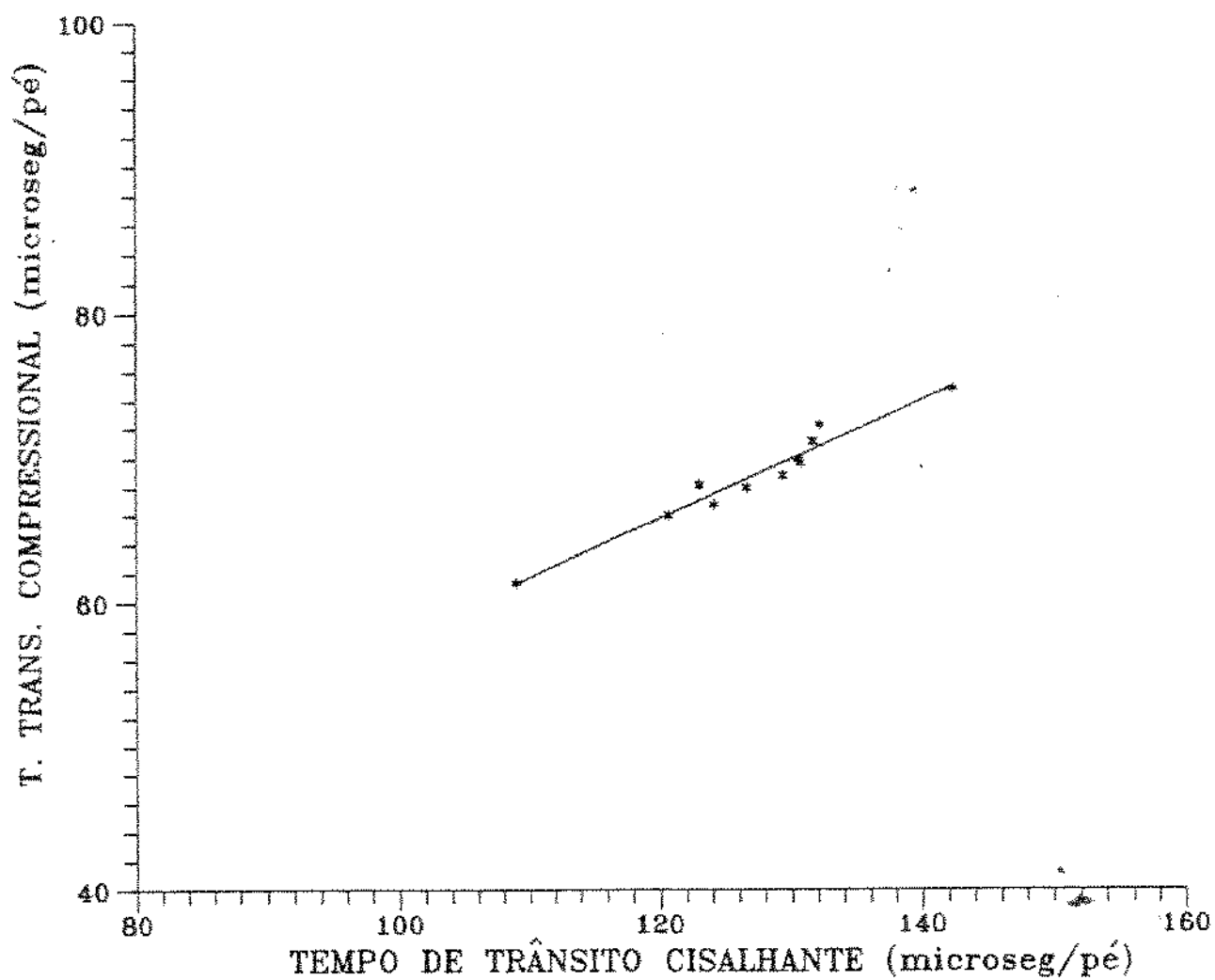


Figura 4.26 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para siltito, no poço RJS-A, Bacia de Campos.

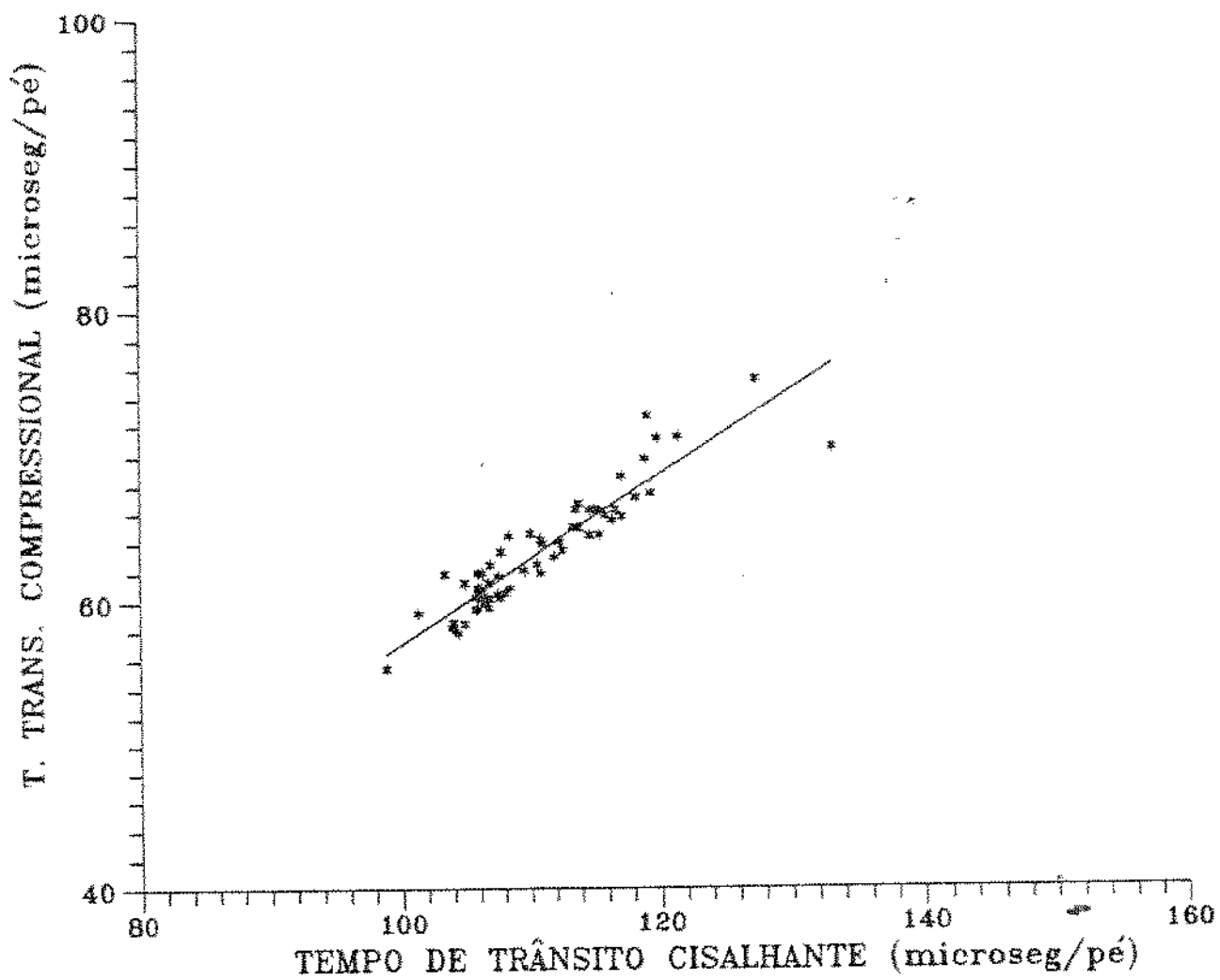


Figura 4.27 Relação entre tempo de trânsito cisalhante e tempo de trânsito compressional para arenito, no poço RJS-A, Bacia de Campos.

a correspondência entre o código IADC da broca utilizada e a sugerida, utilizando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão, recorreu-se à apresentação dessa análise em forma de tabela, de forma resumida, procurando facilitar a visualização dos resultados.

Na estimativa do tempo de trânsito cisalhante, serão utilizadas as expressões, obtidas com quatro poços da área de Macaé, RJ, apresentadas na Tabela 4.3.

Todas as considerações feitas para o campo de Tubarão, bem como os valores assumidos, serão adotados para os poços analisados na Bacia de Campos, RJ.

Foram escolhidos, aleatoriamente, dois poços verticais no campo de Vermelho e dois poços verticais no Campo de Pargo, para testar a validade do método.

As Tabelas 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 a seguir mostram as brocas utilizadas, com os correspondentes códigos IADC e os códigos IADC das brocas sugeridas pelo método, identificadas por dois dígitos, separados por ponto ou juntos. A utilização de dois códigos de identificação, separados por uma barra, significa que, no intervalo perfurado pela broca, apareceram formações que seriam melhor perfuradas, segundo o método, com a utilização de brocas cujos códigos IADC são os valores indicados, ou mesmo códigos intermediários. Foram consideradas diversas faixas de códigos IADC, até as que apresentaram apenas um ponto plotado, mesmo que este intervalo pudesse ser

perfurado com uma broca mais mole do que o valor extremo indicado, ou mesmo por uma broca com código IADC situado entre os limites de variação do mesmo, no intervalo considerado. Para facilitar a identificação, separou-se o código IADC para brocas de dente de aço, das brocas com insertos de tungstênio.

#### 4.6.2.1 Área de Vermelho

##### a) Poço RJS-E

A Tabela 4.5, apresentada a seguir, mostra as brocas utilizadas no poço RJS-E, a partir da fase de 17.5 polegadas de diâmetro. As informações referentes ao código IADC das brocas sugeridas, para o poço RJS-E, foram obtidas das Figuras 4.28 e 4.29.

BROCA UTILIZADA				CÓDIGO IADC BROCA SUGERIDA			
POÇO	DIÂM. (POL)	TIPO	COD. IADC	T. TRÂNS. CISALH		RESIST. COMPR.	
				AÇO	INSERTO	AÇO	INSERTO
RJS-E	17.5	M11	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	M11	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	M13	1.3.1	1.1	-	11/12	4.3
	12.25	J11	4.3.7	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	SM13	1.3.4	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	SM13	1.3.4	1.1	-	11/12	4.3
	"	J22	5.1.7	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	J33	5.3.7	11/23	43/61	11/21	43/53

Tabela 4.5 Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-E.

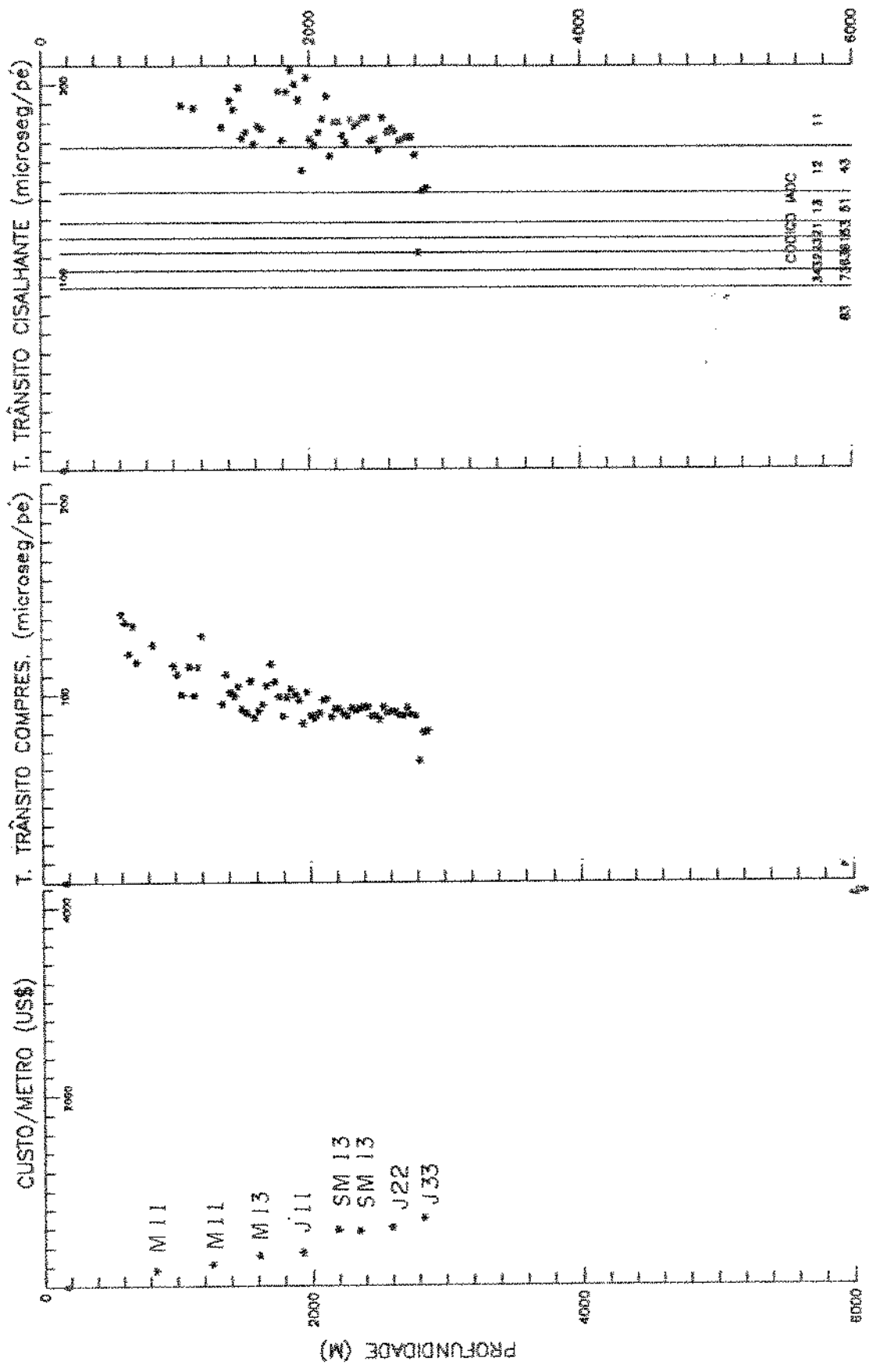


Figura 4.28 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço RJS-E.

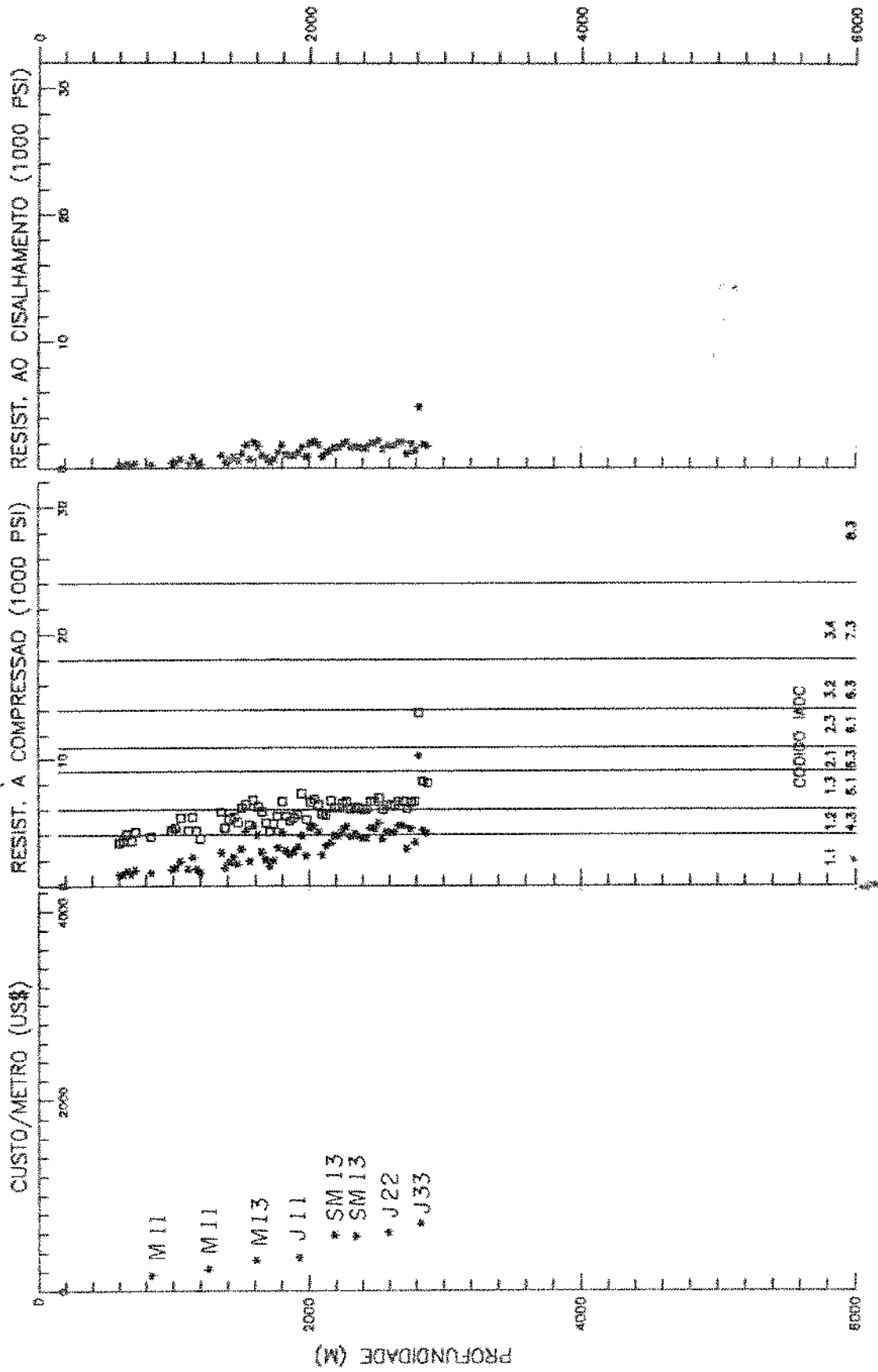


Figura 4.29 Comparação entre os brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RJS-E.



As duas primeiras brocas utilizadas estão de acordo com o sugerido.

A terceira broca utilizada (M13) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão.

A quarta broca (J11) está de acordo com o sugerido, tanto pelo tempo de trânsito cisalhante, quanto pela resistência à compressão.

A quinta e sexta brocas utilizadas (SM13), bem como a sétima broca (J22), são indicadas à perfuração de formações mais duras que as sugeridas pelo método, tanto pelo tempo de trânsito cisalhante, quanto pela resistência à compressão.

O código IADC da oitava broca utilizada (J33) situa-se na faixa intermediária dos códigos IADC de brocas de insertos, sugeridos pelo tempo de trânsito cisalhante. Quando se considera a resistência à compressão, a broca está de acordo com o código IADC indicado à perfuração do intervalo de maior resistência à compressão.

Pela análise feita acima, nota-se a não utilização de brocas de dente de aço com código IADC 1.2, bem como a pouca utilização de brocas de insertos, com código IADC 4.3. O fato de ter sido utilizada, em alguns poços, brocas indicadas para a perfuração de formações mais duras do que as sugeridas pelo método, pode ser um dos motivos das mesmas terem apresentado maior custo por metro, quando comparadas com as brocas

utilizadas, que estavam de acordo com o sugerido. O desgaste apresentado pelas duas últimas brocas reforçam esta hipótese, já que as mesmas apresentaram alto desgaste dos rolamentos e mínimo desgaste/quebra dos insertos, ao final de sua vida útil.

#### b) Poço RJS-F

A Tabela 4.6, apresentada a seguir, mostra as brocas utilizadas no poço RJS-F, a partir da fase de 17.5 polegadas de diâmetro. As informações referentes ao código IADC das brocas sugeridas, para o poço RJS-F, foram obtidas das Figuras 4.30 e 4.31.

As duas primeiras brocas utilizadas (M11) estão de acordo com o sugerido pelo método, tanto quando se considera o tempo de trânsito cisalhante quanto à resistência à compressão.

A terceira e quarta brocas utilizadas, SM12 e R3, respectivamente, são indicadas à perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas, utilizando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A quinta e sexta brocas utilizadas (J3), estão de acordo com o sugerido pelo tempo de trânsito cisalhante e pela resistência à compressão.

A sétima e oitava brocas utilizadas (J22) são indicadas à perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas, utilizando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

BROCA UTILIZADA				CÓDIGO IADC BROCA SUGERIDA			
POÇO	DIÂM. (POL)	TIPO	COD. IADC	T. TRÂNS. CISCALH		RESIST. COMPR.	
				AÇO	INSERTO	AÇO	INSERTO
RJS-F	17.5	M11	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	M11	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	SM12	1.2.4	1.1	-	1.1	-
	"	R3	1.3.1	1.1	-	11/12	4.3
	12.25	J3	1.3.6	11/13	43/51	11/13	43/51
	"	J3	1.3.6	11/13	43/51	11/13	43/51
	"	J22	5.1.7	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	J22	5.1.7	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	J22	5.1.7	11/13	43/51	11/12	4.3
	"	SD6	1.3.4	13/21	51/53	11/12	4.3
	"	J22	5.1.7	12/23	43/51	12/21	43/53
	"	J22	5.1.7	13/23	51/51	13/21	51/53

Tabela 4.6 Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-F.

A nona broca utilizada (J22), perfurou um intervalo de transição das características da formação, estando de acordo com o código IADC da broca sugerida para perfurar o intervalo mais duro, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. Se considerarmos a resistência à compressão, a broca utilizada é indicada à perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas.

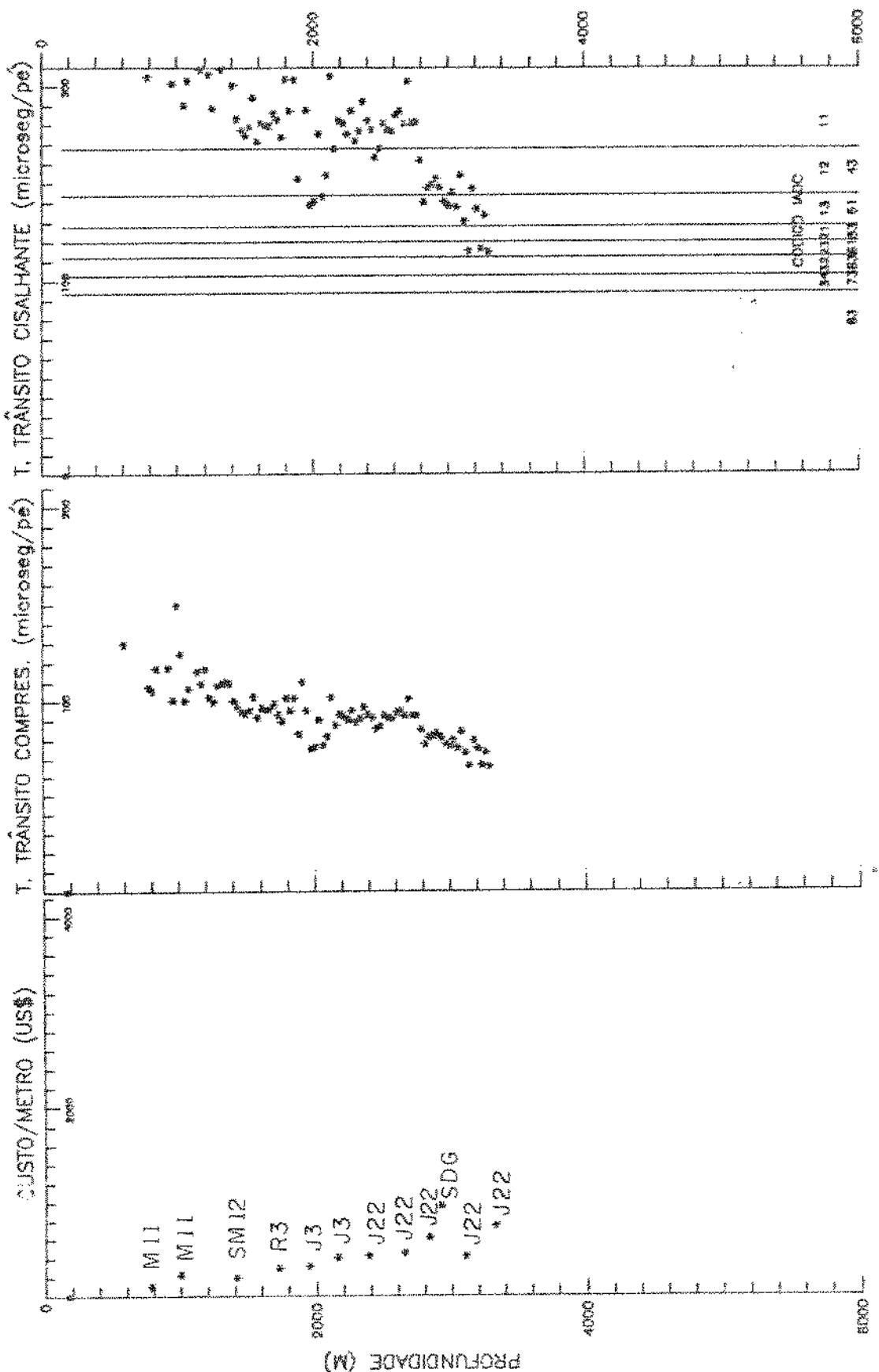


Figura 4.30 Comparação entre as brocas utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço R/S--F.

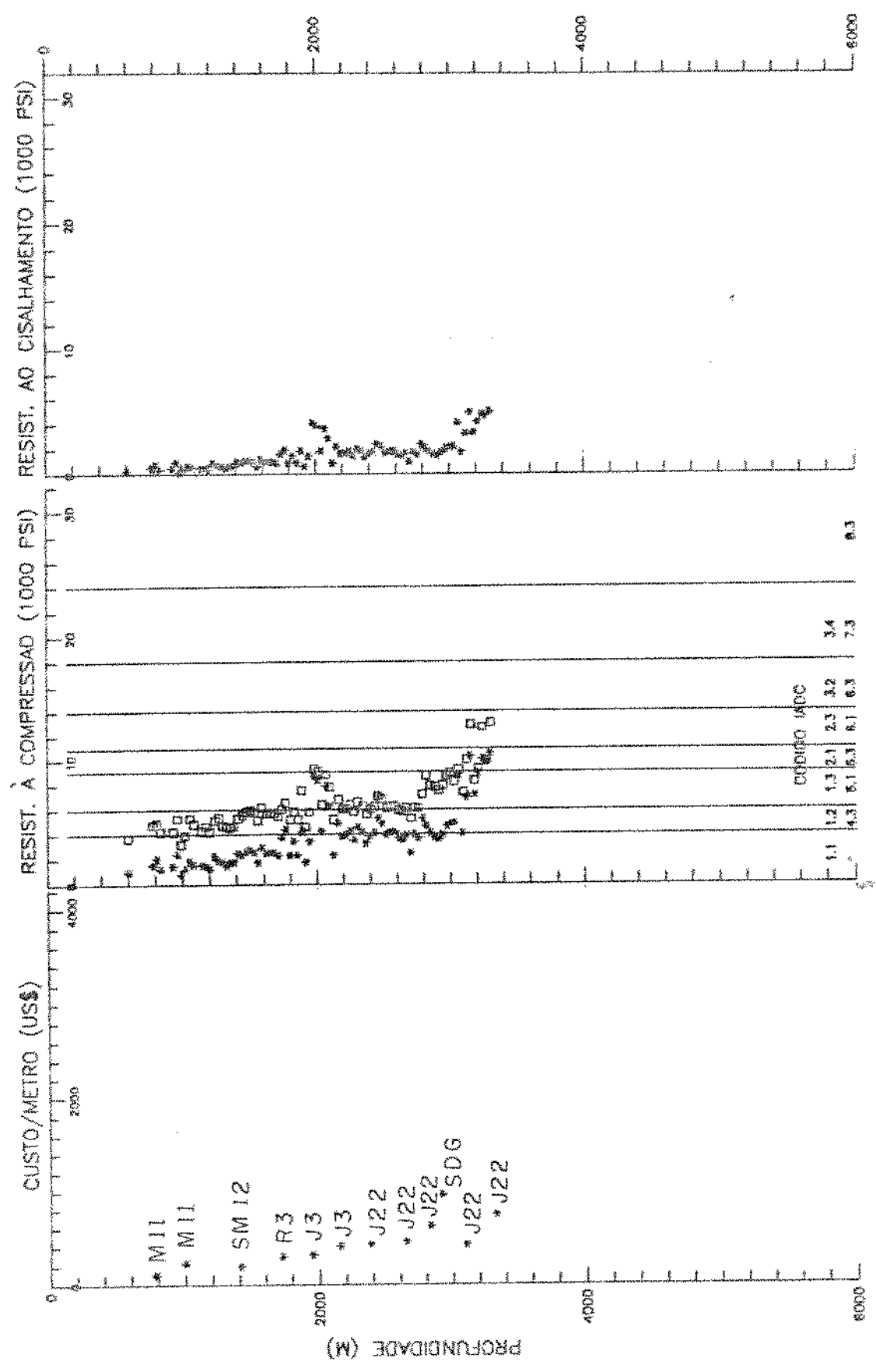


Figura 4.31 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no pagg R35-F.

A décima broca utilizada (SDG) está de acordo com o sugerido, quando consideramos o tempo de trânsito cisalhante, correspondendo ao código IADC da broca indicada à perfuração das formações mais moles, dentro do intervalo perfurado pela mesma. Se considerarmos a resistência à compressão, a broca utilizada é adequada à perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas.

As duas últimas brocas (J22) perfuraram em intervalos de acentuadas mudanças das características das formações, situando-se as mesmas dentro do sugerido pelo tempo de trânsito cisalhante e pela resistência à compressão.

Pela análise acima, observa-se que, com excessão da broca SM12, utilizada na fase de 17.5 polegadas, não foram utilizadas brocas de dente de aço com código IADC 1.2 e também brocas de inserto com código IADC 4.3. O código IADC das brocas sugeridas com o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão coincidiram em diversos intervalos.

#### 4.6.2.2 Área de Pargo

##### a) Poço RJS-G

A Tabela 4.7, apresentada a seguir, mostra as brocas utilizadas no poço RJS-G, partir da fase de 17.5 polegadas de diâmetro. As informações referentes ao código IADC das brocas sugeridas, para o poço RJS-G, foram obtidas das Figuras 4.32 e 4.33.

BROCA UTILIZADA				CÓDIGO IADC BROCA SUGERIDA			
POÇO	DIÂM. (POL)	TIPO	COD. IADC	T. TRÂNS. CISALH.		RESI ST. COMPR.	
				AÇO	INSERTO	AÇO	INSERTO
RJS-G	17.5	Y13	1.3.1	1.1	-	1.1	-
	"	Y13	1.3.1	11/12	4.3	1.1	-
	"	S4	1.3.1	11/12	4.3	11/12	4.3
	12.25	X3	1.2.4	1.1	-	11/12	4.3
	"	X3	1.2.4	1.1	-	11/12	4.3
	"	X3	1.2.4	11/12	4.3	11/12	4.3
	"	X3	1.2.4	11/13	43/51	11/13	43/51
	"	J22	5.1.7	11/12	4.3	11/13	43/51
	"	XV	2.1.4	12/13	43/51	11/13	43/51
	"	J22	5.1.7	11/13	43/51	11/13	43/51
	"	FP53	5.3.7	12/13	43/51	12/21	43/53
	"	H551	5.1.7	13/21	51/53	13/23	51/51

Tabela 4.7 Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-G.

As três primeiras brocas utilizadas (Y13, Y13 e S4) são indicadas para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas, utilizando-se o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A quarta e quinta brocas utilizadas (X3) estão de acordo com o sugerido pela resistência à compressão. Considerando-se o tempo de trânsito cisalhante, as mesmas são indicadas para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas.

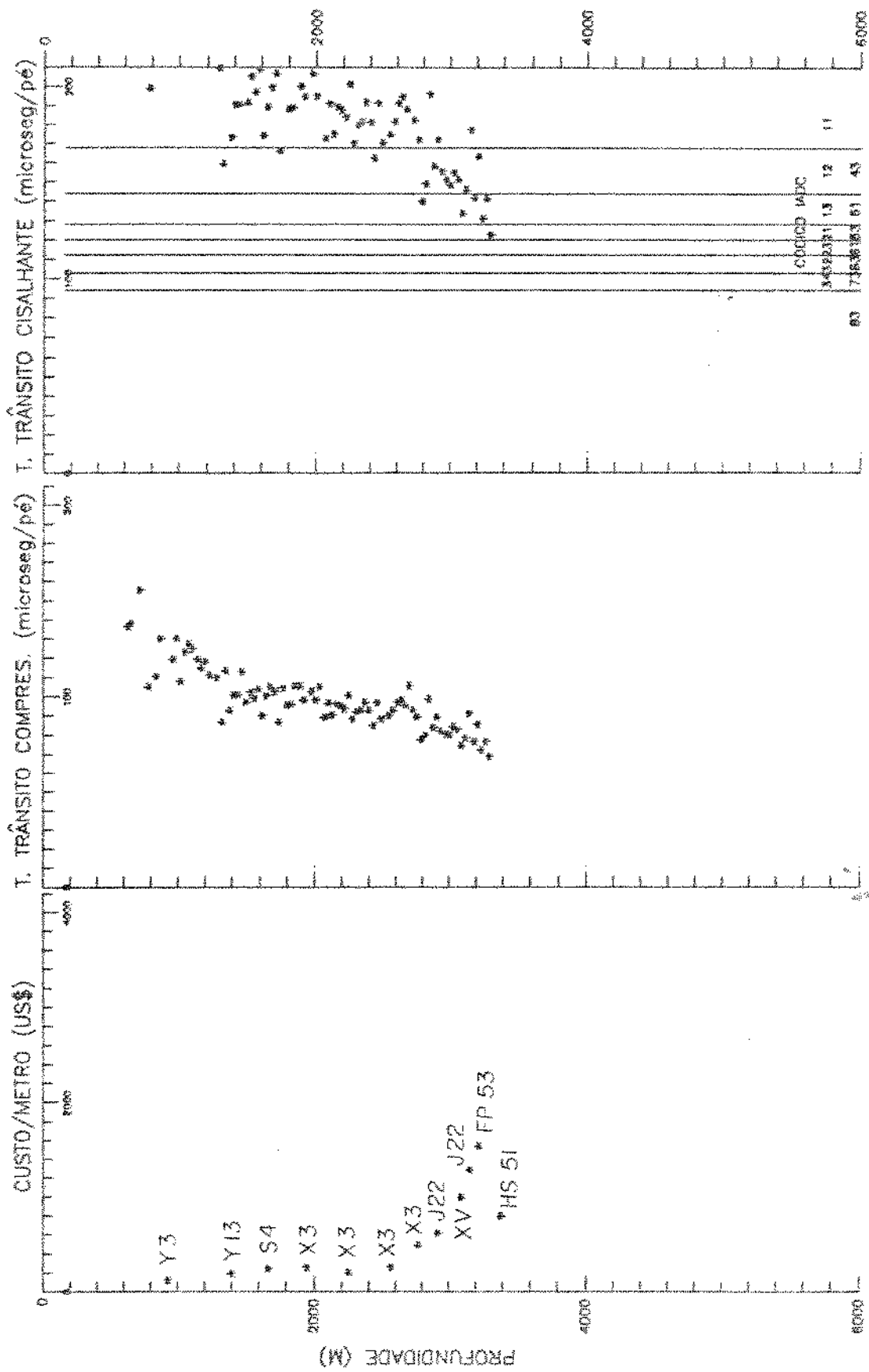


Figura 4.32 Comparação entre as braças utilizadas no campo e sugeridas por Mason, para, tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 189 microseg/pé, no poço RJS-G.



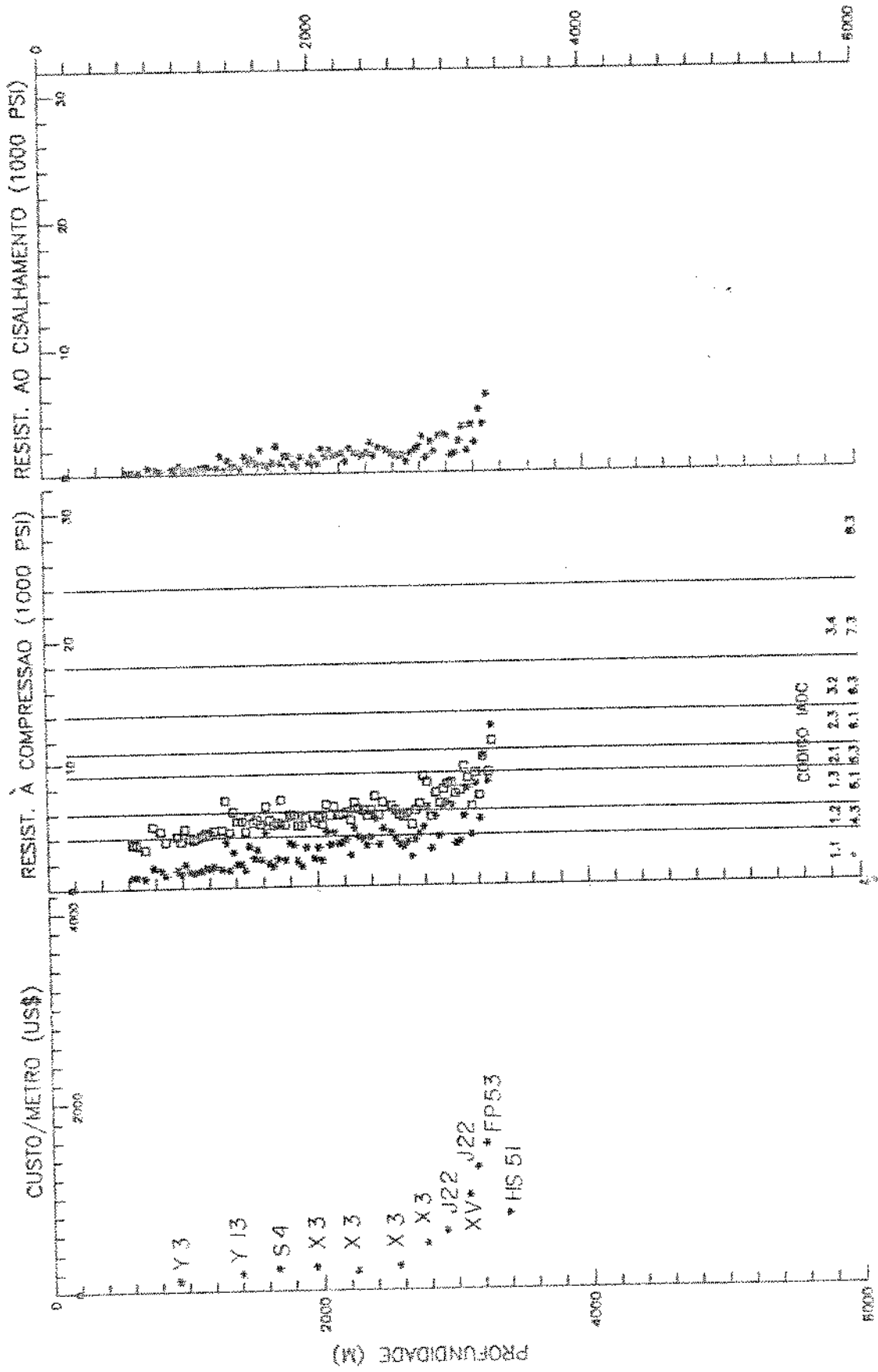


Figura 4.33 Comparação entre as brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço RUS-G.

A sexta broca utilizada (X3) está de acordo com o sugerido, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A sétima broca (X3) situa-se entre o código IADC das brocas sugeridas pelo tempo de trânsito cisalhante e pela resistência à compressão.

A oitava broca (J22) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas quando se utiliza o tempo de trânsito cisalhante. Quando se considera a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais dura do intervalo perfurado pela broca.

A nona broca (XV) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A décima broca (J22) está de acordo com o sugerido para se perfurar a parte mais dura do intervalo, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A décima primeira broca (FP53) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as sugeridas quando se utiliza o tempo de trânsito cisalhante. Considerando-se a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais dura do intervalo

perfurado pela broca.

A última broca (HSS1) está de acordo com o sugerido para se perfurar a parte mais mole do intervalo perfurado pela broca, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

Pela análise feita acima, observa-se que as brocas utilizadas estavam de acordo com o sugerido, ora pelo tempo de trânsito cisalhante, ora pela resistência à compressão, com exceção das três primeiras brocas apresentadas.

#### b) Poço RJS-H

A Tabela 4.8, apresentada a seguir, mostra as brocas utilizadas no poço RJS-H, a partir da fase de 17.5 polegadas de diâmetro.

As informações referentes ao código IADC das brocas sugeridas, para o poço RJS-H, foram obtidas das Figuras 4.34 e 4.35.

As duas primeiras brocas utilizadas (OSC3A) estão de acordo com o sugerido quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A terceira broca utilizada (OSC3A) está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais mole do intervalo, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. Quando se considera a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido.

BROCA UTILIZADA				CÓDIGO IADC BROCA SUGERIDA			
POÇO	DIÂM. (POL)	TIPO	COD. IADC	T. TRÂNS. CI SALH		RESIST. COMPR.	
				ACO	INSERTO	ACO	INSERTO
RJS-H	17.5	OSC3A	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	OSC3A	1.1.1	1.1	-	1.1	-
	"	OSC3A	1.1.1	11/12	4.3	1.1	-
	"	OSC1G	1.3.1	1.1	-	11/12	4.3
	12.25	SM11	1.1.4	1.1	-	1.1	-
	"	SM11	1.1.4	1.1	-	1.1	-
	"	SM12	1.2.4	1.1	-	11/12	4.3
	"	X3	1.2.4	1.1	-	1.1	-
	"	SM12	1.2.4	1.1	-	11/12	4.3
	"	J22	5.1.7	11/23	43/61	11/23	43/61
"	J22	5.1.7	12/13	43/61	12/13	43/61	

Tabela 4.8 Comparação entre códigos IADC das brocas utilizadas e das brocas sugeridas através do tempo de trânsito cisalhante e resistência à compressão, para o poço RJS-H.

A quarta broca utilizada (OSC1G) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as sugeridas, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A quinta e sexta brocas utilizadas (SM11) estão de acordo com o sugerido pelo tempo de trânsito cisalhante e pela resistência à compressão.

A sétima broca utilizada (SM12) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que a broca indicada pelo

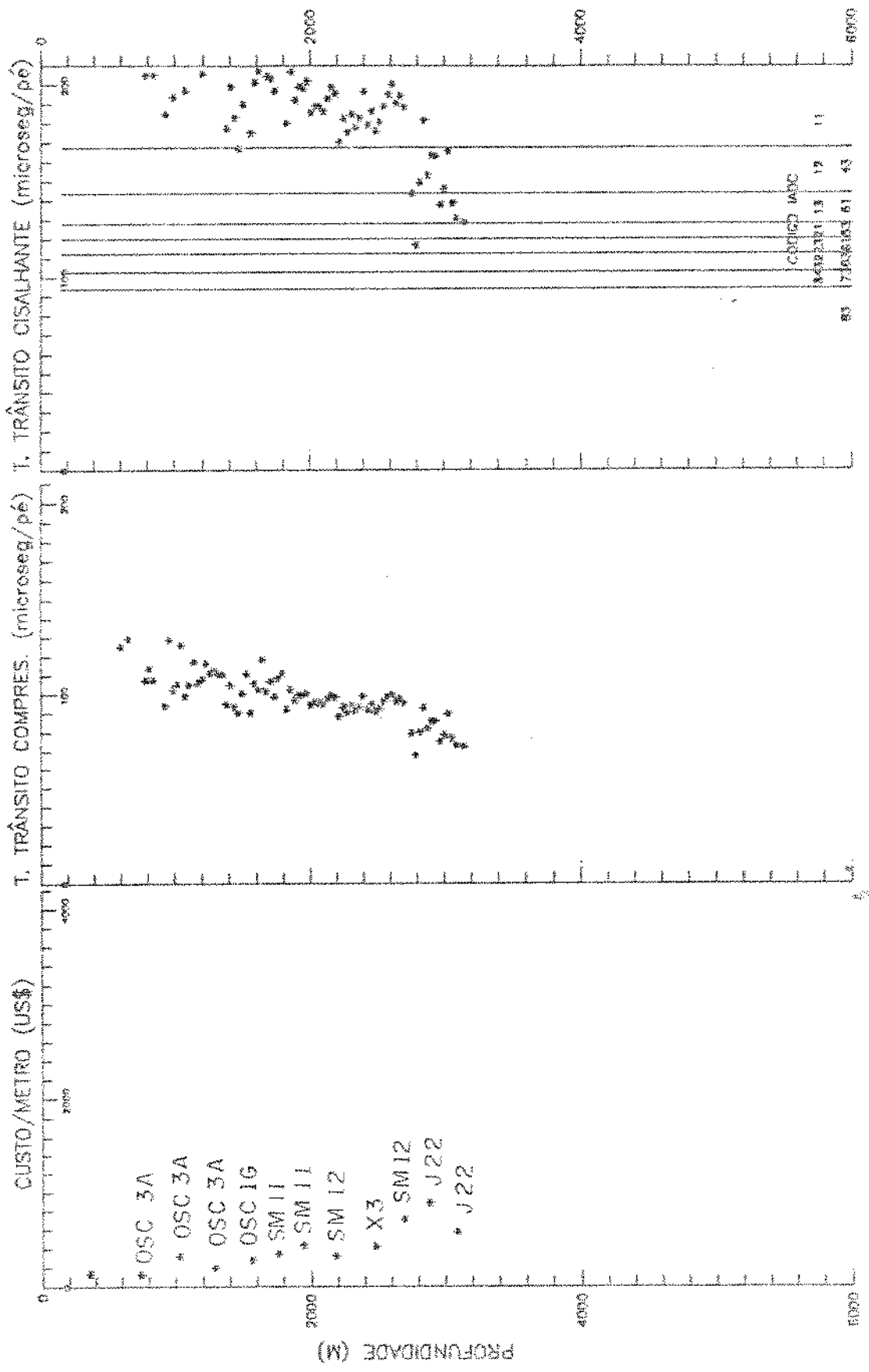


Figura 4.34 Comparação entre os braços utilizados no campo e sugeridas por Mason, para tempo de trânsito no fluido contido nos poros de 159 microseg/pé, no poço RuS-14.

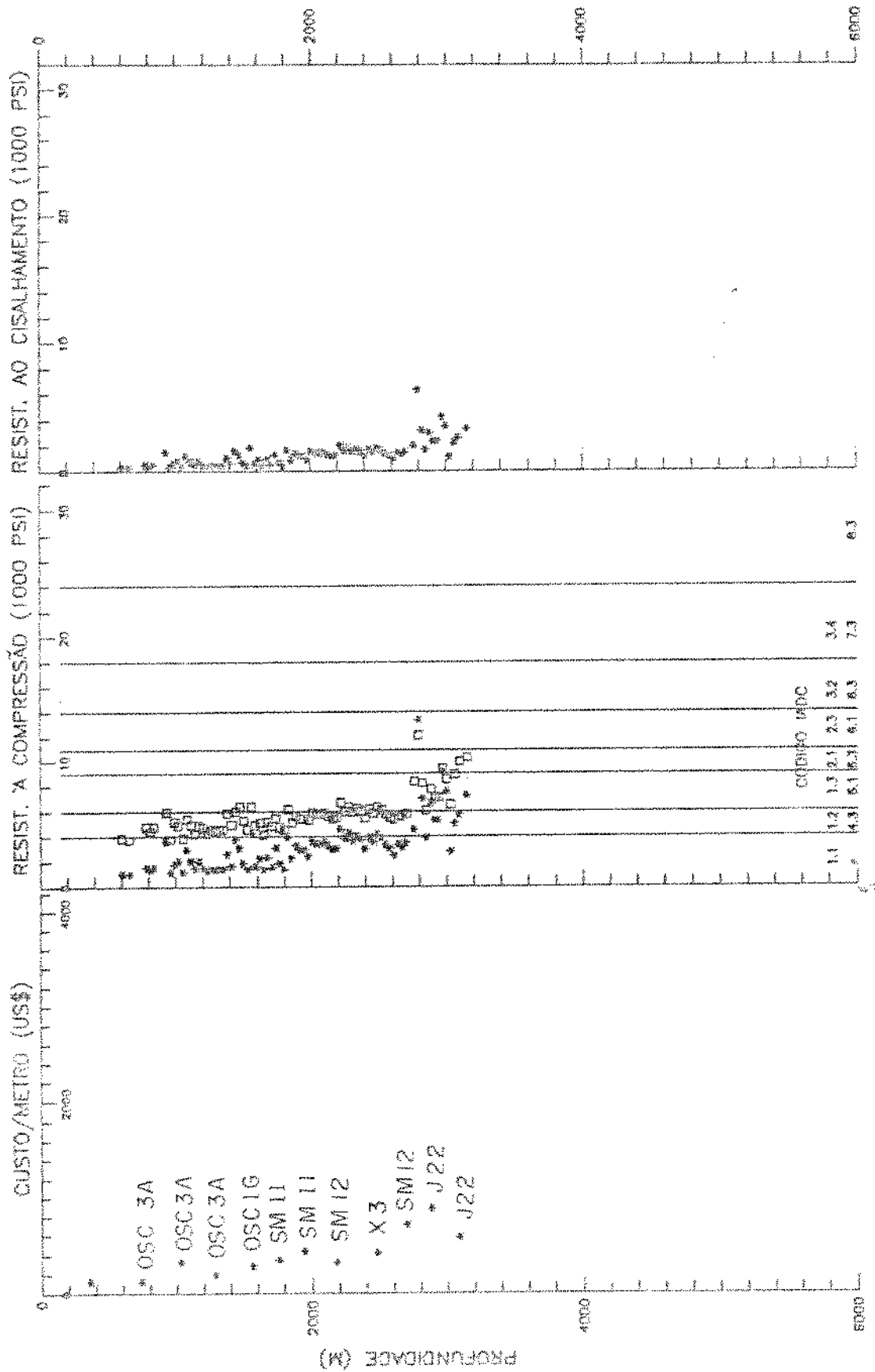


Figura 4.35 Comparação entre os brocas utilizadas e as sugeridas empregando as equações (3.8) e (2.21), no poço R/S--H.

tempo de trânsito cisalhante. Se considerarmos a resistência a compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais dura do intervalo perfurado pela broca.

A oitava broca utilizada (X3) é indicada à perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas, quando utilizamos o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A nona broca utilizada (SM12) é indicada para a perfuração de formações mais duras do que as brocas sugeridas quando se considera o tempo de trânsito cisalhante. Quando se utiliza a resistência à compressão, a broca utilizada está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais dura do intervalo perfurado pela broca.

A décima broca utilizada (J22), perfurou um intervalo de acentuada variação nas características da formação, situando-se a mesma numa posição intermediária entre os códigos IADC das brocas sugeridas, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

A última broca utilizada (J22) está de acordo com o sugerido para perfurar a parte mais dura do intervalo perfurado pela broca, quando se considera o tempo de trânsito cisalhante e a resistência à compressão.

Pela análise feita acima, observa-se que apenas as brocas CSC16 e X3 estavam em desacordo com o sugerido, enquanto

as demais brocas utilizadas estão de acordo com o sugerido pelo tempo de trânsito cisalhante e/ou pela resistência à compressão.



## CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## 5.1 Conclusões.

a) O método para escolha de brocas tricônicas, proposto por Mason, utilizando o tempo de trânsito cisalhante, mostrou-se coerente com o observado, nos poços estudados, em locais onde se dispunha de brocas para análise.

b) A utilização dos intervalos sugeridos por Mason, para escolha de brocas tricônicas, junto da resistência à compressão, calculada com a equação (3.8), também mostrou-se coerente com o observado, nos poços analisados, em locais onde se dispunha de brocas para análise.

c) A resistência à compressão e ao cisalhamento, calculadas com as equações (3.8) e (3.11), não mostraram-se sensíveis à variação, dentro dos limites considerados, do tempo de trânsito no fluido contido nos poros.

d) A resistência à compressão estimada pela equação (3.8) mostrou-se sensível à variação: da massa específica da formação; do ângulo de atrito interno; da resistência ao cisalhamento inicial e do diferencial de pressão atuando no fundo do poço. A variação observada, com os valores que foram utilizados na análise de sensibilidade, pode até mesmo resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

e) A resistência ao cisalhamento estimada com a equação (3.11) também mostrou-se sensível à variação: da massa específica da formação; do ângulo de atrito interno; da resistência ao cisalhamento inicial e do diferencial de pressão atuando no fundo do poço. A variação da resistência ao cisalhamento ocorreu de forma menos acentuada que o observado para a resistência à compressão.

f) A resistência à compressão e ao cisalhamento também mostraram-se sensíveis à variação do tempo de trânsito cisalhante da formação, de forma menos acentuada que o observado para os parâmetros citados nos itens d) e e) acima.

g) Quando se considera o tempo de trânsito cisalhante como parâmetro para escolha de broca, a variação de menos 10% e mais 10% em relação aos valores estimados do mesmo, pode resultar na indicação de brocas com diferentes códigos IADC.

h) A determinação da razão  $\Delta T_s/\Delta T_c$  e/ou de expressões para estimativa do tempo de trânsito cisalhante, próprias à cada área analisada, confirmou ser necessária para obter-se resultados mais representativos.

i) A utilização de equações que fornecem a resistência à compressão, sem especificar as condições em que as mesmas foram medidas, pode levar a resultados bastante diferentes dos resultados obtidos por outros meios, em condições conhecidas.

j) 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.

k) A maneira de apresentação dos diversos parâmetros mostrou-se útil e conveniente na associação das características das formações com as brocas utilizadas, bem como na identificação das brocas indicadas à perfuração de determinado intervalo.

l) Identificou-se a existência de diversos locais para a utilização de brocas com código IADC 1.2 ou 4.3. Essas brocas seriam as mais indicadas para a perfuração de formações com dureza intermediária, entre as formações viáveis ao uso de brocas com código IADC 1.1 e 1.3 ou 5.1, caso não existam intercalações de maior dureza que possam provocar a quebra dos dentes da broca.

## 5.2 Recomendações.

a) Determinar expressões para estimativa do tempo de trânsito cisalhante em função de outros dados de perfis, propondo até mesmo a utilização de diferentes perfis ao longo do poço, com essa finalidade.

b) Aplicar o estudo, em áreas de desenvolvimento, onde já se dispõe de maior número de informações sobre o desempenho de brocas PDC, em condições semelhantes.

c) Procurar estabelecer intervalos de melhor aplicação de brocas PDC, em função da resistência ao cisalhamento.

d) Avaliar em laboratório valores calculados de resistência à compressão e ao cisalhamento, com pressão de confinamento igual ao efetivo diferencial de pressão atuando no fundo do

poço, durante a perfuração.

e) Aprofundar estudo sobre o comportamento e a orientação de tensões no fundo do poço, quando da atuação da broca PDC, e verificar os resultados para outros critérios de ruptura.

f) Como nem sempre se dispõe de resultados de teste de formação, para avaliar-se a pressão de poros obtida através de dados de perfis, torna-se necessário dispor-se de unidades supervisoras de sonda, coletando, pelo menos, dados necessários a estes cálculos e à própria otimização das condições de utilização de brocas. A pressão de poros estimada servirá para a determinação do diferencial de pressão, atuando no fundo do poço e estimativa da resistência à compressão da formação perfurada.

g) Testar e avaliar no campo o desempenho das brocas tricônicas com código IADC 1.2 ou 4.3, em locais onde as mesmas tenham sido indicadas.

h) Procurar associar tempo de trânsito cisalhante da formação, com a energia requerida para remover um volume unitário de rocha (energia específica).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Madigan, J. A. & Caldwell, R. H.: *Applications for Polycrystalline Diamond Compact Bits From Analysis of Carbide Insert and Steel Tooth Bit Performance*. Journal of Petroleum Technology, July 1981, pág. 1171-79.
2. Sneddon, M. V. & Hall, D.R.: *Recent Advances in Polycrystalline Diamond Technology Opens New Frontiers in Drilling*. Society of Petroleum Engineers n° 17007, 1987.
3. Nakagawa, E. Y.; Placido, J. C. R.; Dumans, C. F. Fontenelle; Poggio Jr., A.: *Estudo de Viabilidade de Aplicação de Brocas Stratapax na Petrobras*. PETROBRAS/CENPES/DIPILOT/SEPEF (Comunicação Técnica n° 022/83), 1983.
4. Fonseca, C. F. H.: *Estudo da Viabilidade de Aplicação de Brocas PDC no Brasil*. Quinto Congresso Latino-Americano de Perfuração, 1985.
5. Williams, J. L. & Thompson, A. I.: *An Analysis of the Performance of PDC Hybrid Drill Bits*. Society of Petroleum Engineers n° 16117, 1987.
6. Feenstra, R.: *Status of Polycrystalline-Diamond-Compact Bits: Part 2 - Applications*. Journal of Petroleum Technology, July 1988, pág. 817-821.
7. Moore, S. O.; Lynch, B. W. & Talbot, K. J.: *A Case History of Polycrystalline Diamond Compact Bit Performance in the Tuscaloosa Trend*. SPE n° 11944, 1983.
8. Preslar, P. L. & McDermaid, J. D.: *Polycrystalline*

- Diamond Compact Bit Proves Effective at South Graham Deese Sand Unit.* Journal of Petroleum Technology, December 1984. pág. 2103-2109.
9. Brock, J.: *Applied Open-Hole Log Analysis.* Volume II, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1986.
  10. Frost Jr., E. & Fertl, W. H.: *Shear Wave Travel Time Determination Using an Unconventional Approach.* SPE n° 11032, 1982.
  11. Danbom, S. H. & Domenico, S. N.: *Shear-Wave Exploration.* Society of Exploration Geophysicists, Geophysical Developments, Volume 1. 1987.
  12. Dernbach, L. A.: *Sonic-gamma ray analysis improves bit selection.* Oil & Gas Journal, June 14, 1982. pág. 90-101.
  13. Petroguia. Manual do Departamento de Perfuração, PETROBRAS, 1ª Edição, Julho 1989.
  14. Brocas - Tabela Comparativa Peso e Rotação. Hughes Tool do Brasil, 1982.
  15. Pinheiro, Cesar & Linhares, T. X. Saulo: *Utilização de perfis geológicos para elaboração de programas de broca.* Quarto Congresso Latino-Americano de Perfuração, 1984.
  16. Mason, K. L.: *Tricone Bit Selection Using Sonic Logs.* SPE n° 13256, 1984.
  17. Walker, B. H.; Black, A. D.; Klauber, W. P.; Little, T. & Khodaverdian, M.: *Roller-Bit Penetration Rate Response as a Function of Rock Properties and Well Depth.* SPE n° 15620, 1986.
  18. Winters, W. J.; Warren, T. M. & Onyia, E. C.: *Roller Bit*

- Model With Rock Ductility and Cone Offset.* SPE n° 16696, 1987.
19. Onyia, E. C.: *Relationships Between Formation Strength, Drilling Strength, and Electric Log Properties.* Society of Petroleum Engineers n° 18166, 1988.
  20. Ohara, S.: *Método de Escolha do Tipo de Broca e Seleção do Peso Sobre Broca e Velocidade de Rotação na Perfuração com Mínimo Custo.* Tese de Mestrado, UNICAMP, Março 1989.
  21. Gault, A. D.; Knowlton, H.; Goodman, H. E.; Bourgoyne Jr., A. T.: *PDC Applications in the Gulf of Mexico With Water-Based Drilling Fluids.* Society of Petroleum Engineers Drilling Eng., June 1988, pág. 117-24.
  22. Rabia, Hussain: *Specific Energy as a Criterion for Bit Selection.* Journal of Petroleum Technology, July 1985, pág. 1225-229.
  23. Rabia, H.; Farrelly, M. & Barr, M.V.: *A New Approach to Drill Bit Selection.* SPE 15894, 1986.
  24. Feenstra, R.: *Status of Polycrystalline-Diamond-Compact Bits: Part 1 - Development.* Journal of Petroleum Technology, June 1988, pág. 675-684.
  25. Pickett, G. R.: *Acoustic Character Logs and their Applications in Formation Evaluation.* Journal of Petroleum Technology, 1983, pág. 659-667.
  26. Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T.: *Numerical Recipes.* Cambridge University Press, 1987, pág. 484.
  27. *Cased Hole Log Interpretation Principles/ Applications,*

- Schlumberger, 1989.
28. Cesaroni, R.; Giacca, D.; Schenato, A. & Thierree, B.:  
*Determining Frac Gradients While Drilling*. Petroleum  
Engineer International, reprinted from June 1981.
  29. Lama, R.D.; Vutukuri, V. S.: *Handbook on Mechanical  
Properties of Rocks*. Trans Tech Publications, Volume II,  
1978. pág. 94.
  30. Log Interpretation Principles / Applications.  
Schlumberger, 1989.