



**COPPE/UFRJ**

## PERFURAÇÃO ECONÔMICA DE ROCHAS

Marco Antônio Ribeiro de Almeida

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientador: Raad Yahya Qassim

Rio de Janeiro

Junho de 2010

# PERFURAÇÃO ECONÔMICA EM ROCHAS

Marco Antonio Ribeiro de Almeida

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.

---

Prof. José Luis Lopes da Silveira, D.Sc.

---

Prof. José Márcio do Amaral Vasconcellos, D.Sc.

---

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.

---

Prof. Antônio José da Silva Neto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2010

Almeida, Marco Antônio Ribeiro

Perfuração Econômica de Rochas/Marco Antônio Ribeiro de Almeida. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XX, 250 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Raad Yahya Qassim

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 170-176.

1. Perfuração em rochas. 2. Programação Intervalar. 3. Brocas. I. Qassim, Raad Yahya. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## Dedicatória

Dedico este trabalho a meu pai Melquíades (*In Memoriam*), a minha mãe Bela, a minha esposa Mônica que tanto me apoiou nesse período e, principalmente, a minha princesinha Tirza que por vários momentos não pude dar a devida atenção.

*“A educação é uma descoberta progressiva de nossa ignorância”.*

*Will Durant*

# Agradecimentos

Meu agradecimento inicial vai para o meu orientador Prof<sup>o</sup> Raad Y. Qassim, por tudo que ele me ensinou na academia e no dia-a-dia de um bom profissional.

Oportunamente, eu agradeço a todos os funcionários do Programa de Engenharia Naval e Oceânica da UFRJ. Não posso deixar de agradecer também, a Alta Administração do LTS por ter me dado condições de finalizar esta tese.

Ao Mauro Rezende pelo auxílio nos modelos do LINGO quando foi necessário.

Um agradecimento muito especial a minha família e minha mãe.

Agradeço ao Eng<sup>o</sup> Gustavo Rossi, da Smith International pelas informações sobre brocas e os dados usados no trabalho.

Agradeço ao Sr. Ricardo Novaes, da empresa Romi pelas informações sobre custos do CNC aplicados neste trabalho.

Aos amigos da UGF pelo apoio para que eu finalizasse esta fase da minha vida.

E acima de tudo a Deus por ter me dado muita força para concluir mais um projeto de vida.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## PERFURAÇÃO ECONÔMICA EM ROCHAS

Marco Antônio Ribeiro de Almeida

Junho/2010

Orientador: Raad Yahya Qassim

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho desenvolve um modelo de programação não linear intervalar e outro determinístico para o custo por metro perfurado em poços de petróleo. Além disso, um modelo de vida para brocas aplicadas em rocha baseada em economia de escala é apresentado. Dois exemplos são apresentados para demonstrar os conceitos aplicados no trabalho, a aplicabilidade e viabilidade do modelo de programação não linear intervalar. Os resultados observados não corroboram com os resultados previstos teoricamente.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## ECONOMIC DRILLING OF ROCKS

Marco Antonio Ribeiro de Almeida

June/2010

Advisor: Raad Yahya Qassim

Department: Ocean Engineering

This work presents a interval nonlinear and deterministic program for cost per meter on oil and gas well. In addition, it presents a life model for rock bits based in economies-of-scale. Two examples were built to show the theoretical concepts, applicability and viability of the interval nonlinear program. The results are not agree with those theoretical predicted.

# Sumário

Capítulo 1 – Introdução	01
Capítulo 2 – Revisão da Bibliografia	05
2.1 – Usinagem Econômica de Materiais	05
2.1.1 – Economia de Usinagem de Materiais	05
2.1.1.1 – Abordagem Geral	06
2.1.1.2 – Análise das Condições Econômicas de Usinagem	09
2.1.1.3 – Modelo de Otimização	09
2.1.2 – Técnicas Matemáticas de Solução para Usinagem Econômica	16
2.1.3 – Furação de Metais	18
2.1.3.1 – As Brocas Helicoidais e suas Formas Construtivas	19
2.1.3.2 – Forças e Potências de Corte na Furação	19
2.1.3.3 – Avanço Máximo Permissível e Resistência de uma Broca Helicoidal	21
2.2 – Tempo e Custo em Perfuração de Poço de Petróleo	23
2.2.1 – Custo Métrico Perfurado	29
2.3 – Programação Linear Multi-Objetivo	35
2.3.1 – Classificação dos Métodos de Programação Linear Multi-Objetivo	36
2.3.2 – Modelagem da Programação Matemática Multi-Objetivo	37

2.4 – Incerteza e Abordagens para Tratamento de Incerteza	42
2.4.1 – Incerteza	42
2.4.2 – Tratamento da Incerteza	44
2.4.2.1 – Programação Estocástica	44
2.4.2.2 – Programação Difusa	46
2.4.2.3 – Programação Intervalar	48
<b>Capítulo 3 – Modelo Matemático Não Linear Intervalar</b>	<b>56</b>
3.1 – Descrição e Formulação do Problemas	56
3.2 – Modelo Matemático Não Linear Determinístico	60
3.3 – Modelo Matemático Não Linear Intervalar	63
<b>Capítulo 4 – Exemplos Numéricos Ilustrativos</b>	<b>75</b>
4.1 – Exemplo 1: Perfuração de um Poço de Petróleo	75
4.1.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%	81
4.1.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%	87
4.1.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%	93
4.1.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%	99
4.1.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%	105
4.1.6 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%	111
4.1.7 – Análise geral dos aumentos das incertezas	115

4.2 – Exemplo 2: Furação de Metais	119
4.2.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%	126
4.2.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%	132
4.2.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%	139
4.2.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%	145
4.2.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%	152
4.2.6 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%	158
4.2.7 – Análise geral dos aumentos das incertezas	163
Capítulo 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros	167
Referências Bibliográficas	170
<b>Apêndice A - Complemento sobre Perfuração</b>	177
<b>Apêndice B - Etapas de Execução da Tese e Algoritmos</b>	228
<b>Apêndice C - Modelos Matemáticos do Exemplo Perfuração de Petróleo</b>	238
<b>Apêndice D - Modelos Matemáticos do Exemplo dos Metais</b>	242

# Lista de Figuras

## Seção 2.1.3.1 – As Brocas Helicoidais e suas Formas Construtivas

Figura 1 – Partes de uma Broca Helicoidal 19

## Seção 2.2 – Tempo e Custo em Perfuração de Poço de Petróleo

Figura 2 – Fatores que influenciam no custo da perfuração de um poço 26

## Seção 4.1.1 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%

Figura 3 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$  81

Figura 4 – Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$  82

Figura 5 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  82

Figura 6 – Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$  83

## Seção 4.1.2 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

Figura 7 – Relação entre custo métrico x rop x rpm x vida da broca 88

Figura 8 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico 89

Figura 9 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico 89

Figura 10 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico 90

Figura 11 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico 90

## Seção 4.1.3 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%

Figura 12 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$  93

Figura 13 – Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$  94

Figura 14 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  94

Figura 15 – Comparação dos valores entre $Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^-$	95
--	----

Seção 4.1.4 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%

Figura 16 – Relação entre custo métrico x rop x vida da broca	100
Figura 17 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico	101
Figura 18 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico	101
Figura 19 – Relação vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico	102
Figura 20 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico	102

Seção 4.1.5 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%

Figura 21 – Comparação dos valores entre $Rop_{opt,n}^+$ e $Rop_{opt,n}^-$	106
Figura 22 – Comparação dos valores entre $Rpm_{opt,n}^+$ e $Rpm_{opt,n}^-$	106
Figura 23 – Comparação dos valores entre $Z_{opt,n}^+$ e $Z_{opt,n}^-$	107
Figura 24 – Comparação dos valores entre $Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^-$	108

Seção 4.1.6 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%

Figura 25 – Relação entre custo métrico x rop x rpm x vida da broca	112
Figura 26 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico	113
Figura 27 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico	113
Figura 28 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico	114
Figura 29 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico	114

Seção 4.2.1 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%

Figura 30 – Comparação dos valores entre $Rop_{opt,n}^+$ e $Rop_{opt,n}^-$	126
Figura 31 – Comparação dos valores entre $Rpm_{opt,n}^+$ e $Rpm_{opt,n}^-$	127

Figura 32 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  127

Figura 33 – Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$  128

#### Seção 4.2.2 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

Figura 34 – Relação do rop x custo métrico total 133

Figura 35 – Relação do rpm x custo métrico total 133

Figura 36 – Relação da vida da broca x custo métrico total 134

Figura 37 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico 135

Figura 38 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico 135

Figura 39 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico 136

Figura 40 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico 136

#### Seção 4.2.3 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%

Figura 41 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$  139

Figura 42 – Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$  140

Figura 43 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  140

Figura 44 – Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$  141

#### Seção 4.2.4 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%

Figura 45 – Relação entre rop x custo métrico total 146

Figura 46 – Relação entre rpm x custo métrico total 146

Figura 47 – Relação da vida da broca x custo métrico total 147

Figura 48 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico 148

Figura 49 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico 148

Figura 50 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico 149

Figura 51 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico 149

Seção 4.2.5 - Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%

Figura 52 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$  152

Figura 53 – Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$  153

Figura 54 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  153

Figura 55 – Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$  154

Seção 4.2.6 - Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%

Figura 56 – Relação do rop x custo métrico total 159

Figura 57 – Relação do rpm x custo métrico total 159

Figura 58 – Relação da vida da broca x custo métrico total 160

Figura 59 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico 161

Figura 60 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico 161

Figura 61 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico 162

Figura 62 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico 162

Apêndice A – Complemento sobre Perfuração

Figura 63 – Representação de forças em um corpo 180

Figura 64 – Círculo de Mohr 181

Figura 65 – Curva tensão-deformação em ensaio uniaxial 182

Figura 66 – Coeficiente de Poisson 183

Figura 67 – Cortador sem Desgaste – Sharp 186

Figura 68 – Cortador com Desgaste – Blunt 187

Figura 69 – Broca PDC 191

Figura 70 – Broca Tricônica de Dentes Fresados	192
Figura 71 – Broca Tricônica com Desgaste	206
Figura 72 – Atividades de um projeto de poço	209
Figura 73 – Dados sobre a direção de um poço	212
Figura 74 – Poços de correlação	218
Figura 75 – Poços de correlação geográficos definidos por um raio	219

# Lista de Tabelas

## Seção 2.2.1 – Custo Métrico Perfurado

Tabela 1 – Custos da broca (US\$), por diâmetro e tecnologia	32
Tabela 2 – Custo horário das sondas (US\$/Hr), por aplicação e capacidade	33

## Seção 4.1 – Exemplo 1: Perfuração de um Poço de Petróleo

Tabela 3 – Dados do Modelo Matemático	76
Tabela 4 – ROP em rol	77
Tabela 5 – RPM em rol	77
Tabela 6 – Incertezas de 1%, 10% e 20%	78
Tabela 7 – Intervalos discretizados para incerteza de 20%	79
Tabela 8 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 20%	80
Tabela 9 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 20%	80

### Seção 4.1.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%

Tabela 10 – Diferença entre $ Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^- $	84
Tabela 11 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 20%	86
Tabela 12 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%	87

### Seção 4.1.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

Tabela 13 – Intervalos discretizados para incerteza de 10%	91
Tabela 14 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 10%	92
Tabela 15 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 10%	92

### Seção 4.1.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%

Tabela 16 – Diferença entre $ Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^- $	96
---	----

Tabela 17 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 10%	98
Tabela 18 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%	99
<u>Seção 4.1.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%</u>	
Tabela 19 – Intervalos discretizados para incerteza de 1%	103
Tabela 20 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 1%	104
Tabela 21 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 1%	105
<u>Seção 4.1.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%</u>	
Tabela 22 – Diferença entre $ Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^- $	108
Tabela 23 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 1%	110
Tabela 24 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%	111
<u>Seção 4.2 – Exemplo 2: Furação de metais</u>	
Tabela 25 – Dados do Modelo Matemático	120
Tabela 26 – ROP em rol	121
Tabela 27 – RPM em rol	122
Tabela 28 – Incertezas de 1%, 10% e 20%	123
Tabela 29 – Intervalos discretizados para incerteza de 20%	124
Tabela 30 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 20%	125
Tabela 31 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 20%	125
<u>Seção 4.2.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%</u>	
Tabela 32 – Diferença entre $Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^-$	129
Tabela 33 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 20%	131
Tabela 34 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%	132

<u>Seção 4.2.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%</u>	
Tabela 35 – Intervalos discretizados para incerteza de 10%	137
Tabela 36 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 10%	138
Tabela 37 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 10%	138
<u>Seção 4.2.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%</u>	
Tabela 38 – Diferença entre $Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^-$	142
Tabela 39 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 10%	144
Tabela 40 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%	145
<u>Seção 4.2.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%</u>	
Tabela 41 – Intervalos discretizados para incerteza de 1%	150
Tabela 42 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 1%	151
Tabela 43 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 1%	151
<u>Seção 4.2.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%</u>	
Tabela 44 – Diferença entre $Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^-$	155
Tabela 45 – Limites das restrições do modelo determinístico para incerteza de 1%	157
Tabela 46 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%	158
<u>Apêndice A – Complemento sobre Perfuração</u>	
Tabela 47 – Dureza x UCS x Comentários	196
Tabela 48 – Dados sobre questões técnicas e operacionais	213
Tabela 49 – Informações relativas a brocas	215

# Abreviatura

AFE – Authorization for Expenditure

BD – Banco de Dados

BHA – Bottom Hole Assembly

CMDet – Custo Métrico Determinístico

CMI – Custo Métrico Total Inferior

CMI broca – Custo Métrico Inferior dado pela broca

CMI CNC – Custo Métrico Inferior dado pelo CNC

CMI sonda – Custo Métrico Inferior dado pela sonda

CMS – Custo Métrico Total Superior

CMS broca – Custo Métrico Superior dado pela broca

CMS CNC – Custo Métrico Superior dado pelo CNC

CMS sonda – Custo Métrico Superior dado pela sonda

CSM – Colorado School of Mines

IADC – International Association of Drilling Contractors

NTH – Norwegian Institute of Technology

PDC – Polycrystalline Diamond Compact

PLMO – Programação Linear Multi-Objetivo

PMM – Programação Matemática Multi-Objetivo

ROP – Rate Of Penetration: Taxa de Penetração

SPE – Society of Petroleum Engineers

TSP – Thermally Stable Polycrystalline

UCS – Unconfined Compressive Strength: Resistência Compressiva Não Confinada

WOB – Weight On Bit: Peso sobre a Broca

## Nomenclatura

$D, E, F$  – constantes da relação rocha/broca

$H$  – custo da sonda por hora (R\$/hora) ou (US\$/hora)

$I$  – custo da broca (R\$) ou (US\$)

$Q$  – função objetivo: custo mínimo por metro ou custo mínimo por pés

$U$  – diâmetro da broca (m)

$rop$  – taxa de penetração (m/hora) ou (ft/hora)

$rpm$  – velocidade de rotação por minuto

$wob$  – peso sobre a broca (N) ou (lb)

$Z$  – vida da broca definida pelo seu percurso de corte (m) ou (ft)

$C_i$  – vida da broca registrada no banco de dados,  $i = 1, \dots, I$

$Y_k$  – variável não randômica

$N^+$  - parâmetro constante superior

$N^-$  - parâmetro constante inferior

$i$  - número de dados do banco de dados,  $i = 1, \dots, I$

$a_1$  – limite inferior da variável  $rop_{\max}^+$

$b_1$  - limite superior da variável  $rop_{\max}^+$

$a_2$  – limite inferior da variável  $rpm_{\max}^+$

$b_2$  - limite superior da variável  $rpm_{\max}^+$

$a_3$  – limite inferior da variável  $rop_{\min}^-$

$b_3$  - limite superior da variável  $rop_{\min}^-$

$a_4$  – limite inferior da variável  $rpm_{\min}^-$

$b_4$  - limite superior da variável  $rpm_{\min}^-$

$p$  – expoente positivo

# Capítulo 1 - Introdução

A indústria petrolífera é uma das mais importantes atividades produtivas executadas pelo homem. Suas atividades englobam diversas áreas do conhecimento humano passando pelas engenharias até o social, o que garante um alto desempenho produtivo para as empresas do setor (THOMAS, 2004).

Esta indústria mobiliza quantias gigantescas de recursos econômicos, consideráveis recursos humanos e avançadas tecnologias para apoiar toda sua cadeia produtiva, tanto no Brasil como no mundo afora.

A cadeia produtiva da indústria de petróleo é muito complexa atuando desde as pesquisas preliminares para a descoberta de um reservatório até a chegada a uma refinaria, passando pela logística, segurança e meio ambiente.

A indústria do petróleo basicamente passa pela Exploração (*Upstream*), onde se busca reconstruir a história geológica de uma área, obtendo dados sobre formações rochosas que possam indicar a presença de rochas reservatório; Exploração (*Upstream*), onde as técnicas de desenvolvimento e produção são aplicadas para retirar o petróleo da reserva encontrada. Passa pelo setor de Transporte (*Midstream*) que tem como função transportar o óleo e gás para os terminais e refinarias por diversos modais (embarcações, caminhões, oleodutos e gasodutos). E por fim temos o setor de Refino (*Downstream*) onde é feito o processamento e refino da mistura dos hidrocarbonetos encontrados na rocha reservatório, obtendo-se os produtos (combustíveis, fertilizantes, tintas) provenientes da destilação, craqueamento etc.

Além disso, na engenharia de petróleo existem quatro áreas básicas: reservatórios, perfuração, completação e produção. Focando na perfuração, a mesma engloba as atividades do projeto e perfuração do poço fazendo a comunicação do reservatório com a superfície. O projeto do poço possui várias fases de perfuração, onde se define a técnica apropriada (para perfuração, cimentação e revestimento do poço), seleciona o tipo adequado de sonda, a unidade de perfuração e os equipamentos necessários (brocas, colunas de perfuração e revestimento, as ferramentas de monitoração e controle da trajetória do poço, ferramentas de perfilagem), e também definem-se os fluídos de perfuração. Os fatores econômicos, os aspectos de segurança e

meio ambiente são tratados com extremo rigor no projeto e execução do poço (THOMAS, 2004).

Todo processo de perfuração é feito por meio de uma sonda. Na perfuração, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso sobre a broca que está localizada na extremidade da coluna de perfuração, que basicamente é composto de comandos e tubos de perfuração gerando os cascalhos (THOMAS, 2004). Os cascalhos (ou fragmentos das rochas) são removidos continuamente por meio da lama de perfuração até a superfície (CORREA, 2003).

Após atingir a profundidade desejada é feito o revestimento do poço, por meio de um tubo de revestimento de aço com diâmetro menor do que o diâmetro da broca de perfuração. O espaço entre o poço perfurado e o revestimento, espaço anular, é preenchido por cimento com o objetivo de isolar as rochas perfuradas. Desta forma, pode-se dar continuidade a perfuração do outro intervalo por meio de outra coluna de perfuração com diâmetro menor.

Portanto, o processo de perfuração de um poço, seja em terra (*on-shore*) ou em alto-mar (*off-shore*), apresenta complexidades, e dentre estas a seleção dos parâmetros operacionais eficientes que é de grande interesse das indústrias deste setor, onde a economia obtida nas operações de perfuração apresenta um papel importante neste mercado competitivo. A seleção adequada das condições operacionais de perfuração tais como: rop (taxa de penetração), wob (peso na broca), rpm, vazão da lama de perfuração entre outros é um passo essencial no processo de planejamento das operações de perfuração e no desempenho em campo. A escolha correta das condições operacionais fortemente afetará a eficiência da operação de perfuração.

Contudo, a escolha destes parâmetros no processo de perfuração é baseada em soluções empíricas, de campo e por vezes pelo julgamento do engenheiro responsável e apresentam valores bem definidos, porém existem casos onde os parâmetros não podem ser apresentados de forma precisa (BOURGOYNE *et al*, 2005). No caso da perfuração de um poço é quase impossível manter as condições de corte da rocha exatamente constante durante o processo. Também, é possível que o custo por metro perfurado seja incerto devido aos fatores incontrolláveis do processo, tais como: dureza da rocha,

variação das forças agindo durante o processo de corte e outros. Em outras palavras, os objetivos e as restrições da perfuração podem ser imprecisos naturalmente.

Sob estas circunstâncias, mais informações deveriam ser fornecidas para o planejamento e avaliação do processo de perfuração em rochas na área de petróleo. Logo, se alguns parâmetros são imprecisos ou incertos, o mais usual é adotar os valores mais prováveis, porém esta simplificação pode levar a resultados que não são satisfatórios (WANG e LIU, 2007).

Porém, MAJUMDER e RAO (2009) afirmam que diversos métodos estão disponíveis para o tratamento e quantificação da incerteza. Estes métodos podem incluir teoria da probabilidade, método de *Bayes*, matemática intervalar, teoria *fuzzy*, teoria do caos entre outros. A escolha de um modelo apropriado de incerteza para a solução de um problema particular depende das características da incerteza presente na descrição do problema e das condições limites.

Na maioria dos casos práticos, as faixas das incertezas dos fatores poderão estar disponíveis, mas as informações sobre as distribuições de probabilidade ou dados das variáveis que apresentam incertezas não. Como nem sempre é possível encontrar informações detalhadas sobre as incertezas de um parâmetro, uma abordagem intervalar pode ser convenientemente usada como uma indicação geral da imprecisão que existe em um problema de engenharia. Isto significa que não há necessidade de se conhecer as distribuições de probabilidade das variáveis estocásticas ou das variáveis incertas.

Ao longo dos anos, muitos pesquisadores têm trabalhado e desenvolvido modelos para previsão de desempenho em perfuração de rocha. Porém, estes trabalhos, em geral, atendem a uma necessidade específica sem levar em consideração outros aspectos como o econômico (ROSTAMI *et al*, 1996; GLOWKA, 1987; GEOFFREY e MINH, 1997). Quando se fala em perfuração econômica de rochas em petróleo os trabalhos de referência são o de WIJK (1991) e o de TANSEV (1975), mesmo assim em uma abordagem superficial.

Assim, o trabalho de tese trata do problema que é encontrar a solução ótima para o problema de perfuração econômica de rochas em petróleo, cujos parâmetros operacionais são incertos e são dados por intervalos. Logo, o problema de perfuração econômica de rochas torna-se um problema de perfuração econômica de rochas

intervalar. Portanto, quando os parâmetros são representados como valores intervalares, a função objetivo também terá valores intervalares, isto é, se encontrará dentro de uma determinada faixa de valores (WANG e LIU, 2007).

Com base nas questões que foram delineadas anteriormente, o objetivo desta tese é desenvolver uma metodologia de otimização baseada em programação não linear intervalar para perfuração econômica de rochas, tendo como referência os conceitos de usinagem econômica de materiais, pois o mesmo apresenta uma fundamentação teórica bem estabelecida na academia e pela indústria. Com esta metodologia pode-se incorporar as incertezas dos parâmetros do modelo e do próprio sistema de perfuração de rochas. Logo, pode-se dar seqüência ao trabalho de WIJK (1991) e TANSEV (1975), preencher estas lacunas acima e enriquecer os conhecimentos sobre o processo de otimização de perfuração de rochas como um todo.

Esta tese encontra-se dividida em seis capítulos da seguinte forma:

Neste capítulo, Introdução, expomos o ambiente e os objetivos do trabalho. Fazemos uma apresentação da indústria do petróleo e perfuração de um poço de petróleo, informamos brevemente sobre algumas incertezas encontradas na perfuração econômica de rochas, quais as ferramentas usadas para o tratamento das incertezas e, finalmente, é descrito o restante dos capítulos.

No capítulo 2, Revisão da Bibliografia, é descrito os principais conceitos dos tópicos que norteiam esta tese, tais como: análise das condições de usinagem econômica de materiais, tempo e custo em perfuração de poço de petróleo, os conceitos de programação linear multi-objetivo, incerteza e as abordagens para o seu tratamento.

No capítulo 3 é apresentada a descrição, formulação e hipóteses do problema.

No capítulo 4 é desenvolvido o modelo intervalar, determinístico e também, descrito os procedimentos para resolvê-los.

No capítulo 5 são apresentados dois exemplos com o objetivo de ilustrar a idéia introduzida neste trabalho. O primeiro trata da perfuração de um poço de petróleo e o segundo de furação dos metais. Nos dois casos procura-se melhorar a forma de se definir as variáveis de decisão e o custo métrico perfurado.

Por fim, no capítulo 6, nas conclusões são estabelecidas as bases deste trabalho, as questões fundamentais e trabalhos futuros baseados nesta tese.

## Capítulo 2 - Revisão da Bibliografia

### 2.1 – Usinagem Econômica de Materiais

#### 2.1.1 – Economia de Usinagem de Materiais

Antes de entrarmos no assunto propriamente dito, devem ser feitas algumas observações sobre alguns itens que dão suporte a usinagem econômica de materiais.

A usinagem de materiais é dividida em vários processos mecânicos: torneamento, furação, fresamento etc. Nestes processos existem vários movimentos e relações geométricas, forças e potências de corte entre a ferramenta de corte/material usinado que podem afetar os custos de fabricação dos produtos.

Segundo FERRARESI (1986) a natureza cristalográfica dos materiais e dos materiais da ferramenta de corte impõe restrições à velocidade de corte, por causa da dureza dos mesmos, afetando assim o produto fabricado (seu acabamento superficial) e a ferramenta de corte (seu desgaste). Tão importante quanto à dureza, as forças e outros fatores existentes na usinagem é o fluido de corte aplicado nos processos de usinagem, já que, auxilia no processo de fabricação diminuindo o atrito na região ferramenta-cavaco, expulsando o cavaco da região de corte, refrigerando a ferramenta/peça usinada diminuindo os custos da usinagem, uma vez que gera uma redução na troca de ferramenta, aumenta a velocidade de corte, aumentando a produtividade como um todo (FERRARESI, 1986),

DINIZ *et al* (2001) classifica os fluidos de corte em três categorias:

- a) Ar
- b) Aquoso: água, óleos solúveis etc,
- c) Óleos: óleos minerais, graxos compostos entre outros.

Feito estas ressalvas, pode-se observar que a muito tempo é reconhecido que as condições durante o corte do material, tais como avanço, velocidade de corte e profundidade de corte em conjunto com a ferramenta e fluido de corte devem ser selecionados de forma adequada à otimizar as operações de usinagem visando a máxima produtividade ou o mínimo custo total de fabricação por peça, gerando um melhor

rendimento econômico. Em 1907, Taylor mostrou que uma velocidade de corte econômica ou ótima existe no qual poderia maximizar a taxa de remoção de material.

Ainda hoje, as indústrias de fabricação dependem da habilidade/experiência dos operadores de chão de fábrica para a seleção ótima das condições de corte e das ferramentas de corte.

#### 2.1.1.1 – Abordagem Geral

O estudo das condições de usinagem econômica pode ser dividido em três aspectos (CRUZ, 2008):

- a) O grau de importância da otimização das variáveis de processo;
- b) O tempo de vida da ferramenta e sua relação com as variáveis de processo como restrição principal de processo;
- c) Outras restrições de processo nos procedimentos de otimização.

Ao se considerar a importância da otimização das variáveis de processo MURKHERJEE (2005) e MENG *et al* (2000) dizem que o problema de otimização das condições econômicas de usinagem está fortemente relacionado com a otimização dos parâmetros de corte que atendem as restrições de processo. Estas restrições são vida de ferramenta, força de corte, potência de máquina-ferramenta, rugosidade superficial da peça entre outras.

LAL (1996) no seu trabalho diz que existem muitas variáveis de processo que participam nas condições de usinagem dificultando a análise dos seus efeitos simultaneamente. O autor afirma que os parâmetros de corte tais como: velocidade de corte, avanço, a profundidade de corte, os materiais da ferramenta e da peça, a geometria da ferramenta e o fluido de corte podem ser variados, alterando assim, as condições de usinagem. Este mesmo autor observa que a velocidade de corte sendo baixa gera uma taxa de produção baixa e a vida da ferramenta aumenta.

Em relação a vida da ferramenta, SHABTAY (2002) informa que este fator é reconhecidamente como um dos mais importantes na otimização do problema de usinagem econômica.

A vida da ferramenta possui uma grande importância na otimização de economia de usinagem, pois em todos os modelos matemáticos ela está presente como restrição desses modelos.

F. W. Taylor estudou os impactos da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta e sugeriu uma equação entre a velocidade de corte ( $v_c$ ) e o tempo de vida da ferramenta ( $T$ ). Abaixo, segue a equação (1) desenvolvida por Taylor (RAO e LAO, 1977),

$$T^y \cdot v = C \quad (1)$$

Nesta equação de Taylor simplificada  $v$  é a velocidade de corte,  $T$  é o tempo de vida,  $y$  é a inclinação da curva  $\log T - \log v$  e  $C$  indica a velocidade de corte para uma vida  $T$  de 1 minuto.

Contudo, esta equação é válida em 70% a 80% das condições de usinagem aplicadas em materiais como aço carbono, ferro fundido e metais não ferrosos. Porém, quando se usa em materiais de alta resistência e materiais que apresentam resistência a altas temperaturas, as curvas geradas são diferentes, não podendo ser representadas pela equação de Taylor (KRONENBERG, 1970).

Sabe-se que a vida da ferramenta não depende somente da velocidade de corte, mas por outros parâmetros de usinagem. Desta forma, outras equações foram desenvolvidas denominando-as de Equação Expandida de Taylor. Segue na equação (2) um exemplo (NOVASKI, 1989),

$$T \cdot v^x \cdot f^y \cdot d^z = K_1 \quad (2)$$

onde  $K_1$ ,  $x$ ,  $y$  e  $z$  são constantes.

Nesta formulação,  $f$  é o avanço,  $d$  a profundidade de corte e  $v$  a velocidade de corte.

Segundo MIRANDA (2003) a ferramenta de corte tem sua vida definida normalmente em minutos, mas em algumas circunstâncias é preferível defini-la pelo seu percurso de corte ou percurso de avanço.

Sendo assim, o percurso de corte  $L_c$  em metros é dado por:

$$L_c = v_c \cdot T \quad (2a)$$

O percurso de avanço  $L_f$  em milímetros é definido por:

$$L_f = f \cdot n \cdot T \quad (2b)$$

onde  $n$  é o rpm.

Diversos trabalhos recentes levam em consideração outros fatores na equação expandida de Taylor que afetam a vida da ferramenta.

Temos neste caso, POULACHON *et al* (2001) que no seu trabalho sobre desgaste de ferramenta consideram a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte e a dureza do material no modelo expandido de Taylor.

Outro trabalho feito por ORABY *et al* (2004) apresenta no seu modelo expandido os parâmetros de corte e leva em consideração as componentes da força de usinagem.

Assim, podemos observar que a relação entre a vida da ferramenta e as variáveis de processo que afetam as condições de usinagem econômica é de extrema importância.

Finalizando, temos a influência das outras restrições de processo nos procedimentos de otimização. Estas variam em função dos pressupostos definidos pelos autores nos procedimentos de otimização.

No seu trabalho YEO (1995) analisou as condições econômicas de usinagem em torneamento de múltiplos passes utilizando o critério de custo mínimo de produção, com a força de corte, potência de corte, rugosidade superficial, profundidade de corte e outros fatores como restrições de processo. Esta metodologia de otimização era baseada em programação não linear pelo método seqüencial quadrático.

O trabalho de SHABTAY (2002) se desenvolve partindo dos três critérios de análise econômica, ou seja, taxa de produção máxima, custo de produção mínima e taxa

de benefício máxima esperada para a operação de furação, considerando os limites da máquina-ferramenta, a velocidade de corte e avanço máximo determinada pelo limite de resistência ao cisalhamento do material da ferramenta. Sua abordagem de otimização tem como base os conceitos de otimização clássica.

Logo, vários procedimentos e estudos têm sido feitos objetivando a uma precisão maior nas escolhas dos parâmetros de usinagem para se obter as condições ótimas, considerando quantas variáveis sejam necessárias.

### 2.1.1.2 – Análise das Condições Econômicas de Usinagem

O processo de usinagem de metais é considerado um processo complexo, além de ser composta de uma variedade enorme de operações e materiais diferentes envolvidos (RIBEIRO e COPPINI, 2008).

Por isto, uma economia de usinagem passa por decisões importantes como a escolha e seleção correta da ferramenta, o avanço e profundidade de corte para a máquina, ferramenta e peça baseado nos parâmetros operacionais. Inclui executar testes, traçar curvas de velocidade de corte x tempo de vida, de custos e de produção. Calcular a velocidade de custo mínimo e de máxima produção. Realizar testes para verificar se os dados estão satisfatórios e calcular o retorno do investimento.

### 2.1.1.3 – Modelo de Otimização

#### 2.1.1.3.1 - Ciclos e tempo de produção

Segundo DINIZ *et al* (2001) e FERRARESI (1986) o ciclo de usinagem de uma peça que pertence a um lote de Z peças é constituído diretamente pelas seguintes fases:

- a) Colocação e fixação da peça
- b) Aproximação e posicionamento da ferramenta
- c) Corte
- d) Afastamento da ferramenta
- e) Inspeção (se necessário) e retirada da peça

Outras fases se fazem presentes de forma indireta no ciclo de usinagem (para um lote de Z peças):

- f) Preparo de máquina
- g) Remoção da ferramenta para sua substituição
- h) Recolocação e ajustagem da nova ferramenta

CRUZ (2008) dizem que um ciclo de fabricação de uma unidade produzida pode ser definido por três etapas: pré-ciclo de usinagem, ciclo de usinagem e pós-ciclo de usinagem.

Cada fase tem a seguinte denominação (AMORIM, 2003):

$t_t$  = tempo total de usinagem de uma peça

$t_c$  = tempo de corte (fase c)

$t_s$  = tempo secundário (fases a e e)

$t_a$  = tempo de aproximação e afastamento (fases b e d)

$t_p$  = tempo de preparo da máquina (fase f)

$t_{ft}$  = tempo de troca da ferramenta (fases g e h)

O tempo total de usinagem de uma peça, dentro de um lote de Z peças, será:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} t_{ft} \quad (3)$$

Onde  $N_t$  = número de trocas ou afiações da ferramenta para usinagem do lote

$$Z = (N_t + 1) \frac{t_t}{T_c} = (N_t + 1) \frac{T}{T_c} \quad (4)$$

$$N_t = Z \frac{t_c}{T} - 1 \quad (5)$$

Onde  $Z_t$  = número de peças usinadas durante a vida  $T$  de uma ferramenta.

Substituindo a equação 5 na equação 3 tem-se:

$$\begin{aligned} t_t &= t_c + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right) + \left( \frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z} \right) t_{ft} = \\ &= t_c + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) + \frac{t_c}{T} t_{ft} \end{aligned} \quad (6)$$

Observa-se na equação 6 que o tempo total de usinagem de uma peça pode ser dividida em três parcelas:

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (7)$$

Onde:

$t_c$  = tempo de corte, que diminui com o aumento da velocidade de corte,

$t_1$  = tempo improdutivo, referente à colocação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, substituição da ferramenta e preparo da máquina para a usinagem de um lote, que é independente da velocidade de corte,

$t_2$  = tempo relacionado com a troca da ferramenta. Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida da ferramenta e maior é o número de paradas da máquina para substituição da mesma. Portanto, maior também esta parcela.

### 2.1.1.3.2 – Velocidade de Corte de Máxima Produção

A velocidade de corte de máxima produção ( $v_{cmaxp}$ ) ou o tempo mínimo de produção por peça ( $t_t$ ) em torneamento cilíndrico é dado por:

$$l_f = v_f \cdot t_c = f \cdot n \cdot t_c \quad (8)$$

Onde, a rotação por minute da peça é dada por:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} \quad (9)$$

Logo, no torneamento cilíndrico, temos:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} \quad (10)$$

Onde:

$l_f$  = percurso de avanço em mm

$d$  = diâmetro da peça em mm

$f$  = avanço em mm/revolução

$v_c$  = velocidade de corte em m/min

Substituindo a equação 10 na 6, tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) + \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c \cdot T} t_{ft} \quad (11)$$

Porém,  $T = \frac{K}{v_c^x}$  (12) é a equação de vida de Taylor.

Substituindo 12 em 11, tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c} + \left( t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} \right) + \left( \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} - \frac{1}{Z} \right) t_{ft} \quad (13)$$

Ao se comparar a equação 13 com a 7, observa-se que as três parcelas que constituem o tempo total de confecção de uma peça apresenta os valores:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c}$$

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z}$$

$$t_2 = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} t_{ft}$$

### 2.1.1.3.3 – Custos de Produção

O cálculo da velocidade econômica de corte (velocidade de mínimo custo) depende dos custos de produção que podem ser divididos em duas categorias:

- a) Custos de produção devido ao processo de corte, como custo das ferramentas e custo de operação das máquinas e dos operadores;
- b) Custos de produção não envolvidos diretamente no processo, como controle de qualidade, da matéria-prima, custo da mão-de-obra indireta.

Para o cálculo da velocidade econômica de corte basta considerar a primeira categoria de custos. Desta forma, temos:

$K_p$  = custo de produção por peça

$K_{us}$  = custo da mão-de-obra de usinagem

$K_{uf}$  = custo da ferramenta (depreciação, troca, afiação etc)

$K_{um}$  = custo da máquina (depreciação, manutenção etc)

Onde:

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (14)$$

$$K_{us} = t_t \frac{S_h}{60} \text{ (R\$/peça)} \quad (15)$$

Onde:  $t_t$  = tempo total de confecção por peça em minutos

$S_h$  = salário e encargos do operador em R\$/hora

$$K_{um} = \frac{t_t}{H \cdot 60} \left[ \left( V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \right) j + \frac{V_{mi}}{M} + K_{mc} + E_m \cdot K_e \cdot j \right] \text{ (R\$/peça)} \quad (16)$$

Onde:

$V_{mi}$  = valor inicial de aquisição da máquina em R\$

$m$  = idade da máquina em anos

$M$  = vida prevista para a máquina em anos

$j$  = taxa de juros por ano

$K_{mc}$  = custo anual de manutenção da máquina em R\$/ano

$E_m$  = espaço ocupado pela máquina em  $m^2$

$K_e$  = custo do  $m^2$  ocupado pela máquina em R\$/ $m^2$ ,ano

$S_m$  = custo total da máquina em R\$/hora

$H$  = número de horas de trabalho por ano,

$$\text{Portanto, } K_{um} = \frac{t_i}{60} \cdot S_m \quad (17)$$

No caso de se usar pastilhas intercambiáveis como ferramenta, o custo da ferramenta por vida é dado por:

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{K_{pi}}{N_s} \quad (\text{R\$/vida da ferramenta}) \quad (18)$$

Onde:  $N_{fp}$  = vida média do porta-ferramentas, em quantidade de arestas de corte, até sua possível inutilização;

$V_{si}$  = custo de aquisição do porta-ferramenta;

$N_s$  = número de arestas de corte da pastilha intercambiável;

$K_{pi}$  = custo de aquisição da pastilha intercambiável.

O custo da ferramenta por peça é dado por:

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad (\text{R\$/peça}) \quad (19)$$

Onde:  $Z_t$  = número de peças usinadas por vida  $T$  da ferramenta.

#### 2.1.1.3.4 - Vida Econômica da Ferramenta

A equação da vida da ferramenta para a máxima produção é dado por:

$$T_{mxp} = (n-1) \cdot t_{ft} \quad (20)$$

Pela equação 20 temos que:  $K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf}$  (21)

Se substituirmos as equações 15, 17 e 19 em 14, temos que:

$$K_p = t_t \cdot \frac{S_h}{60} + t_t \cdot \frac{S_m}{60} + \frac{K_{ft}}{Z_t} = \frac{t_t}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot K_{ft} \quad (22)$$

A equação 13 expressa o valor de  $t_t$ . Desta forma, substituindo a equação 13 em 22 e fazendo os algebrismos necessários, temos:

$$K_p = \left( \frac{t_1}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{60} \cdot (S_h + S_m) + \frac{t_c}{T} \cdot \left( K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} (S_h + S_m) \right) \quad (23)$$

Ou ainda:  $K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3$  (24)

Onde:  $C_1$  = constante independente da velocidade de corte em R\$/peça;

$C_2$  = soma das despesas com mão-de-obra e com máquinas em R\$/hora;

$C_3$  = constante de custo relativo à ferramenta.

Para o caso do torneamento cilíndrico,  $t_c$  é dado por:

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot v_c}$$

Substituindo esta expressão na equação 24, temos:

$$K_p = C_1 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v_c} \cdot C_2 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{1000 \cdot f \cdot v_c} \cdot C_3 \quad (25)$$

Sabe-se que a equação de Taylor é dado por:

$$T = K \cdot v_c^{-x}$$

Substituindo T na equação 25, obtemos:

$$K_p = C_1 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v_c} \cdot C_2 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} \cdot C_3 \quad (26)$$

### 2.1.2 - Técnicas Matemáticas de Solução para Usinagem Econômica

Nas operações de usinagem, o objetivo principal, em geral, será ou minimizar o custo de produção ou maximizar a produção de algum produto. Contudo, sempre existem restrições nas operações de usinagem que limitarão os parâmetros de corte. Estas restrições podem ser a vida da ferramenta, a dinâmica da ferramenta de corte, como o acabamento superficial requerido em algum produto etc. Desta forma, tudo isto deve ser levado em consideração para se encontrar uma solução para problemas de otimização em usinagem. Assim, técnicas de programação matemática são aplicadas para encontrar os parâmetros de corte que alcançarão os objetivos acima descritos (HATI e RAO, 1976).

Na literatura existem diversas técnicas de programação matemática aplicadas em usinagem para se encontrar o avanço, velocidade de corte e profundidade de corte que otimize as condições de usinagem econômica.

Basicamente podemos dividir as técnicas de otimização em tradicionais ou avançadas. A seguir são discutidas as técnicas tradicionais de otimização.

Assim, GILBERT (1950) *apud* AGGARWAL e SINGH (2005) estudou a otimização dos parâmetros de usinagem em torneamento tendo como critério a máxima produção e mínimo custo.

BREWER (1996) sugeriu o uso dos multiplicadores de Lagrange para otimização de problemas com restrição de custo, com a potência de corte como uma restrição principal.

WALVEKAR e LAMBERT (1970) discutiram o uso de programação geométrica para a seleção de variáveis de usinagem.

TSAI (1986) estudou a relação entre usinagem multi-passo e de passo simples. Ele apresentou o conceito de *break-even point*, ou seja, um ponto com certo valor de profundidade de corte, na qual a usinagem de simples ou duplo passo são iguais.

GOPALAKRISHNAN e KHAYYAL (1991) desenvolveram uma ferramenta analítica para a seleção dos parâmetros de usinagem em torneamento. Eles utilizaram programação geométrica como metodologia básica para determinar os valores do avanço e velocidade de corte que minimizasse o custo total de usinagem.

WANG e LIU (2007) analisaram o custo de produção de um modelo econômico de usinagem com intervalos nos parâmetros utilizando programação geométrica.

Recentemente técnicas avançadas têm sido utilizadas para auxiliar na obtenção dos parâmetros mais adequados para as condições de usinagem econômica.

KOSKO (1997) mostrou que a técnica baseada em lógica *fuzzy* superou as limitações dos sistemas clássicos para a otimização das condições de usinagem econômica.

BASKAR *et al* (2005) desenvolveram procedimentos de otimização baseados em algoritmos genéticos, *tabu search*, colônia de formigas para a otimização dos parâmetros de usinagem para operações de fresa.

Em resumo, as várias técnicas de otimização de usinagem tradicionais como método de Lagrange, programação geométrica, programação dinâmica etc; tem sido aplicadas com muito sucesso para a otimização das diversas variáveis do processo de usinagem. Porém, técnicas como lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos, *scatter search*,

método Taguchi entre outras são as técnicas mais recentes aplicadas com sucesso em aplicações industriais para a seleção ótima das variáveis de processo na área de usinagem (AGGARWAL e SINGH, 2005).

### 2.1.3 – Furação de Metais

Na indústria de manufatura, o processo de furação é um dos mais utilizados, já que na maioria das peças existem pelo menos um furo cilíndrico. Nestas peças, normalmente, o processo de furação gera um furo em cheio ou o mesmo pode ser aumentado. Assim, o estudo deste processo de otimização é de extrema importância.

Contudo, a furação obteve poucos avanços até um tempo atrás. As ferramentas aplicadas para os outros tipos de processo, tais como, torneamento e fresamento evoluíram rapidamente por causa do uso de novos materiais, por exemplo, metal duro, diamante entre outros. Porém, a ferramenta em uso atualmente na broca helicoidal é o aço rápido (DINIZ *et al*, 2001).

Há alguns anos, observa-se que o uso de Centros de Usinagem CNC no processo de furação tem aumentado significativamente. Assim, foi necessário o desenvolvimento de materiais para as brocas, como, broca de aço rápido revestida com nitreto de titânio, broca com pastilhas intercambiáveis de metal duro, broca inteiriça de metal duro, brocas especiais etc.

Atualmente, sabe-se que no processo de furação ainda é necessário um enorme desenvolvimento, já que existem problemas quanto a pouca rigidez e potência das furadeiras quando se executa um furo de diâmetro médio. Também, existem problemas quanto a profundidade do furo, dificultando a remoção do cavaco e a refrigeração/lubrificação da região de corte (DINIZ *et al*, 2001).

### 2.1.3.1 – As Brocas Helicoidais e suas Formas Construtivas

A broca helicoidal apresenta as seguintes partes:

- a) Haste
- b) Diâmetro
- c) Núcleo
- d) Guias
- e) Canais helicoidais
- f) Arestas de corte

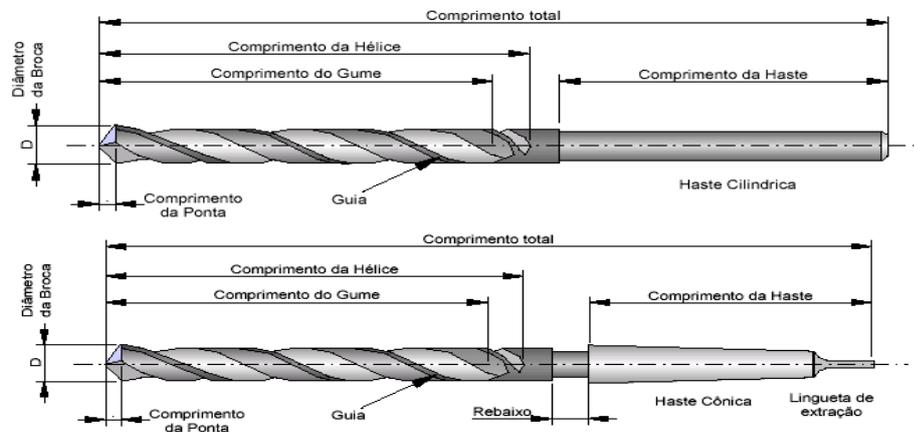


Figura 1 - Partes de uma Broca Helicoidal.

### 2.1.3.2 – Forças e Potências de Corte na Furação

No processo de furação as resistências à penetração da broca podem ser divididas em (SILVEIRA, 2007):

- a) Resistência devido ao corte do material nas duas arestas principais de corte;
- b) Resistência devido ao corte e esmagamento do material na aresta transversal de corte;
- c) Resistência devido ao atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

No processo de corte, a broca helicoidal submete-se, normalmente, a esforços de torção e de compressão devido ao avanço da broca. Logo, a estimativa dos esforços existentes no processo de furação pode ser calculada pelo momento torsor e pela força de avanço do processo (MIRANDA, 2003).

Uma vez obtido os três tipos de resistências da broca helicoidal necessários para vencer o corte, temos:

$$M_{ttotal} = M_{ta} + M_{tb} + M_{tc} \quad (27) \quad e \quad F_{ftotal} = F_{fa} + F_{fb} + F_{fc} \quad (28)$$

Onde:

$M_t$  = momento torsor

$F_f$  = força de avanço

a, b e c = conjunto das resistências a, b e c citadas acima aos esforços  $M_t$  e  $F_f$

Nos processos de usinagem existem diversos fatores que afetam os esforços de corte, sendo assim, na furação não foge a regra. Entre alguns fatores temos o avanço, a profundidade de corte, a velocidade de corte, a geometria da ferramenta, o material da peça e da ferramenta e outros. Na prática, para que nas equações empíricas usadas para se estimar os valores dos esforços tenham aplicabilidade, deve-se reduzir o número de parâmetros que afetam o processo. Assim, em furação temos o diâmetro do furo, o avanço e material da peça. O restante dos fatores que influenciam no processo são inseridos nas equações empíricas de maneira implícita, ou seja, nas constantes das equações (DINIZ *et al*, 2001; MIRANDA, 2003).

A seguir as principais equações empíricas aplicadas no cálculo dos esforços de corte na furação (DINIZ *et al*, 2001; MIRANDA, 2003).

a) Fórmula de Kronenberg – Momento Torsor em furação em cheio

$$M_t = C_1 \cdot D^{x_1} \cdot f^{y_1} \quad (\text{kgf.mm}) \quad (29)$$

D = diâmetro da broca (mm)

f = avanço (mm/volta)

$C_1, x_1$  e  $y_1$  = constantes empíricas do material da peça

b) Fórmula de H. Daar - Força de avanço na furação em cheio

$$F_f = C_2 \cdot D^{x_2} \cdot f^{y_2} \quad (\text{kgf}) \quad (30)$$

$C_2, x_2$  e  $y_2$  = constantes empíricas do material da peça

c) Fórmula de H. Daar – Momento Torsor na furação com Pré-furação

$$M_t = C_3 \cdot f^{1-z_3} \cdot D^{2-x_3} \cdot (D^{x_3} - d_0^{x_3}) \quad (31)$$

Onde:  $d_0$  = diâmetro do pré-furo

$C_3, x_3$  e  $z_3$  = constantes empíricas do material da peça

d) Fórmula de H. Daar - Força de avanço na furação com Pré-furação

$$F_f = C_4 \cdot f^{1-y_4} \cdot D^{1-x_4} \cdot (D^{x_4} - d_0^{x_4}) \quad (32)$$

$C_4, x_4$  e  $y_4$  = constantes empíricas do material da peça

### 2.1.3.3 – Avanço Máximo Permissível e Resistência de uma Broca Helicoidal

Como dito anteriormente, uma broca helicoidal sofre dos esforços de torção e compressão. Se estes esforços não forem iguais, a broca pode se flexionar e flambar. Portanto, se ocorre um maior esforço na broca, maior é a solicitação da máquina e maior o risco de quebra da mesma. Logo, para um diâmetro de furo qualquer existe um avanço máximo permitido, onde acima deste valor a furadeira não consegue mais executar o corte e/ou a broca se rompe (DINIZ *et al*, 2001).

A seguir será dada a metodologia para o cálculo do avanço máximo da broca, considerando três fatores restritivos, quais sejam, resistência da broca, a força de penetração (ou de avanço) máxima da furadeira e a potência da máquina,

a) Cálculo do avanço máximo permissível considerando a resistência da broca

$$\sigma_i = \frac{36,4 \cdot M_t}{D^3} \quad (33)$$

b) Cálculo do avanço máximo permissível considerando a força de penetração máxima da furadeira

Se  $F_f = C_2 \cdot D^{x_2} \cdot f^{y_2}$  é a força de penetração máxima da furação  $F_{f\max}$ , tem-se que:

$$f_{\max}^{y_2} = \frac{F_{f\max}}{C_2 \cdot D^2} \quad (34)$$

c) Cálculo do avanço máximo permissível considerando a potência da máquina

A potência máxima despejada no eixo-árvore de uma máquina-ferramenta  $P_{cdisp}$  é dada por:

$$P_{cdisp} = P_m \cdot \eta = \frac{F_{c\max} \cdot v_c}{60 \cdot 75} \quad (CV) \quad (35)$$

Onde:

$P_m$  – potência do motor

$\eta$  = rendimento da máquina

$$\text{Mas } F_{c\max} = \frac{2M_{t\max}}{D} \quad (36) \quad \text{e} \quad v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (37)$$

$$\text{Assim: } P_m \cdot \eta = \frac{2 \cdot M_{t\max} \cdot \pi \cdot D \cdot n}{D \cdot 1000 \cdot 60 \cdot 75} \quad (38)$$

$$\text{Logo, } M_{t\max} = \frac{716200 \cdot P_m \cdot \eta}{n} \quad (39)$$

$$\text{Mas, } M_{t\max} = C_1 \cdot D^{x_1} \cdot f_{\max}^{y_1} \quad (40)$$

Então, 
$$f_{\max}^{y1} = \frac{716200 \cdot P_m \cdot \eta}{n \cdot C_1 \cdot D^{x1}} \quad (41)$$

Observa-se que na literatura existem diversos trabalhos sobre furação, como deveria de ser, pois sua importância no contexto acadêmico e industrial é enorme. Segue abaixo trabalhos sobre furação.

LEE, LIU e TARNG (1998) e LEE, LIU e TARNG (1999) apresentaram um novo modelo de otimização baseado em uma rede abdutiva para prever a performance do processo de furação. Nestes trabalhos o objetivo da otimização era prever a vida da ferramenta, a taxa de remoção de cavaco, a força de penetração e o torque.

MIRANDA (2003) estudou os efeitos da furação sem fluido de corte em brocas de metal duro com revestimento de TiAlN.

WANG e LIANG (2004) demonstraram o uso da otimização concorrente para a definição dos parâmetros de usinagem e de tolerância, basicamente o modelo trata do *trade-off* custo-qualidade baseado na programação por metas de Chebyshev. Dentre os processos de usinagem analisados neste trabalho temos: torneamento, furação etc.

CRUZ (2008) fez um estudo dos modelos de otimização para o critério de análise das condições econômicas de usinagem por meio do método de Newton com restrição não linear e pelo LINGO tendo como máquinas-ferramentas um torno mecânico CNC e uma furadeira.

## 2.2 – Tempo e Custo em Perfuração de Poço de Petróleo

Para encontrar e produzir reservatórios de óleo e gás, furos devem ser feitos na Terra. A execução de um furo por uma broca de perfuração é chamado de poço e o objetivo básico de um poço é produzir óleo e gás natural e também, estudar as propriedades geológicas da formação. As operações de perfuração são complexas e caras, e embora muitas das atividades ainda continuam automatizadas, a maioria dos serviços são feitos manualmente vinte e quatro horas por dia, sete dias na semana e em

qualquer condição de tempo. O trabalho é difícil e extenuante, executado em turnos, tradicionalmente de doze horas a cada duas semanas de rotatividade. Somente quando ocorrem falhas de qualquer natureza ou quando ocorrem problemas extremos no tempo, por exemplo, furacão ou tempestades violentas as operações são paralisadas.

A perfuração em terra (*on-shore*) ou no mar (*off-shore*) requer o uso de sondas para conduzir as operações necessárias. Embora sondas *off-shore* e suas instalações sejam funcionalmente similares as operações *on-shore*; as localizações remotas, o ambiente *off-shore* e as necessidades peculiares de logística tornam os custos da perfuração *off-shore* muito maiores do que os custos de perfuração *on-shore* para profundidades de poços similares.

Outro fator importante é que embora a física da perfuração seja a mesma em qualquer lugar no mundo, os poços variam fortemente em complexidade e tipo. Para avaliar as diferenças que existem em perfurar um poço e comparar seu desempenho é usual estabelecer relações gerais funcionais para o custo e tempo de perfuração (KAISER, 2009). Para entender como se avalia o desempenho, é necessário isolar os fatores da perfuração e quantificar como estes fatores influenciam a operação. Historicamente, muito do trabalho sobre avaliação do desempenho da perfuração tem sido focado na identificação e eliminação dos tempos não-produtivos, tais como, pescaria, reparo dos equipamentos e na espera da melhoria das condições de tempo (em operação *offshore*).

A estimativa dos custos e avaliação da performance são usualmente feitos dentro de subgrupos pequenos de poços de petróleo por causa da natureza do processo envolvido, incertezas do ambiente de operação, impactos das diferentes tecnologias e muitas características não observáveis que influenciam as operações.

Dois métodos são comumente usados para comparar a performance da perfuração. O primeiro método é baseado em projeto experimental e estudos controlados de campo. Tipicamente, um ou mais parâmetros da perfuração são alterados para examinar os seus impactos sobre a medida de saída em análise, tais como, taxa de penetração e custo por metro perfurado. Uma quantidade significativa de trabalhos experimentais tem sido feitos para estudar os efeitos dos fatores sobre o custo e tempo de perfuração e um grande número de estudos técnicos tem sido executados pela

indústria. O segundo método para estudar os efeitos dos fatores é baseado na contribuição unificada dos dados de perfuração. Neste método, uma amostra dos dados da perfuração dos vários operadores e poços são obtidos e relações que correlacionam os parâmetros da perfuração são estabelecidas através de modelagem empírica (KAISER, 2009).

Mas qual é a proposta da perfuração?

Furos são feitos na Terra para procurar óleo e gás natural, adquirir informações sobre a formação geológica e desenvolver os reservatórios de hidrocarbonetos. Mas, para que isto aconteça, uma companhia adquire uma área baseado em dados geológicos e geofísicos, e investe em dados adicionais e mão-de-obra para refinar seus conhecimentos sobre a região. Se os resultados da análise são encorajadores, então pode resultar numa perfuração exploratória. Assim, uma equipe de geólogos, geofísicos e engenheiros selecionam o sítio onde se encontra o poço e o alvo a ser perfurado baseado em pesquisas magnéticas, gravimétricas e sísmicas. Uma estimativa do custo e um planejamento do poço são executados pelo engenheiro de perfuração, quem tem a responsabilidade de reunir os especialistas, gerir o contrato e assegurar o sucesso da operação. Depois, o poço é então perfurado.

Portanto, recursos substanciais de dinheiro e tempo são investidos para identificar o alvo geológico e o prognóstico é confirmado ou refutado com base nos resultados do poço perfurado, perfilado e testado. Durante a perfuração, uma avaliação é feita nos cascalhos e nos fluidos do reservatório que surgem na superfície e pelos indicadores da perfuração e testemunho. Também, testes referentes a resposta da pressão do reservatório podem ser executados e registrados durante um curto período de produção para reunir informações adicionais sobre o reservatório, a este teste denominamos *DrillStem*. Os resultados da perfuração exploratória são avaliados e podem resultar ou num programa de um poço de valor comercial ou no seu abandono. Se hidrocarbonetos são detectados, a empresa tipicamente confirmará o campo através de uma perfuração adicional e teste do poço. Se o campo é julgado econômico, a companhia desenvolverá e produzirá as reservas de acordo com sua estratégia particular de risco-benefício.

Como se sabe as operações de perfuração são complexas e dinâmicas. Assim, o objetivo na perfuração é perfurar o poço o mais rápido possível sujeito as restrições tecnológicas, operacionais, qualidade e segurança do processo. Estes objetivos são freqüentemente conflitantes e eles próprios dependem de vários fatores, veja figura 2.

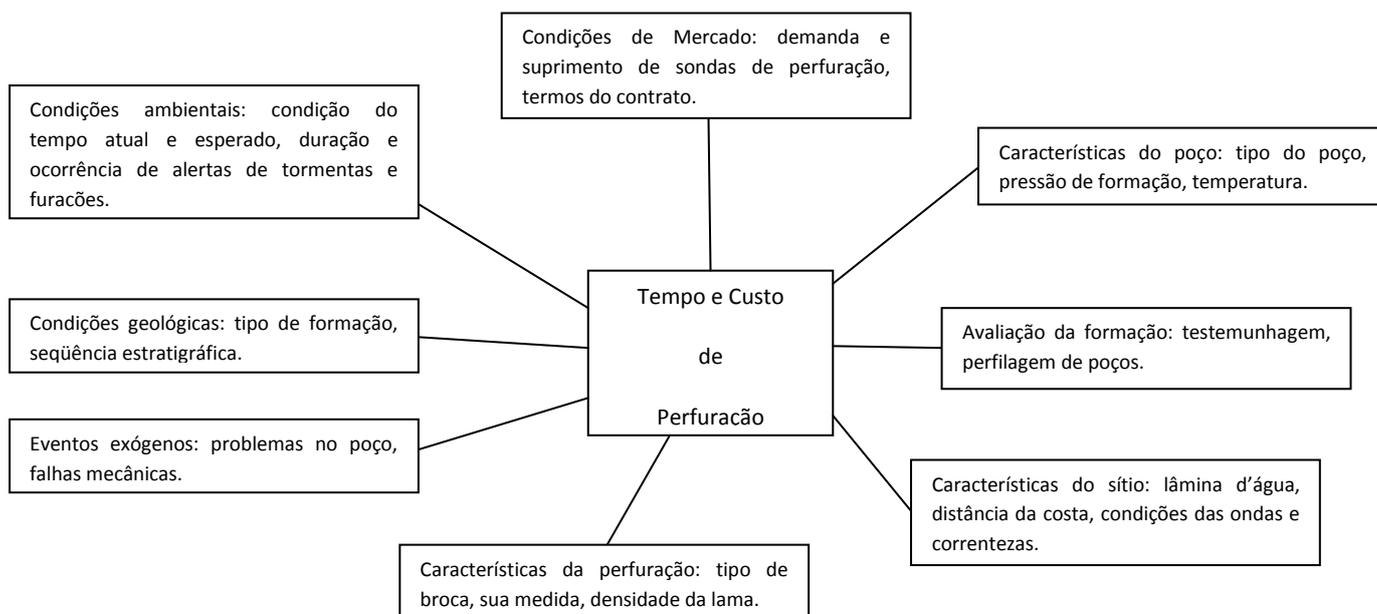


Figura 2 – Fatores que influenciam no custo e tempo da perfuração de um poço.

Fonte: Adaptado de KAISER, 2009.

Como dito anteriormente, as operações de perfuração são complexas e dinâmicas, assim, na perfuração a geologia da formação no sítio e a localização do reservatório alvo é um fator primário; pois, sabe-se que as formações geológicas variam através do mundo e, de fato, dentro da mesma bacia produtora. Formações duras, abrasivas e heterogêneas tipicamente têm baixa taxa de penetração, freqüentes falhas na coluna de perfuração e nas brocas; e desvios significantes da trajetória planejada. Na perfuração de reservatórios em grandes profundidades, observa-se que os mesmos são usualmente caracterizados por baixa permeabilidade, altas temperaturas e pressões, regimes de tensões e fraturas complexas e contaminantes, tais como, gás carbônico e sulfeto de hidrogênio, que aumenta a complexidade do poço e requer operações para

tratar com um número de questões relativas a segurança e desempenho operacional (KAISER, 2009).

Desta forma, os métodos de perfuração usados para se fazer um poço depende da formação geológica e tecnologia aplicada, da quantidade de informações conhecidas sobre a formação, experiência dos operadores, disponibilidade de equipamentos e experiência do empreiteiro que fará a perfuração. As características do poço são especificadas pelo planejamento da perfuração, pela localização do reservatório alvo e as condições encontradas durante a perfuração. As características do sítio, tais como, a profundidade da lâmina d'água (em perfuração *offshore*), experiência do operador na região e as condições ambientais influenciam na decisão do operador com respeito à seleção do contrato e tipo da sonda, que por sua vez, influenciam as métricas do desempenho. Eventos exógenos, tais como, tempo adverso e falhas mecânicas não podem ser previstos, mas podem ter um impacto significativo sobre o tempo e custo da perfuração.

Outro item extremamente importante é a estimativa dos custos que é executado especificamente para um prognóstico da perfuração. O procedimento usual é decompor os custos dentro de categorias gerais, tais como, preparação do sítio, mobilização, preparação da sonda, perfuração, operações de viagem, avaliação da formação e pesquisa, colocação dos tubos de revestimento, completação do poço e contingências. Tipicamente, muitas categorias são especificadas e o engenheiro de perfuração relaciona por itens o tempo e custo esperados por categoria. Cada componente de custo é identificado e categorizado dentro de elementos de custos menores e a porcentagem de contribuição em relação ao custo total é computado para identificar os direcionadores chaves de custo. Para melhorar a faixa da estimativa dos custos, a incerteza dos direcionadores de custo é freqüentemente quantificada. Isto forma a estrutura do orçamento do poço que é então enviado para a gerência para uma Autorização de Despesas (*Authorization for Expenditure – AFE*) para perfurar o poço. Em uma AFE são listados os custos intangíveis dos equipamentos e perfuração, custos de completação se o poço é um sucesso; custos de fechamento e abandono do poço, se o mesmo é considerado “seco”. A AFE, normalmente, inclui estimativas para o custo da sonda de perfuração, fluido de perfuração (lama), perfilagem, testes, cimentação, revestimento, estimulação do poço, bombas, tubos e outros serviços. Em operações conjuntas, os

acordos de operações, normalmente, requerem que o operador obtenha aprovação dos parceiros para despesas de perfuração. Os AFEs informam aos parceiros, por exemplo, sobre o planejamento da perfuração, fornecendo as estimativas de custo do planejamento, e assim, os operadores obtêm as aprovações necessárias dos mesmos (KAISER, 2009),

Existe um número de modos, no qual os custos de perfuração podem ser classificados, isto é, baseado na categoria funcional, na dependência do tempo e profundidade ou classificados como custos fixo ou variável. Os componentes dos custos usualmente permeiam mais que uma categoria e os esquemas de alocação destes custos são específicos de cada empresa. Os custos principais dependentes do tempo incluem o tempo requerido para perfurar um poço, que é influenciado pelo planejamento do poço (por exemplo, a profundidade do intervalo a ser perfurado, o número de tubos de revestimento, necessidades de avaliação da formação), taxa de penetração e problemas encontrados. Os custos da sonda e outros serviços tais como, navios de apoio, perfilagem, alugéis de ferramentas, são também sensíveis ao tempo. Os custos dos fluidos de perfuração, brocas, cimentos e outros consumíveis têm um componente direcionador de tempo, mas são mais influenciados pela profundidade do poço e condições no fundo do poço (dureza, abrasividade da rocha, interação broca/rocha). Alguns itens consumíveis tais como, cabeça de poço e revestimentos são considerados custos fixos. A mobilização, desmobilização e preparação são custos fixos determinados pela localização do sítio e localização da sonda alugada.

Conforme dito acima as categorias funcionais podem ser empregadas para classificar os custos em agrupamentos que incluem revestimento e cimentação, custos da perfuração rotativa, custos referentes ao período sem perfurar e problemas em geral. A categoria do custo de perfuração rotativa inclui todos os custos incorridos enquanto a broca de perfuração está perfurando, ou seja, custo da broca e lama. Os custos referentes ao período sem perfurar inclui viagem, controle de poço, espera por melhoria do tempo e manutenção. Problemas de perfuração incluem pescaria, perda de circulação, estabilidade do poço, problemas no revestimento e cimentação.

Os serviços especializados, tais como, perfuração e cimentação são despesas com base no contrato de serviço, que envolve tempo e volume de serviços. Os serviços

de helicópteros terão um aluguel mensal, uma carga de vôo horária e um custo fixo para mobilização/desmobilização, ou ainda podem ser contratados anualmente.

As operações de perfilagem, tipicamente, combinarão custos fixos para a mobilização/desmobilização das ferramentas, custos dependentes do tempo de uso referentes ao aluguel das ferramentas e custos independentes do tempo para o uso das ferramentas.

A proporção dos custos em cada categoria variará de poço para poço, mas normalmente, a proporção dos custos dependentes do tempo em relação ao custo total varia entre 40 a 70% do custo total. Na categoria funcional, os custos de perfuração rotativa e revestimento/cimentação são usualmente os custos dominantes e aumentam conforme aumenta a profundidade do intervalo perfurado e da lâmina d'água (KAISER, 2009).

### 2.2.1 – Custo Métrico Perfurado

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para se perfurar ao menor custo numa determinada litologia, em local específico em terra ou no mar e numa determinada profundidade, bem como encontrar um modo de decidir o momento certo de retirar uma broca do poço (JUNIOR, 2008).

Em relação ao custo da perfuração rotativa, que é o foco desta tese, WILSON e BENTSEN (1972) *apud* JUNIOR (2008) sugerem três modelos matemáticos para quantificar o efeito dos parâmetros chaves wob e rpm sobre a perfuração e tendo como parâmetros secundários o tipo e propriedades da lama e o tipo de broca. Assim, são sugeridos três modelos com complexidades distintas: o primeiro minimiza o custo métrico durante a perfuração de uma broca, o segundo minimiza o custo em um determinado intervalo e o terceiro de uma série de intervalos.

Como se sabe o custo da perfuração rotativa é um dos indicadores de desempenho da perfuração de um poço, representado pelo que denominamos de custo métrico perfurado. A seguir, de forma sucinta, os conceitos sobre o custo métrico perfurado levando em consideração o tempo de perfuração da broca (ou tempo

produtivo) e os tempos improdutivos como o tempo de viagem e conexão. Na seqüência uma classificação dos tempos envolvidos na perfuração.

Segundo JUNIOR (2008), os tempos na perfuração são divididos em:

- Tempos produtivos: são aqueles tempos gastos pela sonda em serviços que levam ao progresso direto do poço, ou seja, perfuração, jateamento e testemunhagem;
- Tempos não-produtivos: são aqueles tempos gastos pela sonda com serviços visando ao desenvolvimento do poço ou a sua melhoria em termos de qualidade, porém, não ocorrendo avanço ou aprofundamento do poço, como exemplo, manobras ou viagens, conexão, alargamento, circulação, perfilagem etc.;
- Tempos perdidos: são aqueles tempos gastos pela sonda não ocorrendo avanços do poço, mas incorporando custos, como por exemplo, quebra de equipamentos, interrupções das operações de reparo, socorro de acidentes de trabalho, paradas por condições meteorológicas ou de mar ruim entre outros.

A questão econômica é sempre um fator preponderante para perfuração. Logo, a meta é conseguir o menor custo de perfuração sem gerar riscos às operações, dentro das restrições e condições especificadas para a perfuração.

Para isto, o método mais utilizado no mercado é o custo por metro. Este método contém os custos inerentes ao avanço do poço pela perfuração, não incluindo problemas relativos a falta de boa técnica para o avanço do poço, como pescarias, tempos de reparos e outros. Esta metodologia é boa para os poços onde o Operador adquiriu as brocas para perfurar o poço. Outras formas de fornecimento de brocas é o aluguel da broca por metro em valores previamente definidos. Neste caso, a experiência dos Operadores e Fornecedores devem ser grandes, para não representar enormes prejuízos para ambos. Contudo, essa metodologia não é o objeto desta tese.

A seguir como é calculado o Custo por Metro (C):

$$C = \frac{C_b + C_s (T_m + T_p + T_c)}{M_t} \quad (1)$$

$C$  = Custo por metro perfurado (\$/m)

$C_b$  = Custo da broca (\$)

$C_s$  = Custo horário de operação da sonda (\$/h)

$T_m$  = Tempo de manobra ou viagem (h)

$T_p$  = Tempo de perfuração (h)

$T_c$  = Tempo de conexão (h)

$M_t$  = Metros perfurados pela broca ou *footage* (m)

A fórmula do custo métrico nada mais é do que uma simplificação da realidade, já que existem inúmeros parâmetros operacionais e exógenos que afetam os diversos tempos existentes no processo de perfuração.

### Custo da Broca

No mercado existem diversos fabricantes e tipos de brocas, onde os preços variam em função da qualidade de insertos ou cortadores, custos de insumos, cotação do dólar etc. Assim, os preços das brocas são definidos por seus diâmetros e características tecnológicas básicas. A seguir na tabela 1, os preços das brocas por diâmetro e tecnologia.

Tabela 1 – Custos da broca (US\$), por diâmetro e tecnologia.

Tipo	6 1/8"	8 1/2"	9 1/2"	12 1/4"	14 3/4"	17 1/2"	26"
Tricônicas de dentes de aço	3072	3809	4761	6145	7066	11800	12980
Tricônicas de insertos	5443	6750	8437	11772	13099	21875	24063
Tricônicas para motores	8811	11976	15422	22986	35254	41616	45778
Diamantes	6400	10000	13000	20000	23000	30000	33000
PDC	20000	30000	35000	50000	65000	95000	105000

Fonte: JUNIOR, 2008.

Sabe-se que os custos das brocas participam apenas como uma fração do custo total dos equipamentos, porém é considerado um elemento crítico sob o aspecto econômico da perfuração como um todo. Se compararmos os custos das brocas de diamante em relação às brocas tricônicas de dentes de aço ou de insertos, observa-se que elas apresentam custos muitas vezes maiores do que as de cone. Desta forma, a sua aplicação só é justificada pelo seu rendimento (tempo de permanência no fundo do poço). Assim, para se comparar o seu rendimento são usados diversos parâmetros, tais como: custo da broca, velocidade de perfuração, intervalo da seção perfurada e outros. Estes parâmetros, como indicadores de desempenho não são válidos quando aplicados em operações especiais (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

A equação do custo por metro pode ser usada para qualquer broca, mesmo para as de diamante. O cálculo do custo por metro pode ser feito quando se finaliza a operação de perfuração de um intervalo aplicando os dados reais na expressão de  $C$ , ou antes do começo da perfuração inserindo na fórmula os dados para se calcular o seu custo.

Com esta fórmula pode-se comparar brocas de diamante com as tricônicas ou fazer comparações relativas às vantagens econômicas dos tipos diferentes de brocas de diamante. Contudo, o analista deve obedecer a certas regras para fazer a previsão do

custo por metro perfurado, ou seja, o custo deve ser comparado com o custo real de outras brocas utilizadas para perfurar a mesma região sob condições análogas de perfuração. Desta forma, são usados poços vizinhos ao poço que se quer perfurar, a estes poços chamamos de poços de correlação ou *offset well*.

Contudo, ao se analisar brocas de diamante quando normalmente se usa brocas tricônicas convencionais, a análise mais adequada a ser feita é o *break even*. O *break even point*, ou ponto de *break even* se refere aos metros perfurados e as horas necessárias para igualar o custo por metro que pode ser obtido em um poço particular caso não fosse usada uma broca de diamante.

### Custo da Sonda

O custo horário da sonda, em conjunto com o desempenho operacional de avanço, são os elementos mais importantes na análise do custo métrico perfurado. No mercado existem inúmeras sondas de perfuração, contendo diversificados equipamentos que auxiliam na perfuração do poço com profundidades que variam de 1000 a 7000 metros, e apresentam custos diferentes, em decorrência da cotação do petróleo no mercado internacional, capacidade de perfuração etc. Na tabela 2 temos o custo horário das sondas.

Tabela 2 – Custo horário das sondas (US\$/Hr), por aplicação e capacidade.

Sonda	Custo Horário
Navios e semi-submersíveis	15000
Plataformas, jackups	3000
Sondas de terra 7000 metros	2000
Sondas de terra < 3000 metros	750

Fonte: JUNIOR, 2008.

### Tempo de Conexão

O cálculo do tempo de conexão  $T_C$  é feito dividindo-se o comprimento perfurado ( $M_t$ ) por 9,30 m que é o comprimento normal dos tubos de perfuração; no caso do *top drive*, os três tubos são conectados de uma única vez. Com a atividade anterior, sabe-se o número de conexões e depois é só multiplicá-lo pelo tempo unitário de conexão. Este tempo depende de vários fatores como: experiência dos operadores, do equipamento usado e das condições de operação.

### Tempo de Manobra

As horas de manobra, sob o ponto de vista econômico, são consideradas tempos não-produtivos, pois não fazem o poço avançar e gera custos para o operador.

Assim, quanto maior a profundidade do poço, mais horas são necessárias para se retirar a coluna de perfuração para a troca da broca, descer os revestimentos, as ferramentas de perfilagem etc. Portanto, os custos envolvendo horas de manobra são simplificadas, pois as horas envolvidas neste processo de manobra é função direta do número de tubos, do clima, se a operação é em terra ou no mar, depende muito da experiência dos operadores, da sonda de perfuração e das condições de operação entre outros.

O cálculo do tempo de manobra, na prática é feito usando a seguinte expressão:

$$T_m = 0,004 \cdot \left(\frac{h}{m}\right) \cdot Prof(m) \quad (2)$$

Onde o fator 0,004 significa um tubo de perfuração viajando 1000 m em quatro horas.

Outras fórmulas são adotadas, tais como:

$$T_m = \frac{PE + PS}{700} \quad (3)$$

ou

$$T_m = \frac{PE + PS}{500} \quad (4)$$

Onde:

*PE* – Profundidade de Entrada da broca (m)

*PS* - Profundidade de Saída da broca (m)

Os valores 700 ou 500 são fatores de produtividade, baseados na divisão de 1000/700 ou 1000/500, sendo respectivamente 1,42 ou 2,0 horas de manobra para cada 1000 metros de profundidade do poço.

As fórmulas descritas anteriormente, tem como objetivo estimar o tempo que seria gasto para retirada de uma broca, ao fim da sua vida útil, para a descida de outra e desta forma continuar a perfuração do poço.

Outro ponto importante é que o gasto com manobras para poços com sondas de custo baixo é irrelevante, mas para sondas caras se torna extremamente relevante. Portanto, para sondas de custo elevado tanto o rop de uma broca como sua vida útil devem ser o foco de nossas atenções. Logo, o ideal é selecionar uma broca que perfure uma fase inteira sem gerar manobra, e que apresente uma taxa de perfuração média satisfatória (JUNIOR, 2008).

### 2.3 – Programação Linear Multi-Objetivo

Segundo MAVROTAS (2006) e DUTRA (2003) a solução dos problemas de programação matemática com uma única função objetivo é uma tarefa simples e direta. A resposta do modelo é a solução ótima e envolve todas as informações relevantes sobre as variáveis de decisão.

Contudo, na vida prática existem situações onde o sistema pode ter objetivos múltiplos e conflitantes. Os resultados do modelo usualmente são soluções eficientes, pois eles não podem ser ótimos em relação a todos os objetivos do problema (TAHA, 1997).

Na Programação Matemática Multi-Objetivo (PMM) existe mais que uma função objetivo e não existe uma única solução ótima que simultaneamente otimiza todas as funções objetivos. Nestes casos, os tomadores de decisão estão procurando pela solução considerada a “mais preferível”. Em PMM o conceito de solução ótima é substituído pelo conceito de eficiência ou solução Pareto-ótimo. Assim, diz-se que uma solução é eficiente (ou Pareto-ótima, não dominada, não inferior) se o valor de algumas das componentes da função objetivo que formam o problema de minimização não puder ser melhorado sem a degradação de pelo menos uma das outras componentes envolvidas na função custo, ou seja, não pode ser encontrada uma solução que melhore uniformemente todas as outras.

### 2.3.1 – Classificação dos Métodos de Programação Linear Multi-Objetivo

HWANG e MASUD (1979) *apud* LUCAS (2007) dizem que os métodos para se resolver problemas de PMM podem ser classificadas em três categorias baseadas no grau de intervenção do tomador de decisão.

1- Articulação a *posteriori* de preferências: este método também é conhecido como método gerador, onde todo o conjunto das soluções eficientes são geradas e depois o tomador de decisão seleciona a solução mais preferível.

2- Articulação a *priori* de preferências: neste método o tomador de decisão expressa suas preferências antes do processo de cálculo de soluções não dominadas. Com isto é possível gerar uma função agregadora dos múltiplos objetivos presentes no modelo que as representa analiticamente. A crítica sobre este método recai no fato de que é muito difícil para o tomador de decisão saber de antemão e ser capaz de quantificar acuradamente suas preferências (MAVROTA, 2006).

3- Articulação progressiva de preferências: nos métodos interativos as fases do diálogo com o tomador de decisão são integradas com fases de cálculo e o processo usualmente converge depois de poucas interações de forma progressiva. Ou seja, o tomador de decisão incorpora as suas preferências de forma progressiva no processo de pesquisa de soluções. Depois de encontrada uma solução não dominada, o tomador de

decisão informa suas preferências face a esta solução, por meio de um protocolo de diálogo.

### 2.3.2 – Modelagem da Programação Matemática Multi-Objetivo

O problema de programação linear multi-objetivo consiste na otimização de  $p$  funções objetivos lineares sujeitas a um conjunto de restrições lineares.

$$\text{Max } f_1(\underline{x}) = \underline{c}_1 \underline{x}$$

$$\text{Max } f_2(\underline{x}) = \underline{c}_2 \underline{x}$$

.....

$$\text{Max } f_p(\underline{x}) = \underline{c}_p \underline{x}$$

$$\text{s.a. } \underline{x} \in X = \{ \underline{x} \in \mathbb{R}^n : \underline{x} \geq \underline{0}, A \underline{x} = \underline{b}, \underline{b} \in \mathbb{R}^m \}$$

ou

$$\text{“Max” } \underline{f}(\underline{x}) = C \underline{x}$$

$$\text{s.a. } \underline{x} \in X.$$

Onde  $C$  é a matriz dos objetivos (dimensão  $p \times n$ ), cujas linhas são os vetores  $\underline{c}_k$  (coeficientes da função objetivo  $f_k$ ).  $A$  é a matriz dos coeficientes tecnológicos ( $m \times n$ ) e  $\underline{b}$  é o vetor dos termos independentes (recursos disponíveis). Sem perda de generalidade, e de modo a facilitar a notação, considera-se que as funções objetivo são todas a maximizar. “Max” representa a operação de determinar soluções eficientes.

Assim, a definição matemática da solução eficiente é a seguinte (sem perda de generalidade assume-se que todas as funções objetivos  $f_k$ ,  $k = 1, \dots, p$  são para maximização): a solução viável  $\underline{x}$  de um problema PMM é eficiente se não existe outra solução viável  $\underline{x}'$  tal que  $f_k(\underline{x}') \geq f_k(\underline{x})$  para cada  $k = 1, \dots, p$ . Cada solução eficiente corresponde a um vetor não dominado no espaço dos objetivos. Se substituirmos a condição  $f_k(\underline{x}') \geq f_k(\underline{x})$  por  $f_k(\underline{x}') > f_k(\underline{x})$ , obtêm-se soluções fracamente eficientes.

Soluções fracamente eficientes não são usualmente “aceitas” em PMM porque elas podem ser dominadas por outras soluções eficientes. O tomador de decisão racional está procurando a solução mais preferível entre as soluções eficientes do PMM. Na ausência de qualquer outra informação, nenhuma destas soluções podem ser ditas ser melhor do que as outras. Normalmente, para um tomador de decisão é necessário fornecer informação adicional de preferência e identificar a solução não dominada (MAVROTAS, 2006).

Portanto, em programação multi-objetivo, o conceito mais importante é o de solução eficiente. Uma solução admissível para um problema multi-objetivo diz-se eficiente se e somente se não existir outra solução admissível que melhore o valor de uma função objetivo, sem piorar o valor de, pelo menos, outra função objetivo (LUCAS, 2007).

Dentre as diversas estratégias que existem para encontrar soluções de problemas multi-objetivos temos (MAVROTAS, 2006):

- 1) Algoritmo por soma ponderada (*Weighting Method*)
- 2) O Método das restrições (*Constraint Method*)
- 3) Abordagem das satisfações dos objetivos (*Goal Attainment Method*)

1 – Algoritmo por soma ponderada: neste método, o cálculo das soluções eficientes consiste na otimização de uma função escalar que é a soma ponderada das  $p$  soluções objetivos originais.

$$\max \{ \lambda_1 f_1(\underline{x}) + \lambda_2 f_2(\underline{x}) + \dots + \lambda_p f_p(\underline{x}) \}$$

$$\text{s.a. } \underline{x} \in X$$

$$\underline{\lambda} \in \Lambda \equiv \{ \underline{\lambda} : \underline{\lambda} \in \square^p, \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1, \lambda_k \geq 0, k = 1, 2, \dots, p \},$$

Pela variação dos pesos  $\lambda_p$ , obtêm-se diferentes soluções eficientes.

2 – Método das Restrições: Para tipos especiais de problemas PMM (na maioria problemas lineares) de porte pequeno a médio, existem métodos que produzem resultados eficientes. Dentre os diversos métodos temos o Método das Restrições.

No Método das Restrições otimiza-se uma das funções objetivo usando as outras funções objetivo como restrição incorporando-as na parte das restrições do modelo como mostrado abaixo,

$$\begin{array}{l}
 \text{Max } f_1 \\
 \text{Max } f_2 \\
 \text{s.t.} \\
 g_2 \geq e_2 \\
 g_3 \geq e_3 \\
 \vdots \\
 g_p \geq e_p
 \end{array}
 \quad \rightarrow \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Max } f_1 \\
 \text{s.t.} \\
 f_2 \geq e_{f_2} \\
 g_2 \geq e_2 \\
 g_3 \geq e_3 \\
 \vdots \\
 g_p \geq e_p
 \end{array}$$

### 3 - Abordagem das satisfações dos objetivos:

A programação por metas (*goal programming*) faz parte de vários métodos de tomada de decisão com objetivos múltiplos. Sua aplicação tem sido grande em várias áreas da ciência por permitir diferentes abordagens.

Para um entendimento maior do modelo de programação por metas, alguns conceitos são necessários (NETO, 1988):

- Objetivo: é uma expressão que reflete o desejo do decisor, p. ex. maximização do lucro, minimização dos custos, etc.;
- Nível de aspiração: valor relacionado com o nível de atingimento de um objetivo que se deseja atingir;
- Meta: equação formada pela associação entre objetivo e nível de aspiração;
- Desvio da meta: está relacionada com a diferença que poderá ocorrer entre o nível de atingimento inicialmente desejado e o nível de atingimento alcançado

para uma meta. Neste caso, quando a meta é superada os desvios são positivos e quando a meta não é atingida, os desvios são negativos.

Na programação por metas existem vários tipos de classificação, porém dois tipos se destacam: programação por metas ponderadas (*weighted goal programming*) e programação por metas lexicográficas (*pre-emptive goal programming*). Para maiores detalhes sobre estes tipos de programação por meta ver JONES (2004).

Na programação por metas clássica, a determinação das soluções eficientes baseia-se na minimização de uma distância a um ponto de referência, normalmente, definido pelo tomador de decisão, ou seja, os valores que gostaria de atingir (aspirações do tomador de decisão) em cada função objetivo. A solução ideal como ponto de referência é:

$$\text{Min } \| \underline{z}^* - \underline{f}(\underline{x}) \|_p$$

$$\text{s.a. } \underline{x} \in X.$$

Onde  $\underline{z}^*$  é a solução ideal. Para  $p = 1$  todos os desvios em relação ao ponto de referência são tidos em conta. Portanto, se  $p$  aumenta, maiores desvios vão tendo cada vez mais maior impacto no valor da distância.

RAMOS (1995) diz que a formulação geral do modelo de programação por metas segue as etapas abaixo:

- Formulação dos objetivos: definidos de acordo com os desejos do decisor e formulados em expressões matemáticas que relacionem as variáveis de decisão;
- Transformação dos objetivos em metas: para cada um dos objetivos deve ser estabelecido um nível de aspiração a ser incluído no membro direito da equação correspondente à meta, juntamente com as variáveis de desvios a serem incluídas no membro esquerdo;

- Priorização das metas: para programação por metas ponderadas devem ser estabelecidos pesos para os desvios das metas, em função da importância de cada meta. Para programação por metas lexicográficas, deve ser definida uma ordem de importância das metas de maiores níveis de prioridade;
- Formulação da função execução: a solução da programação por metas é obtida através da minimização dos valores das variáveis de desvio por metas.

Para finalizar, a formulação clássica de programação por metas é dada abaixo.

$$\begin{aligned} & \text{minimizar}_{x, d^+, d^-} \left( \sum_{i=1}^m (d_i^+ + d_i^-)^p \right)^{1/p}, p \geq 1 \\ & \text{s.a. } f_i(x) - d_i^+ + d_i^- = t_i, i = 1, 2, \dots, m \\ & d_i^+ \geq 0, d_i^- \geq 0, d_i^+ \cdot d_i^- = 0, i = 1, 2, \dots, m \\ & x \in \Omega \end{aligned}$$

Onde:

$t_i$  : meta (*goal, target*) para o objetivo  $i$  estipulada pelo decisor.

$d_i^+ > 0$  : indica que o objetivo  $i$  ficou *acima* de  $t_i$  na quantidade  $d_i^+$ .

$d_i^- > 0$  : indica que o objetivo  $i$  ficou *abaixo* de  $t_i$  na quantidade  $d_i^-$ .

Na interpretação da formulação clássica da programação por metas, minimiza-se alguma (p) distância de  $d^+ + d^-$  à origem. Também, assume-se que os desvios em relação às metas são igualmente importantes.

## 2.4 – Incerteza e Abordagens para Tratamento da Incerteza

### 2.4.1 - Incerteza

No mundo real, a tomada de decisão num ambiente complexo, normalmente, é feita levando em consideração a existência de múltiplos critérios que se conflitam entre si e não são de todo mensuráveis, e também é influenciada por diversos tipos de incerteza e variadas fontes. Assim, a incerteza está intrinsecamente relacionada com os problemas reais, uma vez que os sistemas apresentam um alto grau de complexidade e/ou porque os parâmetros a modelar apresentam uma grande variabilidade.

Portanto, pode-se classificar o tipo de incerteza envolvida nos processos de apoio à tomada de decisão em dois grupos básicos (LUCAS, 2007):

- A variabilidade (incerteza externa) definida como um atributo da realidade: neste caso, o sistema ou o processo sendo analisado se comporta de diferentes modos e com certa imprevisibilidade. Logo, esta variabilidade pode ser o resultado da aleatoriedade intrínseca da natureza, da diversidade de valores, dos diversos aspectos tecnológicos etc., que estão envolvidos no sistema ou no processo analisado.

- A falta de conhecimento (incerteza interna) definida como um atributo inerente aos tomadores de decisão participantes do processo decisório e ao conhecimento vigente, onde se inclui o conhecimento científico atual.

Porém, é sabido que as duas fontes de incerteza atuam em conjunto, uma vez que se influenciam mutuamente.

Segundo WALKER *et al* (2003) *apud* LUCAS (2007) nos processos de apoio à decisão baseados em modelos matemáticos pode-se definir vários graus de falta de conhecimento que levam a uma certa distinção da incerteza, tais como:

- Inexistência total ou parcial: por falta de observação ou medida, que neste caso, pode ser devido ao seu custo de aquisição ou por ser demorado, podendo em algumas situações haver estimativas mais ou menos confiáveis.

- Imprecisão (dados imprecisos): devido a erros ou dificuldades de medida, já que foram feitas aproximações em decorrência do custo ou tempo de obtenção ou mesmo devido à natureza estatística.
- Duvidosa: informação pouco confiável, contraditória entre as diversas fontes ou controversa entre os diferentes atores do processo.
- Arbitrariedade: apresenta certo grau de evidência conflituosa, com diferentes conjuntos de dados permitindo interpretações diferentes.
- Ignorância: relativo aos processos ou interações entre processos que não foram observados ou mesmo postulados teoricamente, porém existindo elementos de processos análogos que possam ser usados.
- Indeterminação: na prática é impossível de saber.

Outra confusão corrente está na definição do conceito entre risco e incerteza, que muitas vezes na literatura são usados com o mesmo significado. Contudo, o risco é entendido como uma mensuração da probabilidade e da severidade dos efeitos adversos associados a uma dada ação, resultado do processo decisório. No ambiente de risco, as conseqüências das ações (soluções) podem ser descritas por distribuições de probabilidade relativamente bem conhecidas ou mensuráveis, mesmo que a seqüência espacial dos acontecimentos ou o tempo específico não possam ser determinados (LUCAS, 2007).

Mas, a incerteza, na sua definição, apresenta um caráter distinto e mais amplo já que as conseqüências das ações não são descritas em termos de probabilidades conhecidas, nem podem ser estimadas por meio de probabilidades subjetivas, ou seja, graus de crença – *degrees of belief*.

Também, a incerteza está relacionada a sistemas abertos que não permitem a realização de experiências controladas, ou seja, está associada a situações onde ocorre indeterminação dos resultados, não podem ser repetidos de todo e em situações tão diferentes que dificilmente pode ser atribuído um significado a sucessivas observações.

Outro termo recorrente é a imprecisão que está freqüentemente refletida na qualidade dos dados de entrada de algum modelo (LUCAS, 2007).

## 2.4.2 – Tratamento da Incerteza

Uma vez discutida o que é incerteza, como tratá-la?

Segundo MAJUMDER e RAO (2009) diversos métodos estão disponíveis para o tratamento e quantificação da incerteza. Estes métodos podem incluir método de *Bayes*, teoria da probabilidade, teoria *fuzzy*, matemática intervalar etc. A escolha de um modelo apropriado de incerteza para a solução de um problema particular depende das características da incerteza presente na descrição do problema e das condições limites.

### 2.4.2.1 – Programação Estocástica

Em programação estocástica o conceito básico está na capacidade de se tomar decisões de correção dado uma ocorrência de um evento aleatório. Uma abordagem normalmente encontrada em programação estocástica consiste em definir cenários, onde são definidas probabilidades baseadas em distribuições previamente determinadas ou verificadas empiricamente.

A formulação de um problema de programação linear estocástico baseado em dois períodos, consiste na minimização do custo relativo à decisão a tomar no primeiro período mais o custo esperado da decisão no segundo período. No segundo período, os valores das variáveis de decisão são interpretados como medidas operacionais corretivas de recurso contra as não admissibilidades geradas por causa das incertezas (LUCAS, 2007).

$$\begin{aligned}
& \min \underline{c}\underline{x} + E_s Q(\underline{x}, s) \\
& s.a. \\
& A\underline{x} = \underline{b} \\
& \underline{x} \geq \underline{0} \\
& \text{onde} \\
& Q(\underline{x}, s) = \min \underline{d}(s)\underline{y}(s) \\
& s.a. \\
& T(s)\underline{x} + W(s)\underline{y}(s) = \underline{h}(s)
\end{aligned}$$

Onde  $s$  são os cenários.  $Q(\underline{x}, s)$  é o custo do recurso para todos os cenários possíveis, dependentes das decisões no primeiro período e do evento aleatório  $s$ .  $\underline{y}(s)$  são as decisões, uma para cada cenário  $s$ , a tomar no segundo período. No segundo período,  $T(s)\underline{x} + W(s)\underline{y}(s) = \underline{h}(s)$  são as restrições, que representam a necessidade das medidas de correção depois da ocorrência do evento aleatório.

Geralmente, o problema definido anteriormente pode ser tratado como um problema determinístico equivalente utilizando as probabilidades  $p_s$  para a ocorrência de cada cenário  $s$ .

$$\begin{aligned}
& \min \underline{c}\underline{x} + \sum_{s=1}^S p_s \underline{d}_s \underline{y}_s \\
& s.a. \\
& A\underline{x} = \underline{b} \\
& \underline{x} \geq \underline{0} \\
& T_s \underline{x} + W_s \underline{y}_s = \underline{h}_s \rightarrow s = 1, \dots, S \\
& \underline{x} \geq \underline{0} \\
& \underline{y}_s \geq \underline{0} \rightarrow s = 1, \dots, S
\end{aligned}$$

Já que existe uma variável  $\underline{y}_s$  para cada cenário, as variáveis de decisão do primeiro período não podem antecipar qualquer dos cenários, portanto, são admissíveis para todos eles. Como a resolução deste problema é dado pelas variáveis  $\underline{x}$  e  $\underline{y}_s$  simultaneamente, escolhe-se  $\underline{x}$  que é o ótimo para todos os cenários. Observa-se que a

dimensão deste problema determinístico aumenta linearmente com os números de cenários (LUCAS, 2007).

Sabe-se que na programação probabilística o centro das atenções está na capacidade do modelo satisfazer a admissibilidade num ambiente incerto ao invés da minimização dos custos esperados do recurso como na programação estocástica.

#### 2.4.2.2 – Programação Difusa

Na programação difusa (*fuzzy programming*) os parâmetros aleatórios são definidos como números difusos e as restrições como conjuntos difusos. Atualmente, existem diversas formulações de programação difusa.

Podemos citar a programação flexível, onde a incerteza se encontra na operação de otimização, ou seja, maximização ou minimização; e também, nos sinais das restrições, deixando de serem rígidos. Outro tipo de programação é a denominada de programação possibilística, neste caso, todos os coeficientes do modelo são incertos.

Na programação difusa, as funções objetivos têm a possibilidade de ser tratada como restrições onde os termos independentes são definidos conforme as preferências do tomador de decisão. Logo, as funções objetivos e as restrições apresentam a mesma natureza e as desigualdades são flexibilizadas quer entre os lados das restrições, como entre as funções objetivos e a meta especificada pelo tomador de decisão. Assim, pode ocorrer relaxações das relações matemáticas do modelo, permitindo pequenas violações das restrições, ficando o tomador de decisão satisfeito ao atingir uma determinada meta para as funções objetivos (LUCAS, 2007).

$$\begin{aligned} & \max C \underline{x} \\ & s.a. \\ & A \underline{x} \leq \tilde{b} \\ & \underline{x} \in X \end{aligned}$$

que é equivalente a:

$$\begin{aligned} C\underline{x} &\geq \underline{z}^a \\ A\underline{x} &\leq \underline{b} \\ \underline{x} &\in X \end{aligned}$$

onde  $\underline{z}^a$  é o vetor das metas que o tomador de decisão gostaria de atingir para as  $p$  funções objetivos.

Logo, algumas violações das restrições são permitidas e o grau de satisfação de uma restrição é determinado por meio de uma função membro.

$$\text{Onde, } A' = \begin{bmatrix} -C \\ A \end{bmatrix} \text{ e } \underline{b}' = \begin{bmatrix} -z^a \\ b \end{bmatrix}, \text{ portanto, observa-se a natureza simétrica do}$$

modelo.

$$\begin{aligned} A'\underline{x} &\leq \underline{b}' \\ \underline{x} &\in X \end{aligned}$$

Desta forma, cada função objetivo e restrição é considerada um conjunto difuso sendo  $\mu_k(\underline{x})$ , onde  $k = 1, \dots, m+p$ , a respectiva função membro. Normalmente,  $\mu_k(\underline{x})$  é uma função linear apresentando valor 0 se as restrições forem fortemente violadas, 1 se forem completamente satisfeitas e variando linearmente entre 0 e 1, para restrições  $\geq$ , ou entre 1 e 0 para restrições  $\leq$ .

No modelo simétrico, descreve-se o problema de programação difusa como:

$$\max_{x \in X} (\mu_D(x)) = \max_{x \in X} [\min_{k=1}^{m+p} \mu_k(x)], \forall x \in X$$

onde  $\mu_k(x)$  é a função membro da restrição ou função objetivo  $k$  (LUCAS, 2007).

### 2.4.2.3 – Programação Intervalar

Quando se fala dos métodos de programação difusa, a grande questão está no fato deste ser uma abordagem indireta com variáveis de controle intermediárias cujo significado pode não se apresentar de forma clara para o tomador de decisão e podem também, não incluir na otimização os tipos de incertezas relevantes. A grande dificuldade encontrada na utilização de métodos estocásticos está relacionada com a obtenção de informações detalhadas para se construir funções probabilísticas, sendo impossível em muitas das vezes. Porém, na maioria das vezes é possível obter informações que um determinado valor se encontra em um certo intervalo, mas é muito difícil definir uma distribuição de probabilidade adequada para esta variação.

Portanto, os modelos matemáticos intervalares, surgem como uma ferramenta para soluções desta natureza. Neste caso, os requisitos se encontram no fato de que não é possível determinar com precisão um dado valor, porém, é possível definir uma gama de variação plausível onde ele se encontra, sem determinar distribuições de qualquer natureza, ou seja, possibilística (programação *fuzzy*) ou probabilística (programação estocástica). Sendo assim, os coeficientes/parâmetros são incertos, mas sabe-se que variam num intervalo fechado.

Mas o que é matemática ou aritmética intervalar? Este assunto foi introduzido no final da década de 50, do século XX, por R. E. Moore, com o objetivo de tratar problemas que lidam com a incerteza. Desta forma, os números representados como intervalos servem como controladores da propagação do erro, já que garantem que a resposta correta de certo problema está dentro do intervalo obtido. Baseado neste método, DENG, em 1982, introduziu a teoria de sistemas grey ou cinza (HU e WANG, 2006).

A teoria de sistemas cinza é uma metodologia importante usada nos estudos das situações não definidas, ou seja, esta teoria tem como objetivo o tratamento de sistemas com informações pobres ou perdidas. Esta teoria tem sido fortemente empregada em muitos campos da ciência desde a sua proposição e tem produzido uma grande quantidade de estudos teóricos e práticos. A matemática Intervalar é um novo tipo de matemática aplicada a incerteza, que é baseada na teoria cinza. Este tipo de número incerto vem de informações pobres, é um número real, porém não se sabe o seu valor

com certeza. Na teoria cinza, o número real cujo valor é desconhecido é chamado número cinza (LI, 2009).

Mas o que significa a palavra cinza no sistema cinza?

A cognição do nosso universo natural e/ou artificial tem sido um processo tedioso e progressivo. As formulações das leis naturais e artificiais não acontecem da noite para o dia. A Natureza para nós não é “*white (Branco)*” (a informação é totalmente precisa), mas por outro lado, também não é “*black (Preto)*” (a informação é totalmente imprecisa). Ela é “*grey (cinza)*”, ou seja, uma mistura de *black* e *white*. Nosso pensamento, não importa quão analítico ele seja, ele é cinza, enquanto nossa ação e reação, não importa quão prático seja, é também cinza. O fato é que, desde o início de nossa existência, nós estamos confinados a um alto espaço dimensional relacional de informações cinzas (NG, 1994).

Os fenômenos naturais tem nos dado numerosos problemas difíceis. Nós estamos confrontados com numerosos sistemas cinzas: sistemas sociais, ambientais, econômicos, na medicina, de engenharia entre outros (DENG, 1989). Para assegurar a continuação de nossa existência é imperativo que nós investiguemos e entendamos estes sistemas. Entretanto, dado nosso presente conhecimento ou informação científica, tentamos simplificar a complexidade destes sistemas. Durante este processo, nós descartamos informações corretas ou erradas. Como resultado disto, nós podemos somente trabalhar com informações parciais, ou mesmo pobre. Por causa da falta de informação correta que pode ser extraída do sistema, a “cor” que nós obtemos de um sistema é cinza (NG, 1994).

Qual é a característica de um sistema cinza? A falta de informação é a característica básica, e ela serve como ponto de partida fundamental para a investigação de um sistema cinza. A ênfase é descobrir as verdadeiras estruturas destes sistemas sobre condições pobres de informação.

Contudo, o que é informação? A maioria das pessoas definem a informação como dados numéricos, porém na teoria de sistema cinza, esta definição é considerada estreita. Na realidade, dado é somente parte da informação total. A informação deveria consistir de dois tipos: o primeiro é o elemento (dado) qualitativo, isto é, o tipo que não pode ser medido, mas pode dar uma aparência categórica. O segundo tipo são os

elementos quantitativos, que fornecem medidas das propriedades da informação. Desta forma, na vida real podemos estar diante de um sistema, sabendo somente parte dos elementos qualitativos da informação. Ao mesmo tempo, nós podemos saber somente certos intervalos de variação dos elementos quantitativos da informação, com seus valores numéricos precisos desconhecidos. Sem dúvida, tais sistemas fornecem somente informações que são denominados cinza (NG, 1994). Para maiores informações sobre este assunto ver DENG (1989).

Desta forma, discutiremos agora a aritmética/matемática intervalar que fundamenta os sistemas cinzas.

Na análise intervalar, todos os parâmetros do sistema são tratados como números intervalares,  $A = [A - \Delta A, A + \Delta A]$ ; com  $A$  denotando o valor nominal e  $\Delta A$  o desvio da média. Isto envolve a aplicação da aritmética intervalar a cada passo do cálculo. Como nem sempre é possível encontrar informações detalhadas sobre as incertezas de um parâmetro, uma abordagem intervalar pode ser convenientemente usada como uma indicação geral da imprecisão que existe em um problema de engenharia. Isto significa que nós não necessitamos conhecer as distribuições de probabilidade das variáveis estocásticas ou das variáveis incertas.

Um número intervalar pode ser definido como  $x^\pm = [x^-, x^+] \equiv [x_1, x_2]$ . Os limites dos valores inferiores e superiores são dados por  $x^- = x_1 = x_0 - \Delta x$  e  $x^+ = x_2 = x_0 + \Delta x$ , onde  $x_0$  é um valor nominal e  $\Delta x$  representa a tolerância de  $x$ .

A seguir em mais detalhes são dadas as definições referentes aos sistemas Cinzas ou Parâmetros Intervalares (MAQSOOD *et al*, 2005).

Definição 1 - Seja  $x$  um grupo de números reais que apresente limites. Um número cinza  $x^\pm$  com limite superior e inferior e com distribuição de probabilidade desconhecida é definido como um intervalo para  $x$  tal que

$$x^\pm = [x^-, x^+] = \{t \in x, x^- \leq t \leq x^+\} \quad (1)$$

onde  $x^-$  e  $x^+$  representam os limites superior e inferior de  $x^\pm$ , respectivamente. Quando  $x^- = x^+$ ,  $x^\pm$  torna-se um número determinístico, ou seja,  $x^\pm = x^- = x^+$ .

Definição 2 - Para  $x^\pm$  temos as seguintes relações:

$$x^\pm \geq 0 \text{ se } x^- \geq 0 \text{ e } x^+ \geq 0 \quad (2)$$

$$x^\pm \leq 0 \text{ se } x^- \leq 0 \text{ e } x^+ \leq 0 \quad (3)$$

Definição 3 – Para  $x^\pm$  e  $y^\pm$ , suas relações são dadas conforme abaixo:

$$x^\pm \leq y^\pm \text{ se } x^- \leq y^- \text{ e } x^+ \leq y^+ \quad (4)$$

$$x^\pm < y^\pm \text{ se } x^- < y^- \text{ e } x^+ < y^+ \quad (5)$$

Definição 4 – O valor *whitenizado* (branco ou preciso) de  $x^\pm$  é definido como um valor determinístico encontrando-se entre o limite superior e inferior de  $x^\pm$ :

$$x^- \leq x_v^\pm \leq x^+, \quad (6)$$

onde  $x_v^\pm$  representa o valor *whitenizado* de  $x^\pm$ .

Definição 5 – Para  $x^\pm$ ,  $\text{Sign}(x^\pm)$  é definido como:

$$\text{Sign}(x^\pm) = \begin{cases} 1 & \text{se } x^\pm \geq 0 \\ -1 & \text{se } x^\pm < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Definição 6 – Para  $x^\pm$ , seu valor absoluto  $|x^\pm|$  é definido conforme abaixo:

$$|x^\pm| = \begin{cases} x^\pm & \text{se } x^\pm \geq 0 \\ -x^\pm & \text{se } x^\pm < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Logo, temos:

$$|x|^- = \begin{cases} x^- & \text{se } x^\pm \geq 0 \\ -x^+ & \text{se } x^\pm < 0 \end{cases} \quad (9)$$

e

$$|x|^{\pm} = \begin{cases} x^+ \text{ se } x^{\pm} \geq 0 \\ -x^- \text{ se } x^{\pm} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Definição 7 – Um sistema cinza (parâmetro intervalar) é definido como um sistema contendo informações apresentados como números cinza ou intervalar.

Definição 8 – Uma decisão cinza é definida como uma decisão tomada dentro de um sistema cinza.

Definição 9 – Seja  $\mathfrak{R}^{\pm}$  um grupo de números cinzas. Um vetor cinza  $X^{\pm}$  são números cinzas e uma matriz cinza  $X^{\pm}$  é uma matriz cujos elementos são números cinza,

$$X^{\pm} = \mathfrak{X}^{\pm} = \left[ \begin{matrix} x_i^- & x_i^+ \end{matrix} \right]_{\forall i}, \mathfrak{X}^{\pm} \in \mathfrak{R}^{\pm} \mathbb{I}^n, \quad (11)$$

$$X^{\pm} = \mathfrak{X}^{\pm} = \left[ \begin{matrix} x_{ij}^- & x_{ij}^+ \end{matrix} \right]_{\forall i, j}, \mathfrak{X}^{\pm} \in \mathfrak{R}^{\pm} \mathbb{I}^{m \times n}, \quad (12)$$

Definição 10 – Para os vetores e matrizes cinzas temos:

$$\begin{aligned} X^{\pm} \geq 0 \text{ se } x_{ij}^{\pm} \geq 0, \forall i, j, \\ X^{\pm} \in \mathfrak{R}^{\pm} \mathbb{I}^{m \times n}, m \geq 1, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} X^{\pm} \leq 0 \text{ se } x_{ij}^{\pm} \leq 0, \forall i, j, \\ X^{\pm} \in \mathfrak{R}^{\pm} \mathbb{I}^{m \times n}, m \geq 1, \end{aligned} \quad (14)$$

Definição 11 – Seja  $* \in \{+, \times, \div\}$  uma operação binária sobre os números cinzas. Então para  $x^{\pm}$  e  $y^{\pm}$  temos:

$$\begin{aligned} x^{\pm} * y^{\pm} = \left[ \min \{x * y\}, \max \{x * y\} \right] \\ x^- \leq x \leq x^+, y^- \leq y \leq y^+. \end{aligned} \quad (15)$$

Em caso de divisão, assume-se que  $y^{\pm}$  não possa ser zero. Além disso, temos:

$$x^\pm + y^\pm = \left[ \begin{array}{l} \underline{f}^- + y^-, x^+ + y^+ \\ \underline{f}^+ + y^+ \end{array} \right] \quad (16)$$

$$x^\pm - y^\pm = \left[ \begin{array}{l} \underline{f}^- - y^+, x^+ - y^+ \\ \underline{f}^+ - y^+ \end{array} \right] \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x^\pm \times y^\pm &= \left[ \min \{x \times y\}, \max \{x \times y\} \right] \\ x^- \leq x \leq x^+, y^- \leq y \leq y^+, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} x^\pm \div y^\pm &= \left[ \min \{x \div y\}, \max \{x \div y\} \right] \\ x^- \leq x \leq x^+, y^- \leq y \leq y^+, \end{aligned} \quad (19)$$

Definição 12 – Seja  $\mathfrak{R}^\pm$  um grupo de números cinzas. Um modelo de programação linear cinza pode ser definido como:

$$\max f^\pm = C^\pm X^\pm \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} s.t. \\ A^\pm X^\pm \leq B^\pm, \end{aligned} \quad (20b)$$

$$X^\pm \geq 0, \quad (20c)$$

$$x_j^\pm = \text{variável de decisão cinza}, x_j^\pm \in X^\pm, \quad (20d)$$

onde:

$$\begin{aligned} A^\pm &\in \mathfrak{R}^\pm \left\} \begin{array}{l} \overline{m} \times n \\ \overline{m} \times 1 \end{array} \right\}, \\ C^\pm &\in \mathfrak{R}^\pm \left\} \begin{array}{l} \overline{1} \times n \\ \overline{1} \times 1 \end{array} \right\}, \end{aligned} \quad (20e)$$

Quando os parâmetros  $A^\pm, B^\pm e C^\pm$  forem intervalares, o modelo de programação linear intervalar fornecerá soluções ótimas cinza para as variáveis de decisão  $x_{jopt}^\pm, \forall j$ , e os valores da função objetivo  $f_{opt}^\pm$ , conforme abaixo:

$$x_{jopt}^\pm = \left[ \begin{array}{l} \underline{x}_{jopt}^-, x_{jopt}^+ \\ \underline{x}_{jopt}^+, x_{jopt}^- \end{array} \right] \geq x_{jopt}^-, \forall j, \quad (21)$$

$$f_{jopt}^\pm = \left[ \begin{array}{l} \underline{f}_{jopt}^-, f_{jopt}^+ \\ \underline{f}_{jopt}^+, f_{jopt}^- \end{array} \right] \geq f_{jopt}^-. \quad (22)$$

Quando os elementos do modelo contêm níveis de incertezas elevados, o modelo matemático de programação cinza pode gerar soluções no qual as incertezas são dadas com grandes intervalos. Desta forma, quanto maior o grau cinza das soluções, menor a eficiência e utilidade destes resultados, ou seja, elas podem ter uso prático limitado na tomada de decisão.

Observa-se na literatura a existência de diversos trabalhos sobre o tratamento da incerteza baseado em matemática intervalar.

MAJUMDER e RAO (2009) desenvolveram um modelo de otimização intervalar para analisar as cargas que incidem nas estruturas das asas das aeronaves durante o período de pouso. Neste problema os parâmetros do sistema são incertos e descritos como números intervalares.

LI (2009) apresenta um trabalho que trata da análise dinâmica *grey input-output* que reflete a relação entre setores do sistema econômico em diferente períodos de tempo. Neste trabalho ele combina a teoria de sistema *grey* com a análise dinâmica tradicional *input-output* onde pode-se prever e controlar o sistema econômico sobre situações de incerteza.

No trabalho de OLIVEIRA e ANTUNES (2007) eles fazem uma revisão dos modelos lineares multi-objetivo com coeficientes intervalares apresentando diversos exemplos ilustrativos.

No artigo de LIN e LI (2006) é desenvolvido um modelo para planejamento de trânsito em nível regional. O modelo proposto aloca as atividades recreacionais, de serviços e residenciais de uma cidade de acordo com quatro objetivos e seis grupos de restrições. O objetivo é tratar a incerteza que se apresenta no modelo como número *grey* nos dados de entrada e saída do modelo de programação multi-objetivo *grey*.

HU e WANG (2006) apresenta uma nova abordagem sobre a relação entre números intervalares que satisfazem as propriedades operacionais da aritmética intervalar, reduzindo as incertezas da aritmética clássica.

WU *et al* (2006) apresenta um modelo programação intervalar não linear para o planejamento dos sistemas de gerenciamento de resíduos levando em consideração os efeitos da economia de escala.

MAQSOOD, HUANG e YEOMANS (2005) fazem uma análise do planejamento dos sistemas de gerenciamento de recursos de água levando em consideração as incertezas deste processo baseado no método denominado programação estocástica de dois estágios *fuzzy* com parâmetros intervalares.

LAI, WANG, XU *et al* (2002) desenvolveram um modelo de programação linear intervalar para seleção de portfólios. Neste modelo os valores dos coeficientes da função objetivo e das restrições são dados em intervalos.

## Capítulo 3 - Modelo Matemático Não Linear Intervalar

### 3.1 – Descrição e Formulação do Problema

A descrição do problema de perfuração econômica de rochas de um poço de óleo e gás pode ser traduzida como: perfurar rochas pela ação da rotação (rpm) e peso aplicado a uma broca (wob) numa sonda, sendo que estas rochas apresentam certas propriedades, tais como: porosidade, permeabilidade, resistência compressiva não confinada (resistência à compressão da rocha à pressão atmosférica).

A broca aplicada neste processo pode ser Tricônica de Dentes de Aço, Inseto de Carbureto de Tungstênio, PDC e de Diamante/TSP. A mesma é conectada na extremidade de uma coluna de perfuração, que consiste basicamente de comandos (tubos de paredes grossas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas). Na sonda existe um motor elétrico que faz girar um eixo conectado a uma engrenagem que transmite rotação e torque à broca no fundo do poço fazendo com que a mesma fragmente as rochas.

Para que a perfuração seja mais eficiente deve-se bombear o fluido de perfuração ou lama (a base de água, óleo entre outros) continuamente com o objetivo de resfriar a broca, limpar o fundo do poço e carrear os fragmentos da rocha (cascalhos) pelo espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna até a superfície.

Após atingir a profundidade de projeto do poço, retira-se a coluna de perfuração e uma coluna de revestimento de aço, com diâmetro menor do que da broca, é descida. O espaço anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é preenchido por cimento com a finalidade de isolar as rochas atravessadas e assim, dar prosseguimento a perfuração com segurança. Logo após a cimentação, desce outra coluna de perfuração com uma broca de diâmetro menor do que a do revestimento. Assim, conforme exposto acima, verifica-se que um poço é perfurado em diversas fases, definidas pelos diferentes diâmetros das brocas (THOMAS, 2004). Para maiores informações sobre perfuração de rochas em petróleo ver o apêndice A.

Outros fatores são fundamentais para a perfuração econômica de rochas, tais como: custo horário da sonda e da broca, seleção adequada dos parâmetros

operacionais, ou seja, rpm, wob, torque e vazão da lama. Também, temos os tempos envolvidos no processo de perfuração, tais como, o tempo efetivamente perfurando o poço pela broca ou tempo de corte pela broca, que diminui com o desgaste da mesma; os tempos improdutivos caracterizados pelo tempo de conexão das colunas e o tempo de viagem quando se tem a necessidade de se trocar as brocas desgastadas ou quando ocorre pescaria, por exemplo, o recolhimento dos cones quebrados das brocas tricônicas do fundo do poço.

Todos estes fatores irão impactar no desempenho da perfuração das rochas. Mas, para se avaliar o desempenho da perfuração podemos observar o custo métrico perfurado, que quanto menor melhor. Segundo WILSON e BENTSEN (1972) *apud* JUNIOR (2008) existem três modelos matemáticos com complexidades distintas para o custo métrico perfurado: o primeiro minimiza o custo métrico durante a perfuração de uma broca, o segundo minimiza o custo em um determinado intervalo e o terceiro de uma série de intervalos. O custo métrico total perfurado, basicamente é impactado pelas propriedades das rochas, pelos parâmetros operacionais wob, rpm, rop, torque, vazão da lama e pelos custos da sonda e da broca.

Também sabe-se que durante a perfuração de um poço é impossível manter as condições operacionais de corte da rocha constantes e também, em decorrência dos fatores incontroláveis do processo, o custo métrico perfurado pode ser considerado incerto. Assim, nestas situações mais informações são necessárias para o planejamento e avaliação do processo de perfuração de um poço de petróleo. Portanto, se os parâmetros são incertos, devem-se adotar os valores mais prováveis, mas isto pode levar a resultados insatisfatórios. Logo, como resolver este problema?

Segundo MAJUMDER e RAO (2009) existem diversos métodos para se tratar e quantificar as incertezas, por exemplo: teoria da probabilidade, método de *Bayes*, matemática intervalar, teoria *fuzzy* e outros. A escolha de um modelo apropriado de incerteza para a solução de um problema particular depende das características da incerteza presente na descrição do problema e das condições limites.

Na maioria dos casos práticos, as faixas das incertezas dos fatores poderão estar disponíveis, mas as informações sobre as distribuições de probabilidade ou dados das variáveis que apresentam incertezas não. Como nem sempre é possível encontrar

informações detalhadas sobre as incertezas de um parâmetro, uma abordagem intervalar pode ser convenientemente usada como uma indicação geral da imprecisão que existe em um problema de engenharia. Isto significa que nós não necessitamos conhecer as distribuições de probabilidade das variáveis estocásticas ou das variáveis incertas.

Assim, conforme descrito anteriormente, o problema de perfuração econômica em rochas pode ser estabelecido como: dado um grupo de propriedades das rochas, da sonda, ou seja, seu custo por hora (\$/hr); da broca, seu custo (\$); encontre os parâmetros operacionais wob, torque, vazão da lama, rop e rpm tal que minimize o custo métrico total perfurado (WIJK, 1991) e (TANZEV, 1975).

A seguir hipóteses são feitas para definir o escopo do estudo.

1 – O custo por metro ( $Q$ ) é definido pelo custo horário da sonda ( $H = \$/hr$ ), pelo custo da broca ( $I = \$$ ), pelo rop (m/hr) e pela vida da broca ( $Z$ ) definida pelo seu percurso de corte, dado em metros. Esta abordagem segue o raciocínio usado no trabalho de WIJK (1991). Com isto, não são considerados os tempos de conexão e nem de viagem, ou seja, o custo métrico reflete o custo métrico durante a perfuração da rocha pela broca. Caso, os tempos de conexão e viagem fossem considerados seria necessário analisar dentre várias questões, as curvas de aprendizado dos operadores e a política de troca de ferramenta no processo de perfuração, que não é o foco da tese.

$$Q = \frac{H}{rop} + \frac{I}{Z}$$

2 - A perfuração é baseada no controle cinemático das variáveis de decisão: rop e rpm. Nesta abordagem o rop e o rpm são variáveis de entrada do modelo e as variáveis de saída são o wob e torque. Uma das vantagens para esta abordagem é a facilidade de se medir o rop com boa resolução quando a perfuração não está sob o controle do wob, ou seja, com pequenas mudanças neste parâmetro ocorrem grandes variações no rop (DETOURNY *et al*, 2008).

3 – Durante a perfuração de um poço de petróleo é quase impossível manter as condições operacionais de corte, ou seja, rpm, wob, vazão da lama e torque exatamente constante e por conseguinte, o rop; ocorrem flutuações na vida da broca e variações nas forças de corte devido aos fatores incontrolláveis (interação broca/rocha, propriedades

das rochas), de modo que, estes problemas não podem ser evitados neste tipo de processo. Portanto, é possível que o custo métrico perfurado e os fatores operacionais sejam incertos devido aos fatores incontroláveis da perfuração. Assim, as incertezas nesta tese estão nos limites inferior e superior do  $rop$  ( $rop_{\min}$  e  $rop_{\max}$ ) e do  $rpm$  ( $rpm_{\min}$  e  $rpm_{\max}$ ), já que estes limites podem, também, não ser conhecido com certeza (MAQSOOD *et al*, 2005).

Estes limites apresentam incertezas inerentes ao processo em si, desde que, o material/ferramenta e suas características sejam conhecidas. A incerteza no caso do  $rop_{\min}$  e  $rpm_{\min}$ , está no fato de que não podemos afirmar com certeza com qual valor se iniciará a interação da ferramenta/material no processo, assim como para  $rop_{\max}$  e  $rpm_{\max}$ , também não sabemos qual valor começará a prejudicar no processo de perfuração, a relação ferramenta/material.

Portanto, este problema tem sido uma lacuna na literatura sobre perfuração econômica em rochas na área de petróleo, onde este trabalho de tese vem de encontro, pois não existe na literatura uma metodologia baseada em programação não linear intervalar para a definição do custo métrico perfurado.

Contudo, para se definir o modelo não linear intervalar são necessárias duas etapas. Na primeira etapa é desenvolvido o modelo não linear determinístico para se minimizar o custo métrico. Na segunda etapa é desenvolvido o modelo não linear intervalar, onde, também, são apresentados os procedimentos para se definirem os limites inferiores e superiores dos intervalos dos limites físicos das variáveis de decisão do modelo, ou seja,  $rop_{\min} = [rop_{\min}^-, rop_{\min}^+]$ ,  $rop_{\max} = [rop_{\max}^-, rop_{\max}^+]$ ,  $rpm_{\min} = [rpm_{\min}^-, rpm_{\min}^+]$  e  $rpm_{\max} = [rpm_{\max}^-, rpm_{\max}^+]$ .

A seguir apresenta-se o desenvolvimento dos modelos matemáticos não linear determinístico e intervalar.

### 3.2 – Modelo Matemático Não Linear Determinístico

A seguir, a Função Objetivo (FO) custo métrico (Q) é dado como a soma entre o custo métrico da sonda e o custo métrico da broca. Desta forma, temos:

$$Q = \frac{H}{rop} + \frac{I}{Z} \quad (1)$$

sendo, a vida da broca Z em metros e dado por:

$$Z = \frac{1}{C_1 rop + C_2 rpm + D_1 rop^p + D_2 rpm^p} \quad (2)$$

onde,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_1$  e  $D_2 \in \mathfrak{R}$  e são coeficientes que dependem do rop, rpm, do tipo da rocha, da broca etc. O valor de  $p$  é dado por:  $1 < p < 2$  e é discreto. Sua forma está adequada ao teorema 2 de WU *et al* (2006) que será a base deste modelo de vida da broca.

O rop dado por (WIJK, 1991) é:

$$rop = D \cdot rpm \cdot wob^{3/2} \quad (3)$$

onde  $D$  é uma constante na equação 3 e que depende do diâmetro da broca, resistência da rocha, geometria da broca etc. Nesta restrição a constante  $D$  é definida como:

$$D = \frac{\bar{V}^4 \sqrt{Sc}}{U \sigma^{3/2}} \text{ e } Sc = \frac{Nc}{A_{broca}}, \text{ onde } Sc \text{ é a densidade de cortadores e vai depender da broca}$$

a ser utilizada se Tricônica ou PDC.  $Nc$  é o número de cortadores ou bits da broca e  $A_{broca}$  é a área da broca e  $\sigma$  é o UCS da rocha.

O torque sobre a broca (N.m) ou (lb.ft) dado por (DETOURNAY *et al*, 2008) é:

$$torque = E \cdot wob + F \cdot \frac{rop}{rpm} \quad (4)$$

Onde  $E$  e  $F$  são constantes na equação 4. Esta equação define a interação rocha/broca caracterizada pela coexistência simultânea entre o contato gerado pelo processo de atrito e o processo de corte da rocha por meio do torque e wob. O parâmetro  $E$  é definido em função do raio da broca, do coeficiente de atrito (adimensional) entre o contato do plano

de desgaste do cortador e a rocha e uma constante da broca. Esta constante incorpora as influências do projeto da broca. A magnitude deste parâmetro reflete a distribuição das forças transmitidas pelo “plano de desgaste” do cortador da broca em relação ao processo de corte. O parâmetro  $F$  é definido em função da razão entre a força vertical e horizontal agindo sobre a face de corte, da energia específica intrínseca (ou a quantidade de energia gasta para cortar uma unidade de volume de rocha). Esta energia quantifica um processo complexo de destruição da rocha e geralmente depende de vários fatores, tais como: tipo de rocha, do material do cortador, pressão sobre a superfície da rocha, pressão de poro e outros.

Nesta equação  $E$  é definida como:

$$E = \frac{\mu\gamma}{2}, \text{ onde } \mu \text{ é coeficiente de atrito entre a broca e a rocha e } \gamma \text{ é uma}$$

constante da broca.

Nesta equação  $F$  é definida como:

$$F = \beta \xi \text{ e } \beta = \mu\gamma\xi, \text{ onde } \varepsilon \text{ é a energia específica intrínseca da rocha, } \xi \text{ é uma constante de atrito em relação a interface entre a rocha e o cortador.}$$

Substituindo a equação 3 em 4 e fazendo algumas transformações temos:

$$\frac{\text{torque} - E \cdot \text{wob}}{F \cdot D \cdot \text{wob}^{3/2}} = 1 \quad (5)$$

Como, na equação 5 não aparece as variáveis  $\text{rop}$  e  $\text{rpm}$ , pode-se desacoplar a equação 5 do modelo. O torque e o wob são calculados pelas equações 3 e 4 posteriormente, depois de obtidos o  $\text{rop}$  e  $\text{rpm}$ .

Substituindo a equação 2 na equação 1, temos:

$$Q = \frac{H}{\text{rop}} + I \cdot (C_1 \text{rop} + C_2 \text{rpm} + D_1 \text{rop}^p + D_2 \text{rpm}^p) \quad (6)$$

Na prática, o  $\text{rop}$  e  $\text{rpm}$  devem ser selecionados tal que minimize  $Q$  em (6) sem violar qualquer restrição. Estas restrições, que podem limitar o domínio viável do  $\text{rop}$  e  $\text{rpm}$ , podem ser matematicamente descritos como:

$$\text{rop máximo e mínimo: } rop_{\min} \leq rop \leq rop_{\max} \quad (7)$$

$$\text{rpm máximo e mínimo: } rpm_{\min} \leq rpm \leq rpm_{\max} \quad (8)$$

Da discussão acima, o problema de perfuração econômica em rochas não linear determinístico pode ser formulado matematicamente como:

$$\begin{aligned} \text{Min } Q &= \frac{H}{rop} + I \cdot (C_1 rop + C_2 rpm + D_1 rop^p + D_2 rpm^p) \\ \text{s.a.} \\ rop_{\min} &\leq rop \leq rop_{\max} \\ rpm_{\min} &\leq rpm \leq rpm_{\max} \\ 1 &< p < 2 \\ C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \Re \end{aligned} \quad (9)$$

O modelo (9) é um problema de programação não linear devido ao expoente  $p$  e por causa da variável de decisão  $rop$  se encontrar no denominador da FO.

Na prática de perfuração de poços de petróleo é quase impossível manter as condições operacionais de corte exatamente constante. Mesmo se isto fosse possível, seria verificado que ocorrem flutuações na vida da broca e variações nas forças de corte durante as operações de perfuração, ou seja, estes fatores não podem ser evitados neste tipo de processo. Portanto, é possível que o custo métrico perfurado seja incerto na função objetivo devido aos fatores incontroláveis da perfuração. Também, os limites inferior e superior do rop e rpm, equações 7 e 8 respectivamente, podem não ser conhecidos com certeza (MAQSOOD *et al*, 2005). Estas constantes apresentam incertezas inerentes ao processo em si, dado que, o material/ferramenta e suas características sejam conhecidas. A incerteza no caso do  $rop_{\min}$  e  $rpm_{\min}$ , está no fato de que não podemos afirmar com certeza qual o seu valor em que se iniciará a interação da ferramenta/material no processo e para  $rop_{\max}$  e  $rpm_{\max}$ , não sabemos qual o seu valor com certo grau de certeza que começará a prejudicar no processo de perfuração, a relação ferramenta/material.

Sem perda de generalidade, a vida da broca, o custo métrico perfurado, o rop e rpm podem assumir valores intervalares.

Logo, o modelo (9) pode ser traduzido como:

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Q &= \frac{H}{rop} + I \cdot (C_1 rop + C_2 rpm + D_1 rop^p + D_2 rpm^p) \\
 \text{s.a.} \\
 rop_{\min} &\leq rop \leq rop_{\max} \\
 rop_{\min}^- &\leq rop_{\min} \leq rop_{\min}^+ \\
 rop_{\max}^- &\leq rop_{\max} \leq rop_{\max}^+ \\
 rpm_{\min} &\leq rpm \leq rpm_{\max} \\
 rpm_{\min}^- &\leq rpm_{\min} \leq rpm_{\min}^+ \\
 rpm_{\max}^- &\leq rpm_{\max} \leq rpm_{\max}^+ \\
 1 &< p < 2 \\
 C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \Re
 \end{aligned} \tag{10}$$

Portanto, se existem dados de entrada incertos, temos que ter dados de saída também, incertos. A partir desta confirmação neste trabalho de tese, fica caracterizada a necessidade do uso do modelo matemático por intervalos (ou programação intervalar), como forma de resolver problemas que apresentem incertezas.

Segue abaixo o modelo matemático intervalar.

### 3.3 – Modelo Matemático Não Linear Intervalar

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Q^\pm &= \frac{H}{rop^\pm} + I \cdot (C_1 rop^\pm + C_2 rpm^\pm + D_1 (rop^\pm)^p + D_2 (rpm^\pm)^p) \\
 \text{s.a.} \\
 rop^\pm - rop_{\min} &\geq 0 \\
 -rop^\pm + rop_{\max} &\geq 0 \\
 rpm^\pm - rpm_{\min} &\geq 0 \\
 -rpm^\pm + rpm_{\max} &\geq 0 \\
 rop_{\min}^- &\leq rop_{\min} \leq rop_{\min}^+ \\
 rop_{\max}^- &\leq rop_{\max} \leq rop_{\max}^+ \\
 rpm_{\min}^- &\leq rpm_{\min} \leq rpm_{\min}^+ \\
 rpm_{\max}^- &\leq rpm_{\max} \leq rpm_{\max}^+ \\
 1 &< p < 2 \\
 C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \Re
 \end{aligned} \tag{11}$$

No modelo (11),  $MinQ^\pm$  indica que a Função Objetivo (FO) possui dois valores distintos, neste caso, um valor superior definido por (+) e outro valor inferior por (-), Conseqüentemente,  $Z^\pm$  são os valores da vida da broca, onde  $Z^+$  é a vida superior e  $Z^-$  é a vida inferior. Portanto,  $rop^\pm$  e  $rpm^\pm$  são variáveis de decisão, sendo que  $rop^+$  e  $rpm^+$  são as variáveis de decisão de valores superiores que definirão o  $Z^+$  e a FO  $MinQ^+$ ; portanto,  $rop^-$  e  $rpm^-$  são as variáveis de decisão de valores inferiores que definirão o  $Z^-$  e a FO  $MinQ^-$ ,

Quando no programa acima, os dados que definem os intervalos das constantes  $rop_{\max} = [rop_{\max}^-, rop_{\max}^+]$ ,  $rpm_{\max} = [rpm_{\max}^-, rpm_{\max}^+]$ ,  $rop_{\min} = [rop_{\min}^-, rop_{\min}^+]$  e  $rpm_{\min} = [rpm_{\min}^-, rpm_{\min}^+]$  forem inseridos; o mesmo fornecerá a solução otimizada por intervalo para as variáveis de decisão  $rop_{opt}^\pm$ ,  $rpm_{opt}^\pm$  e o valor da FO,  $F_{opt}^\pm$ , conforme abaixo (Huang *et al*, 1994 *apud* WU *et al*, 2006):

$$rop^\pm \in rop^\pm, \text{ onde } rop^\pm \in \mathfrak{R}^\pm \quad (12)$$

$$rpm^\pm \in rpm^\pm, \text{ onde } rpm^\pm \in \mathfrak{R}^\pm \quad (13)$$

$$rop_{opt}^\pm = [rop_{opt}^-, rop_{opt}^+], rop_{opt}^+ \geq rop_{opt}^- \quad (14)$$

$$rpm_{opt}^\pm = [rpm_{opt}^-, rpm_{opt}^+], rpm_{opt}^+ \geq rpm_{opt}^- \quad (15)$$

$$F_{opt}^\pm = [F_{opt}^-, F_{opt}^+], F_{opt}^+ \geq F_{opt}^- \quad (16)$$

Segundo os teoremas 1 e 2 de (WU *et al*, 2006), podemos ter:

$$F_{opt}^+ = Q^+ = Q(rop_{opt}^+, rpm_{opt}^+, rop_{\min}^+, rop_{\max}^+, rpm_{\min}^+, rpm_{\max}^+, C_1, C_2, D_1, D_2, p) \quad (17)$$

$$F_{opt}^- = Q^- = Q(rop_{opt}^-, rpm_{opt}^-, rop_{\min}^-, rop_{\max}^-, rpm_{\min}^-, rpm_{\max}^-, C_1, C_2, D_1, D_2, p) \quad (18)$$

Para maiores detalhes sobre o desenvolvimento matemático acima ver (WU *et al*, 2006).

Assim, para se implementar (17) e (18), divide-se o modelo matemático (11) em dois sub-modelos correspondendo, respectivamente, aos limites superior e inferior da função objetivo e também, retira-se o primeiro termo da FO e transforma-o em uma restrição (WU *et al*, 2006). Neste caso, temos:

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Q^+ &= I \cdot (C_1 rop^+ + C_2 rpm^+ + D_1 (rop^+)^p + D_2 (rpm^+)^p) \\
 \text{s.a.} & \\
 H &\leq N^+ \cdot rop^+ \\
 rop^+ - rop_{\min}^+ &\geq 0 \\
 -rop^+ + rop_{\max}^+ &\geq 0 \\
 rpm^+ - rpm_{\min}^+ &\geq 0 \\
 -rpm^+ + rpm_{\max}^+ &\geq 0 \\
 1 < p < 2 \\
 C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \mathfrak{R}
 \end{aligned} \tag{19}$$

e

$$\begin{aligned}
 \text{Min}Q^- &= I \cdot (C_1 rop^- + C_2 rpm^- + D_1 (rop^-)^p + D_2 (rpm^-)^p) \\
 \text{s.a.} & \\
 H &\leq N^- \cdot rop^- \\
 rop^- - rop_{\min}^- &\geq 0 \\
 -rop^- + rop_{\max}^- &\geq 0 \\
 rpm^- - rpm_{\min}^- &\geq 0 \\
 -rpm^- + rpm_{\max}^- &\geq 0 \\
 1 < p < 2 \\
 C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \mathfrak{R}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Portanto, baseado em (17) e (18), a solução de (19) corresponde ao limite superior de  $F$ , ou seja,  $F_{opt}^+$  e a solução de (20) corresponde ao limite inferior de  $F$ , ou seja,  $F_{opt}^-$ ,

Ao se analisar os modelos (19) e (20) verifica-se que é necessário determinarmos os valores extremos de  $rop_{\max} = [rop_{\max}^-, rop_{\max}^+]$ ,  $rpm_{\max} = [rpm_{\max}^-, rpm_{\max}^+]$ ,  $rop_{\min} = [rop_{\min}^-, rop_{\min}^+]$  e  $rpm_{\min} = [rpm_{\min}^-, rpm_{\min}^+]$ .

Assim, é preciso ir além de (WU *et al*, 2006), ou seja, garantirmos que:

$$rop_{\max} \geq rop^+ \geq rop^- \geq rop_{\min} \quad (21)$$

$$rpm_{\max} \geq rpm^+ \geq rpm^- \geq rpm_{\min} \quad (22)$$

Sendo conservador, serão definidos os seguintes intervalos:  $rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-, rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$ .

Para isto, é necessário desenvolver um procedimento matemático e existir um banco de dados (BD) com  $rop_i$ ,  $rpm_i$  e  $C_i$ , sendo que  $rop_i$ ,  $rpm_i$  são os parâmetros do modelo e  $C_i$  é a vida das brocas no BD, onde  $i = 1, \dots, I$  indica o número de dados de um banco de dados para  $rop$ ,  $rpm$  e  $C$ .

A seguir as etapas do procedimento matemático para se determinar  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$ .

Etapla 1 – Deseja-se determinar as variáveis aleatórias  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  que são limitadas por  $a_1 \leq rop_{\max}^+ \leq b_1$  e  $a_2 \leq rpm_{\max}^+ \leq b_2$ . Para tanto, devemos supor que  $rop_i$  e  $rpm_i$  do BD representem  $rop_{\max,i}^+$  e  $rpm_{\max,i}^+$  uma vez que são as informações disponíveis. Para isto devemos encontrar um grupo de limites superiores  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  para os valores esperados de um grupo de funções  $f(\mathfrak{C}_{rop_{\max}^+}, rpm_{\max}^+)$  tal que,

$$E[f(\mathfrak{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] \leq rop_{\max}^+ \quad (23)$$

$$E[f(\mathfrak{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] \leq rpm_{\max}^+ \quad (24)$$

$$E[g(\mathfrak{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] = C \quad (25)$$

onde,  $g(\mathfrak{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)$  é a função de vida das brocas (Z) e

$f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+) = C_1 rop_{\max}^+ + C_2 rpm_{\max}^+ + D_1 (rop_{\max}^+)^p + D_2 (rpm_{\max}^+)^p$   
é a equação (26).

Como  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  são variáveis aleatórias e  $B = f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+) = C_1 rop_{\max}^+ + C_2 rpm_{\max}^+ + D_1 (rop_{\max}^+)^p + D_2 (rpm_{\max}^+)^p$ . Então  $C_1 rop_{\max}^+ + C_2 rpm_{\max}^+ + D_1 (rop_{\max}^+)^p + D_2 (rpm_{\max}^+)^p$  também são variáveis aleatórias. Logo,  $f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)$  é uma variável aleatória (HINES *et al*, 2006).

Etapa 2 – Assume-se a existência de um grupo de variáveis não-aleatórias  $Y_m$  tal que:

$$f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+) = Y_m \cdot g(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+) \quad (27)$$

Onde  $a_1 \leq rop_{\max}^+ \leq b_1$  e  $a_2 \leq rpm_{\max}^+ \leq b_2$  e  $m = 1, \dots, M$ .

Logo, temos:

$$E[f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] \leq Y_m \cdot E[g(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] \quad (28)$$

e usando a equação (25), temos:

$$E[f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)] \leq Y_m \cdot C, \text{ onde } m = 1, \dots, M. \quad (29)$$

Etapa 3 – Agora é possível estabelecer o problema que é apresentado na etapa 1, como:

$$\text{Min } C \cdot Y_m, \quad \text{onde } m = 1, \dots, M \quad (30)$$

s.a.

$$f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+) = Y_m \cdot g(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+),$$

onde  $a_1 \leq rop_{\max}^+ \leq b_1$  e  $a_2 \leq rpm_{\max}^+ \leq b_2$  (31)

Etapa 4 – Assumindo a existência de um grupo de dados  $(rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+; C_i)$  e que a restrição (31) atenda todos  $rop_{\max}^+ \in [a_1, b_1]$  e  $rpm_{\max}^+ \in [a_2, b_2]$ . Também, necessita - se

que atenda alguns grupos finitos de pontos, ou seja,  
 $a_1 = rop_{\max,1}^+ < rop_{\max,2}^+ < \dots < rop_{\max,I}^+ = b_1$  e  
 $a_2 = rpm_{\max,1}^+ < rpm_{\max,2}^+ < \dots < rpm_{\max,I}^+ = b_2$ .

Etapa 5 – Assim, o problema de otimização dado pelas funções objetivos (30) e restrições (31) podem ser escritas como:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I C_i \cdot Y_{m,i}, \quad (32)$$

s.a.

$$f(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+) \leq Y_{m,i} \cdot g(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+),$$

$$m = 1, \dots, M \text{ e } i = 1, \dots, I \quad (33)$$

Vamos chamar este modelo matemático de PLMO1 (Programação Linear Multiobjetivo) e o mesmo definirá o limite superior de  $rop_{\max}$  e  $rpm_{\max}$ , ou seja,  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$ , respectivamente, dado pela FO (32).

Da mesma forma temos que encontrar  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$ .

Etapa 1 – Deseja-se determinar as variáveis aleatórias  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$  que são limitadas por  $a_3 \leq rop_{\min}^- \leq b_3$  e  $a_4 \leq rpm_{\min}^- \leq b_4$ . Para tanto, devemos supor que  $rop_i$  e  $rpm_i$  do BD representem  $rop_{\min,i}^-$  e  $rpm_{\min,i}^-$  uma vez que são as informações disponíveis. Para isto devemos encontrar um grupo de limites inferiores  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$  para os valores esperados de um grupo de funções  $f(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)$  tal que,

$$E[f(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)] \geq rop_{\min}^- \quad (34)$$

$$E[f(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)] \geq rpm_{\min}^- \quad (35)$$

$$E[g(\mathbf{C}_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)] = C \quad (36)$$

onde,  $g \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right)$  é a função de vida das brocas (Z) e

$f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) = C_1 rop_{\min}^- + C_2 rpm_{\min}^- + D_1 (rop_{\min}^-)^p + D_2 (rpm_{\min}^-)^p$   
 é a equação (37).

Como  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$  são variáveis aleatórias e

$$B = f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) = C_1 rop_{\min}^- + C_2 rpm_{\min}^- + D_1 (rop_{\min}^-)^p + D_2 (rpm_{\min}^-)^p$$

. Então  $C_1 rop_{\min}^- + C_2 rpm_{\min}^- + D_1 (rop_{\min}^-)^p + D_2 (rpm_{\min}^-)^p$  também são variáveis aleatórias, Logo,  $f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right)$  é uma variável aleatória (HINES *et al*, 2006).

Etapa 2 – Assume-se a existência de um grupo de variáveis não-randômicas  $Y_m$  tal que:

$$f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \geq Y_m \cdot g \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \quad (38)$$

Onde  $a_3 \leq rop_{\min}^- \leq b_3$  e  $a_4 \leq rpm_{\min}^- \leq b_4$  e  $m = 1, \dots, M$ .

Logo, temos:

$$E \left[ f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \right] \geq Y_m \cdot E \left[ g \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \right] \quad (39)$$

e usando a equação (36), temos:

$$E \left[ f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \right] \geq Y_m \cdot C, \text{ onde } m = 1, \dots, M \quad (40)$$

Etapa 3 – Agora é possível estabelecer o problema que é apresentado na etapa 1, como:

$$\text{Min } C \cdot Y_m, \quad \text{onde } m = 1, \dots, M \quad (41)$$

s.a.

$$f \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right) \geq Y_m \cdot g \left( C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^- \right), \text{ onde}$$

$$a_3 \leq rop_{\min}^- \leq b_3 \text{ e } a_4 \leq rpm_{\min}^- \leq b_4 \quad (42)$$

Etapa 4 – Assumindo a existência de um grupo de dados  $\{rop_{\min,i}^-, rpm_{\min,i}^-; C_i\}$  e que a restrição (42) atenda todos  $rop_{\min}^- \in [b_3, b_3^-]$  e  $rpm_{\min}^- \in [b_4, b_4^-]$ . Também, necessita - se que atenda alguns grupos finitos de pontos, ou seja,

$$a_3 = rop_{\min,1}^- < rop_{\min,2}^- < \dots < rop_{\min,I}^- = b_3 \quad e$$

$$a_4 = rpm_{\min,1}^- < rpm_{\min,2}^- < \dots < rpm_{\min,I}^- = b_4.$$

Etapa 5 – Assim, o problema de otimização dado pelas funções objetivos (41) e restrições (42) podem ser escritas como:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I C_i \cdot Y_{m,i}, \quad (43)$$

s.a.

$$f(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min,i}^-, rpm_{\min,i}^-) \geq Y_{m,i} \cdot g(C_1, C_2, D_1, D_2, p; rop_{\min,i}^-, rpm_{\min,i}^-),$$

$$m = 1, \dots, M \text{ e } i = 1, \dots, I \quad (44)$$

Vamos chamar este modelo matemático de PLMO2 (Programação Linear Multi-Objetivo) e o mesmo definirá os limites inferiores de  $rop_{\min}$  e  $rpm_{\min}$ , ou seja,  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$ , respectivamente, dado pela FO (43).

Etapa 6 – Para se obter os valores de  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  (FO do programa PLMO1) e os valores de  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$  (FO do programa PLMO2), devemos substituir os  $rop_{\max,i}$  e  $rpm_{\max,i}$  nas equações (32) e (33) e devemos substituir os  $rop_{\min,i}$  e  $rpm_{\min,i}$  nas equações (43) e (44). Porém, antes os coeficientes  $C_1, C_2, D_1, D_2$  e o expoente  $p$  devem ser obtidos por regressão utilizando o banco de dados.

Dando continuidade ao procedimento devemos passar para etapa 7, que trata da classificação dos dados do BD para os modelos matemáticos de otimização PLMO1 e PLMO2.

Etapa 7 – Para se fazer a classificação dos dados no BD, todos os  $rop_{\min,i}^-$ ,  $rpm_{\min,i}^-$ ,  $rop_{\max,i}^+$  e  $rpm_{\max,i}^+$  serão colocados em ordem crescente de valores e calculados os seus percentis definidos pelo analista, por exemplo,  $P_{25}$  que neste caso é o 25º percentil e o  $P_{75}$  é o 75º percentil.

Observação:

- 1) Um percentil é uma medida da posição relativa de uma unidade observacional em relação a todas as outras, O  $p$ -ésimo percentil tem no mínimo  $p\%$  dos valores abaixo daquele ponto e no mínimo  $(100 - p)\%$  dos valores acima.
- 2) Os percentis são válidos apenas para dados ordinais, intervalares e proporcionais.

Os percentis são calculados seguindo o algoritmo abaixo.

Fase 1: Arranje os dados em ordem ascendente

Fase 2: Classifique um índice  $k$

$$L = \left( \frac{k}{100} \right) \cdot n \quad (45)$$

Fase 3: a) Se não for um inteiro, arredonde para cima, O próximo inteiro maior que  $l$  indica a posição do  $p$ -ésimo percentil.

b) Se  $l$  é um inteiro, o  $p$ -ésimo percentil é a média dos valores de dados nas posições  $l$  e  $l + 1$  (ANDERSON, SWEENEY, WILLIAMS, 2003).

Logo, para calcularmos o  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  podemos adotar o  $P_{75}$  e com isto encontrar o dado observacional que define o  $P_{75}$ . A partir deste valor separamos todos os valores acima do mesmo e inserimos no PLMO1.

Para o  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$  podemos calcular o  $P_{25}$  e com isto encontrar o dado observacional que define o  $P_{25}$ . A partir deste valor separamos todos os valores abaixo do mesmo e inserimos no PLMO2.

Em relação aos valores do  $rop_{\min}^+$ ,  $rpm_{\min}^+$ ,  $rop_{\max}^-$  e  $rpm_{\max}^-$  os mesmos serão definidos por um método a ser desenvolvido mais adiante. Para tanto, deve-se satisfazer as seguintes inequações:

$$rop_{\max}^+ > rop_{\min}^+ \geq rop_{\max}^- > rop_{\min}^- \quad (46)$$

$$rpm_{\max}^+ > rpm_{\min}^+ \geq rpm_{\max}^- > rpm_{\min}^- \quad (47)$$

Sendo assim, as próximas equações satisfazem as inequações (46) e (47):

$$rop_{\min}^+ = rop_{\max}^- \quad (48)$$

$$rpm_{\min}^+ = rpm_{\max}^- \quad (49)$$

Assim, as inequações (46) e (47) e as equações (48) e (49) podem ser empregadas para definir os parâmetros  $R_{rop,n}$  que satisfaz (46) e (48) e  $R_{rpm,n}$  que satisfaz (47) e (49). Estes parâmetros podem ter infinitos valores. Podemos, também, escolher um número discreto de valores para os parâmetros  $R_{rop,n}$  e  $R_{rpm,n}$  e para cada destes valores podemos definir um intervalo para a incerteza e obter as soluções dos modelos (19) e (20), sem nenhuma iteração. Os valores de  $R_{rop,n}$  e  $R_{rpm,n}$  podem ser obtidos por meio das fórmulas abaixo:

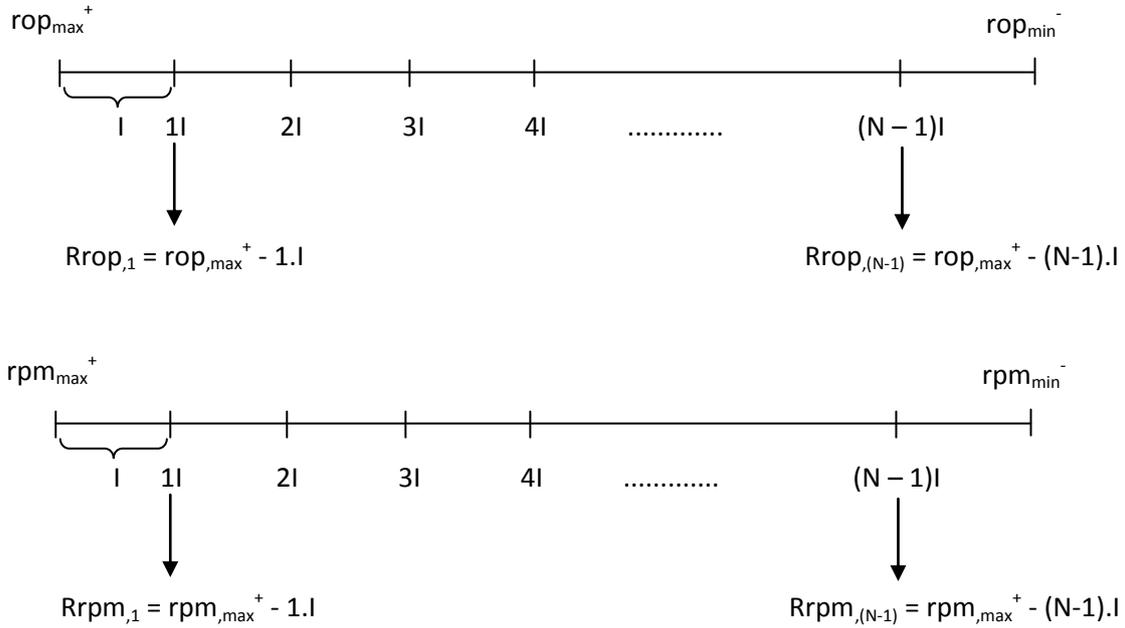
$$\frac{rop_{\max}^+ - rop_{\min}^-}{N} = I \quad (50)$$

$$R_{rop,n} = rop_{\max}^+ - n \cdot I, \quad n = 1, \dots, N \quad (51)$$

$$\frac{rpm_{\max}^+ - rpm_{\min}^-}{N} = I \quad (52)$$

$$R_{rpm,n} = rpm_{\max}^+ - n \cdot I, \quad n = 1, \dots, N \quad (53)$$

$N$  é o número de valores discretos e  $I$  é o valor do intervalo de cada número discreto,



Com o valor de  $R_{rop,n}$  podemos definir os limites  $rop_{min}^+ = rop_{max}^- = R_{rop,n}$  e com o valor de  $R_{rpm,n}$  podemos definir os limites  $rpm_{min}^+ = rpm_{max}^- = R_{rpm,n}$  e com isto obter os valores da FO  $Q^+$ ,  $rop^+$ ,  $rpm^+$ ; da FO  $Q^-$ ,  $rop^-$  e  $rpm^-$  do problema em questão.

Assim, para finalizar, os modelos intervalares que definem os limites superiores e inferiores da função objetivo custo métrico e das variáveis de decisão rop e rpm são:

$$\begin{aligned}
 MinQ^+ &= I \cdot (C_1 rop^+ + C_2 rpm^+ + D_1 (rop^+)^p + D_2 (rpm^+)^p) \\
 s.a. & \\
 H &\leq N^+ \cdot rop^+ \\
 rop^+ - R_{rop,n} &\geq 0 \\
 -rop^+ + rop_{max}^+ &\geq 0 \\
 rpm^+ - R_{rpm,n} &\geq 0 \\
 -rpm^+ + rpm_{max}^+ &\geq 0 \\
 1 &< p < 2 \\
 C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \mathfrak{R}
 \end{aligned} \tag{54}$$

e

$$\begin{aligned} \text{Min} Q^- &= I \cdot \left( C_1 \text{rop}^- + C_2 \text{rpm}^- + D_1 \left( \text{rop}^- \right)^p + D_2 \left( \text{rpm}^- \right)^p \right) \\ \text{s.a.} \\ H &\leq N^- \cdot \text{rop}^- \\ \text{rop}^- - \text{rop}_{\min}^- &\geq 0 \\ -\text{rop}^- + R_{\text{rop},n} &\geq 0 \\ \text{rpm}^- - \text{rpm}_{\min}^- &\geq 0 \\ -\text{rpm}^- + R_{\text{rpm},n} &\geq 0 \\ 1 < p < 2 \\ C_1, C_2, D_1, D_2 &\in \mathfrak{R} \end{aligned} \tag{55}$$

Para verificar a seqüência dos procedimentos apresentados neste capítulo ver apêndice B.

## Capítulo 4 - Exemplos Ilustrativos

Neste capítulo, o objetivo em questão é melhorar a qualidade do planejamento da perfuração de um poço de petróleo e da furação de metais, uma vez que nestes processos existem diversas incertezas envolvidas. Desta forma, para o tomador de decisão é melhor incluir intervalos de valores, ao invés de valores determinísticos, de alguns parâmetros (condições de planejamento) e variáveis (resultados do planejamento). Nos exemplos a seguir procura-se definir as condições operacionais ótimas determinísticas/intervalares que minimizem o custo métrico perfurado determinístico/intervalar. Também, com estes exemplos pode-se: i) avaliar a generalização do modelo, ou seja, avaliar se o modelo pode ser aplicado tanto em perfuração em rochas quanto em metais; ii) avaliar e comparar os resultados dos modelos determinístico e intervalar nos dois exemplos e com isto ver quão o modelo intervalar é superior ou inferior ao modelo determinístico. Na abordagem determinística serão usados os valores médios dos intervalos dos parâmetros incertos como valores determinísticos para os limites superior e inferior das variáveis de decisão  $rop$  e  $rpm$ , ou seja,  $rop_{\min}$ ,  $rop_{\max}$ ,  $rpm_{\min}$  e  $rpm_{\max}$ .

### 4.1 – Exemplo 1: Perfuração de um Poço de Petróleo

Este exemplo foi baseado no artigo de TANSEV (1975), onde as brocas utilizadas foram tricônicas de dentes de aço fresadas. Também, sabe-se que os dados são de rocha considerada dura. Porém, outros dados não foram informados, tais como, diâmetro da broca, tipo específico de rocha dura e se o poço era *off-shore* ou *on-shore*. O custo da broca dado em Tansev foi de US\$ 418,00 e da sonda foi de US\$ 250,00/hora. A seguir os dados do problema na tabela 3.

Tabela 3 – Dados do Modelo Matemático

ROP (ft/Hrs)	RPM	Z (ft)	Q (US\$/ft)
2,0	100	32,8	137,74
3,0	100	110,1	87,13
3,8	100	98,0	70,05
6,1	100	61,6	47,77
6,4	100	60,8	45,94
7,6	120	82,8	37,94
8,9	100	178,0	30,44
9,0	130	82,8	32,83
10,4	140	156,0	26,72
11,2	120	89,6	26,99
11,3	130	144,6	25,01
11,4	120	205,2	23,97
12,2	120	85,4	25,39

Dando continuidade a metodologia, deve-se encontrar os coeficientes do modelo matemático da vida da broca por meio de regressão linear. A regressão foi feita variando o  $p$  de 1,9 até 1,1 com passo de 0,1. Depois de 1,1 até 1,01 com passo 0,01. Assim, os valores encontrados para os coeficientes foram:

$$C_1 = 0,00000060$$

$$C_2 = 0,01387763$$

$$D_1 = 0,00066649$$

$$D_2 = 0,01310720$$

$$p = 1,01$$

Deve-se agora encontrar  $rop_{\max}^+$ ,  $rop_{\min}^-$ ,  $rpm_{\max}^+$  e  $rpm_{\min}^-$  por meio de Programação Linear Multi-Objetivo. Contudo, antes deve-se colocar cada variável de decisão em rol, conforme tabelas 4 e 5 abaixo, para depois usar a PLMO.

Tabela 4 – ROP em rol

ROP (ft/Hrs)	RPM	Z (ft)	
2,0	100	32,8	P25
3,0	100	110,1	
3,8	100	98,0	
6,1	100	61,6	
6,4	100	60,8	
7,6	120	82,8	
8,9	100	178,0	P75
9,0	130	82,8	
10,4	140	156,0	
11,2	120	89,6	
11,3	130	144,6	
11,4	120	205,2	
12,2	120	85,4	

Tabela 5 – RPM em rol

RPM	ROP (ft/Hrs)	Z (ft)	
100	2,0	32,8	P25
100	3,0	110,1	
100	3,8	98,0	
100	6,1	61,6	
100	6,4	60,8	
100	8,9	178,0	
120	7,6	82,8	P75
120	11,2	89,6	
120	11,4	205,2	
120	12,2	85,4	
130	9,0	82,8	
130	11,3	144,6	
140	10,4	156,0	

Contudo, os valores obtidos pelas PLMO1 e PLMO2 não condizem com os valores definidos no artigo e encontrados na prática. No PLMO1 foi encontrado os seguintes valores:  $rop_{\max}^+ = 0,0314855$  e  $rpm_{\max}^+ = 7,216368$  e em PLMO2  $rop_{\min}^- = 0,000009$  e  $rpm_{\min}^- = 5,489969$ . Logo, para resolver este problema e analisar a sensibilidade dos modelos intervalar e determinístico foi adotado o seguinte critério. Para  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$ , pegar o maior valor do BD para cada variável e encontrar as

incertezas de 20%, 10% e 1%. No caso, por exemplo, da incerteza de 20%, obter o maior valor e multiplicar por 1,20. Logo, temos:

$$rop_{\max}^+ = 12,2 \times 1,20 = 14,640$$

$$rpm_{\max}^+ = 140 \times 1,20 = 168$$

Assim, para  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$ , pegar o menor valor do BD para cada variável e encontrar as incertezas de 20%, 10% e 1%. Neste caso, para a incerteza de 20%, obter o menor valor e dividir por 1,20. Portanto, temos:

$$rop_{\min}^- = 2,0 \div 1,20 = 1,667$$

$$rpm_{\min}^- = 100 \div 1,20 = 83$$

Desta forma, os valores das incertezas para cada variável rop e rpm estão demonstrados na tabela 6.

Tabela 6 – Incertezas de 1%, 10% e 20%

Incerteza		1%	10%	20%
ROP				
Mínimo=	2,0	1,980	1,818	1,667
Máximo=	12,2	12,322	13,420	14,640
RPM				
Mínimo=	100	99	91	83
Máximo=	140	141	154	168

Dando seqüência a metodologia, deve-se obter os intervalos discretizados para cada variável e incerteza para o modelo intervalar. Os valores para incerteza de 20% estão na tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Intervalos discretizados para incerteza de 20%

$rop_{max}^+$	14,640			$rpm_{max}^+$	168		
$rop_{min}^-$	1,667			$rpm_{min}^-$	83		
N=	20			N=	20		
l=	0,649			l=	4,233		
n=	1	Rrop,1	13,991	n=	1	Rrpm,1	164
n=	2	Rrop,2	13,343	n=	2	Rrpm,2	160
n=	3	Rrop,3	12,694	n=	3	Rrpm,3	155
n=	4	Rrop,4	12,045	n=	4	Rrpm,4	151
n=	5	Rrop,5	11,397	n=	5	Rrpm,5	147
n=	6	Rrop,6	10,748	n=	6	Rrpm,6	143
n=	7	Rrop,7	10,099	n=	7	Rrpm,7	138
n=	8	Rrop,8	9,451	n=	8	Rrpm,8	134
n=	9	Rrop,9	8,802	n=	9	Rrpm,9	130
n=	10	Rrop,10	8,153	n=	10	Rrpm,10	126
n=	11	Rrop,11	7,505	n=	11	Rrpm,11	121
n=	12	Rrop,12	6,856	n=	12	Rrpm,12	117
n=	13	Rrop,13	6,207	n=	13	Rrpm,13	113
n=	14	Rrop,14	5,559	n=	14	Rrpm,14	109
n=	15	Rrop,15	4,910	n=	15	Rrpm,15	105
n=	16	Rrop,16	4,261	n=	16	Rrpm,16	100
n=	17	Rrop,17	3,613	n=	17	Rrpm,17	96
n=	18	Rrop,18	2,964	n=	18	Rrpm,18	92
n=	19	Rrop,19	2,315	n=	19	Rrpm,19	88

Nas tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 20%.

Tabela 8 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 20%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	13,991	164	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
2	13,343	160	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
3	12,694	155	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
4	12,045	151	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
5	11,397	147	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
6	10,748	143	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
7	10,099	138	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
8	9,451	134	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
9	8,802	130	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
10	8,153	126	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
11	7,505	121	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
12	6,856	117	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
13	6,207	113	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
14	5,559	109	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
15	4,910	105	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
16	4,261	100	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
17	3,613	96	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
18	2,964	92	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60
19	2,315	88	14,640	168	274,2	17,08	1,52	18,60

Tabela 9 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 20%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	13,991	164	13,991	164	231,1	17,87	1,81	19,68
2	13,343	160	13,343	160	200,3	18,74	2,09	20,82
3	12,694	155	12,694	155	177,3	19,69	2,36	22,05
4	12,045	151	12,045	151	159,4	20,75	2,62	23,38
5	11,397	147	11,397	147	145,1	21,94	2,88	24,82
6	10,748	143	10,748	83	133,7	23,26	3,13	26,39
7	10,099	138	10,099	83	126,2	24,75	3,31	28,07
8	9,451	134	9,451	83	119,4	26,45	3,50	29,95
9	8,802	130	8,802	83	113,4	28,40	3,69	32,09
10	8,153	126	8,153	83	107,9	30,66	3,87	34,53
11	7,505	121	7,505	83	103,0	33,31	4,06	37,37
12	6,856	117	6,856	83	98,5	36,46	4,24	40,71
13	6,207	113	6,207	83	94,3	40,27	4,43	44,71
14	5,559	109	5,559	83	90,6	44,97	4,62	49,59
15	4,910	105	4,910	83	87,1	50,92	4,80	55,72
16	4,261	100	4,261	83	83,8	58,67	4,99	63,65
17	3,613	96	3,613	83	80,8	69,20	5,17	74,37
18	2,964	92	2,964	83	78,0	84,35	5,36	89,70
19	2,315	88	2,315	83	75,4	107,98	5,54	113,52

#### 4.1.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%

Analisando os dados da tabela 8 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 14,640$  e  $rpm_{max}^+ = 168$ . Em relação aos dados da tabela 9, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $R_{rop,n}$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,5}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 7. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 3 e 4 respectivamente.

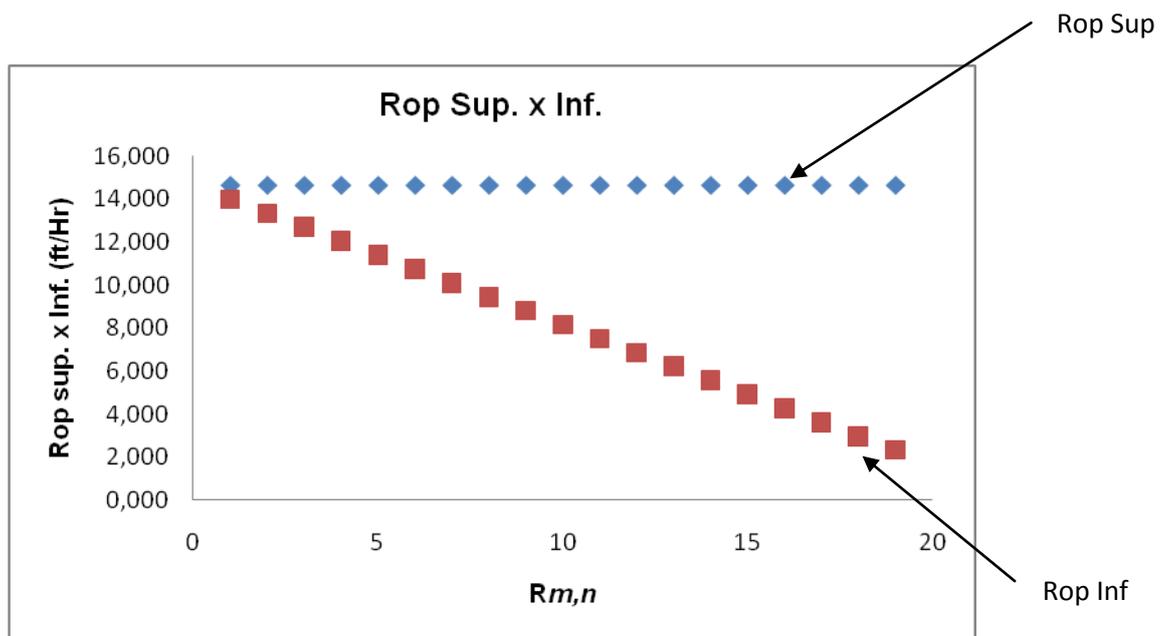


Figura 3 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

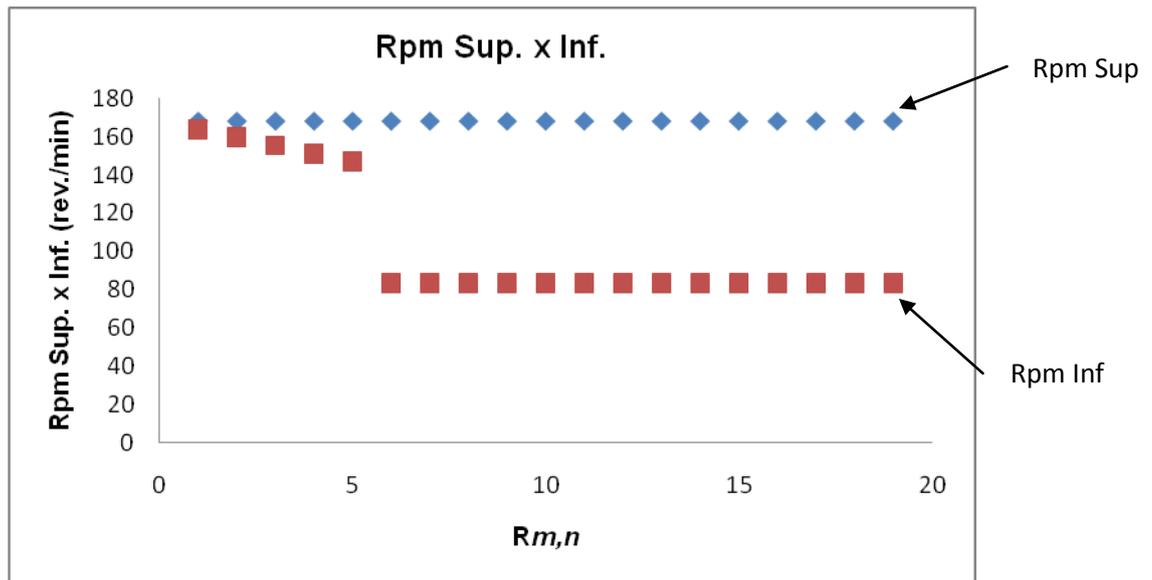


Figura 4 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Também, os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 5, porém, os seus valores não englobam todos os valores da tabela 3. Os resultados anteriormente descritos concordam com os teoremas apresentados em WU *et al* (2006).

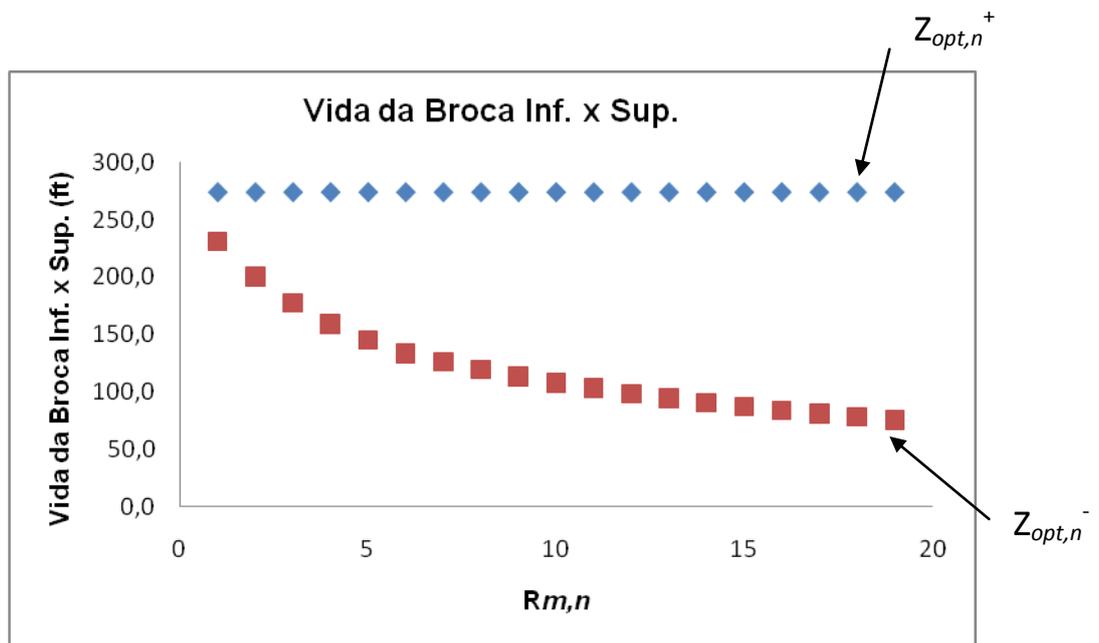


Figura 5 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

Porém, o  $CMI_{sonda,n}$  é maior do que o  $CMS_{sonda,n}$ , uma vez que  $CMI_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^+}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  é maior do que o  $CMS_{broca,n}$ , já que  $CMI_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^+}$ . Contudo, vê-se que  $Q_{opt,n}^+$  (CMS) é menor do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), conforme figura 6, apresentando uma incoerência, baseado no trabalho de WU *et al* (2006).

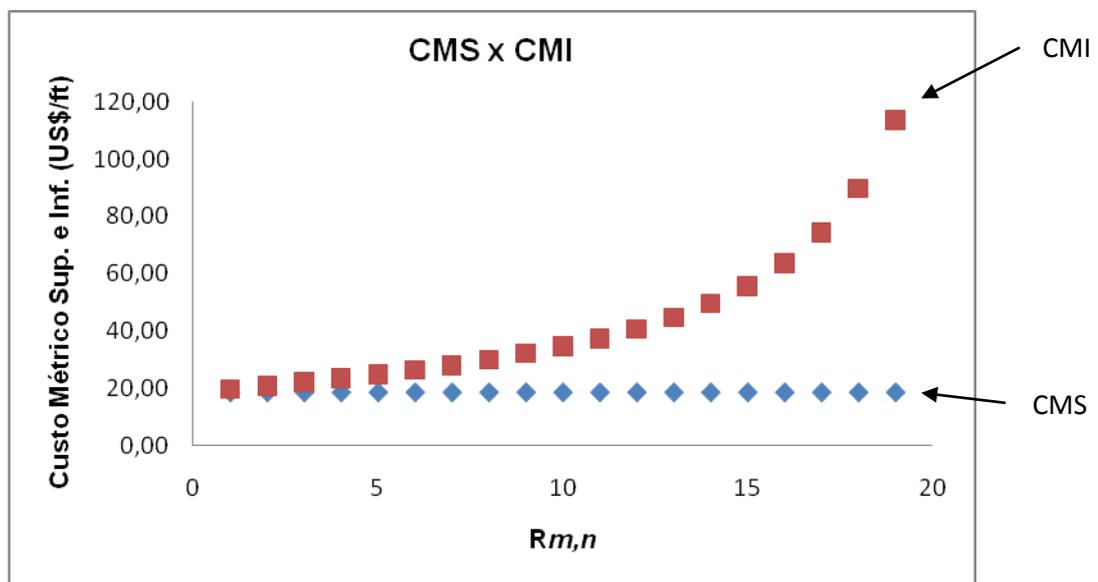


Figura 6 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado da otimização é a menor diferença entre  $|Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-|$ , conforme tabela 10.

Tabela 10 – Diferença entre  $|Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-|$

$ Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^- $
1,08
2,22
3,45
4,78
6,22
7,79
9,47
11,35
13,49
15,93
18,77
22,11
26,10
30,99
37,12
45,05
55,77
71,10
94,91

Baseado neste critério a menor diferença é US\$ 1,08/ft. Assim sendo, temos como resultado final, os seguintes valores dos parâmetros do modelo matemático.

$$rop_{opt}^+ = 14,640 \text{ ft/hr}; rop_{opt}^- = 13,991 \text{ ft/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 168 \text{ rev./min.}; rpm_{opt}^- = 164 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{US\$ } 18,60/\text{ft} \text{ e } Q_{opt}^- = \text{US\$ } 19,68/\text{ft}$$

Em relação aos dados na tabela 3, observa-se que os limites superior e inferior mesmo invertido em termos de valores para o custo métrico  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ , definem uma faixa que incorporam alguns valores da tabela 3. Assim, se pegarmos o menor valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e calcularmos temos,  $\frac{18,60}{23,97} \cong 0,776$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é menor 22,4% em relação ao menor valor da tabela 3. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior

valor, encontra-se  $\frac{113,52}{137,74} \cong 0,824$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor

17,6% em relação ao maior valor original do custo métrico na tabela 3, não incorporando, assim, todos os valores da tabela.

Dando continuidade, na tabela 11 a seguir temos os valores do  $rop_{\max}$ ,  $rop_{\min}$ ,  $rpm_{\max}$  e  $rpm_{\min}$  para serem usados como limites das restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado usando dados como  $rop_{\max}^+$ ,  $rpm_{\max}^+$ ,  $rop_{\min}^-$ ,  $rpm_{\min}^-$ ,  $R_{rop,n}$  e  $R_{rpm,n}$  da tabela 7 referente a incerteza de 20%. A seguir como é feito o cálculo para os valores do  $rop_{\max,n}$ ,  $rop_{\min,n}$ ,  $rpm_{\max,n}$  e  $rpm_{\min,n}$ .

$$rop_{\max,n} = \frac{rop_{\max}^+ + R_{rop,n}}{2}$$

$$rop_{\min,n} = \frac{rop_{\min}^- + R_{rop,n}}{2}$$

$$rpm_{\max,n} = \frac{rpm_{\max}^+ + R_{rpm,n}}{2}$$

$$rpm_{\min,n} = \frac{rpm_{\min}^- + R_{rpm,n}}{2}$$

Como exemplo demonstrativo para tabela 11, baseado na incerteza de 20%, temos:

$$rop_{\max,1} = \frac{14,640 + 13,991}{2} = 14,316$$

$$rop_{\min,1} = \frac{1,667 + 13,991}{2} = 7,829$$

$$rpm_{\max,1} = \frac{168 + 164}{2} = 166$$

$$rpm_{\min,1} = \frac{83 + 164}{2} = 124$$

A partir deste ponto devem ser feitos os procedimentos apresentado acima, conforme descrito no exemplo da incerteza de 20%. Estes procedimentos referentes ao modelo determinístico, são idênticos para todas as incertezas (1%, 10% e 20%) e também, para os dois exemplos ilustrativos apresentados nesta tese.

Tabela 11 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 20%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	14,316	7,829	166	124
2	13,991	7,505	164	121
3	13,667	7,180	162	119
4	13,343	6,856	160	117
5	13,018	6,532	157	115
6	12,694	6,207	155	113
7	12,370	5,883	153	111
8	12,045	5,559	151	109
9	11,721	5,234	149	107
10	11,397	4,910	147	105
11	11,072	4,586	145	102
12	10,748	4,261	143	100
13	10,424	3,937	140	98
14	10,099	3,613	138	96
15	9,775	3,288	136	94
16	9,451	2,964	134	92
17	9,126	2,640	132	90
18	8,802	2,315	130	88
19	8,478	1,991	128	85

A seguir, na tabela 12, os resultados do modelo determinístico usando dados da tabela 11 como restrição.

Tabela 12 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
14,316	7,829	166	124	14,316	166	250,7	17,46	1,67	19,13
13,991	7,505	164	121	13,991	164	231,1	17,87	1,81	19,68
13,667	7,180	162	119	13,667	162	214,5	18,29	1,95	20,24
13,343	6,856	160	117	13,343	160	200,3	18,74	2,09	20,82
13,018	6,532	157	115	13,018	157	188,0	19,20	2,22	21,43
12,694	6,207	155	113	12,694	155	177,3	19,69	2,36	22,05
12,370	5,883	153	111	12,370	153	167,8	20,21	2,49	22,70
12,045	5,559	151	109	12,045	151	159,4	20,75	2,62	23,38
11,721	5,234	149	107	11,721	149	151,9	21,33	2,75	24,08
11,397	4,910	147	105	11,397	147	145,1	21,94	2,88	24,82
11,072	4,586	145	102	11,072	145	139,0	22,58	3,01	25,59
10,748	4,261	143	100	10,748	143	133,5	23,26	3,13	26,39
10,424	3,937	140	98	10,424	140	128,5	23,98	3,25	27,24
10,099	3,613	138	96	10,099	138	123,9	24,75	3,37	28,13
9,775	3,288	136	94	9,775	136	119,7	25,58	3,49	29,07
9,451	2,964	134	92	9,451	134	115,8	26,45	3,61	30,06
9,126	2,640	132	90	9,126	90	113,4	27,39	3,69	31,08
8,802	2,315	130	88	8,802	88	111,4	28,40	3,75	32,15
8,478	1,991	128	85	8,478	85	109,6	29,49	3,81	33,30

#### 4.1.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\max,n}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ , somente entre os valores do  $rpm_{\max,1} = 166$  até  $rpm_{\max,16} = 134$ , depois os valores do  $Rpm_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rpm_{\min,n}$ , ou seja,  $rpm_{\min,17} = 90$  até  $rpm_{\min,19} = 83$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$  e  $Z_{opt,n}$  vão diminuindo, o custo métrico  $Q_{opt,n}$  vai aumentando, conforme figura 7.

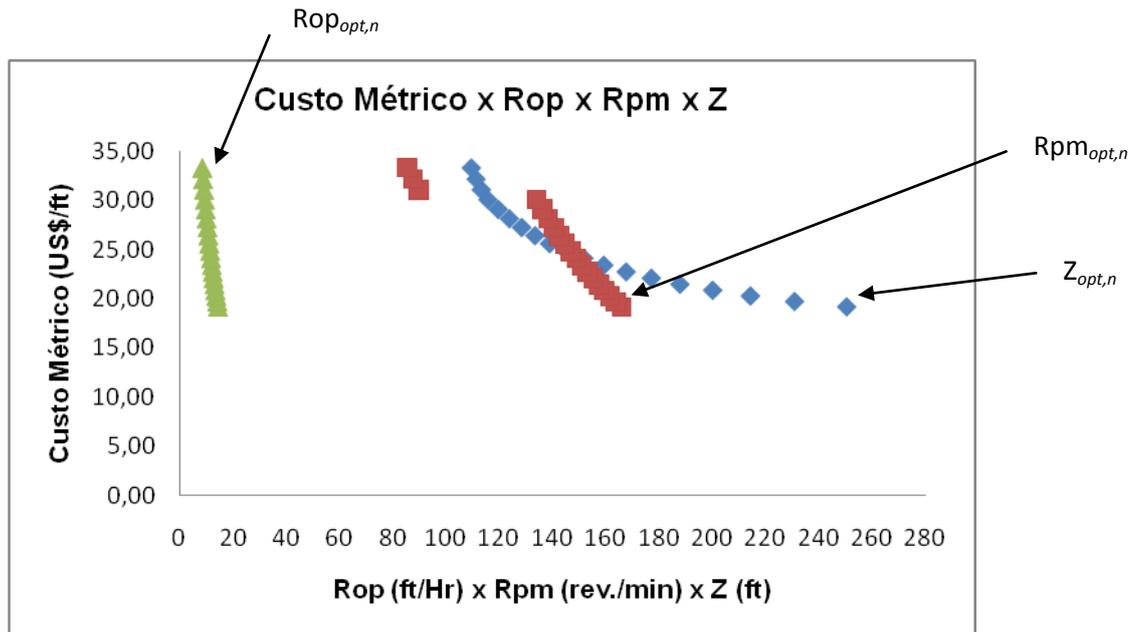


Figura 7 – Relação entre custo métrico x rop x rpm x vida da broca.

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado é o menor custo métrico perfurado, então,  $Q_{opt} = \text{US\$ } 19,13/\text{ft}$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 14,316 \text{ ft/hr}$  e  $Rpm_{opt} = 166 \text{ rev./min}$ .

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$  e  $Z_{opt,n}$ , do modelo determinístico, observa-se que os mesmos são maiores e se aproximam dos resultados obtidos pelo modelo intervalar inferior para valores comparáveis. Ver abaixo os figuras 8, 9 e 10, respectivamente. A única exceção é o  $Q_{opt,n}$  que é maior. Ver figura 11.

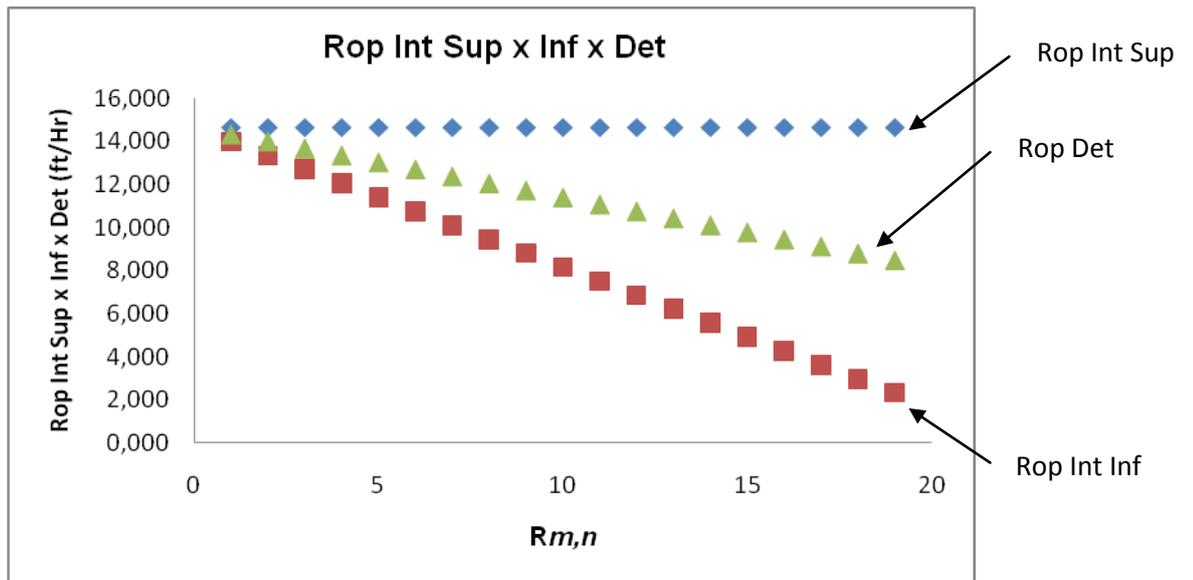


Figura 8 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico.

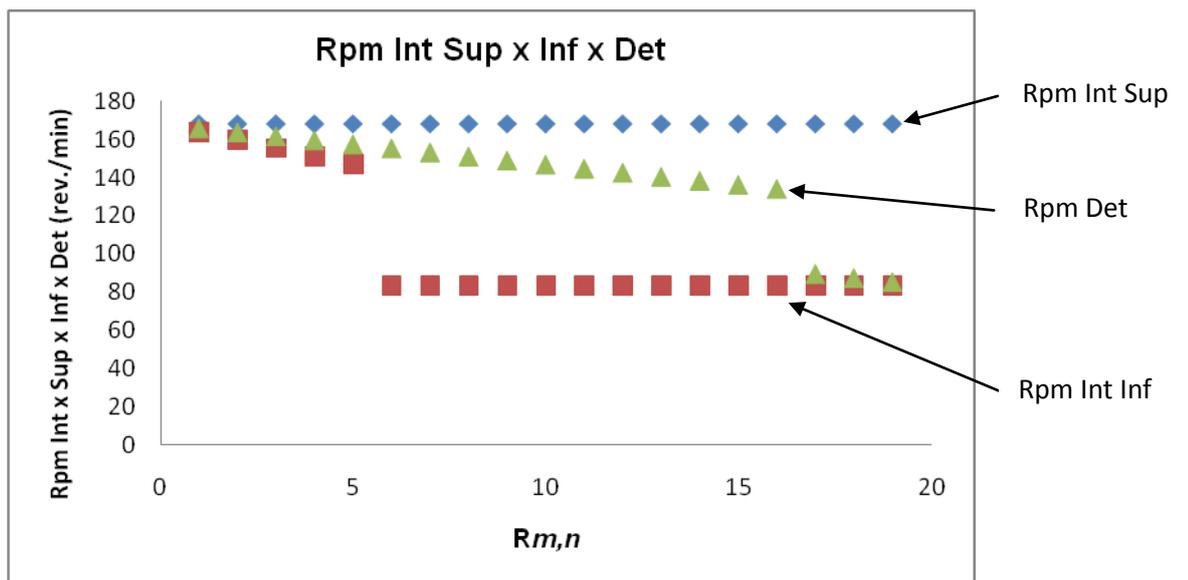


Figura 9 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico.

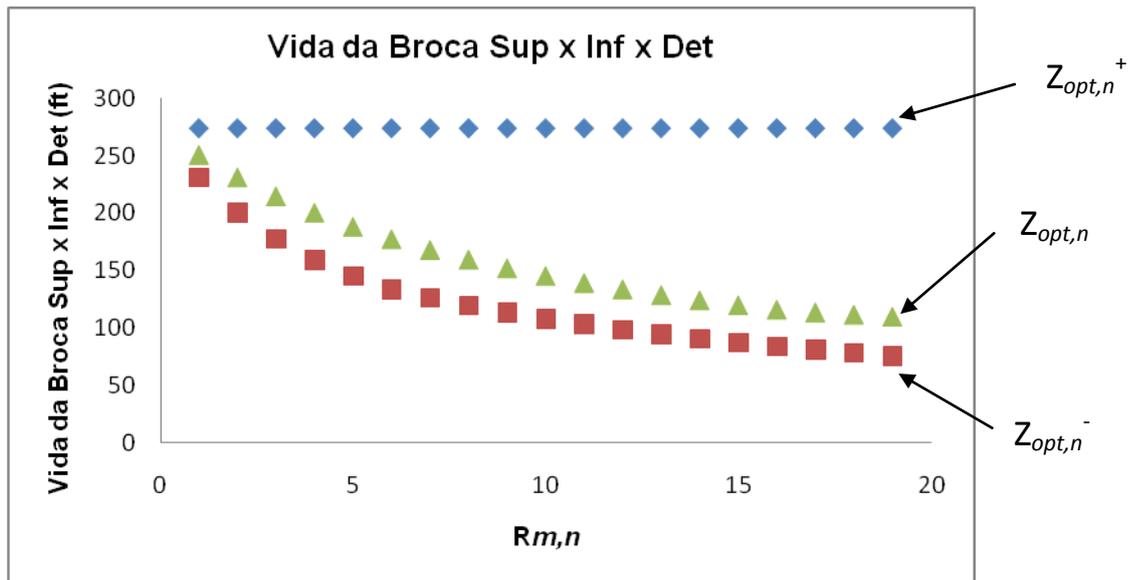


Figura 10 – Relação da vida da broca interv. superior x inferior x determinístico.

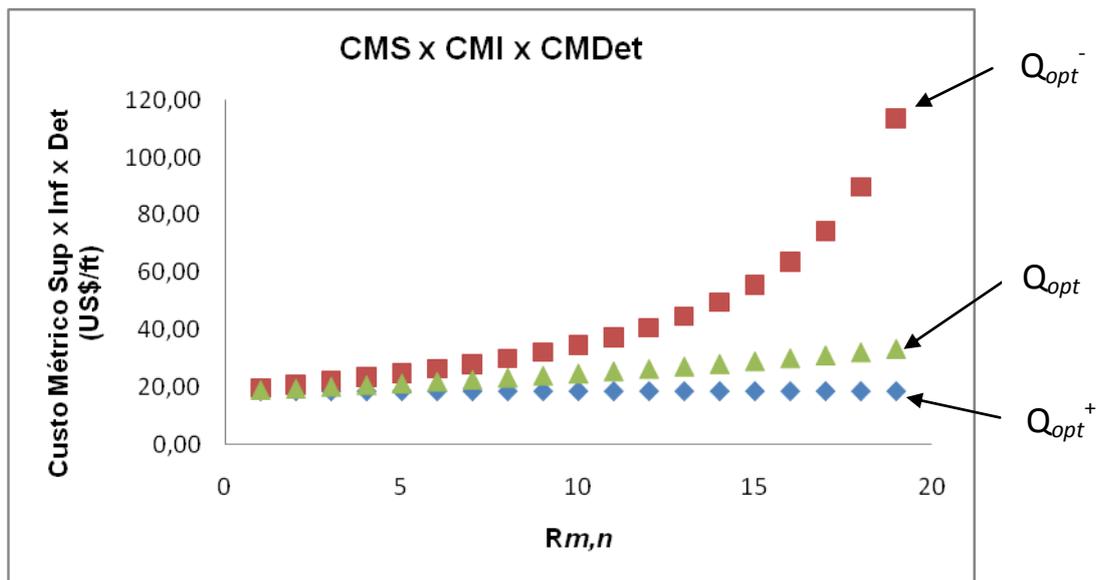


Figura 11 – Relação do custo métrico interv. superior x inferior x determinístico.

Na tabela 13 obtemos os valores dos intervalos discretizados para incerteza de 10%.

Tabela 13 – Intervalos discretizados para incerteza de 10%

$rop_{max}^+$	13,420			$rpm_{max}^+$	154		
$rop_{min}^-$	1,818			$rpm_{min}^-$	91		
N=	20			N=	20		
l=	0,580			l=	3,155		
n=	1	Rrop,1	12,840	n=	1	Rrpm,1	151
n=	2	Rrop,2	12,260	n=	2	Rrpm,2	148
n=	3	Rrop,3	11,680	n=	3	Rrpm,3	145
n=	4	Rrop,4	11,100	n=	4	Rrpm,4	141
n=	5	Rrop,5	10,520	n=	5	Rrpm,5	138
n=	6	Rrop,6	9,939	n=	6	Rrpm,6	135
n=	7	Rrop,7	9,359	n=	7	Rrpm,7	132
n=	8	Rrop,8	8,779	n=	8	Rrpm,8	129
n=	9	Rrop,9	8,199	n=	9	Rrpm,9	126
n=	10	Rrop,10	7,619	n=	10	Rrpm,10	122
n=	11	Rrop,11	7,039	n=	11	Rrpm,11	119
n=	12	Rrop,12	6,459	n=	12	Rrpm,12	116
n=	13	Rrop,13	5,879	n=	13	Rrpm,13	113
n=	14	Rrop,14	5,299	n=	14	Rrpm,14	110
n=	15	Rrop,15	4,719	n=	15	Rrpm,15	107
n=	16	Rrop,16	4,139	n=	16	Rrpm,16	104
n=	17	Rrop,17	3,558	n=	17	Rrpm,17	100
n=	18	Rrop,18	2,978	n=	18	Rrpm,18	97
n=	19	Rrop,19	2,398	n=	19	Rrpm,19	94

Nas tabelas 14 e 15 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 10%.

Tabela 14 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 10%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	12,840	151	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
2	12,260	148	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
3	11,680	145	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
4	11,100	141	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
5	10,520	138	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
6	9,939	135	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
7	9,359	132	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
8	8,779	129	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
9	8,199	126	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
10	7,619	122	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
11	7,039	119	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
12	6,459	116	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
13	5,879	113	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
14	5,299	110	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
15	4,719	107	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
16	4,139	104	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
17	3,558	100	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
18	2,978	97	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80
19	2,398	94	13,420	154	192,3	18,63	2,17	20,80

Tabela 15 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 10%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	12,840	151	12,840	151	174,3	19,47	2,40	21,87
2	12,260	148	12,260	148	159,7	20,39	2,62	23,01
3	11,680	145	11,680	145	147,5	21,40	2,83	24,24
4	11,100	141	11,100	141	137,2	22,52	3,05	25,57
5	10,520	138	10,520	138	128,5	23,77	3,25	27,02
6	9,939	135	9,939	135	120,9	25,15	3,46	28,61
7	9,359	132	9,359	91	115,0	26,71	3,64	30,35
8	8,779	129	8,779	91	109,9	28,48	3,80	32,28
9	8,199	126	8,199	91	105,3	30,49	3,97	34,46
10	7,619	122	7,619	91	101,1	32,81	4,14	36,95
11	7,039	119	7,039	91	97,2	35,52	4,30	39,82
12	6,459	116	6,459	91	93,6	38,71	4,47	43,17
13	5,879	113	5,879	91	90,2	42,53	4,63	47,16
14	5,299	110	5,299	91	87,1	47,18	4,80	51,98
15	4,719	107	4,719	91	84,2	52,98	4,97	57,95
16	4,139	104	4,139	91	81,5	60,41	5,13	65,54
17	3,558	100	3,558	91	78,9	70,26	5,30	75,55
18	2,978	97	2,978	91	76,5	83,94	5,46	89,40
19	2,398	94	2,398	91	74,3	104,24	5,63	109,87

#### 4.1.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%

Analisando os dados da tabela 14 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 13,420$  e  $rpm_{max}^+ = 154$ . Em relação aos dados da tabela 15, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $R_{rop,n}$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,6}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 13. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 12 e 13 respectivamente.

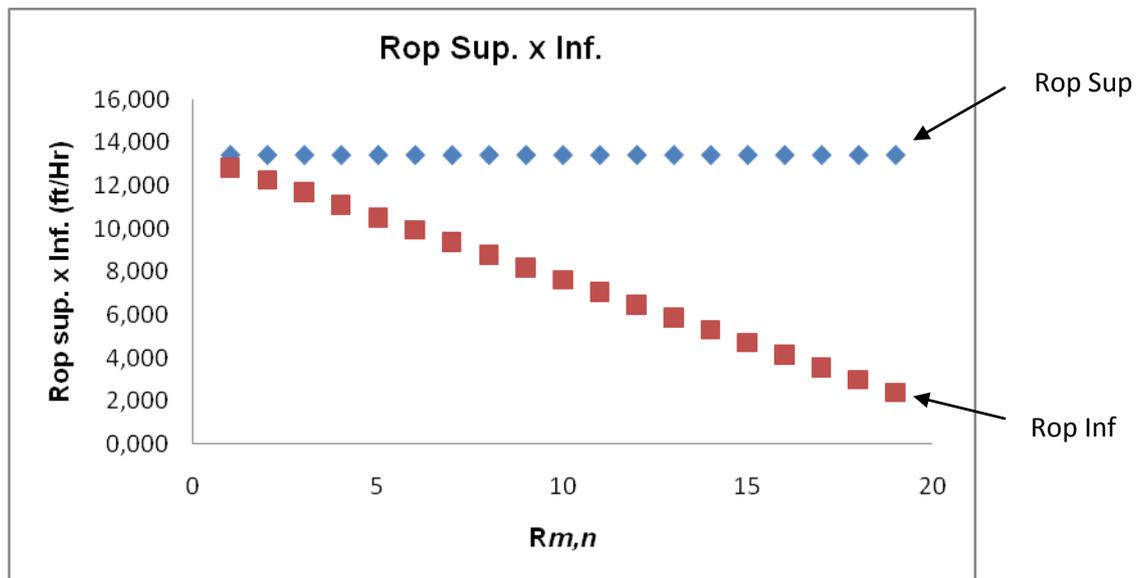


Figura 12 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

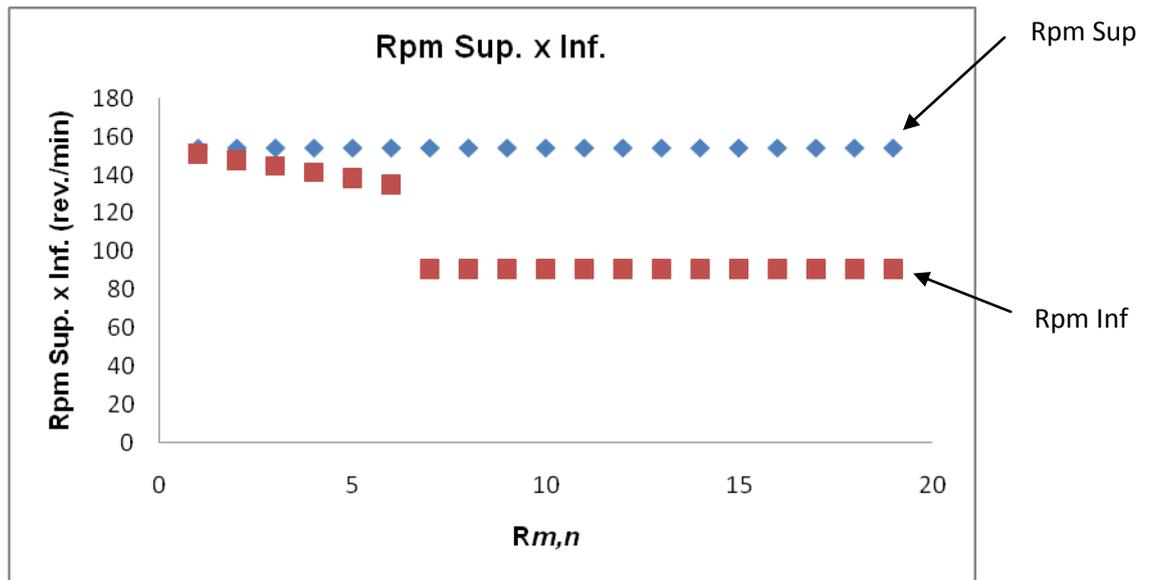


Figura 13 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 14, porém, os seus valores não englobam todos os valores da tabela 3. Os resultados acima descritos estão de acordo com os teoremas apresentados em WU *et al* (2006).

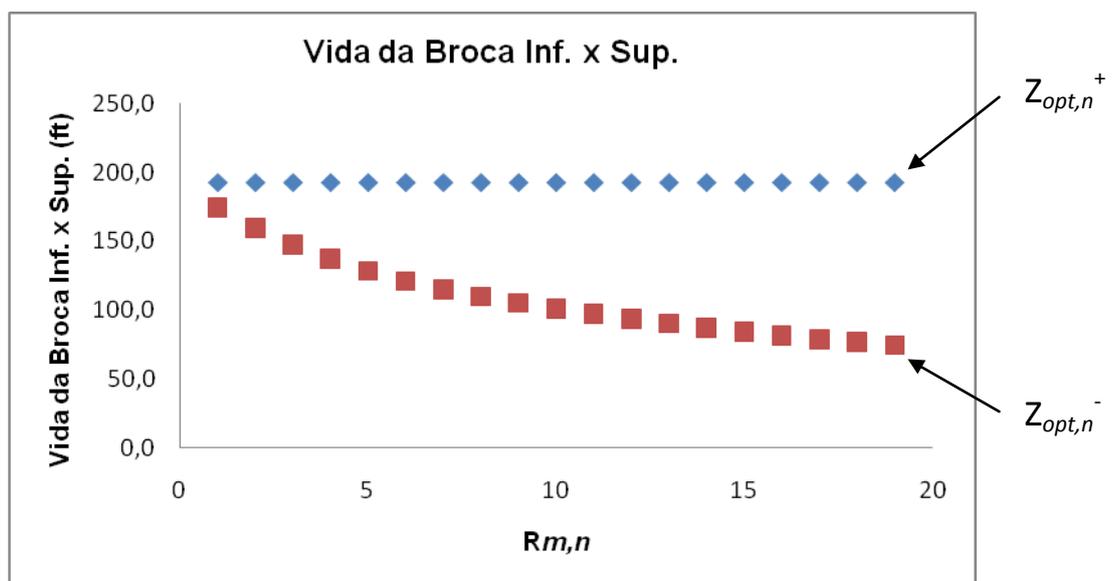


Figura 14 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

O  $CMI_{sonda,n}$  é maior do que o  $CMS_{sonda,n}$ , uma vez que  $CMI_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^+}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  é maior do que o  $CMS_{broca,n}$ , já que  $CMI_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^+}$ . Contudo, vê-se que  $Q_{opt,n}^+$  (CMS) é menor do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), conforme figura 15, apresentando uma incoerência, baseado em WU *et al* (2006).

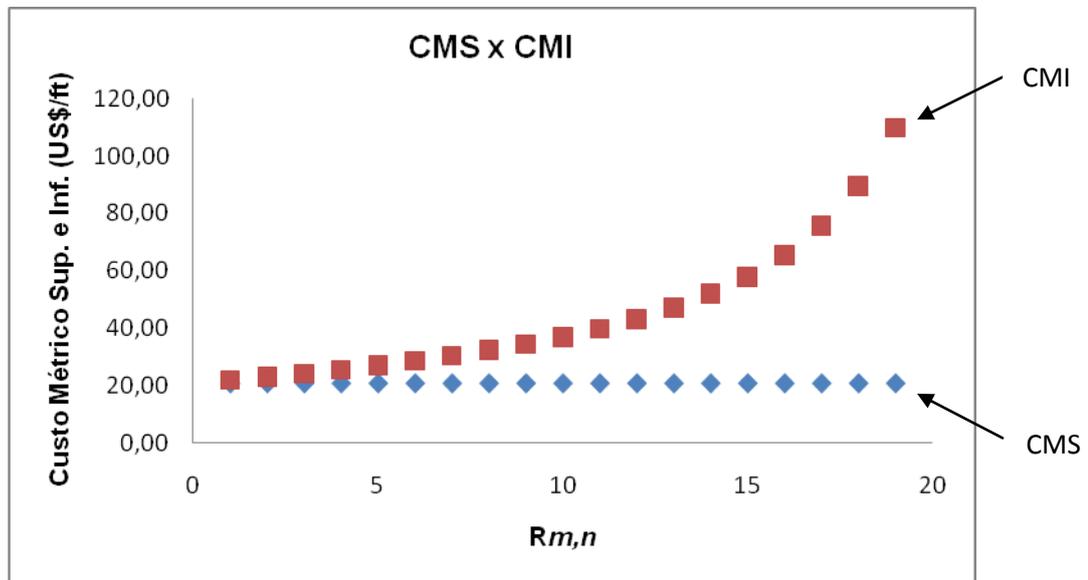


Figura 15 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

Na tabela 16 observa-se os resultados entre  $|Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-|$ .

Tabela 16 – Diferença entre  $|Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-|$

$ Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^- $
1,07
2,21
3,44
4,77
6,22
7,81
9,54
11,48
13,66
16,15
19,02
22,37
26,36
31,18
37,14
44,74
54,75
68,60
89,07

Como o critério é a menor diferença temos: US\$ 1,07/ft. Portanto, os resultados encontrados para valores dos parâmetros do modelo matemático são:

$$rop_{opt}^+ = 13,420 \text{ ft/hr}; rop_{opt}^- = 12,880 \text{ ft/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 154 \text{ rev./min.}; rpm_{opt}^- = 151 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{US\$ } 20,80/\text{ft e } Q_{opt}^- = \text{US\$ } 21,87/\text{ft}$$

Em relação aos dados na tabela 3, observa-se que os limites superior e inferior mesmo invertido em termos de valores para o custo métrico  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ , definem

uma faixa que incorporam alguns valores da tabela 3. Assim, ao se pegar o menor valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e calcularmos temos,  $\frac{20,80}{23,97} \cong 0,868$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é menor 13,2% em relação ao menor valor da tabela 3. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior valor, encontra-se  $\frac{109,87}{137,74} \cong 0,798$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor 20,2% em relação ao maior valor original do custo métrico na tabela 3, assim, não englobam todos os valores da tabela 3.

Na tabela 17 a seguir temos os valores de  $rop_{\max}$ ,  $rop_{\min}$ ,  $rpm_{\max}$  e  $rpm_{\min}$  para serem usados como limites das restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado para incerteza de 10%.

Tabela 17 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 10%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	13,130	7,329	152	121
2	12,840	7,039	151	119
3	12,550	6,749	149	118
4	12,260	6,459	148	116
5	11,970	6,169	146	115
6	11,680	5,879	145	113
7	11,390	5,589	143	111
8	11,100	5,299	141	110
9	10,810	5,009	140	108
10	10,520	4,719	138	107
11	10,230	4,429	137	105
12	9,939	4,139	135	104
13	9,649	3,849	133	102
14	9,359	3,558	132	100
15	9,069	3,268	130	99
16	8,779	2,978	129	97
17	8,489	2,688	127	96
18	8,199	2,398	126	94
19	7,909	2,108	124	92

A seguir, na tabela 18, o resultado do modelo determinístico para incerteza de 10%.

Tabela 18 – Resultados do modelo determinístico para a incerteza de 10%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
13,130	7,329	152	121	13,130	152	182,9	19,04	2,29	21,33
12,840	7,039	151	119	12,840	151	174,3	19,47	2,40	21,87
12,550	6,749	149	118	12,550	149	166,7	19,92	2,51	22,43
12,260	6,459	148	116	12,260	148	159,7	20,39	2,62	23,01
11,970	6,169	146	115	11,970	146	153,3	20,89	2,73	23,61
11,680	5,879	145	113	11,680	145	147,5	21,40	2,83	24,24
11,390	5,589	143	111	11,390	143	142,1	21,95	2,94	24,89
11,100	5,299	141	110	11,100	141	137,2	22,52	3,05	25,57
10,810	5,009	140	108	10,810	140	132,7	23,13	3,15	26,28
10,520	4,719	138	107	10,520	138	128,5	23,77	3,25	27,02
10,230	4,429	137	105	10,230	137	124,5	24,44	3,36	27,80
9,939	4,139	135	104	9,939	135	120,9	25,15	3,46	28,61
9,649	3,849	133	102	9,649	133	117,5	25,91	3,56	29,47
9,359	3,558	132	100	9,359	132	114,3	26,71	3,66	30,37
9,069	3,268	130	99	9,069	130	111,3	27,57	3,76	31,32
8,779	2,978	129	97	8,779	129	108,5	28,48	3,85	32,33
8,489	2,688	127	96	8,489	96	106,2	29,45	3,94	33,38
8,199	2,398	126	94	8,199	94	104,4	30,49	4,00	34,49
7,909	2,108	124	92	7,909	92	102,7	31,61	4,07	35,68

#### 4.1.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\max,n}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ , somente entre os valores do  $rpm_{\max,1} = 152$  até  $rpm_{\max,16} = 129$ , depois os valores do  $Rpm_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rpm_{\min,n}$ , ou seja,  $rpm_{\min,17} = 96$  até  $rpm_{\min,19} = 92$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$  e  $Z_{opt,n}$  vão diminuindo o custo métrico vai aumentando, ver figura 16.

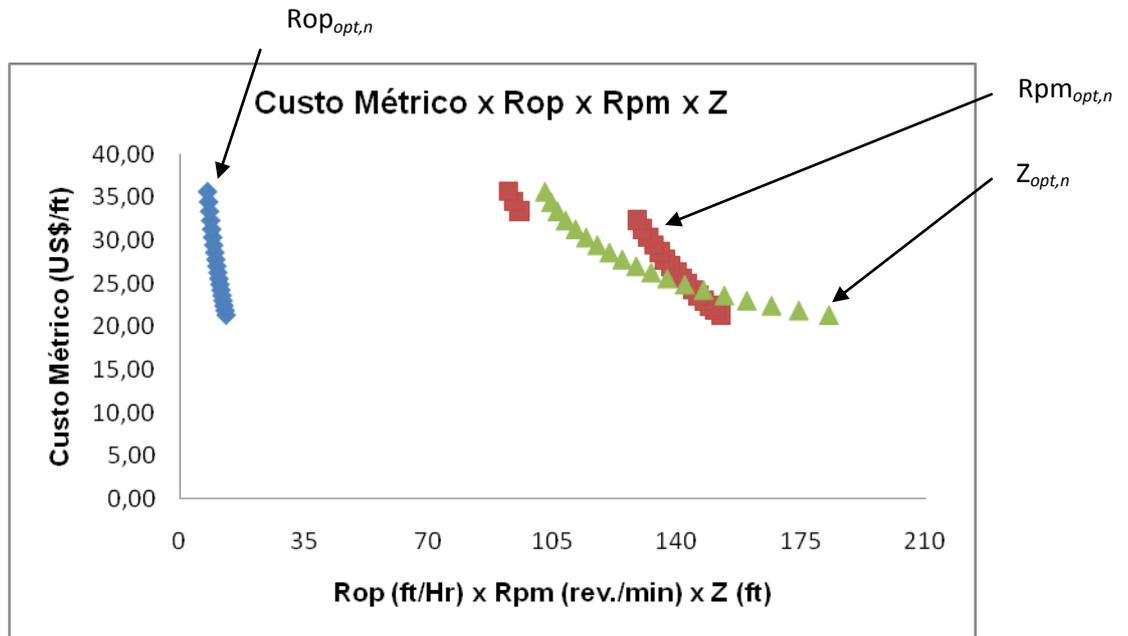


Figura 16 – Relação entre custo métrico x rop x rpm x vida da broca.

O melhor resultado encontrado é  $Q_{opt} = \text{US\$ } 21,33/\text{ft}$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 13,130 \text{ ft/hr}$  e  $Rpm_{opt} = 152 \text{ rev./min}$ .

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$ ,  $Z_{opt,n}$ , e  $Q_{opt,n}$  do modelo determinístico, observa-se que os mesmos são maiores e se aproximam dos resultados obtidos pelo modelo intervalar inferior para valores comparáveis. Ver abaixo as figuras 17, 18 e 19, respectivamente. A única exceção é o  $Q_{opt,n}$  que é o contrário. Ver figura 20.

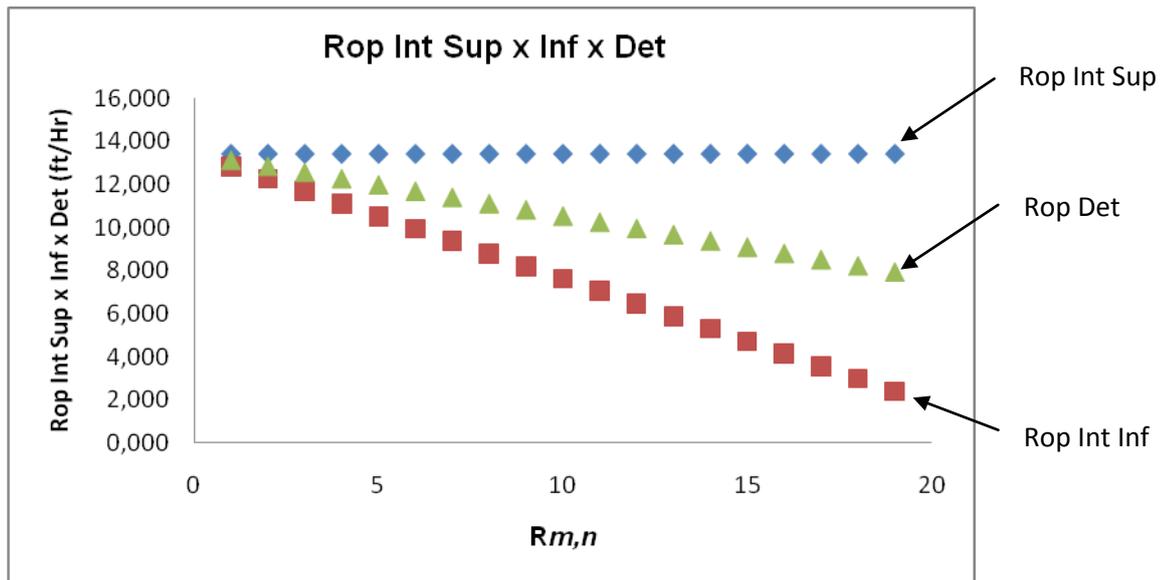


Figura 17 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico.

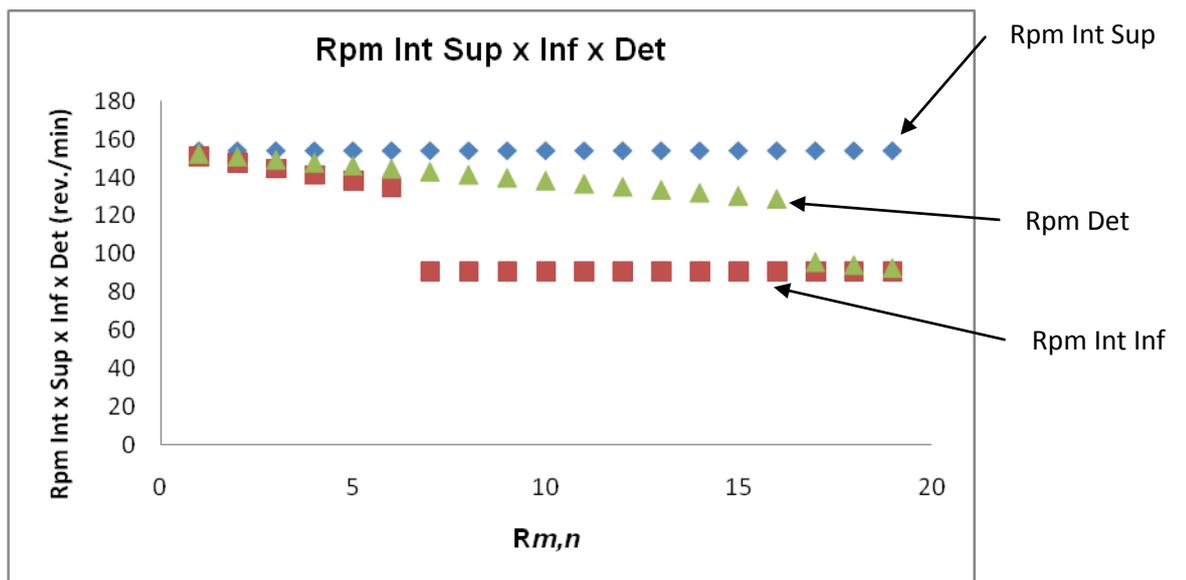


Figura 18 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico.

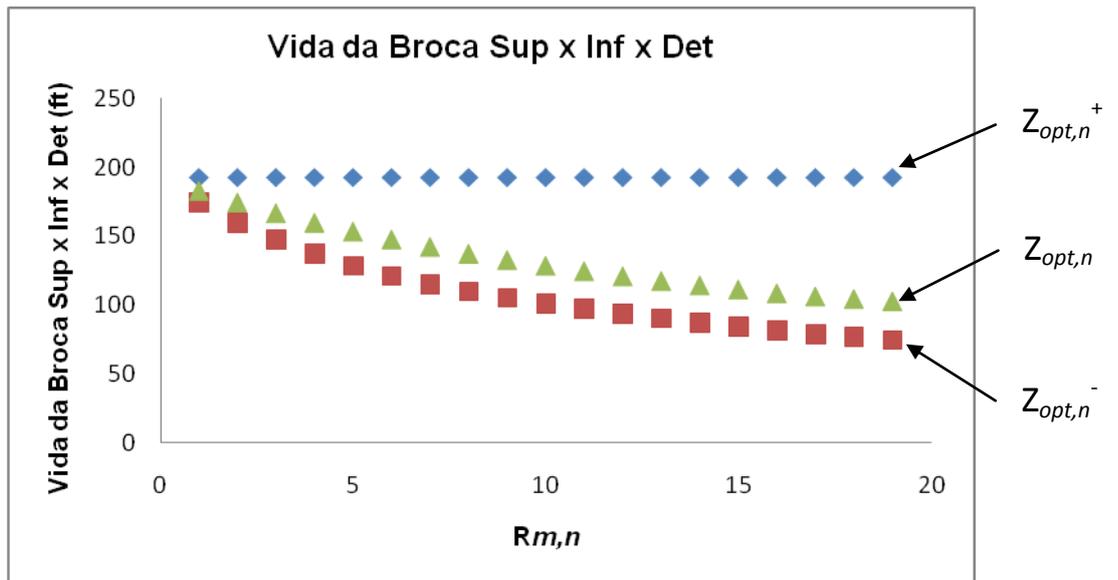


Figura 19 – Relação da vida da broca interv. superior x inferior x determinístico.

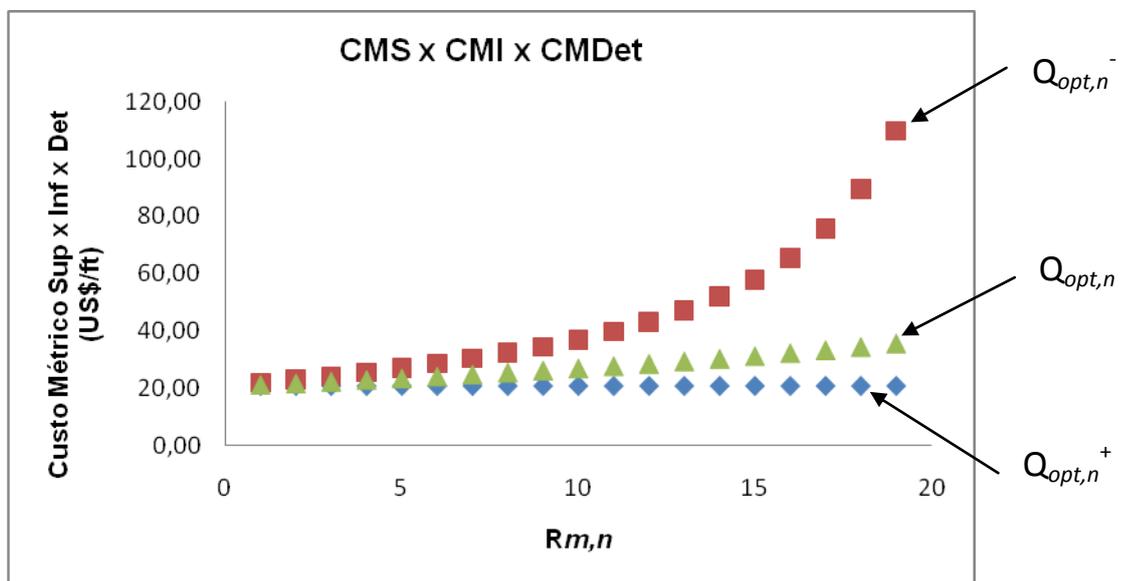


Figura 20 – Relação do custo métrico interv. superior x inferior x determinístico.

Dando seqüência ao exemplo, na tabela 19 temos os valores dos intervalos discretizados para incerteza de 1%.

Tabela 19 – Intervalos discretizados para incerteza de 1%

$rop_{\max}^+$	12,322			$rpm_{\max}^+$	141		
$rop_{\min}^-$	1,980			$rpm_{\min}^-$	99		
N=	20			N=	20		
l=	0,517			l=	2,120		
n=	1	Rrop,1	11,805	n=	1	Rrpm,1	139
n=	2	Rrop,2	11,288	n=	2	Rrpm,2	137
n=	3	Rrop,3	10,771	n=	3	Rrpm,3	135
n=	4	Rrop,4	10,254	n=	4	Rrpm,4	133
n=	5	Rrop,5	9,737	n=	5	Rrpm,5	131
n=	6	Rrop,6	9,219	n=	6	Rrpm,6	129
n=	7	Rrop,7	8,702	n=	7	Rrpm,7	127
n=	8	Rrop,8	8,185	n=	8	Rrpm,8	124
n=	9	Rrop,9	7,668	n=	9	Rrpm,9	122
n=	10	Rrop,10	7,151	n=	10	Rrpm,10	120
n=	11	Rrop,11	6,634	n=	11	Rrpm,11	118
n=	12	Rrop,12	6,117	n=	12	Rrpm,12	116
n=	13	Rrop,13	5,600	n=	13	Rrpm,13	114
n=	14	Rrop,14	5,083	n=	14	Rrpm,14	112
n=	15	Rrop,15	4,566	n=	15	Rrpm,15	110
n=	16	Rrop,16	4,049	n=	16	Rrpm,16	107
n=	17	Rrop,17	3,531	n=	17	Rrpm,17	105
n=	18	Rrop,18	3,014	n=	18	Rrpm,18	103
n=	19	Rrop,19	2,497	n=	19	Rrpm,19	101

Como próximo passo, nas tabelas 20 e 21 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 1%.

Tabela 20 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 1%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	11,805	139	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
2	11,288	137	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
3	10,771	135	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
4	10,254	133	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
5	9,737	131	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
6	9,219	129	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
7	8,702	127	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
8	8,185	124	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
9	7,668	122	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
10	7,151	120	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
11	6,634	118	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
12	6,117	116	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
13	5,600	114	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
14	5,083	112	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
15	4,566	110	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
16	4,049	107	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
17	3,531	105	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
18	3,014	103	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98
19	2,497	101	12,322	141	155,2	20,29	2,69	22,98

Tabela 21 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 1%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	11,805	139	11,805	139	145,6	21,18	2,87	24,05
2	11,288	137	11,288	137	137,2	22,15	3,05	25,19
3	10,771	135	10,771	135	129,9	23,21	3,22	26,43
4	10,254	133	10,254	133	123,3	24,38	3,39	27,77
5	9,737	131	9,737	131	117,4	25,68	3,56	29,24
6	9,219	129	9,219	129	112,2	27,12	3,73	30,84
7	8,702	127	8,702	127	107,4	28,73	3,89	32,62
8	8,185	124	8,185	99	103,2	30,54	4,05	34,59
9	7,668	122	7,668	99	99,6	32,60	4,20	36,80
10	7,151	120	7,151	99	96,2	34,96	4,35	39,31
11	6,634	118	6,634	99	93,0	37,68	4,49	42,18
12	6,117	116	6,117	99	90,0	40,87	4,64	45,51
13	5,600	114	5,600	99	87,3	44,64	4,79	49,43
14	5,083	112	5,083	99	84,6	49,19	4,94	54,12
15	4,566	110	4,566	99	82,2	54,76	5,09	59,84
16	4,049	107	4,049	99	79,9	61,75	5,23	66,98
17	3,531	105	3,531	99	77,7	70,79	5,38	76,17
18	3,014	103	3,014	99	75,6	82,94	5,53	88,46
19	2,497	101	2,497	99	73,7	100,11	5,67	105,78

#### 4.1.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%

Analisando os dados da tabela 20 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 12,322$  e  $rpm_{max}^+ = 141$ . Em relação aos dados da tabela 21, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $R_{rop,n}$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,7}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 19. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 21 e 22 respectivamente.

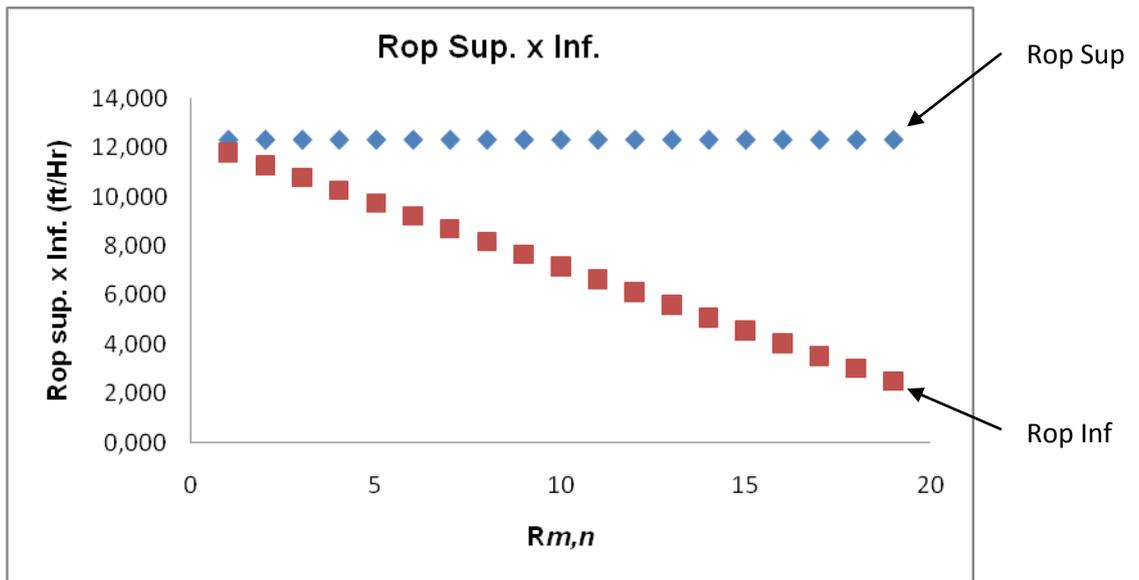


Figura 21 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

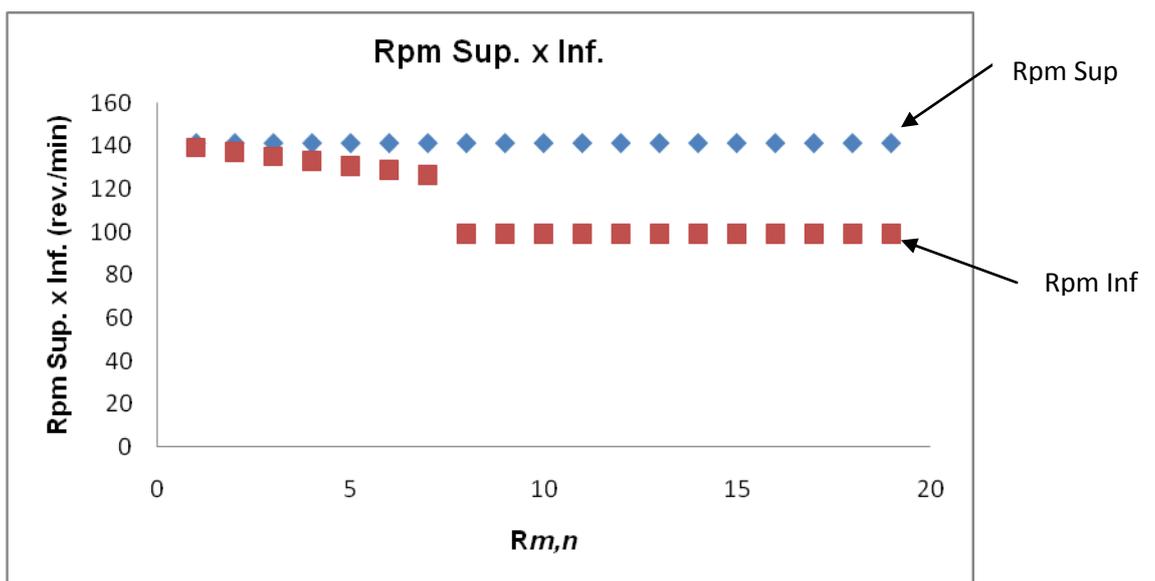


Figura 22 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Novamente, os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 23 e não incorporam todos os valores da tabela 1.

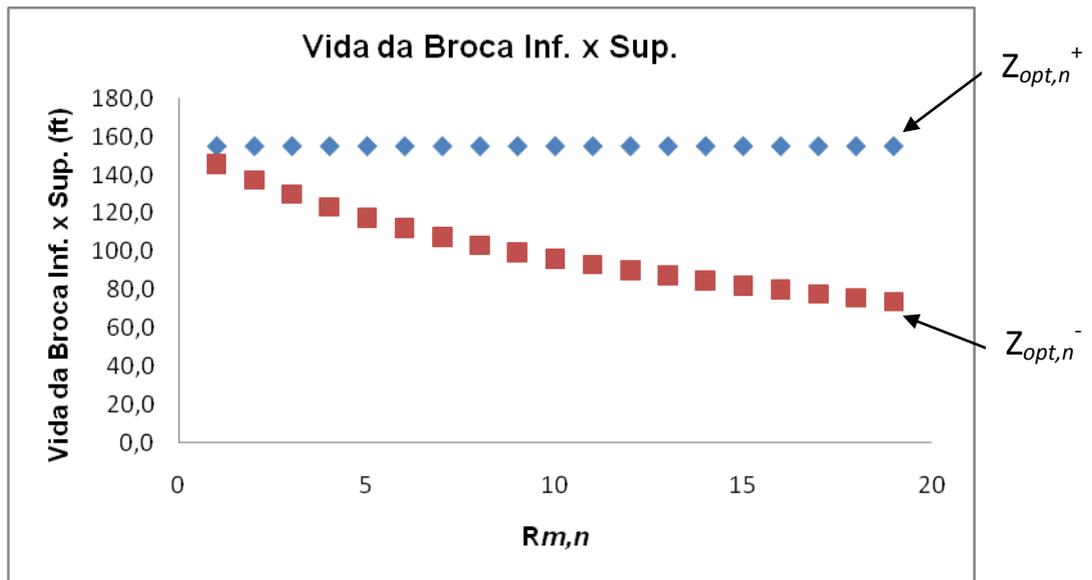


Figura 23 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

Outra vez, o  $CMI_{sonda,n}$  é maior do que o  $CMS_{sonda,n}$ , uma vez que  $CMI_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{sonda,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^+}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  é maior do que o  $CMS_{broca,n}$ , já que  $CMI_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^+}$ . Da mesma forma que os anteriores, vê-se que  $Q_{opt,n}^+$  (CMS) é menor do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), conforme figura 24, apresentando uma incoerência, segundo WU *et al* (2006).

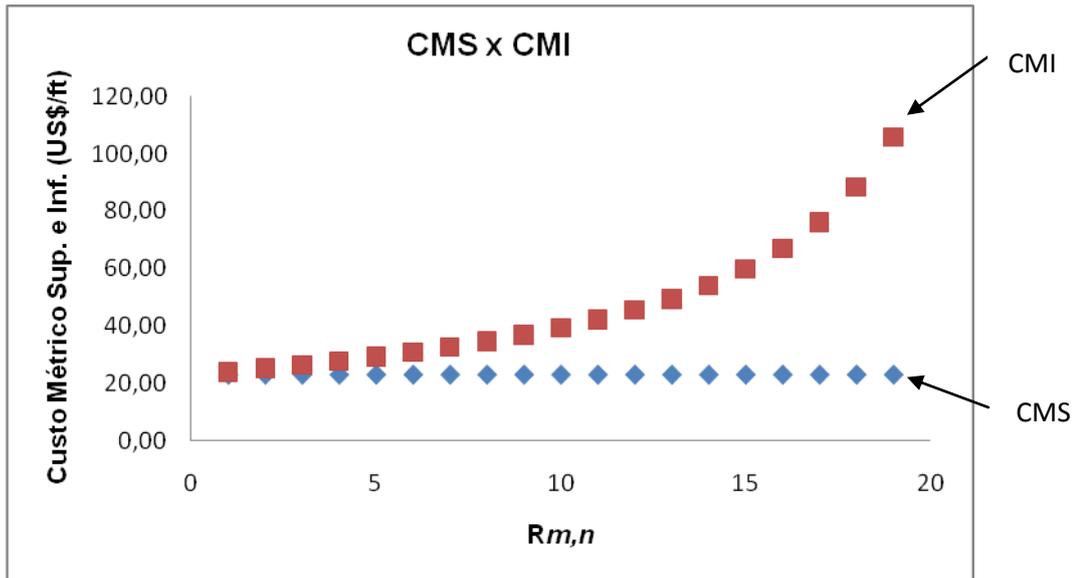


Figura 24 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

Abaixo na tabela 22, os resultados entre  $|Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-|$ .

Tabela 22 – Diferença entre  $|Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-|$

$ Q_{opt,n}^+$ e $Q_{opt,n}^- $
1,07
2,21
3,45
4,79
6,25
7,86
9,64
11,61
13,82
16,32
19,20
22,53
26,45
31,14
36,86
44,00
53,19
65,48
82,80

Portanto, a menor diferença é US\$ 1,07/ft. Logo, os resultados finais são:

$$rop_{opt}^+ = 12,322 \text{ ft/hr}; rop_{opt}^- = 11,805 \text{ ft/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 141 \text{ rev./min.}; rpm_{opt}^- = 139 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{US\$ } 22,98/\text{ft} \text{ e } Q_{opt}^- = \text{US\$ } 24,05/\text{ft}$$

Em relação aos dados na tabela 3, observa-se que os limites superior e inferior mesmo invertido em termos de valores para o custo métrico  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ , definem uma faixa que incorporam alguns valores da tabela 3. Assim, ao se pegar o menor valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e calcularmos temos,  $\frac{22,98}{23,97} \cong 0,959$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é menor 4,1% em relação ao menor valor da tabela 3. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior valor, encontra-se  $\frac{105,78}{137,74} \cong 0,768$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor 23,2% em relação ao maior valor original do custo métrico na tabela 3. Neste caso, o modelo intervalar não incorpora todos os valores da tabela 3.

Por fim, na tabela 23 a seguir temos os valores do  $rop_{max}$ ,  $rop_{min}$ ,  $rpm_{max}$  e  $rpm_{min}$  para serem usados como limites das restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado para a incerteza de 1%.

Tabela 23 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 1%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	12,063	6,893	140	119
2	11,805	6,634	139	118
3	11,546	6,375	138	117
4	11,288	6,117	137	116
5	11,029	5,858	136	115
6	10,771	5,600	135	114
7	10,512	5,341	134	113
8	10,254	5,083	133	112
9	9,995	4,824	132	111
10	9,737	4,566	131	110
11	9,478	4,307	130	109
12	9,219	4,049	129	107
13	8,961	3,790	128	106
14	8,702	3,531	127	105
15	8,444	3,273	126	104
16	8,185	3,014	124	103
17	7,927	2,756	123	102
18	7,668	2,497	122	101
19	7,410	2,239	121	100

A seguir, na tabela 24, os resultados do modelo determinístico para a incerteza de 1%.

Tabela 24 – Resultados do modelo determinístico para a incerteza de 1%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
12,063	6,893	140	119	12,063	140	150,2	20,72	2,78	23,51
11,805	6,634	139	118	11,805	139	145,6	21,18	2,87	24,05
11,546	6,375	138	117	11,546	138	141,3	21,65	2,96	24,61
11,288	6,117	137	116	11,288	137	137,2	22,15	3,05	25,19
11,029	5,858	136	115	11,029	136	133,4	22,67	3,13	25,80
10,771	5,600	135	114	10,771	135	129,9	23,21	3,22	26,43
10,512	5,341	134	113	10,512	134	126,5	23,78	3,30	27,09
10,254	5,083	133	112	10,254	133	123,3	24,38	3,39	27,77
9,995	4,824	132	111	9,995	132	120,3	25,01	3,47	28,49
9,737	4,566	131	110	9,737	131	117,4	25,68	3,56	29,24
9,478	4,307	130	109	9,478	130	114,7	26,38	3,64	30,02
9,219	4,049	129	107	9,219	129	112,2	27,12	3,73	30,84
8,961	3,790	128	106	8,961	128	109,7	27,90	3,81	31,71
8,702	3,531	127	105	8,702	127	107,4	28,73	3,89	32,62
8,444	3,273	126	104	8,444	126	105,2	29,61	3,97	33,58
8,185	3,014	124	103	8,185	124	103,1	30,54	4,05	34,60
7,927	2,756	123	102	7,927	123	101,1	31,54	4,13	35,67
7,668	2,497	122	101	7,668	101	99,2	32,60	4,21	36,81
7,410	2,239	121	100	7,410	100	97,7	33,74	4,28	38,02

#### 4.1.6 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\max,n}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ , entre os valores do  $rpm_{\max,1} = 140$  até  $rpm_{\max,17} = 123$ , depois os dois últimos valores do  $Rpm_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rpm_{\min,n}$ , ou seja,  $rpm_{\min,18} = 101$  e  $rpm_{\min,19} = 100$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  vão diminuindo o custo métrico vai aumentando, conforme figura 25.

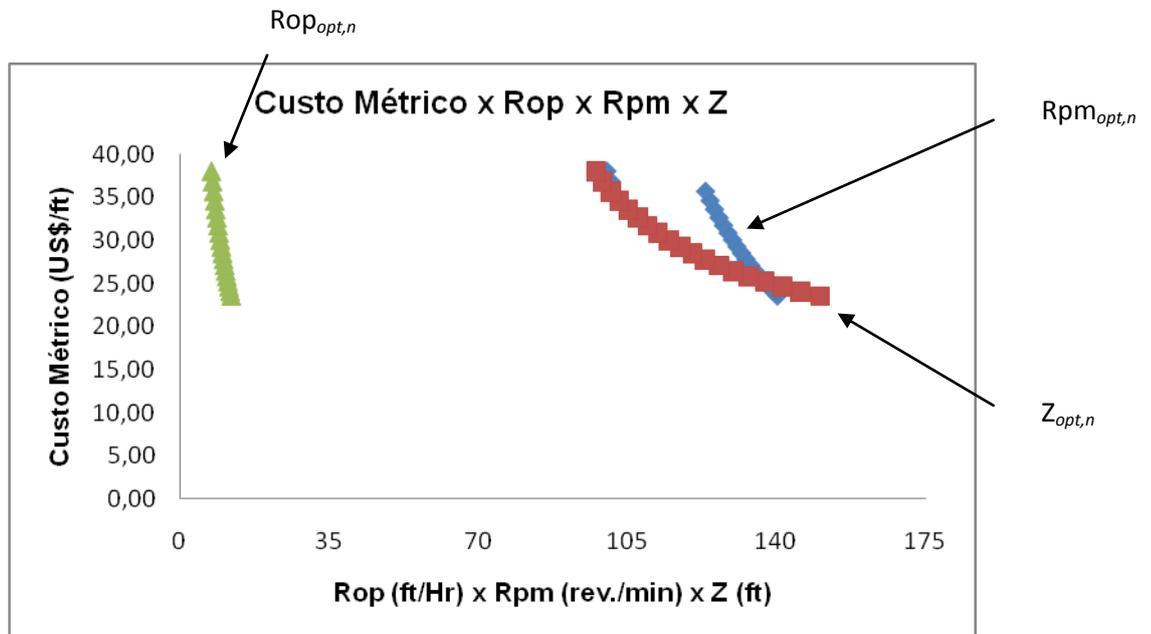


Figura 25 - Relação entre custo métrico x rop x rpm x vida da broca.

O menor custo métrico perfurado é  $Q_{opt} = \text{US\$ } 23,51/\text{ft}$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 12,063 \text{ ft/hr}$  e  $Rpm_{opt} = 140 \text{ rev./min}$ .

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$ ,  $Z_{opt,n}$ , e  $Q_{opt,n}$  do modelo determinístico, observa-se que os mesmos se aproximam dos resultados obtidos pelo modelo intervalar inferior para valores comparáveis. Ver abaixo os figuras 26, 27, 28 e 29, respectivamente.

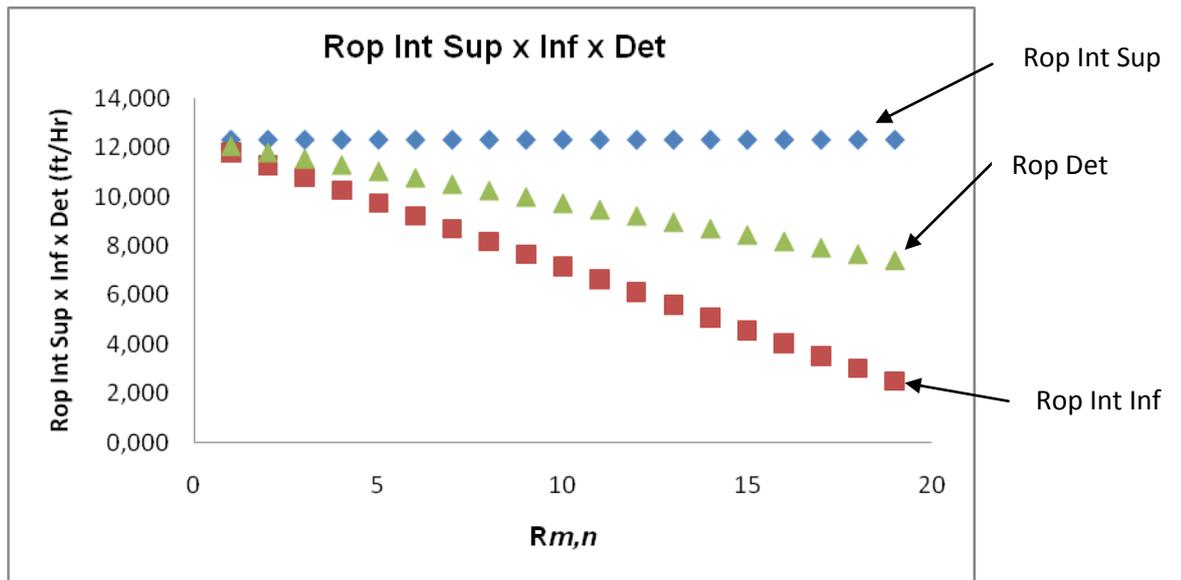


Figura 26 – Relação entre rop interv. superior x inferior x determinístico.

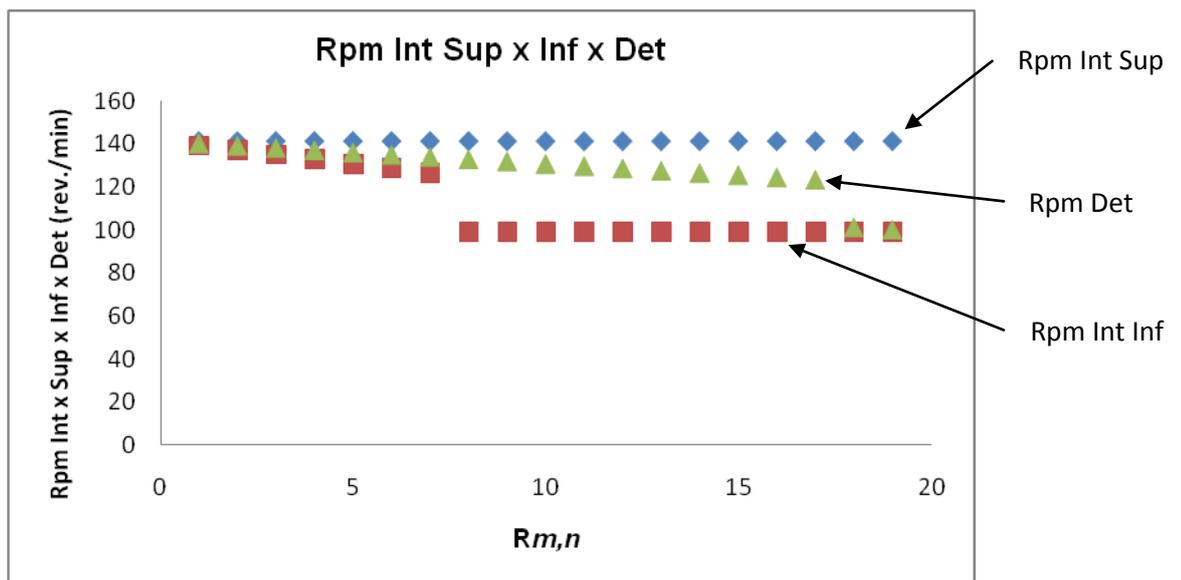


Figura 27 – Relação entre rpm interv. superior x inferior x determinístico.

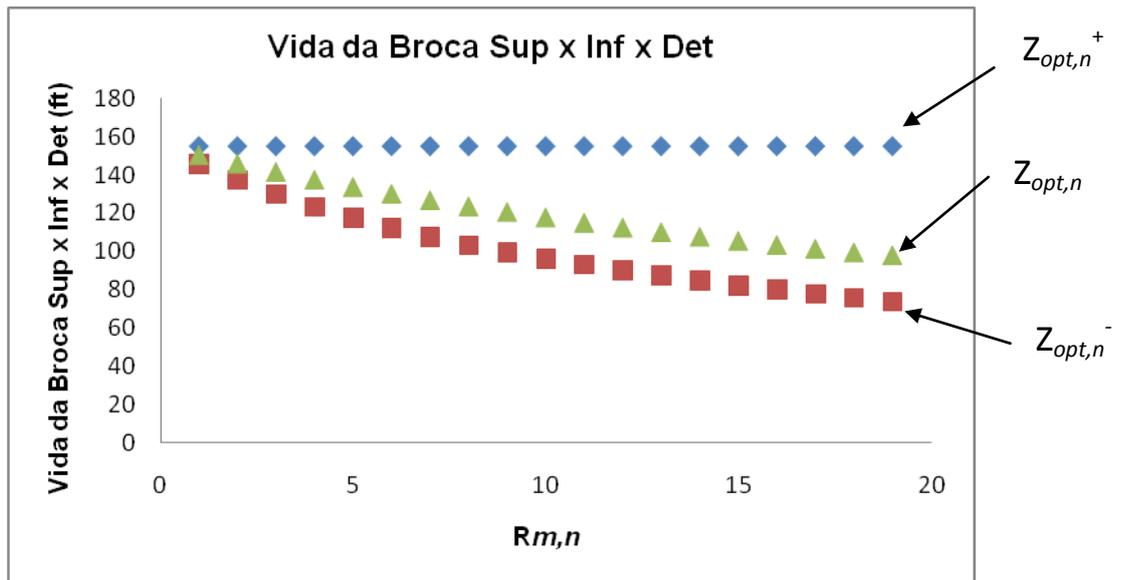


Figura 28 – Relação da vida da broca interv. superior x inferior x determinístico.

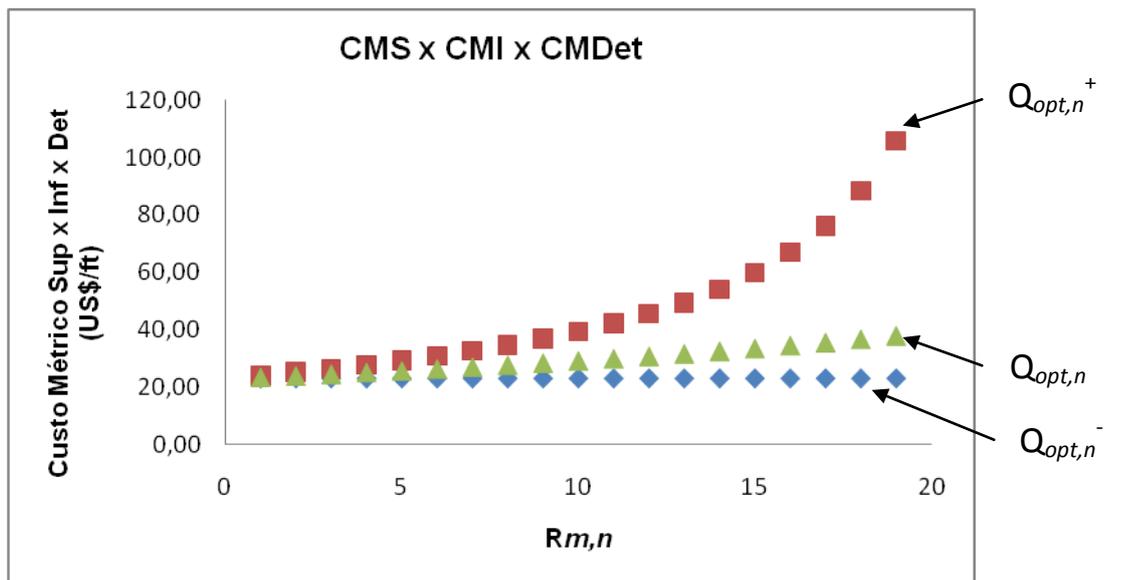


Figura 29 – Relação do custo métrico interv. superior x inferior x determinístico.

#### 4.1.7 – Análise geral dos aumentos das incertezas

##### Aumento da Incerteza de 1% para 10%

Para concluir este exemplo, observa-se que numa análise geral, quando se aumenta a incerteza de 1% para 10%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$  sobe de US\$ 22,98/ft para US\$ 20,80/ft, respectivamente. Desta forma, ocorre uma redução de aproximadamente 9,5% no valor do  $Q_{opt,n}^+$ . Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 1%, ocorrem um aumento de aproximadamente 23,9% em relação a incerteza de 10%, ou seja, sai de 155,2 ft para 192,3 ft, respectivamente.

Em relação ao  $Rop_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de aproximadamente 8,9%. Já para o  $Rpm_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de 9,2%, quando a incerteza aumenta de 1% para 10%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 1%, diminuem entre 0,8% a 9,1% em relação a incerteza de 10%, para os valores do  $R_{rop,1}$  e  $R_{rpm,1}$  até  $R_{rop,17}$  e  $R_{rpm,17}$ . Já para os valores do  $R_{rop,18}$ ,  $R_{rpm,18}$ ,  $R_{rop,19}$  e  $R_{rpm,19}$  ocorre um aumento entre 1,1% e 3,9% nos valores do  $Q_{opt,n}^-$  quando se aumenta a incerteza de 1% para 10%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 1%, ocorrem aumentos entre 0,8% e 19,7% aproximadamente em relação a incerteza de 10%, quando se aumenta a incerteza de 1% para 10%, no modelo intervalar.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem variações negativas entre 1,2% e 4,0%, ou seja, redução nos seus valores para  $R_{rop,18}$  e  $R_{rop,19}$ . Como também apresentam aumentos entre 0,8% e 8,8% nos seus valores, dependendo em determinadas situações dos valores do  $R_{rop,n}$ , ou seja, entre  $R_{rop,1}$  e  $R_{rop,17}$ . Quando se analisa os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 4,6% a 8,6%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,6}$ . Contudo, ocorrem reduções nos seus valores entre 8,1% e 28,3% entre  $R_{rpm,7}$  e  $R_{rpm,19}$ , quando a incerteza sobe de 1% para 10%.

Quando ocorre aumento, no modelo determinístico, da incerteza de 1% para 10%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 1%) apresenta uma redução em relação ao  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 10%), entre 6,2% a 9,3%. Ao analisarmos os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 1% para 10%, vê-se que os seus valores apresentam uma aumento entre 5,1% e 21,8%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 6,7% e 8,9%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 4,0% e 8,6%, ou seja, entre  $rpm_{max,1}, rpm_{min,1}$  e  $rpm_{max,16}, rpm_{min,16}$ . Porém, também ocorrem reduções nos seus valores entre 8% e 22,0% para as restrições  $rpm_{max,17}, rpm_{min,17}, rpm_{max,18}, rpm_{min,18}, rpm_{max,19}$  e  $rpm_{min,19}$ .

#### Aumento da Incerteza de 1% para 20%

Quando se aumenta a incerteza de 1% para 20%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$  desce de US\$ 22,98/ft para US\$ 18,60/ft, respectivamente. Desta forma, ocorre uma redução de aproximadamente 19,6% no valor do  $Q_{opt,n}^+$ . Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 1%, ocorrem um aumento de aproximadamente 76,7% em relação a incerteza de 20%, ou seja, sai de 155,2 ft para 274,2 ft.

Em relação ao  $Rop_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de aproximadamente 18,8%. Os valores do  $Rpm_{opt,n}^+$ , apresentam um aumento de 19,1%, quando aumenta-se a incerteza de 1% para 20%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 1%, diminuem entre 2,4% a 18,1% em relação a incerteza de 10%, para os valores do  $R_{rop,1}$  e  $R_{rpm,1}$  até  $R_{rop,17}$  e  $R_{rpm,17}$ . Já para os valores do  $R_{rop,18}, R_{rpm,18}, R_{rop,19}$  e  $R_{rpm,19}$  ocorre um aumento entre 1,4% e 7,3% nos valores do  $Q_{opt,n}^-$  quando se aumenta a incerteza de 1% para 20%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 1%, ocorrem aumentos entre 2,3% a 58,7% aproximadamente em relação a incerteza de 20%, quando se aumenta a incerteza de 1% para 20%, no modelo intervalar.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem reduções entre 1,2% e 4,0%, ou seja, entre os valores para  $R_{rop,18}$  e  $R_{rop,19}$ . Como também apresentam aumentos entre 2,3% e 18,5% nos seus valores, dependendo em determinadas situações, dos valores do  $R_{rop,n}$ , ou seja, entre  $R_{rop,1}$  e  $R_{rop,17}$ . Quando se analisa os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 12,2% a 18,0%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,5}$ . Contudo, ocorrem reduções nos seus valores entre 16,2% e 35,7% para os demais  $R_{rpm,n}$ , aumentando-se a incerteza de 1% para 20%.

Quando ocorre aumento, no modelo determinístico, da incerteza de 1% para 20%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 1%) apresenta uma redução em relação ao  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 20%), entre 12,4% a 18,6%. Ao analisarmos os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 1% para 20%, vê-se que os seus valores apresentam um aumento entre 12,2% e 66,9%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 14,4% e 18,7%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 8,9% e 18,6%, ou seja, entre  $rpm_{max,1}$ ,  $rpm_{min,1}$  e  $rpm_{max,16}$ ,  $rpm_{min,16}$ . Porém, também ocorrem reduções nos seus valores entre 10,9% e 15,0% para as restrições  $rpm_{max,17}$ ,  $rpm_{min,17}$ ,  $rpm_{max,18}$ ,  $rpm_{min,18}$ ,  $rpm_{max,19}$  e  $rpm_{min,19}$ .

#### Aumento da Incerteza de 10% para 20%

Quando se aumenta a incerteza de 10% para 20%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$  desce de US\$ 20,80 para US\$ 18,60, respectivamente. Desta forma, ocorre uma redução de aproximadamente 10,6% no valor do  $Q_{opt,n}^+$ . Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 10%, ocorrem um aumento de aproximadamente 42,6% em relação a incerteza de 20%, ou seja, sai de 192,3 ft para 274,2 ft.

Em relação ao  $Rop_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de aproximadamente 9,1%. Já para o  $Rpm_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de 9,1%, aumentando-se a incerteza de 10% para 20%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 10%, diminuem entre 1,6% a 10,0% em relação a incerteza de 20%, para os valores do  $R_{rop,1}$  e  $R_{rpm,1}$  até  $R_{rop,17}$  e  $R_{rpm,17}$ . Já para os valores do  $R_{rop,18}$ ,  $R_{rpm,18}$ ,  $R_{rop,19}$  e  $R_{rpm,19}$  ocorre um aumento entre 0,34% e 3,30% nos valores do  $Q_{opt,n}^-$  quando se aumenta a incerteza de 10% para 20%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 10%, ocorrem aumentos entre 1,5% a 32,6% aproximadamente, em relação a incerteza de 10%, quando se aumenta a incerteza de 10% para 20%, no modelo intervalar.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem reduções entre 0,47% e 3,50%, ou seja, para os valores  $R_{rop,18}$  e  $R_{rop,19}$ . Como também apresentam aumentos entre 1,5% a 9,0% nos seus valores, dependendo em determinadas situações, dos valores do  $R_{rop,n}$ , ou seja, entre  $R_{rop,1}$  e  $R_{rop,17}$ . Quando se analisa os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 6,5% a 8,6%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,5}$ . Contudo, ocorrem reduções nos seus valores entre 8,8% e 38,5% para os demais  $R_{rpm,n}$ .

Aumentando-se, no modelo determinístico, a incerteza de 10% para 20%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 10%) apresenta uma redução em relação ao  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 20%), entre 6,7% a 10,3%. Ao analisarmos os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 10% para 20%, vê-se que os seus valores apresentam uma aumento entre 6,7% e 37,1%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 7,2% e 9,0%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$ , em certos momentos, ocorrem aumentos entre 3,9% e 9,2%, ou seja, entre  $rpm_{max,1}$ ,  $rpm_{min,1}$  e  $rpm_{max,16}$ ,  $rpm_{min,16}$ . Porém, também ocorrem reduções nos seus valores entre 6,3% e 7,6% para as restrições  $rpm_{max,17}$ ,  $rpm_{min,17}$ ,  $rpm_{max,18}$ ,  $rpm_{min,18}$ ,  $rpm_{max,19}$  e  $rpm_{min,19}$ .

Para verificação dos modelos no LINGO para este problema ver apêndice C.

## 4.2 – Exemplo 2: Furação de Metais

Este exemplo foi baseado no artigo de LEE, LIU e TARNG (1999), onde as brocas usadas foram de aço rápido (HSS) para aço carbono 45. Os diâmetros das brocas variaram de 8 a 12 mm. O equipamento usado foi um CNC MCV-641. Contudo, não foi possível obter os dados pelo artigo referente ao custo horário deste centro de usinagem vertical e nem das brocas acima citadas. Então, foi pesquisado na internet o valor médio para uma broca nacional de 12 mm de diâmetro, de aço rápido DIN 338, marca Irwin e o valor médio encontrado foi de R\$ 20,00. Para o centro de usinagem vertical foi usado como referência para o custo da máquina por hora, um centro de usinagem vertical nacional, da marca Romi D600 e o seu valor aproximado de mercado foi R\$ 200.000,00 a título de exemplificação, conforme informações do representante da marca no Rio de Janeiro. O cálculo para o custo total da máquina em R\$/hora está demonstrado no apêndice D, e o seu valor encontrado foi de R\$ 17,27. Também, a velocidade de corte foi transformado em rpm e o rop, velocidade de avanço em metais (CARIS e SILVEIRA, 2009), foi obtido pelo produto do rpm e avanço (ou *feed*) dado em mm/revolução. A seguir na tabela 25 os dados do problema.

Tabela 25 – Dados do Modelo Matemático

ROP (m/Hrs)	RPM	Z (m)	Q (R\$/m)
0,9540	265	0,0901	240,08
1,1460	318	0,2992	81,91
1,4340	398	0,2103	107,14
1,9080	531	0,1500	142,39
2,2920	637	0,1795	118,93
2,3880	265	0,0902	228,93
2,8620	796	0,1352	154,02
2,8620	796	0,1797	117,35
2,8620	318	0,4190	53,77
3,4380	955	0,1795	116,42
3,5820	398	0,0299	674,84
4,2960	1194	0,2100	99,25
4,5840	318	0,0764	265,55
4,7760	531	0,0902	225,31
5,7300	637	0,1194	170,55
7,1640	796	0,0896	225,75
7,1640	796	0,1194	169,91
7,6380	531	0,0912	221,48
8,5920	955	0,1504	135,02
9,1680	637	0,1503	134,99
10,7400	1194	0,1193	169,21
11,4600	796	0,1210	166,84
11,4600	796	0,1210	166,84
13,7520	955	0,1490	135,50
17,1900	1194	0,1480	136,12

Dando continuidade a metodologia, devemos encontrar os coeficientes do modelo matemático da vida da broca por meio de regressão linear. A regressão foi feita variando o  $p$  de 1,9 até 1,1 com passo de 0,1. Depois de 1,1 até 1,01 com passo 0,01. Assim, os valores encontrados para os coeficientes foram:

$$C_1 = 52,56350000$$

$$C_2 = 0,69189830$$

$$D_1 = 50,73966000$$

$$D_2 = 0,64437040$$

$$p = 1,01$$

Deve-se agora encontrar  $rop_{\max}^+$ ,  $rop_{\min}^-$ ,  $rpm_{\max}^+$  e  $rpm_{\min}^-$  por meio de Programação Linear Multi-Objetivo. Contudo, antes deve-se colocar cada variável de decisão em rol, conforme tabelas 26 e 27 abaixo, para depois usar a PLMO.

Tabela 26 – ROP em rol

ROP (m/Hrs)	RPM	Z (m)	
0,9540	265	0,0901	P25
1,1460	318	0,2992	
1,4340	398	0,2103	
1,9080	531	0,1500	
2,2920	637	0,1795	
2,3880	265	0,0902	
2,8620	796	0,1352	
2,8620	796	0,1797	
2,8620	318	0,4190	
3,4380	955	0,1795	
3,5820	398	0,0299	
4,2960	1194	0,2100	
4,5840	318	0,0764	
4,7760	531	0,0902	
5,7300	637	0,1194	
7,1640	796	0,0896	
7,1640	796	0,1194	
7,6380	531	0,0912	
8,5920	955	0,1504	
9,1680	637	0,1503	
10,7400	1194	0,1193	
11,4600	796	0,1210	
11,4600	796	0,1210	
13,7520	955	0,1490	
17,1900	1194	0,1480	

Tabela 27 – RPM em rol

RPM	ROP (m/Hrs)	Z (m)	
265	0,9540	0,0901	P25
265	2,3880	0,0902	
318	1,1460	0,2992	
318	2,8620	0,4190	
318	4,5840	0,0764	
398	1,4340	0,2103	
398	3,5820	0,0299	
531	1,9080	0,1500	
531	4,7760	0,0902	
531	7,6380	0,0912	
637	2,2920	0,1795	P75
637	5,7300	0,1194	
637	9,1680	0,1503	
796	2,8620	0,1352	
796	2,8620	0,1797	
796	7,1640	0,0896	
796	7,1640	0,1194	
796	11,4600	0,1210	
796	11,4600	0,1210	
955	3,4380	0,1795	
955	8,5920	0,1504	
955	13,7520	0,1490	
1194	4,2960	0,2100	
1194	10,7400	0,1193	
1194	17,1900	0,1480	

Porém, os valores obtidos pelas PLMO1 e PLMO2 não condizem com os valores do artigo e encontrados na prática. No PLMO1 foi encontrado os seguintes valores:  $rop_{\max}^+ = 3877,61$  e  $rpm_{\max}^+ = 4461$  e em PLMO2  $rop_{\min}^- = 516,6$  e  $rpm_{\min}^- = 1285$ . Assim, os procedimentos adotados são iguais aos do exemplo 1.

Desta forma, os valores das incertezas para cada variável rop e rpm estão demonstrados na tabela 28.

Tabela 28 – Incertezas de 1%, 10% e 20%

Incerteza		1%	10%	20%
Rop				
Mínimo=	0,954	0,945	0,867	0,795
Máximo=	17,190	17,362	18,909	20,628
Rpm				
Mínimo=	265	263	241	221
Máximo=	1194	1206	1313	1432

Dando seqüência a metodologia, devemos obter os intervalos discretizados para cada variável e incerteza para o modelo intervalar. Os valores para a incerteza de 20% estão na tabela 29 a seguir.

Tabela 29 – Intervalos discretizados para incerteza de 20%

$rop_{\max}^+$	20,628			$rpm_{\max}^+$	1432		
$rop_{\min}^-$	0,795			$rpm_{\min}^-$	221		
N=	20			N=	20		
l=	0,992			l=	60,568		
n=	1	R1,1	19,636	n=	1	R1,1	1372
n=	2	R1,2	18,645	n=	2	R1,2	1311
n=	3	R1,3	17,653	n=	3	R1,3	1251
n=	4	R1,4	16,661	n=	4	R1,4	1190
n=	5	R1,5	15,670	n=	5	R1,5	1130
n=	6	R1,6	14,678	n=	6	R1,6	1069
n=	7	R1,7	13,686	n=	7	R1,7	1008
n=	8	R1,8	12,695	n=	8	R1,8	948
n=	9	R1,9	11,703	n=	9	R1,9	887
n=	10	R1,10	10,712	n=	10	R1,10	827
n=	11	R1,11	9,720	n=	11	R1,11	766
n=	12	R1,12	8,728	n=	12	R1,12	706
n=	13	R1,13	7,737	n=	13	R1,13	645
n=	14	R1,14	6,745	n=	14	R1,14	584
n=	15	R1,15	5,753	n=	15	R1,15	524
n=	16	R1,16	4,762	n=	16	R1,16	463
n=	17	R1,17	3,770	n=	17	R1,17	403
n=	18	R1,18	2,778	n=	18	R1,18	342
n=	19	R1,19	1,787	n=	19	R1,19	282

Nas tabelas 30 e 31 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 20%.

Tabela 30 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 20%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	19,636	1372	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
2	18,645	1311	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
3	17,653	1251	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
4	16,661	1190	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
5	15,670	1130	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
6	14,678	1069	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
7	13,686	1008	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
8	12,695	948	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
9	11,703	887	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
10	10,712	827	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
11	9,720	766	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
12	8,728	706	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
13	7,737	645	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
14	6,745	584	20,628	1432	0,25218	0,84	79,31	80,15
15	5,753	524	5,753	1432	0,25999	3,00	76,93	79,93
16	4,762	463	4,762	1432	0,29493	3,63	67,81	71,44
17	3,770	403	3,770	1432	0,35378	4,58	56,53	61,11
18	2,778	342	2,778	1432	0,47048	6,22	42,51	48,73
19	1,787	282	1,787	1432	0,80833	9,67	24,74	34,41

Tabela 31 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 20%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	19,636	1372	0,795	1372	1,91441	21,72	10,45	32,17
2	18,645	1311	0,795	1311	1,02311	21,72	19,55	41,27
3	17,653	1251	0,795	1251	0,70776	21,72	28,26	49,98
4	16,661	1190	0,795	1190	0,54708	21,72	36,56	58,28
5	15,670	1130	0,795	1130	0,45018	21,72	44,43	66,15
6	14,678	1069	0,795	1069	0,38579	21,72	51,84	73,56
7	13,686	1008	0,795	1008	0,34027	21,72	58,78	80,50
8	12,695	948	0,795	948	0,30672	21,72	65,21	86,93
9	11,703	887	0,795	887	0,28132	21,72	71,09	92,82
10	10,712	827	0,795	827	0,26176	21,72	76,41	98,13
11	9,720	766	0,795	766	0,24661	21,72	81,10	102,82
12	8,728	706	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
13	7,737	645	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
14	6,745	584	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
15	5,753	524	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
16	4,762	463	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
17	3,770	403	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
18	2,778	342	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68
19	1,787	282	0,795	221	0,24109	21,72	82,96	104,68

#### 4.2.1 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 20%

Analisando os dados da tabela 30 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 20,628$ , entre  $n = 1$  e  $n = 14$ . Entre  $n = 15$  e  $n = 19$ , os seus valores iguais aos valores dos  $R_{rop,n}$ . Os valores dos  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rpm_{max}^+ = 1432$ . Em relação aos dados da tabela 31, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rop_{min}^- = 0,795$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,11}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 29. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 30 e 31 respectivamente.

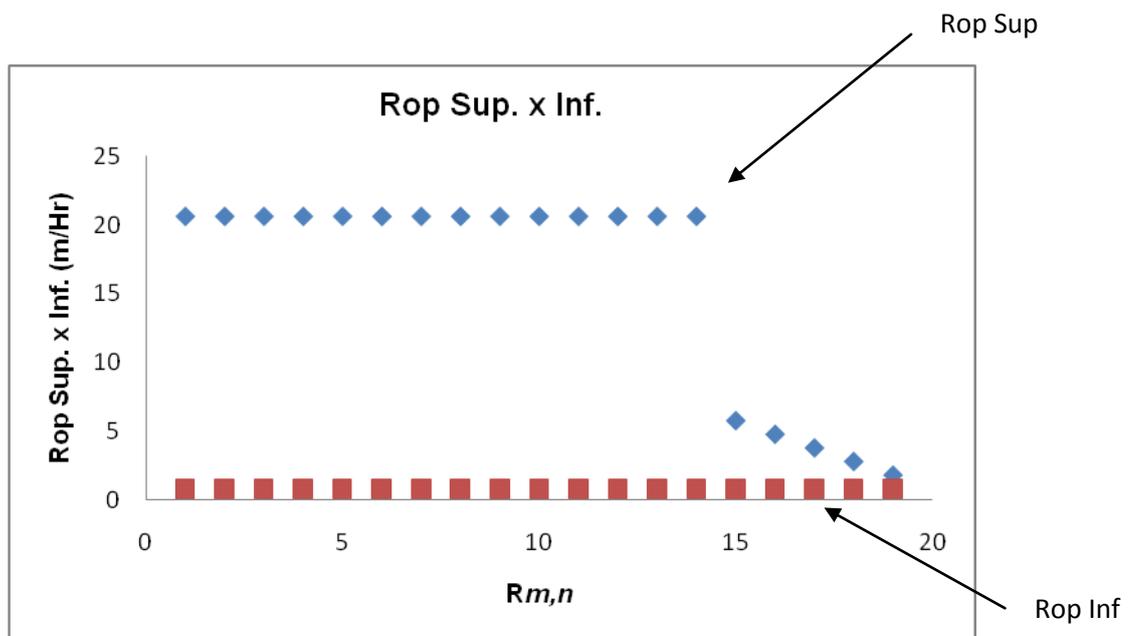


Figura 30 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

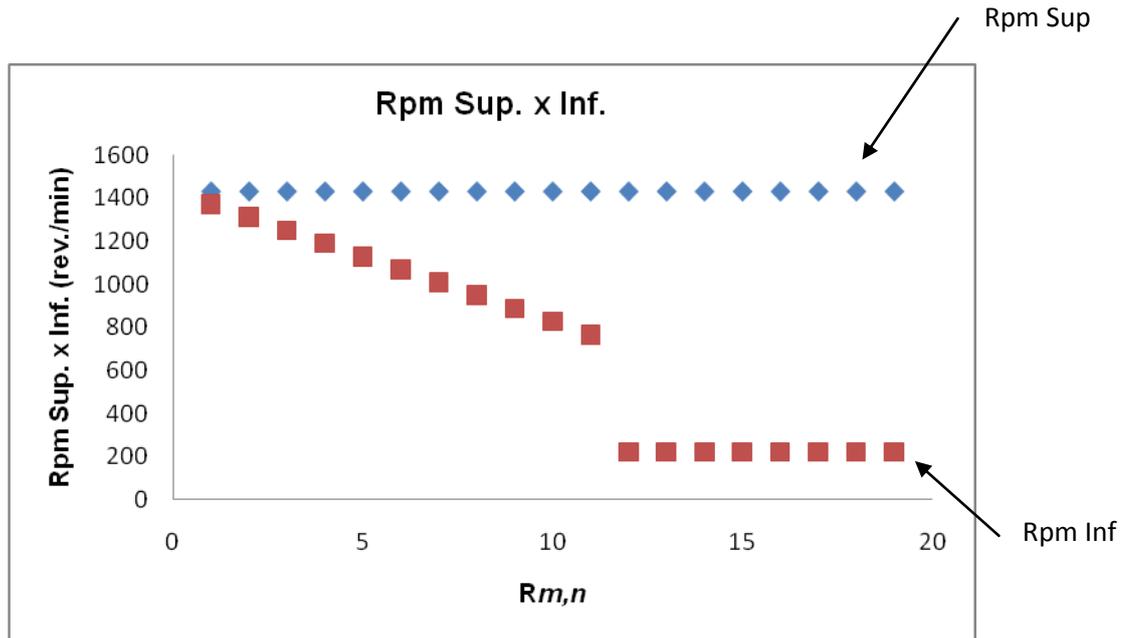


Figura 31 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Também, os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são menores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , entre  $n = 1$  e  $n = 10$ , já entre  $n = 11$  e  $n = 19$ , os valores de  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 32.

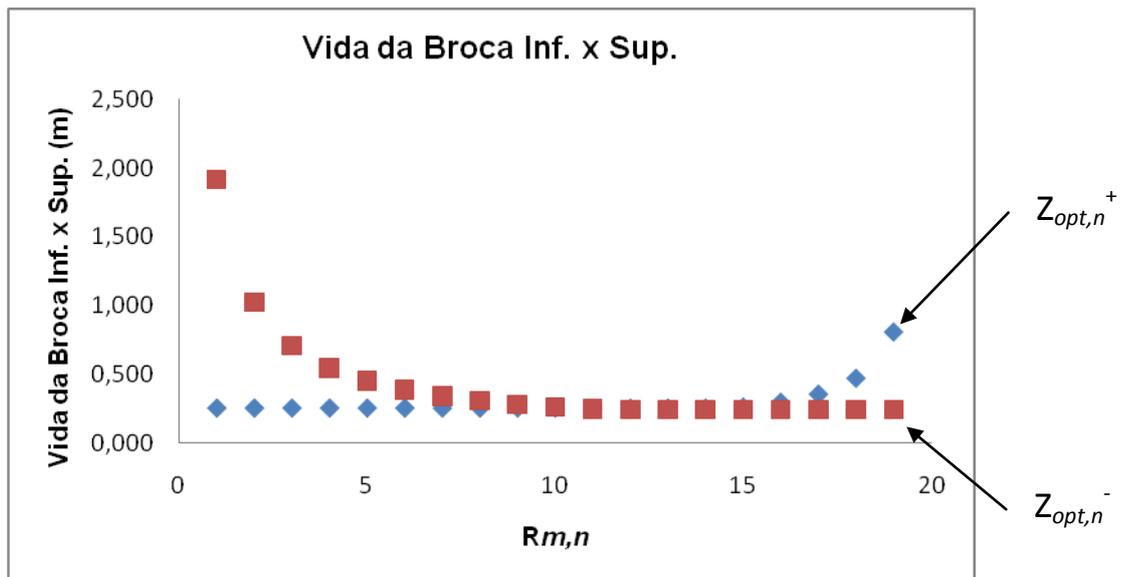


Figura 32 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

Os resultados anteriormente descritos estão, em parte, de acordo com os teoremas apresentados em WU *et al* (2006). Assim, o  $CMI_{cnc,n}$  é maior do que o  $CMS_{cnc,n}$ , uma vez que  $CMI_{cnc,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^-}$  e  $CMS_{cnc,n} = \frac{H}{Rop_{opt,n}^+}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  ( $CMI_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^-}$ ) é menor do que o  $CMS_{broca,n}$  ( $CMS_{broca,n} = \frac{I}{Z_{opt,n}^+}$ ), entre  $n = 1$  e  $n = 10$ . Porém, para  $n = 11$  até  $n = 19$ , os valores do  $CMI_{broca,n}$  são maiores do que  $CMS_{broca,n}$ . Contudo, vê-se que  $Q_{opt,n}^+$  (CMS) é maior do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), entre  $n = 1$  até  $n = 6$  e menor do que  $Q_{opt,n}^-$  para  $n = 7$  até  $n = 19$ , conforme figura 33.

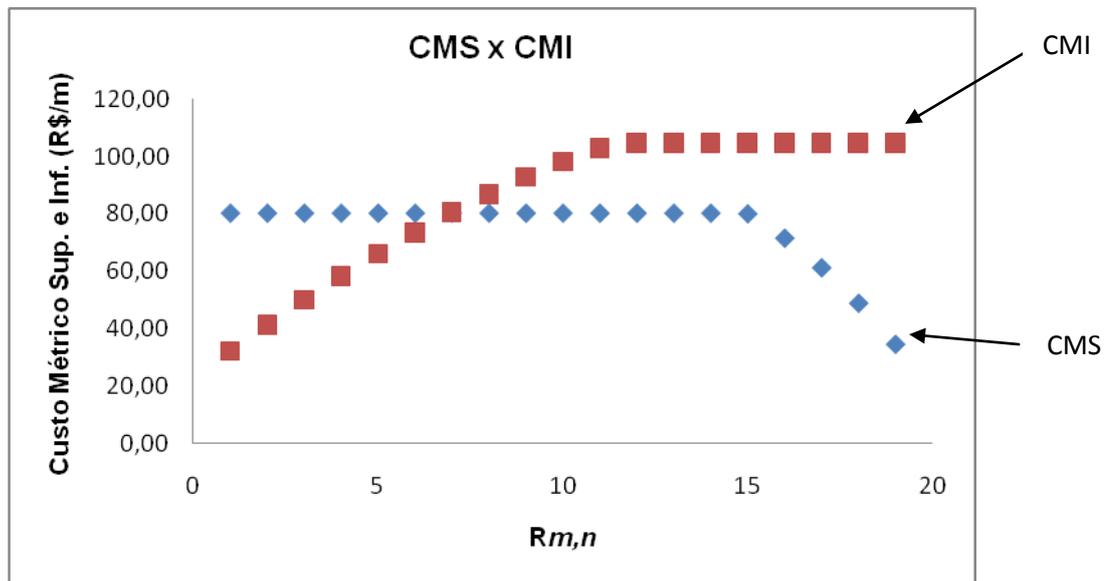


Figura 33 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

Na tabela 32 temos os resultados da diferença entre  $Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$ .

Tabela 32 – Diferença entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$

$Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$
47,98
38,87
30,16
21,86
14,00
6,59
-0,36
-6,78
-12,67
-17,98
-22,68
-24,54
-24,54
-24,54
-24,75
-33,24
-43,57
-55,96
-70,27

Com isto a menor diferença é R\$ 6,59/m. Assim sendo, temos como resultado final, os seguintes valores dos parâmetros do modelo matemático.

$$rop_{opt}^+ = 20,628 \text{ m/hr}; rop_{opt}^- = 0,795 \text{ m/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 1432 \text{ rev./min.}; rpm_{opt}^- = 1069 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{R\$ } 80,15/\text{m} \text{ e } Q_{opt}^- = \text{R\$ } 73,56/\text{m}$$

Em relação aos dados na tabela 25, observa-se que o menor valor para o limite inferior do custo métrico,  $Q_{opt,n}^- = \text{R\$ } 32,17/\text{m}$ , incorpora o menor valor do custo métrico da tabela 25, porém para  $Q_{opt}^+$  isto não acontece. Assim, ao se pegar o menor

valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e calcularmos a incerteza temos,  $\frac{32,17}{53,77} \cong 0,598$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é menor 40,2% em relação ao menor valor da tabela 25. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior valor, ou seja,  $Q_{opt}^+ = R\$80,15 / m$ , encontra-se  $\frac{80,15}{674,84} \cong 0,119$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor 88,1% em relação ao maior valor original do custo métrico da tabela 25, não englobando todos os valores da tabela.

Na tabela 33 a seguir temos os dados para os valores do  $rop_{max}$ ,  $rop_{min}$ ,  $rpm_{max}$  e  $rpm_{min}$  para serem usados como restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado levando em consideração a incerteza de 20%.

Tabela 33 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 20%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	20,132	10,216	1402	796
2	19,636	9,720	1372	766
3	19,141	9,224	1342	736
4	18,645	8,728	1311	706
5	18,149	8,232	1281	675
6	17,653	7,737	1251	645
7	17,157	7,241	1220	615
8	16,661	6,745	1190	584
9	16,166	6,249	1160	554
10	15,670	5,753	1130	524
11	15,174	5,257	1099	494
12	14,678	4,762	1069	463
13	14,182	4,266	1039	433
14	13,686	3,770	1008	403
15	13,191	3,274	978	373
16	12,695	2,778	948	342
17	12,199	2,282	918	312
18	11,703	1,787	887	282
19	11,207	1,291	857	251

A seguir, na tabela 34, o resultado do modelo determinístico baseado na incerteza de 20%.

Tabela 34 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
20,132	10,216	1402	796	20,132	1402	0,23097	0,86	86,59	87,45
19,636	9,720	1372	766	19,636	1372	0,21356	0,88	93,65	94,53
19,141	9,224	1342	736	19,141	1342	0,19903	0,90	100,49	101,39
18,645	8,728	1311	706	18,645	1311	0,18676	0,93	107,09	108,02
18,149	8,232	1281	675	18,149	1281	0,17628	0,95	113,46	114,41
17,653	7,737	1251	645	17,653	1251	0,17046	2,23	117,33	119,56
17,157	7,241	1220	615	17,157	1220	0,16833	2,39	118,81	121,20
16,661	6,745	1190	584	16,661	1190	0,16689	2,56	119,84	122,40
16,166	6,249	1160	554	16,166	1160	0,16615	2,76	120,37	123,13
15,670	5,753	1130	524	15,670	1130	0,16614	3,00	120,38	123,38
15,174	5,257	1099	494	15,174	1099	0,16690	3,28	119,83	123,12
14,678	4,762	1069	463	14,678	1069	0,16852	3,63	118,68	122,31
14,182	4,266	1039	433	14,182	1039	0,17113	4,05	116,87	120,92
13,686	3,770	1008	403	13,686	1008	0,17492	4,58	114,34	118,92
13,191	3,274	978	373	13,191	978	0,18018	5,27	111,00	116,27
12,695	2,778	948	342	12,695	948	0,18736	6,22	106,74	112,96
12,199	2,282	918	312	12,199	918	0,19717	7,57	101,44	109,00
11,703	1,787	887	282	11,703	887	0,21083	9,67	94,87	104,53
11,207	1,291	857	251	11,207	857	0,23064	13,38	86,71	100,09

#### 4.2.2 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 20%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\max,n}$  entre  $rop_{\max,1}$  até  $rop_{\max,5}$ . Mas, os resultados do  $Rop_{opt,n}$ , também, são iguais aos valores do  $rop_{\min,n}$  entre  $rop_{\min,6}$  e  $rop_{\min,19}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  vão diminuindo, o custo métrico vai aumentando entre  $n = 1$  e  $n = 10$ , depois o seu valor diminui, conforme figuras 34 e 35.

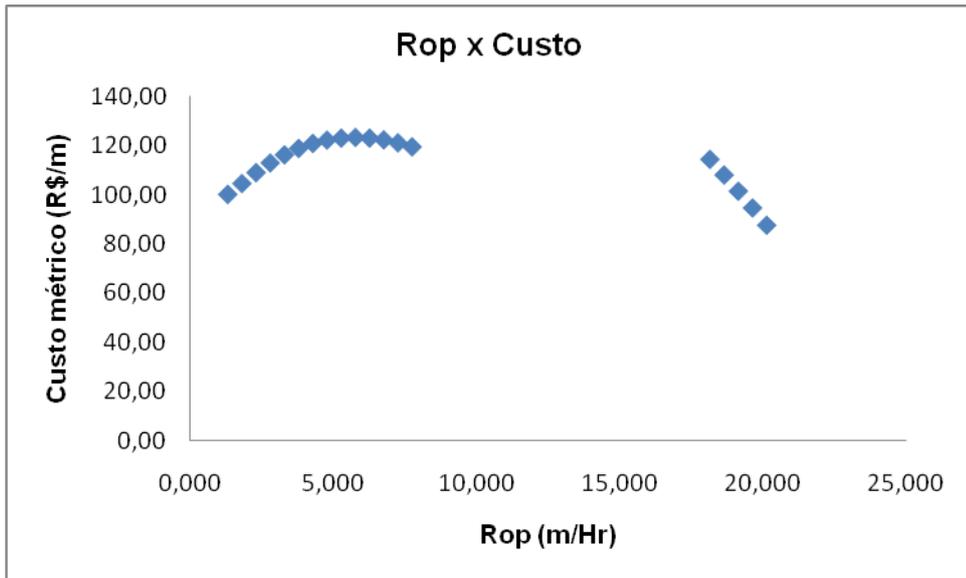


Figura 34 – Relação do rop x custo métrico total.

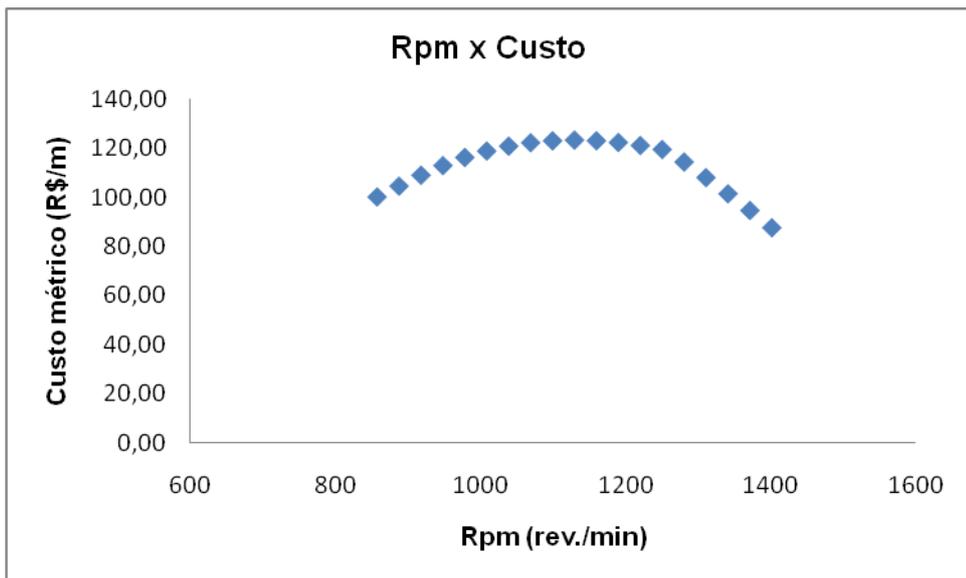


Figura 35 – Relação do rpm x custo métrico total.

Em relação a vida da broca, vê-se que o custo métrico vai diminuindo conforme a vida vai aumentando, conforme figura 36 a seguir.

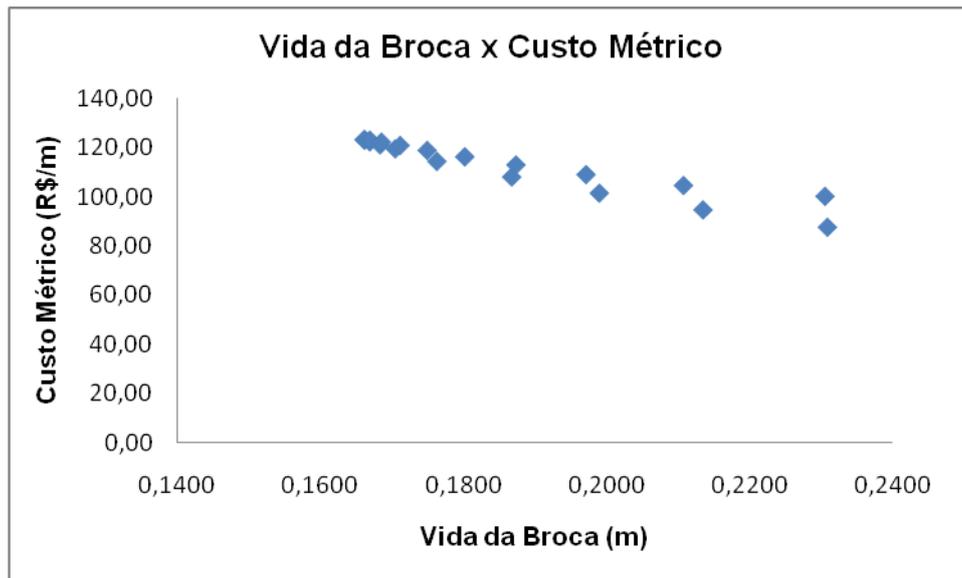


Figura 36 – Relação da vida da broca x custo métrico total.

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado é o menor custo métrico perfurado, então,  $Q_{opt} = R\$ 87,45/m$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 20,132$  m/hr,  $Rpm_{opt} = 1402$  rev./min e  $Z_{opt} = 0,23097$  m.

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  do modelo determinístico, em relação ao modelo intervalar observa-se que os seus valores se encontram dentro dos limites superior e inferior do modelo intervalar. Ver abaixo os figuras 37 e 38, respectivamente. Para os valores do  $Z_{opt,n}$ , do modelo determinístico, os seus valores se encontram abaixo do menor valor do  $Z_{opt,n}^- = 0,24109$ , ver figura 39. Por fim, os resultados do  $Q_{opt,n}$ , modelo determinístico, são maiores do que os valores do  $Q_{opt,n}^+$ , do modelo intervalar, conforme figura 40. Analisando os resultados para  $Q_{opt,n}$  em comparação aos resultados  $Q_{opt,n}^-$ , observa-se que entre  $n = 1$  e  $n = 17$ , os seus valores são maiores e entre  $n = 18$  e  $n = 19$ , apresentam valores menores.

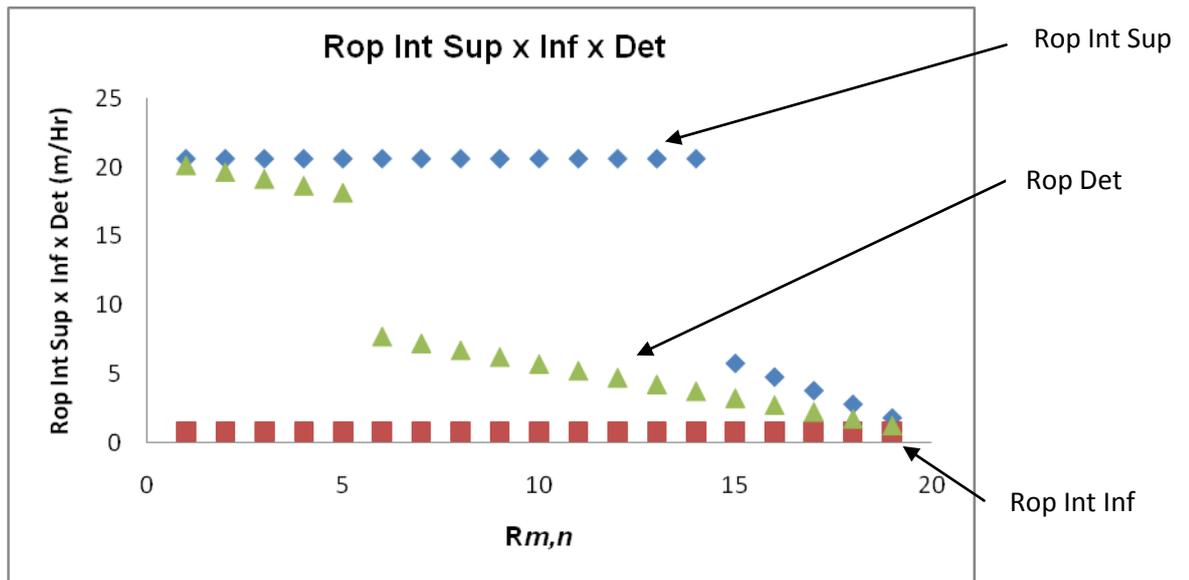


Figura 37 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico.

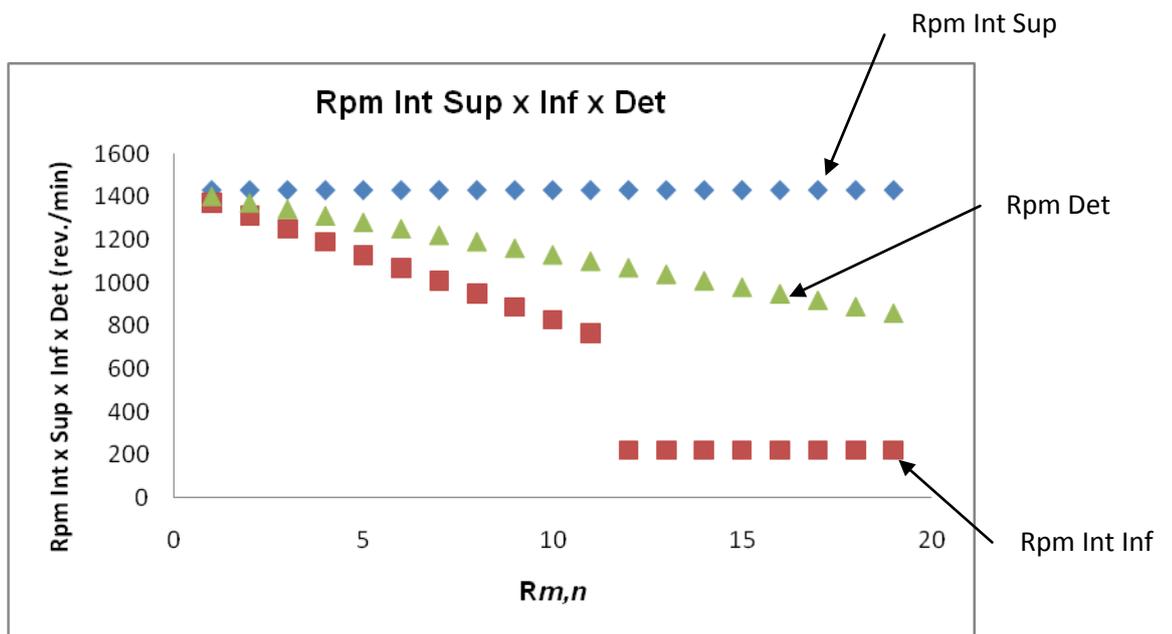


Figura 38 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico.

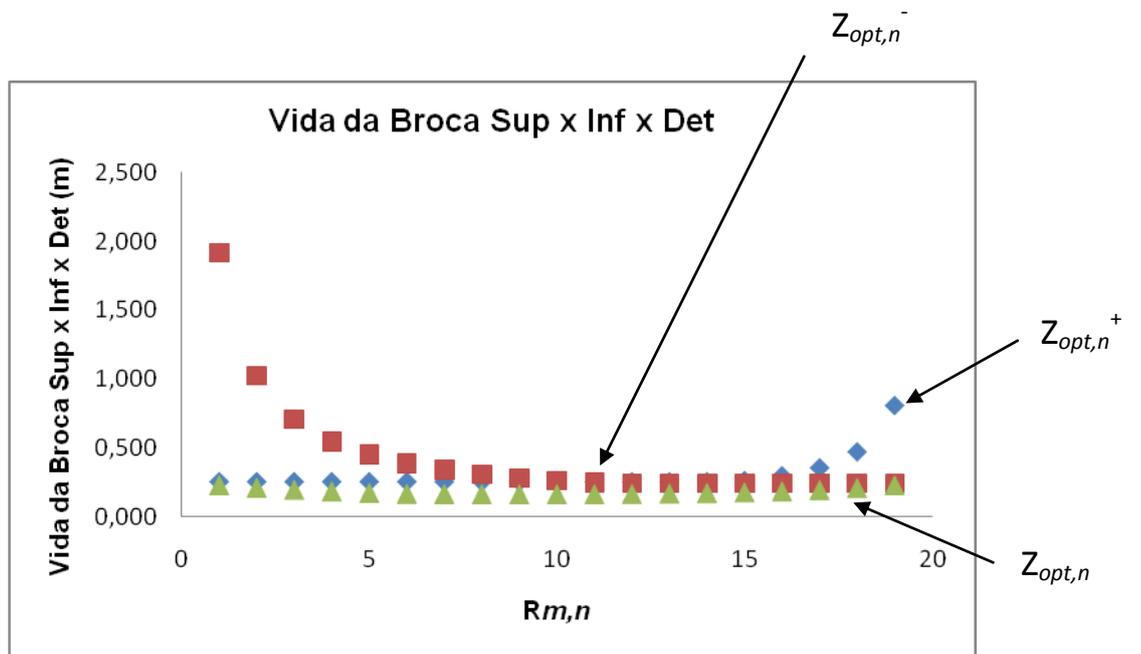


Figura 39 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico.

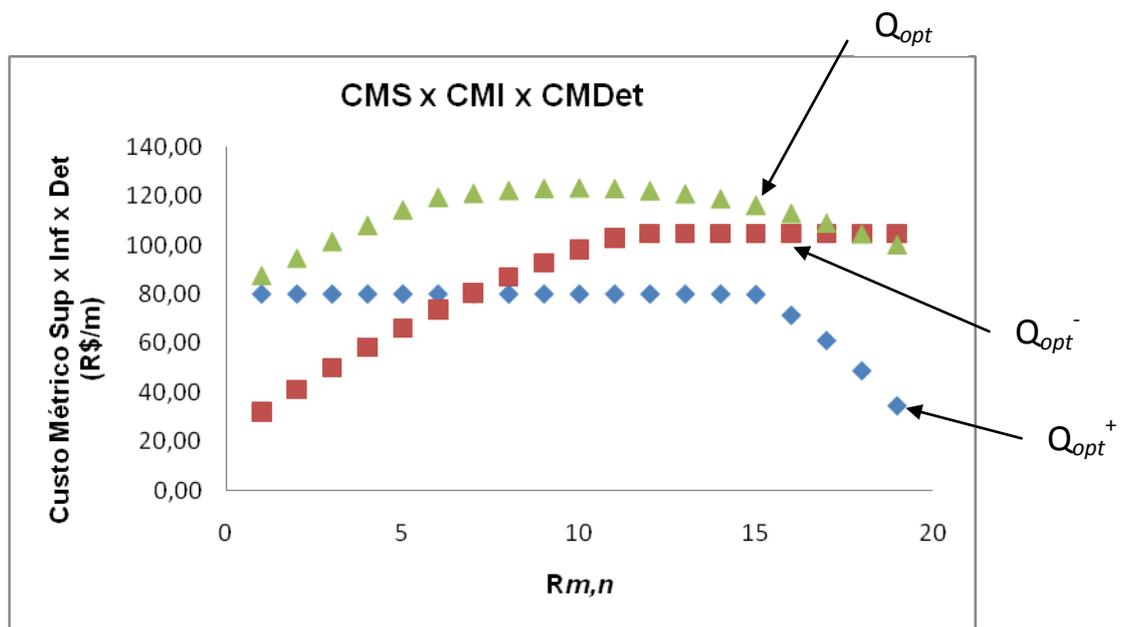


Figura 40 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico.

Na tabela 35 obtêm-se os valores dos intervalos discretizados para incerteza de 10%.

Tabela 35 – Intervalos discretizados para incerteza de 10%

$rop_{max}^+$	18,909			$rpm_{max}^+$	1313		
$rop_{min}^-$	0,867			$rpm_{min}^-$	241		
N=	20			N=	20		
l=	0,902			l=	53,594		
n=	1	R1,1	18,007	n=	1	R1,1	1259
n=	2	R1,2	17,105	n=	2	R1,2	1206
n=	3	R1,3	16,203	n=	3	R1,3	1152
n=	4	R1,4	15,301	n=	4	R1,4	1099
n=	5	R1,5	14,399	n=	5	R1,5	1045
n=	6	R1,6	13,496	n=	6	R1,6	992
n=	7	R1,7	12,594	n=	7	R1,7	938
n=	8	R1,8	11,692	n=	8	R1,8	884
n=	9	R1,9	10,790	n=	9	R1,9	831
n=	10	R1,10	9,888	n=	10	R1,10	777
n=	11	R1,11	8,986	n=	11	R1,11	724
n=	12	R1,12	8,084	n=	12	R1,12	670
n=	13	R1,13	7,182	n=	13	R1,13	616
n=	14	R1,14	6,280	n=	14	R1,14	563
n=	15	R1,15	5,378	n=	15	R1,15	509
n=	16	R1,16	4,476	n=	16	R1,16	456
n=	17	R1,17	3,574	n=	17	R1,17	402
n=	18	R1,18	2,671	n=	18	R1,18	348
n=	19	R1,19	1,769	n=	19	R1,19	295

Nas tabelas 36 e 37 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 10%.

Tabela 36 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 10%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	18,007	1259	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
2	17,105	1206	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
3	16,203	1152	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
4	15,301	1099	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
5	14,399	1045	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
6	13,496	992	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
7	12,594	938	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
8	11,692	884	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
9	10,790	831	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
10	9,888	777	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
11	8,986	724	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
12	8,084	670	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
13	7,182	616	18,909	1313	0,18916	0,91	105,73	106,64
14	6,280	563	6,280	1313	0,20133	2,75	99,34	102,09
15	5,378	509	5,378	1313	0,21734	3,21	92,02	95,23
16	4,476	456	4,476	1313	0,24062	3,86	83,12	86,98
17	3,574	402	3,574	1313	0,27658	4,83	72,31	77,14
18	2,671	348	2,671	1313	0,33831	6,46	59,12	65,58
19	1,769	295	1,769	1313	0,46832	9,76	42,71	52,47

Tabela 37 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 10%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	18,007	1259	0,867	1259	0,68808	19,91	29,07	48,98
2	17,105	1206	0,867	1206	0,54817	19,91	36,49	56,40
3	16,203	1152	0,867	1152	0,45902	19,91	43,57	63,48
4	15,301	1099	0,867	1099	0,39754	19,91	50,31	70,22
5	14,399	1045	0,867	1045	0,35285	19,91	56,68	76,59
6	13,496	992	0,867	992	0,31913	19,91	62,67	82,58
7	12,594	938	0,867	938	0,29302	19,91	68,26	88,17
8	11,692	884	0,867	884	0,27243	19,91	73,41	93,33
9	10,790	831	0,867	831	0,25602	19,91	78,12	98,03
10	9,888	777	0,867	777	0,24289	19,91	82,34	102,25
11	8,986	724	0,867	724	0,23242	19,91	86,05	105,96
12	8,084	670	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
13	7,182	616	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
14	6,280	563	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
15	5,378	509	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
16	4,476	456	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
17	3,574	402	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
18	2,671	348	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79
19	1,769	295	0,867	241	0,23020	19,91	86,88	106,79

#### 4.2.3 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 10%

Analisando os dados da tabela 36 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 18,909$ , entre  $n = 1$  e  $n = 13$ . Entre  $n = 14$  e  $n = 19$ , os seus valores são iguais aos valores dos  $R_{rop,n}$ . Os valores dos  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rpm_{max}^+ = 1313$ . Em relação aos dados da tabela 37, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rop_{min}^- = 0,867$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,11}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 35. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 41 e 42 respectivamente.

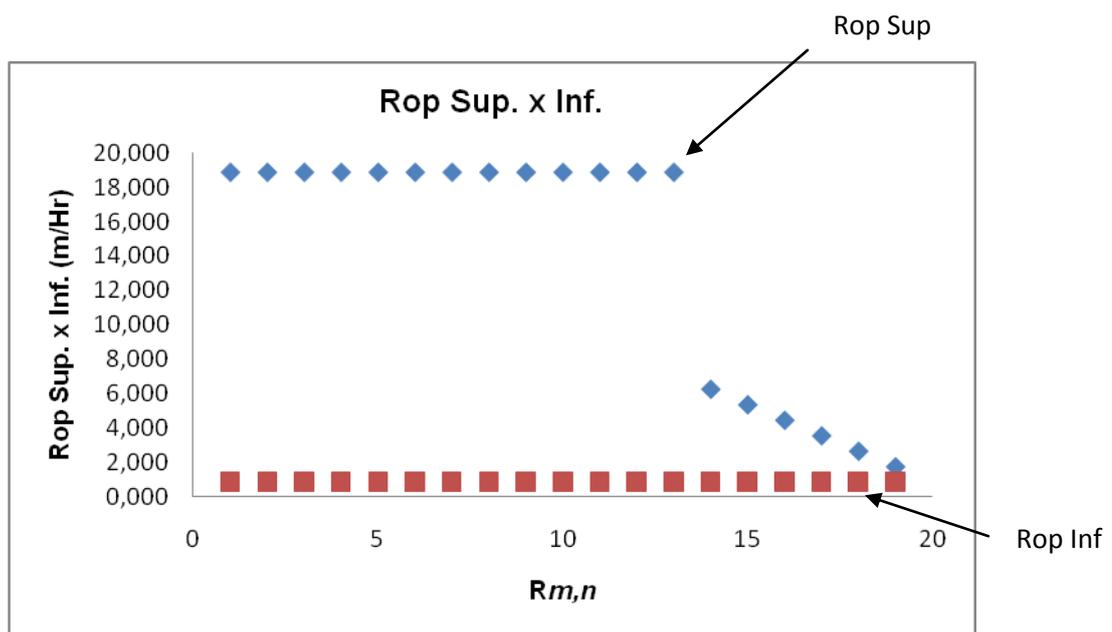


Figura 41 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

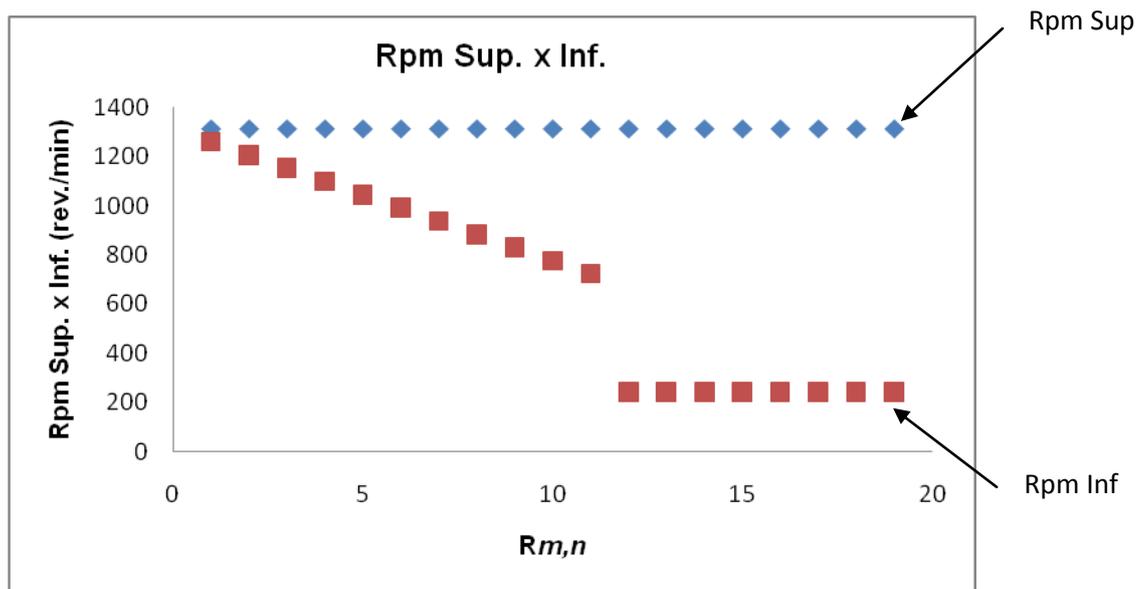


Figura 42 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Também, os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são menores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , entre  $n = 1$  e  $n = 15$ , já entre  $n = 16$  e  $n = 19$ , os valores de  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 43.

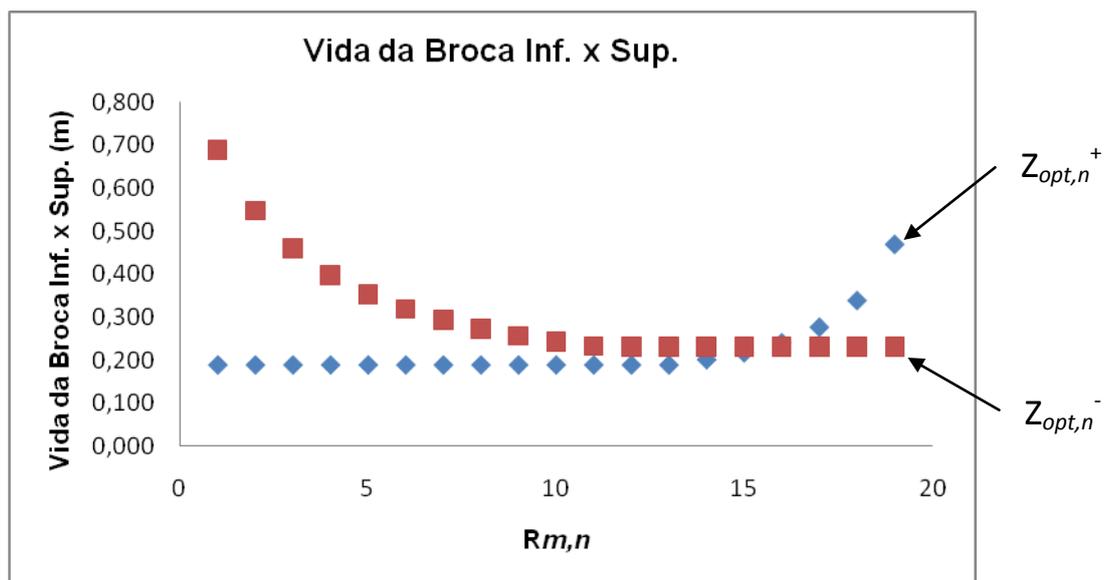


Figura 43 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

Os resultados anteriormente descritos estão, em parte, de acordo com os teoremas apresentados em WU *et al* (2006). Assim, o  $CMI_{cnc,n}$  é maior do que o  $CMS_{cnc,n}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  é menor do que o  $CMS_{broca,n}$  entre  $n = 1$  e  $n = 5$ . Mas, para  $n = 16$  até  $n = 19$ , os valores do  $CMI_{broca,n}$  são menores do que  $CMS_{broca,n}$ . Contudo, vê-se que  $Q_{opt,n}^+$  (CMS) é maior do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), para  $n = 1$  até  $n = 11$  e menor do que  $Q_{opt,n}^-$  para  $n = 12$  até  $n = 19$ , conforme figura 44.

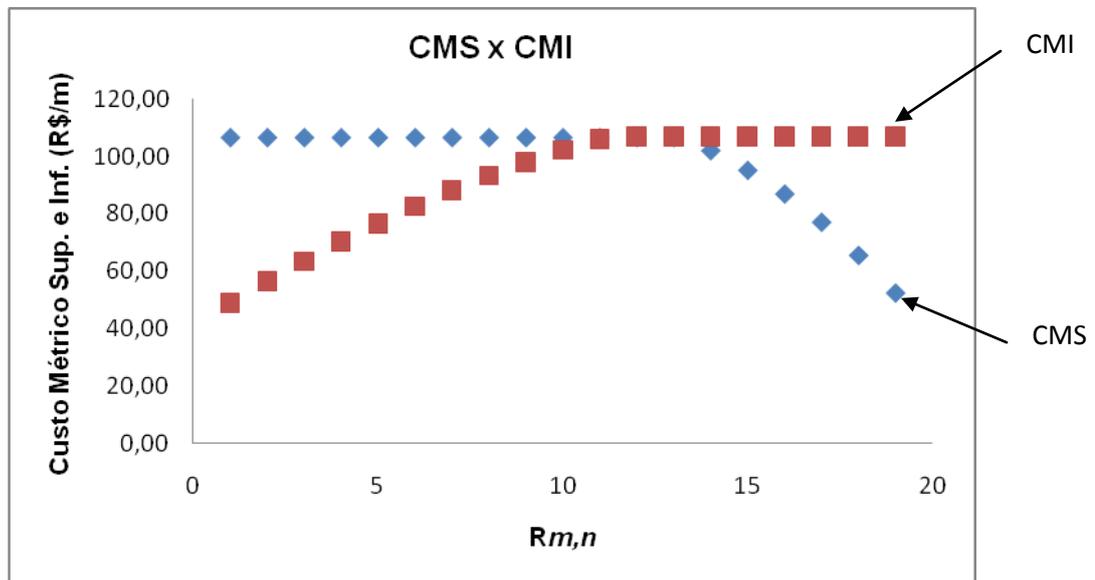


Figura 44 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado da otimização é a menor diferença entre  $Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$ , conforme tabela 38.

Tabela 38 – Diferença entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$

$Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$
57,66
50,24
43,16
36,42
30,05
24,06
18,47
13,32
8,61
4,39
0,68
-0,15
-0,15
-4,71
-11,56
-19,82
-29,65
-41,21
-54,33

Baseado neste critério a menor diferença é R\$ 0,68/m. Assim sendo, temos como resultado final, os seguintes valores dos parâmetros do modelo matemático.

$$rop_{opt}^+ = 18,909 \text{ m/hr}; \quad rop_{opt}^- = 0,867 \text{ m/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 1313 \text{ rev./min.}; \quad rpm_{opt}^- = 724 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{R\$ } 106,64/\text{m} \text{ e } Q_{opt}^- = \text{R\$ } 105,96/\text{m}$$

Em relação aos dados na tabela 25, observa-se que o menor valor para o limite inferior do custo métrico  $Q_{opt,n}^- = \text{R\$}48,98/\text{m}$  incorpora o menor valor do custo métrico na tabela 25, porém para  $Q_{opt,n}^+$  isto não acontece. Assim, ao se pegar o menor valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e

calcularmos temos,  $\frac{48,98}{53,77} \cong 0,911$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é menor 8,9% em relação ao menor valor da tabela 25. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior valor, ou seja,  $Q_{opt,n}^+ = R\$106,64$  encontra-se  $\frac{106,64}{674,84} \cong 0,158$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor 84,2% em relação ao maior valor original do custo métrico na tabela 25.

Na tabela 39 a seguir temos os dados para os valores do  $rop_{max}$ ,  $rop_{min}$ ,  $rpm_{max}$  e  $rpm_{min}$  para serem usados como restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado levando em consideração a incerteza de 10%.

Tabela 39 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 10%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	18,458	9,437	1286	750
2	18,007	8,986	1259	724
3	17,556	8,535	1233	697
4	17,105	8,084	1206	670
5	16,654	7,633	1179	643
6	16,203	7,182	1152	616
7	15,752	6,731	1125	590
8	15,301	6,280	1099	563
9	14,850	5,829	1072	536
10	14,399	5,378	1045	509
11	13,948	4,927	1018	482
12	13,496	4,476	992	456
13	13,045	4,025	965	429
14	12,594	3,574	938	402
15	12,143	3,122	911	375
16	11,692	2,671	884	348
17	11,241	2,220	858	322
18	10,790	1,769	831	295
19	10,339	1,318	804	268

A seguir, na tabela 40, o resultado do modelo determinístico baseado na incerteza de 10%.

Tabela 40 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
18,458	9,437	1286	750	18,458	1286	0,17938	0,94	111,50	112,43
18,007	8,986	1259	724	18,007	1259	0,17084	0,96	117,07	118,03
17,556	8,535	1233	697	17,556	1233	0,16334	0,98	122,44	123,42
17,105	8,084	1206	670	8,084	1206	0,15971	2,14	125,23	127,36
16,654	7,633	1179	643	7,633	1179	0,15802	2,26	126,56	128,83
16,203	7,182	1152	616	7,182	1152	0,15681	2,40	127,54	129,94
15,752	6,731	1125	590	6,731	1125	0,15609	2,57	128,13	130,70
15,301	6,280	1099	563	6,280	1099	0,15586	2,75	128,32	131,07
14,850	5,829	1072	536	5,829	1072	0,15616	2,96	128,07	131,04
14,399	5,378	1045	509	5,378	1045	0,15702	3,21	127,37	130,58
13,948	4,927	1018	482	4,927	1018	0,15850	3,51	126,18	129,69
13,496	4,476	992	456	4,476	992	0,16069	3,86	124,46	128,32
13,045	4,025	965	429	4,025	965	0,16371	4,29	122,16	126,46
12,594	3,574	938	402	3,574	938	0,16773	4,83	119,24	124,07
12,143	3,122	911	375	3,122	911	0,17299	5,53	115,61	121,14
11,692	2,671	884	348	2,671	884	0,17985	6,46	111,20	117,67
11,241	2,220	858	322	2,220	858	0,18889	7,78	105,88	113,66
10,790	1,769	831	295	1,769	831	0,20101	9,76	99,50	109,26
10,339	1,318	804	268	1,318	804	0,21789	13,10	91,79	104,89

#### 4.2.4 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 10%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\max,n}$  entre  $rop_{\max,1}$  até  $rop_{\max,3}$ . Porém, os resultados do  $Rop_{opt,n}$ , também, são iguais aos valores do  $rop_{\min,n}$  entre  $rop_{\min,4}$  até  $rop_{\min,19}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  vão diminuindo o custo métrico vai aumentando para  $n = 1$  até  $n = 8$  e depois os seus valores diminuem, conforme figuras 45 e 46, respectivamente.

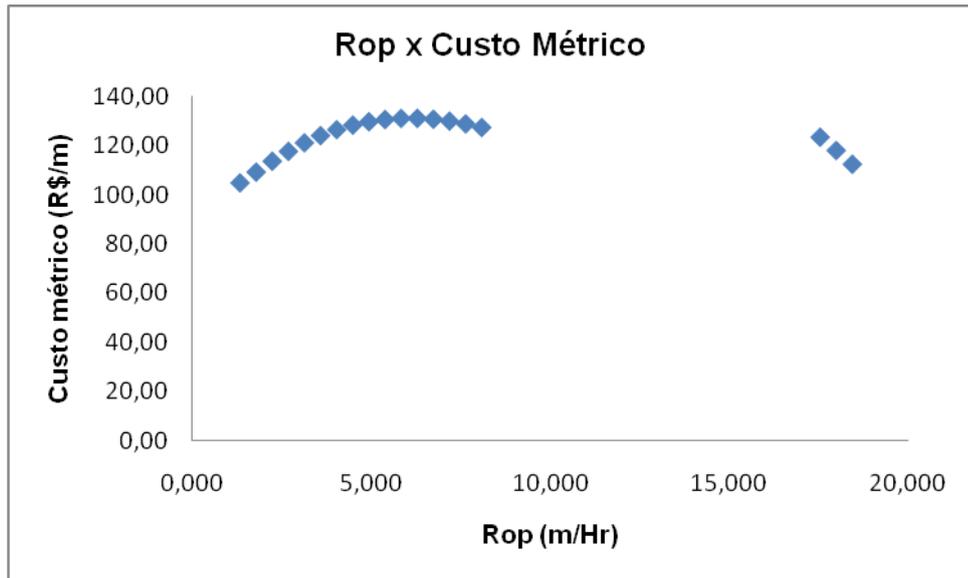


Figura 45 – Relação entre rop x custo métrico total.

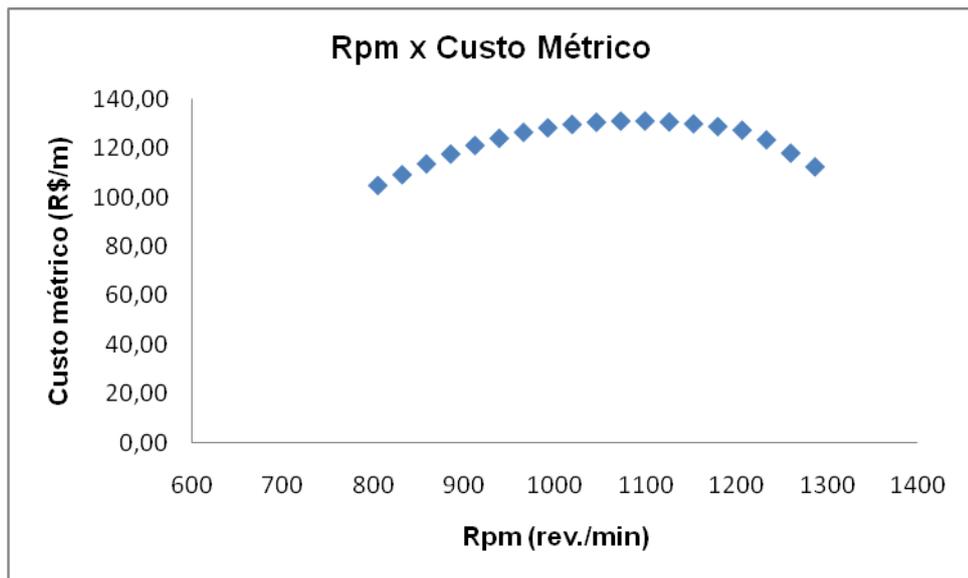


Figura 46 – Relação entre rpm x custo métrico total.

Para os valores do  $Z_{opt,n}$  observa-se que quando os seus valores aumentam o valor do custo métrico diminuem, conforme figura 47 abaixo.

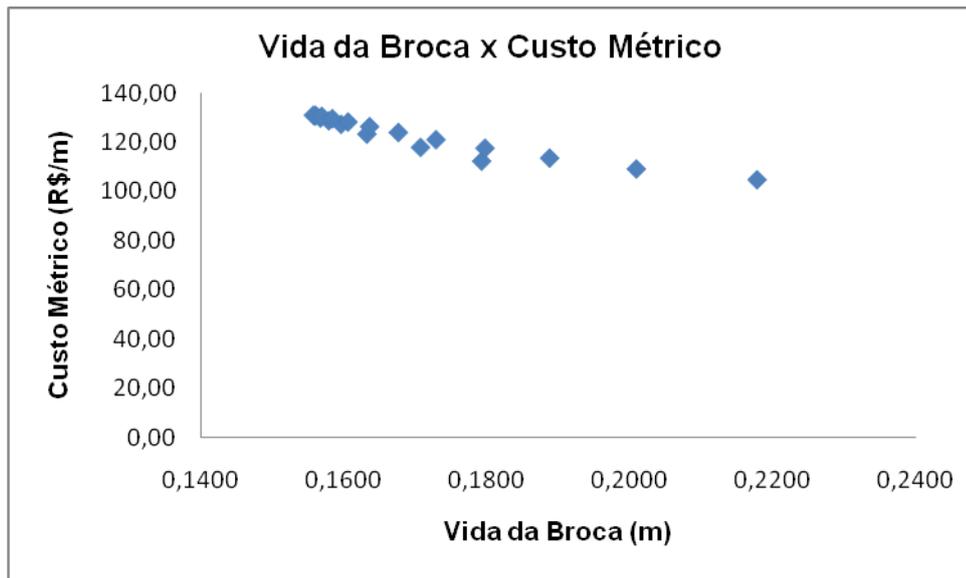


Figura 47 – Relação da vida da broca x custo métrico total.

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado é o menor custo métrico perfurado, então,  $Q_{opt} = R\$ 104,89/m$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 1,318 \text{ m/hr}$ ,  $Rpm_{opt} = 804 \text{ rev./min}$  e  $Z_{opt} = 0,21789 \text{ m}$ .

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$  do modelo determinístico, em relação ao modelo intervalar observa-se que os seus valores se encontram dentro dos limites superior e inferior do modelo intervalar, ver figura 48. O raciocínio é o mesmo para  $Rpm_{opt,n}$  do modelo determinístico, ver figura 49. Para os valores do  $Z_{opt,n}$ , do modelo determinístico, os seus valores se encontram abaixo do menor valor do  $Z_{opt,n}^- = 0,23020$ , ver figura 50. Por fim, os resultados do  $Q_{opt,n}$ , modelo determinístico, são maiores do que os valores do  $Q_{opt,n}^+$ , do modelo intervalar, conforme figura 51. Analisando os resultados para  $Q_{opt,n}$  em comparação aos resultados  $Q_{opt,n}^-$ , observa-se que entre  $n = 1$  e  $n = 18$ , os seus valores são maiores e em  $n = 19$ , apresenta valor menor.

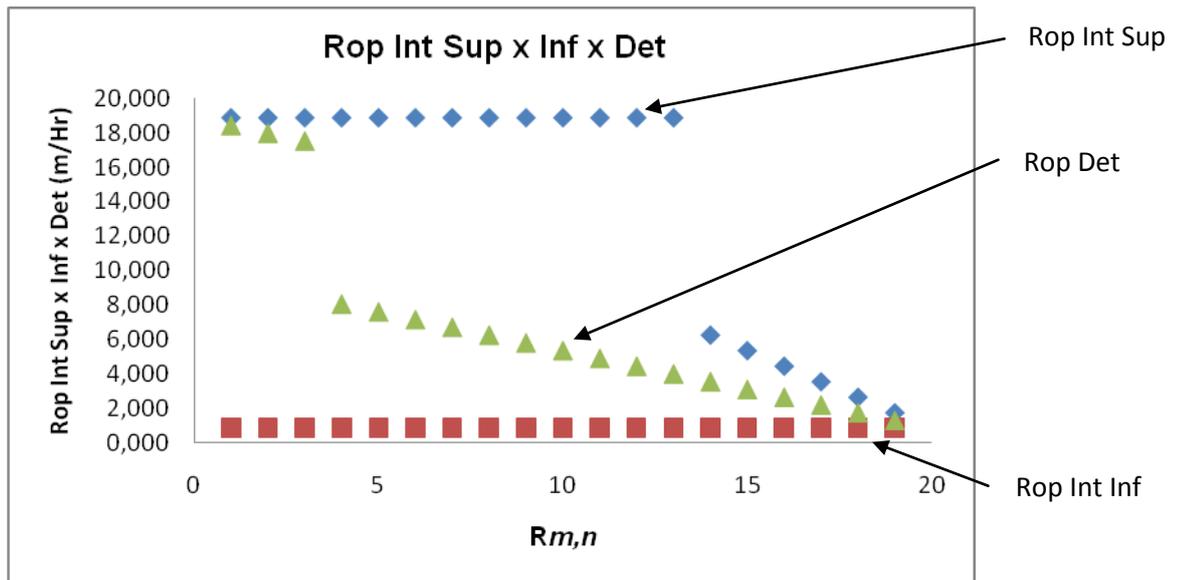


Figura 48 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico.

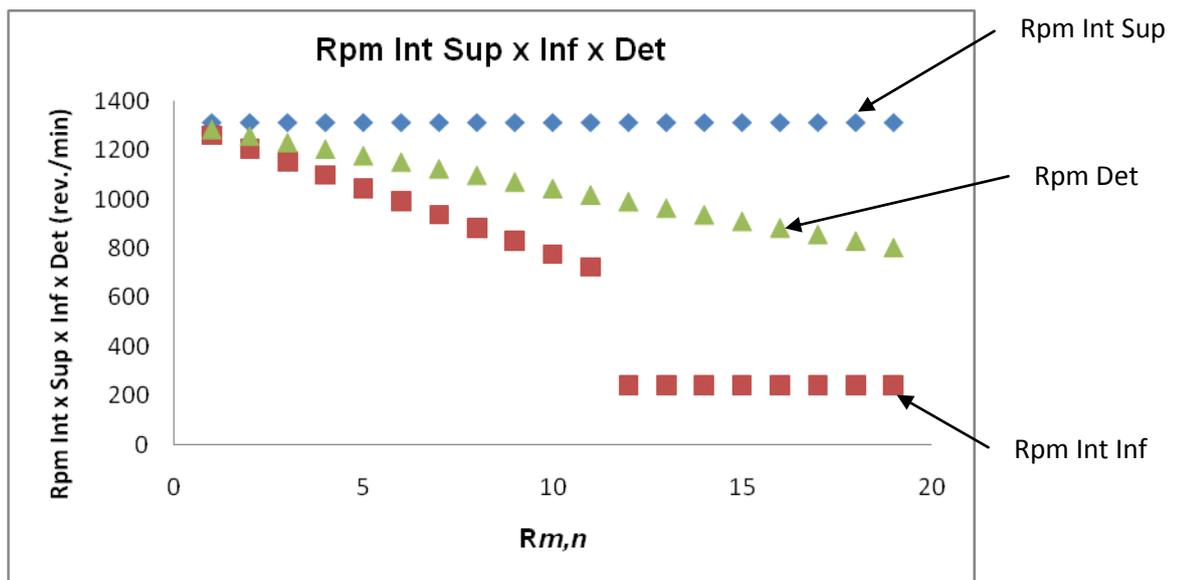


Figura 49 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico.

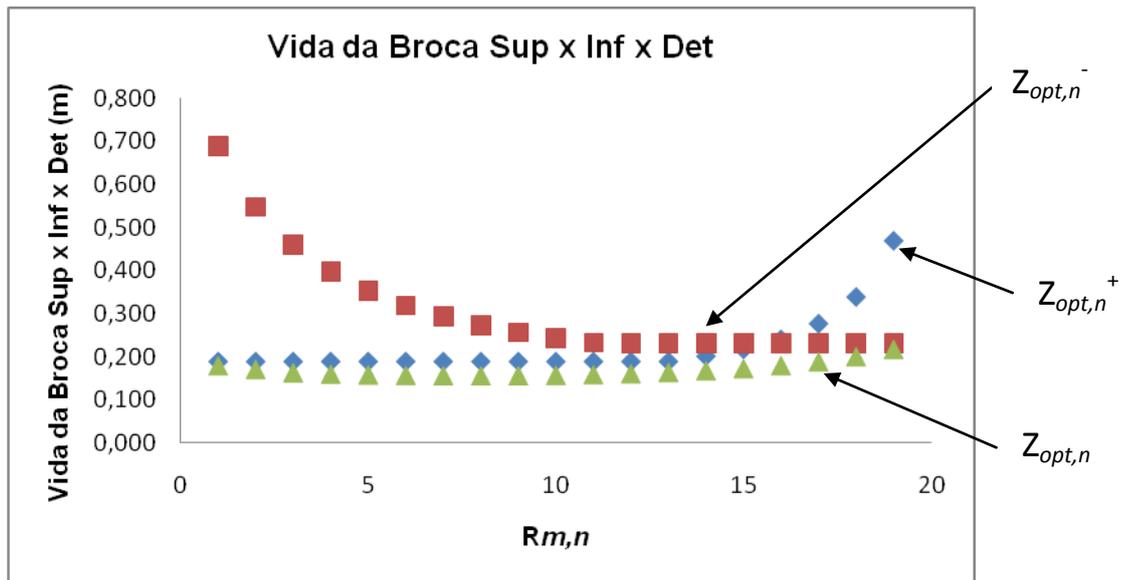


Figura 50 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico.

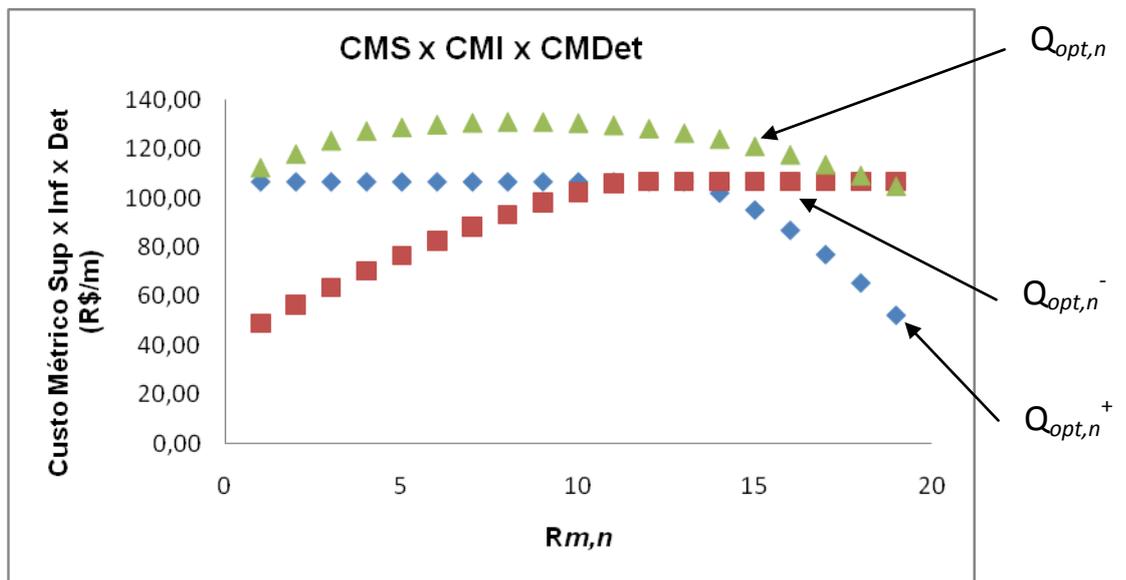


Figura 51 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico.

Dando seqüência ao exemplo, na tabela 41 observa-se os valores dos intervalos discretizados para incerteza de 1%.

Tabela 41 – Intervalos discretizados para incerteza de 1%

$rop_{\max}^+$	17,362			$rpm_{\max}^+$	1206		
$rop_{\min}^-$	0,945			$rpm_{\min}^-$	263		
N=	20			N=	20		
l=	0,821			l=	47,148		
n=	1	R1,1	16,541	n=	1	R1,1	1158
n=	2	R1,2	15,720	n=	2	R1,2	1111
n=	3	R1,3	14,899	n=	3	R1,3	1064
n=	4	R1,4	14,078	n=	4	R1,4	1017
n=	5	R1,5	13,258	n=	5	R1,5	970
n=	6	R1,6	12,437	n=	6	R1,6	923
n=	7	R1,7	11,616	n=	7	R1,7	876
n=	8	R1,8	10,795	n=	8	R1,8	828
n=	9	R1,9	9,974	n=	9	R1,9	781
n=	10	R1,10	9,153	n=	10	R1,10	734
n=	11	R1,11	8,332	n=	11	R1,11	687
n=	12	R1,12	7,511	n=	12	R1,12	640
n=	13	R1,13	6,691	n=	13	R1,13	593
n=	14	R1,14	5,870	n=	14	R1,14	546
n=	15	R1,15	5,049	n=	15	R1,15	498
n=	16	R1,16	4,228	n=	16	R1,16	451
n=	17	R1,17	3,407	n=	17	R1,17	404
n=	18	R1,18	2,586	n=	18	R1,18	357
n=	19	R1,19	1,765	n=	19	R1,19	310

Nas tabelas 42 e 43 são apresentados os resultados do modelo intervalar superior e inferior para a incerteza de 1%.

Tabela 42 – Resultados do modelo intervalar superior para incerteza de 1%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Z_{opt,n}^+$	$CMS_{sonda,n}$	$CMS_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^+$
1	16,541	1158	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
2	15,720	1111	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
3	14,899	1064	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
4	14,078	1017	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
5	13,258	970	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
6	12,437	923	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
7	11,616	876	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
8	10,795	828	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
9	9,974	781	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
10	9,153	734	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
11	8,332	687	17,362	1206	0,15772	0,99	126,80	127,80
12	7,511	640	7,511	1206	0,16345	2,30	122,36	124,66
13	6,691	593	6,691	1206	0,17036	2,58	117,40	119,98
14	5,870	546	5,870	1206	0,17956	2,94	111,38	114,32
15	5,049	498	5,049	1206	0,19201	3,42	104,16	107,58
16	4,228	451	4,228	1206	0,20932	4,08	95,55	99,63
17	3,407	404	3,407	1206	0,23456	5,07	85,27	90,34
18	2,586	357	2,586	1206	0,27430	6,68	72,91	79,59
19	1,765	310	1,765	1206	0,34593	9,78	57,82	67,60

Tabela 43 – Resultados do modelo intervalar inferior para incerteza de 1%

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Z_{opt,n}^-$	$CMI_{sonda,n}$	$CMI_{broca,n}$	$Q_{opt,n}^-$
1	16,541	1158	0,945	1158	0,44561	18,28	44,88	63,17
2	15,720	1111	0,945	1111	0,39320	18,28	50,86	69,15
3	14,899	1064	0,945	1064	0,35356	18,28	56,57	74,85
4	14,078	1017	0,945	1017	0,32269	18,28	61,98	80,26
5	13,258	970	0,945	970	0,29813	18,28	67,08	85,37
6	12,437	923	0,945	923	0,27827	18,28	71,87	90,16
7	11,616	876	0,945	876	0,26205	18,28	76,32	94,61
8	10,795	828	0,945	828	0,24870	18,28	80,42	98,70
9	9,974	781	0,945	781	0,23769	18,28	84,14	102,43
10	9,153	734	0,945	734	0,22865	18,28	87,47	105,75
11	8,332	687	0,945	687	0,22130	18,28	90,38	108,66
12	7,511	640	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
13	6,691	593	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
14	5,870	546	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
15	5,049	498	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
16	4,228	451	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
17	3,407	404	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
18	2,586	357	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03
19	1,765	310	0,945	263	0,22039	18,28	90,75	109,03

#### 4.2.5 – Análise dos resultados do modelo intervalar para incerteza de 1%

Analisando os dados da tabela 42 observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rop_{max}^+ = 17,362$ , entre  $n = 1$  e  $n = 11$ . Entre  $n = 12$  e  $n = 19$ , os seus valores são iguais aos valores dos  $R_{rop,n}$ . Os valores dos  $Rpm_{opt,n}^+$  são iguais aos valores do  $rpm_{max}^+ = 1206$ . Em relação aos dados da tabela 43, os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rop_{min}^- = 0,945$ . Para os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , eles são iguais aos valores do  $R_{rpm,1}$  até o  $R_{rpm,11}$  e depois os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  são iguais aos valores do  $rpm_{min}^-$  referente a tabela 41. Observa-se que os valores do  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^+$  são maiores do que os do  $Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ , conforme figuras 52 e 53 respectivamente.

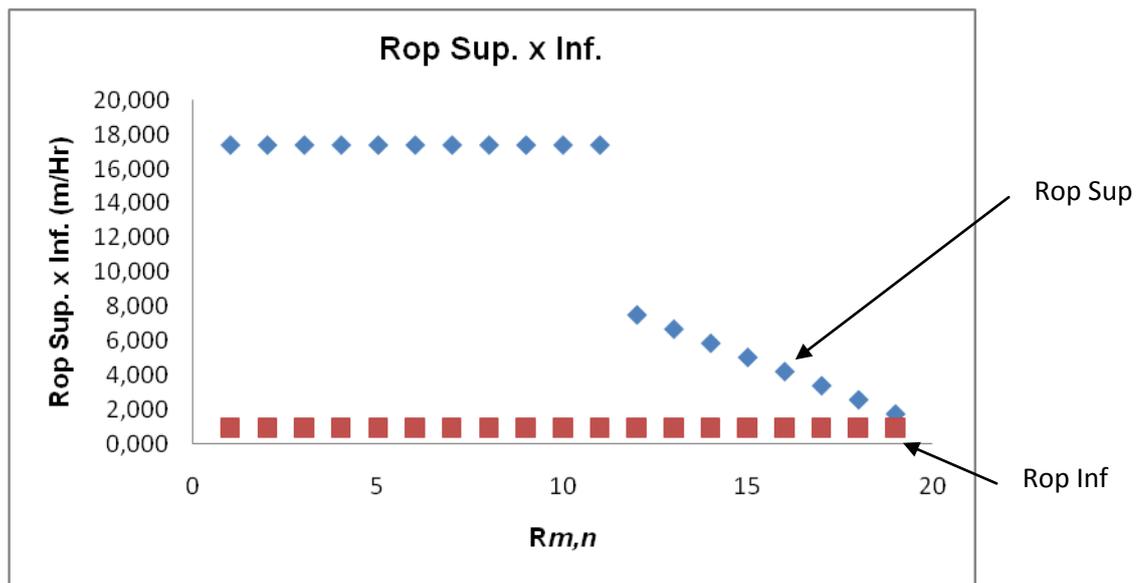


Figura 52 – Comparação dos valores entre  $Rop_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ .

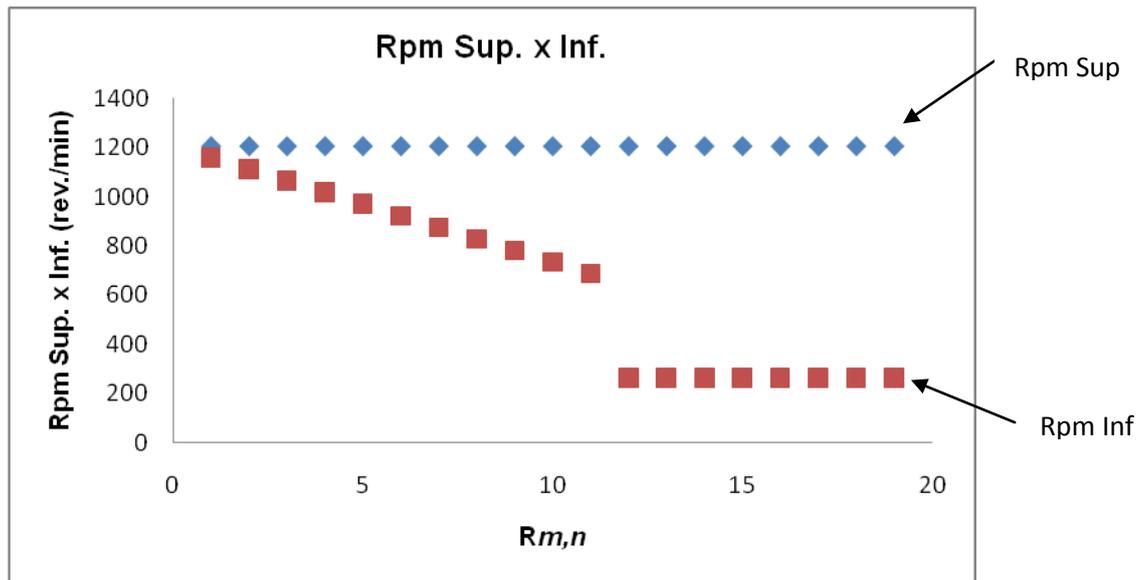


Figura 53 - Comparação dos valores entre  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

Também, os valores da vida da broca  $Z_{opt,n}^+$  são menores do que do  $Z_{opt,n}^-$ , entre  $n = 1$  e  $n = 16$ , já entre  $n = 17$  e  $n = 19$ , os valores de  $Z_{opt,n}^+$  são maiores do que  $Z_{opt,n}^-$ , conforme figura 54.

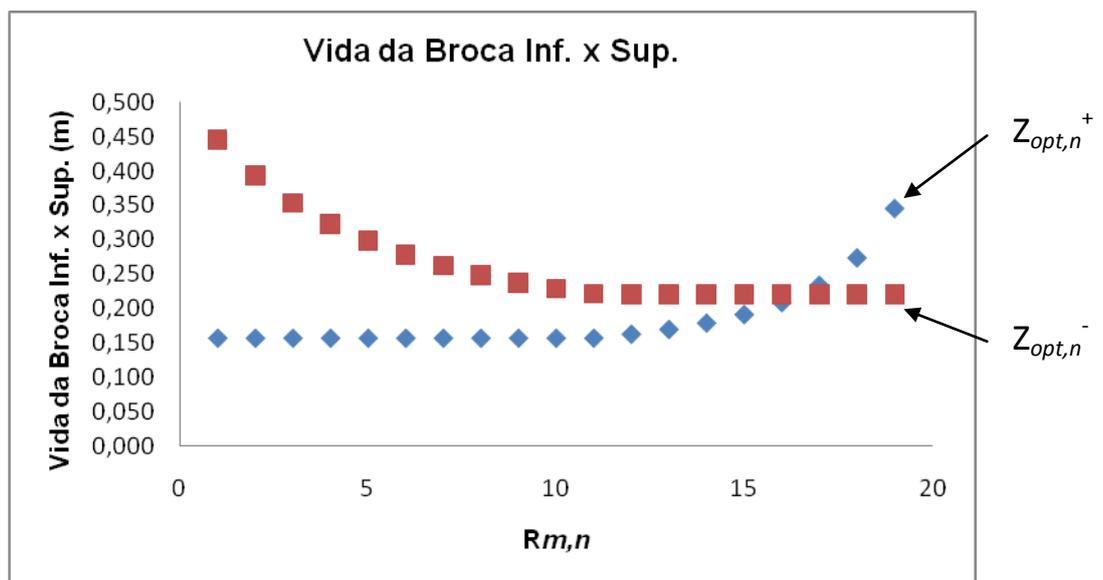


Figura 54 – Comparação dos valores entre  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$ .

Os resultados anteriormente descritos estão, em parte, de acordo com os teoremas apresentados em WU *et al* (2006). Assim, o  $CMI_{cnc,n}$  é maior do que o  $CMS_{cnc,n}$ . Da mesma forma,  $CMI_{broca,n}$  é menor do que o  $CMS_{broca,n}$  entre  $n = 1$  e  $n = 16$ . Já para  $n = 17$  até  $n = 19$ , os valores do  $CMI_{broca,n}$  são maiores do que  $CMS_{broca,n}$ . Em relação ao  $Q_{opt,n}^+$  (CMS), os seus valores são maiores do que  $Q_{opt,n}^-$  (CMI), para  $n = 1$  até  $n = 14$  e menores do que  $Q_{opt,n}^-$  entre  $n = 15$  e  $n = 19$ , conforme Figura 55.

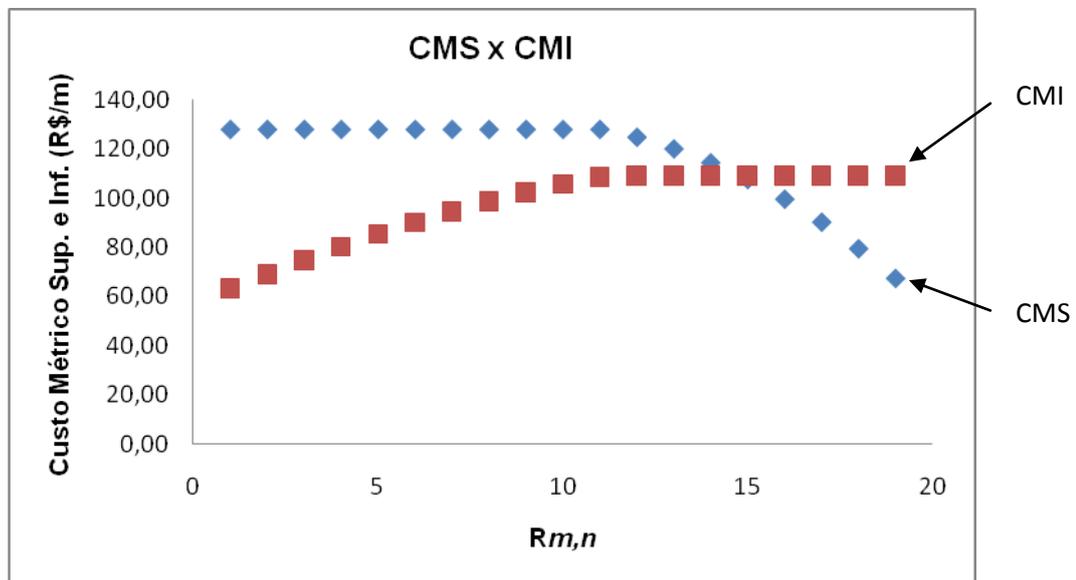


Figura 55 - Comparação dos valores entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$ .

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado da otimização é a menor diferença entre  $Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$ , conforme tabela 44.

Tabela 44 – Diferença entre  $Q_{opt,n}^+$  e  $Q_{opt,n}^-$

$Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$
64,63
58,65
52,95
47,54
42,43
37,64
33,19
29,10
25,37
22,04
19,14
15,63
10,95
5,29
-1,45
-9,40
-18,70
-29,44
-41,44

Baseado neste critério a menor diferença é R\$ 5,29/m. Assim sendo, tem-se como resultado final, os seguintes valores dos parâmetros do modelo matemático.

$$rop_{opt}^+ = 5,870 \text{ m/hr}; rop_{opt}^- = 0,945 \text{ m/hr};$$

$$rpm_{opt}^+ = 1206 \text{ rev./min.}; rpm_{opt}^- = 263 \text{ rev./min.};$$

$$Q_{opt}^+ = \text{R\$ } 114,32/\text{m} \text{ e } Q_{opt}^- = \text{R\$ } 109,03/\text{m}$$

Em relação aos dados na tabela 25, observa-se que o menor valor para o limite inferior do custo métrico  $Q_{opt,n}^- = \text{R\$}63,17 / m$  é maior do que o menor valor do custo métrico na tabela 25, e da mesma forma que o maior valor do  $Q_{opt,n}^+$ , também, é muito menor do que o maior valor do  $Q$  na tabela 25. Assim, ao se pegar o menor valor do custo métrico intervalar em relação ao menor valor da tabela do custo métrico e

calcularmos temos,  $\frac{63,17}{53,77} \cong 1,175$ , ou seja, o custo métrico inferior intervalar é maior 17,5% em relação ao menor valor da tabela 25. Fazendo o mesmo raciocínio para o maior valor, encontra-se  $\frac{127,80}{674,84} \cong 0,189$ , ou seja, o custo métrico superior intervalar é menor 81,1% em relação ao maior valor original do custo métrico na tabela 25. Neste caso, o modelo intervalar não incorpora todos os valores da tabela 25.

Na tabela 45 a seguir temos os dados para os valores do  $rop_{\max}$ ,  $rop_{\min}$ ,  $rpm_{\max}$  e  $rpm_{\min}$  para serem usados como restrições do modelo matemático não linear determinístico do custo métrico perfurado levando em consideração a incerteza de 1%.

Tabela 45 – Limites das restrições para o modelo determinístico para incerteza de 1%

$n$	$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$
1	16,951	8,743	1182	711
2	16,541	8,332	1158	687
3	16,131	7,922	1135	663
4	15,720	7,511	1111	640
5	15,310	7,101	1088	616
6	14,899	6,691	1064	593
7	14,489	6,280	1041	569
8	14,078	5,870	1017	546
9	13,668	5,459	993	522
10	13,258	5,049	970	498
11	12,847	4,638	946	475
12	12,437	4,228	923	451
13	12,026	3,818	899	428
14	11,616	3,407	876	404
15	11,205	2,997	852	381
16	10,795	2,586	828	357
17	10,385	2,176	805	333
18	9,974	1,765	781	310
19	9,564	1,355	758	286

A seguir, na tabela 46, o resultado do modelo determinístico baseado na incerteza de 1%.

Tabela 46 – Resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%

$rop_{\max,n}$	$rop_{\min,n}$	$rpm_{\max,n}$	$rpm_{\min,n}$	$Rop_{opt,n}$	$Rpm_{opt,n}$	$Z_{opt,n}$	$CM_{sonda,n}$	$CM_{broca,n}$	$Q_{opt,n}$
16,951	8,743	1182	711	8,743	1182	0,15240	1,98	131,23	133,21
16,541	8,332	1158	687	8,332	1158	0,15079	2,07	132,63	134,71
16,131	7,922	1135	663	7,922	1135	0,14952	2,18	133,76	135,94
15,720	7,511	1111	640	7,511	1111	0,14860	2,30	134,59	136,89
15,310	7,101	1088	616	7,101	1088	0,14801	2,43	135,12	137,56
14,899	6,691	1064	593	6,691	1064	0,14778	2,58	135,33	137,92
14,489	6,280	1041	569	6,280	1041	0,14792	2,75	135,21	137,96
14,078	5,870	1017	546	5,870	1017	0,14845	2,94	134,73	137,67
13,668	5,459	993	522	5,459	993	0,14940	3,16	133,87	137,04
13,258	5,049	970	498	5,049	970	0,15081	3,42	132,62	136,04
12,847	4,638	946	475	4,638	946	0,15275	3,72	130,93	134,66
12,437	4,228	923	451	4,228	923	0,15529	4,08	128,79	132,87
12,026	3,818	899	428	3,818	899	0,15855	4,52	126,15	130,67
11,616	3,407	876	404	3,407	876	0,16266	5,07	122,96	128,03
11,205	2,997	852	381	2,997	852	0,16783	5,76	119,17	124,93
10,795	2,586	828	357	2,586	828	0,17437	6,68	114,70	121,38
10,385	2,176	805	333	2,176	805	0,18271	7,94	109,46	117,40
9,974	1,765	781	310	1,765	781	0,19356	9,78	103,33	113,11
9,564	1,355	758	286	1,355	758	0,20812	12,75	96,10	108,84

#### 4.2.6 – Análise dos resultados do modelo determinístico para incerteza de 1%

Os resultados obtidos para o  $Rop_{opt,n}$  são iguais aos valores do  $rop_{\min,n}$  entre  $rop_{\min,2}$  até  $rop_{\min,19}$ . Portanto, para o  $Rop_{opt,1}$ , o seu valor é igual ao valor do  $rop_{\max,1}$ . Para o  $Rpm_{opt,n}$ , os seus valores são iguais aos valores do  $rpm_{\max,n}$ . Quando os valores do  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  vão diminuindo o custo métrico vai aumentando, de  $n = 1$  até  $n = 7$  e depois os seus valores vão diminuindo, conforme figuras 56 e 57.

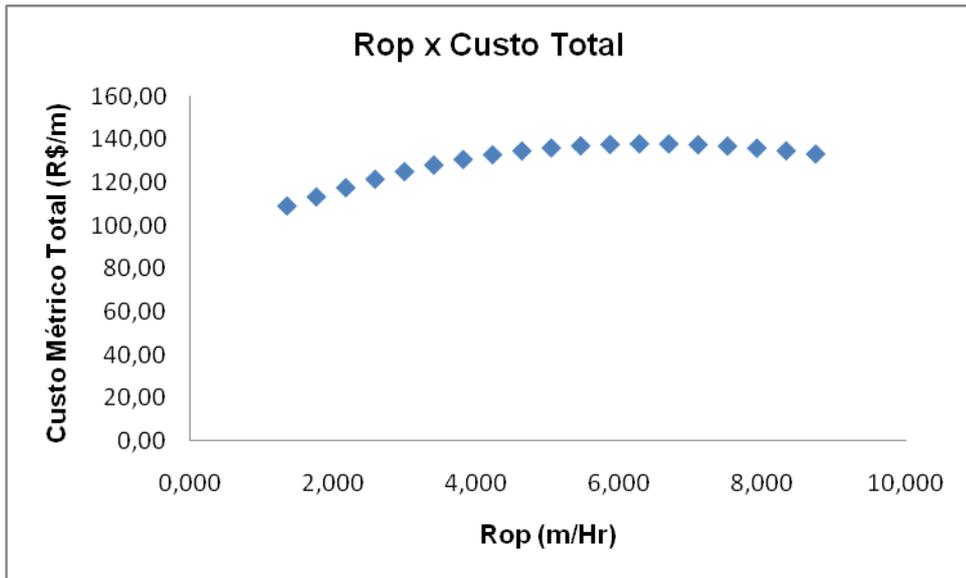


Figura 56 – Relação do rop x custo métrico total.

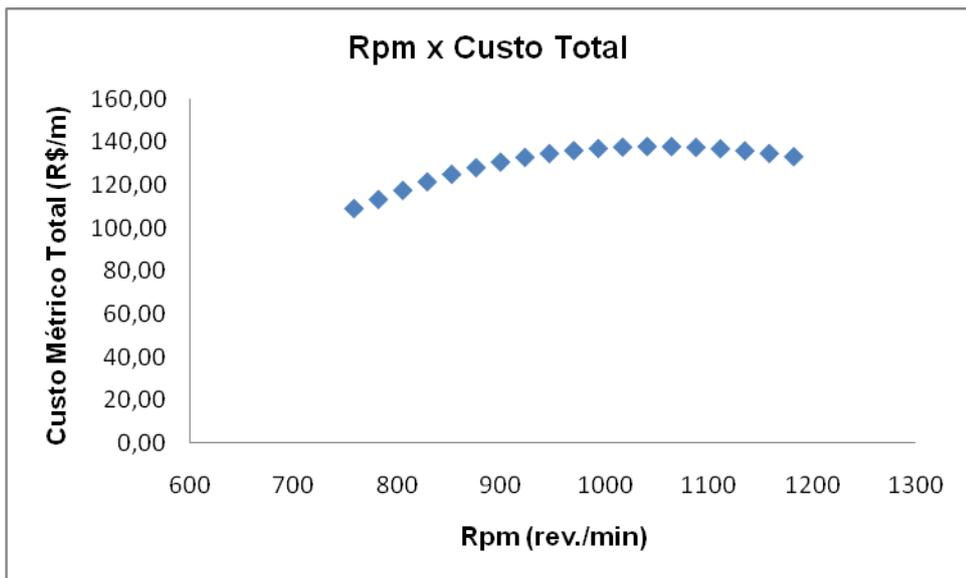


Figura 57 – Relação do rpm x custo métrico total.

Ao se observar os valores do custo métrico total, os mesmos diminuem quando os valores do  $Z_{opt,n}$  aumentam, conforme figura 58.

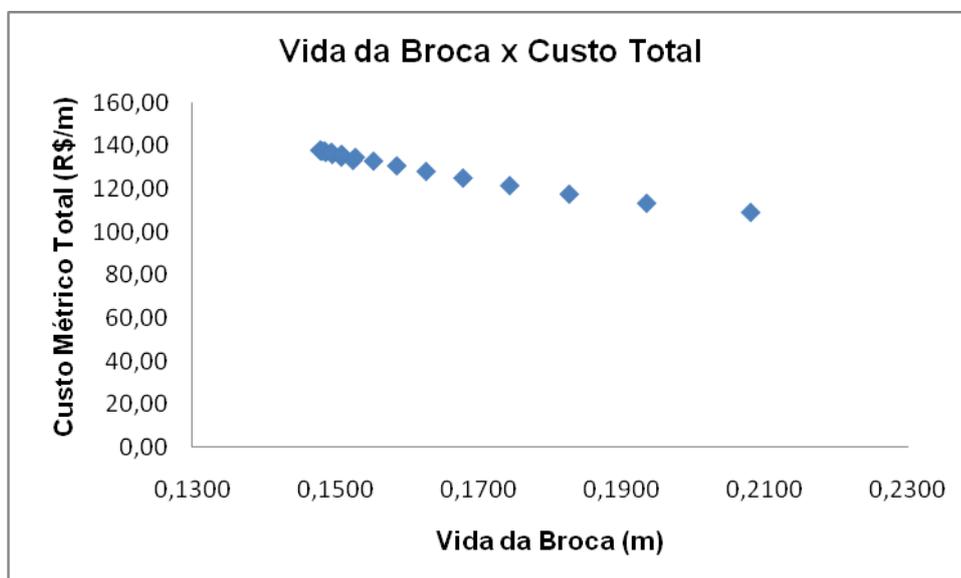


Figura 58 – Relação da vida da broca x custo métrico total.

O critério estabelecido para se definir o melhor resultado é o menor custo métrico perfurado, então,  $Q_{opt} = R\$ 108,84/m$ , com os respectivos valores para  $Rop_{opt} = 1,355 \text{ m/hr}$ ,  $Rpm_{opt} = 758 \text{ rev./min}$  e  $Z_{opt} = 0,20812 \text{ m}$ .

Analisando os resultados encontrados para  $Rop_{opt,n}$  do modelo determinístico, em relação ao modelo intervalar, observa-se que os seus valores se encontram dentro dos limites superior e inferior do modelo intervalar, ver figura 59. O raciocínio é o mesmo para  $Rpm_{opt,n}$  do modelo determinístico, ver figura 60. Para os valores do  $Z_{opt,n}$ , do modelo determinístico, os seus valores se encontram abaixo do menor valor do  $Z_{opt,n}^- = 0,22039$ , ver figura 61. Os resultados do  $Q_{opt,n}$ , modelo determinístico, são maiores do que os valores do  $Q_{opt,n}^+$ , do modelo intervalar, ver figura 62. Analisando os resultados para  $Q_{opt,n}$  em comparação aos resultados  $Q_{opt,n}^-$ , observa-se que entre  $n = 1$  e  $n = 18$ , os seus valores são maiores e em  $n = 19$ , apresenta valor menor.

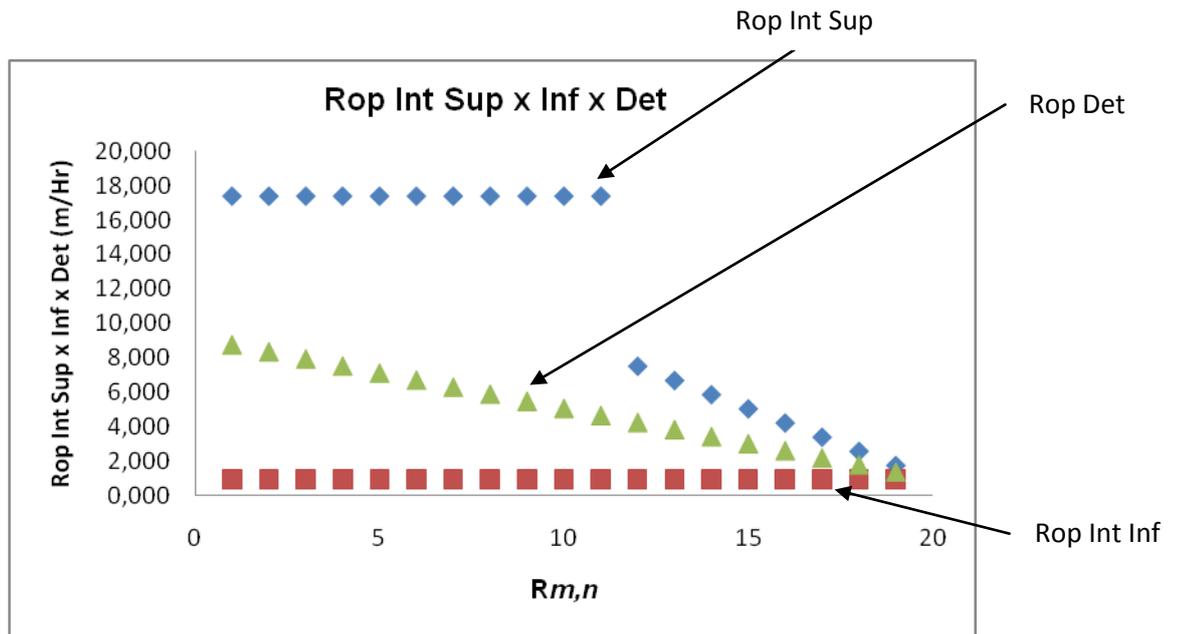


Figura 59 – Relação entre rop intervalar superior x inferior x determinístico.

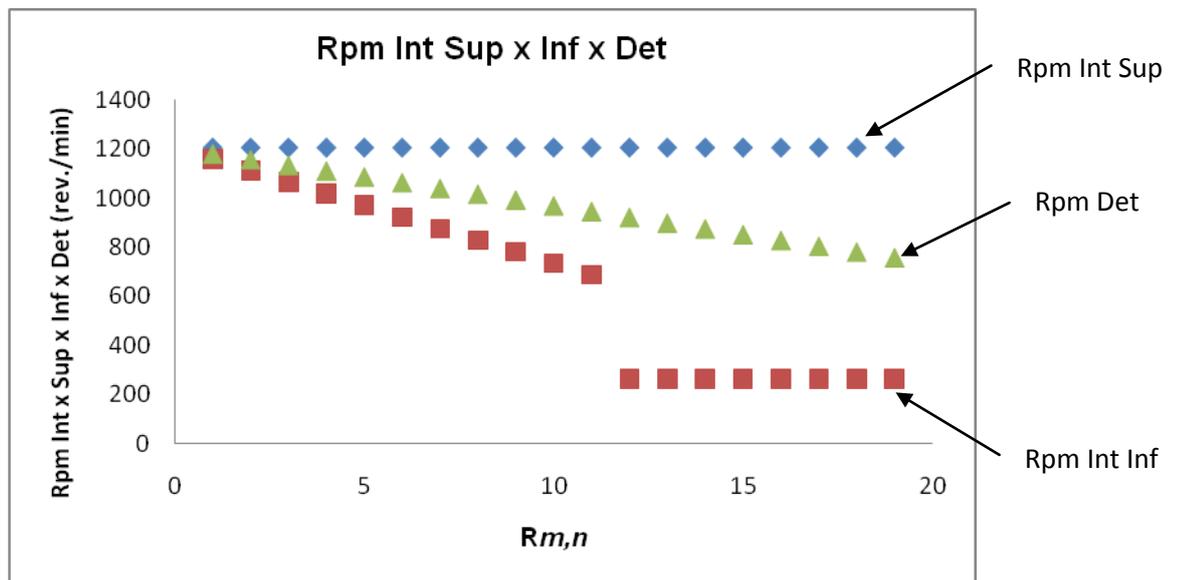


Figura 60 – Relação entre rpm intervalar superior x inferior x determinístico.

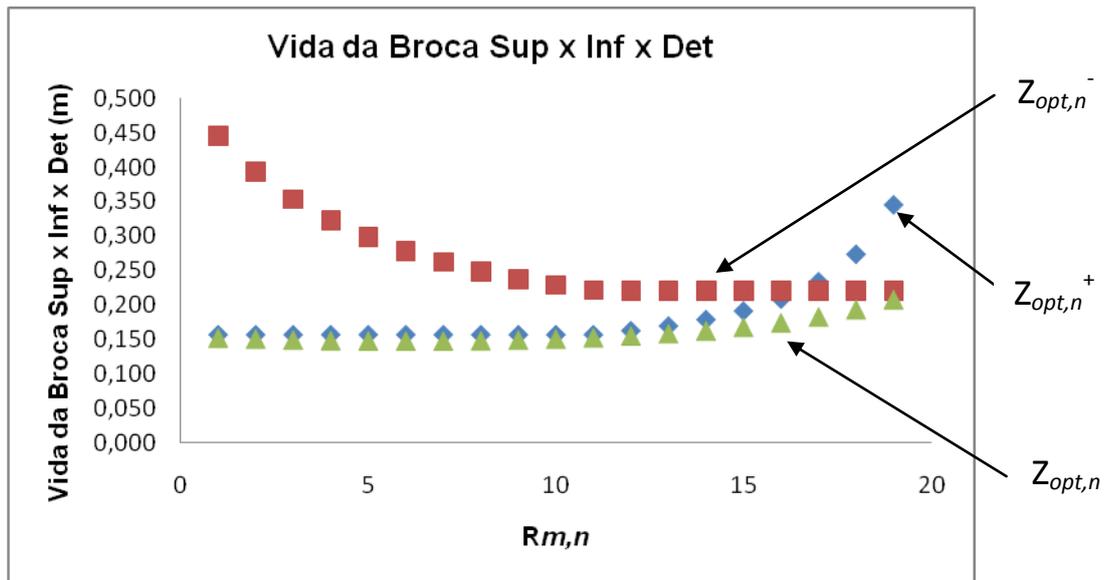


Figura 61 – Relação da vida da broca intervalar superior x inferior x determinístico.

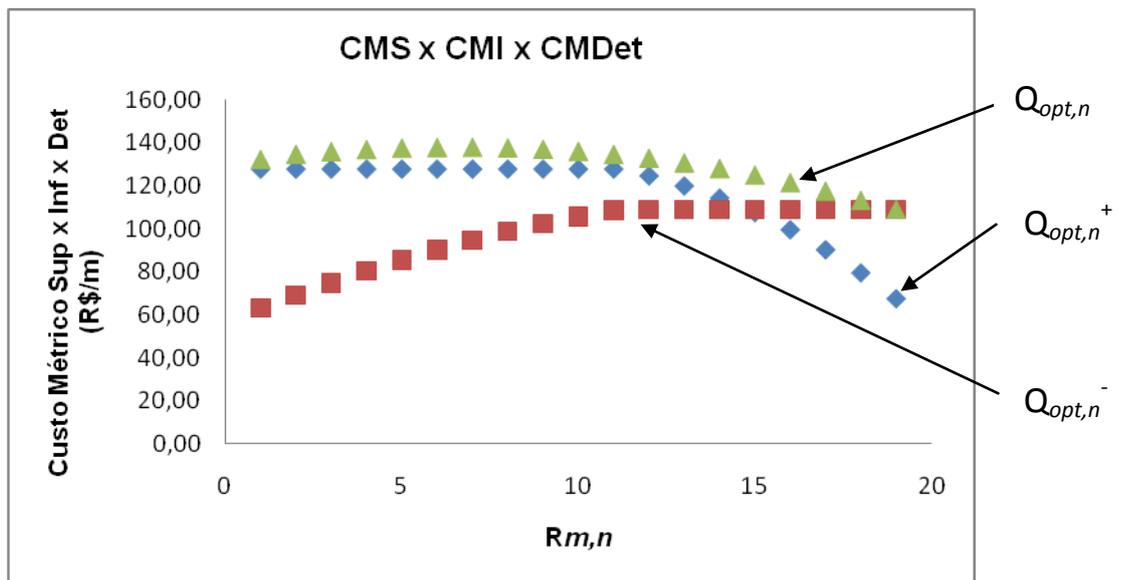


Figura 62 – Relação do custo métrico intervalar superior x inferior x determinístico.

## 4.2.7 – Análise geral dos aumentos das incertezas

### Aumento da Incerteza de 1% para 10%

Fazendo-se uma análise geral, quando se aumenta a incerteza de 1% para 10%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$ , para incerteza de 1%, varia entre R\$ 67,60/m e R\$ 127,80/m e para incerteza de 10%, varia entre R\$ 52,47/m e R\$ 106,64/m. Com isto, ocorrem reduções nos seus valores entre 16,6% e 22,4%. Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 1%, ocorrem variações entre 0,15772 m e 0,34593 m. Para a incerteza de 10%, esta variação está entre 0,18916 m e 0,46832 m. Desta forma, temos um aumento entre 19,9% e 35,4%.

Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}^+$ , para incerteza de 1%, os mesmos apresentam variações entre 1,765 m/hr e 17,362 m/hr. Em relação a incerteza de 10%, estes valores estão entre 1,769 m/hr e 18,909 m/hr, ou seja, aumento entre 0,2% e 8,9%. Já para o  $Rpm_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de 8,8%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 1%, diminuem entre 2,1% a 22,5% em relação a incerteza de 10%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 1%, pode-se observar variações entre 0,22039 m e 0,44561 m, e para incerteza de 10%, temos variações entre 0,23020 m e 0,68808 m. Com isto, ocorrem aumentos entre 4,5% e 54,4%.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem reduções de 8,3% nos seus valores, quando a incerteza aumenta de 1% para 10%. Quando se analisa o aumento da incerteza de 1% para 10%, os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  apresentam aumentos entre 5,4% e 8,7%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,11}$ . Contudo, para os valores entre  $R_{rpm,12}$  e  $R_{rpm,19}$  apresentam reduções de aproximadamente 8,4%.

Quando ocorre aumento, no modelo determinístico, da incerteza de 1% para 10%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 1%) varia entre R\$ 108,84/m e R\$ 137,96/m

(seu valor máximo) e depois cai para R\$ 132,30. Porém, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 10%), varia entre R\$ 104,89 e R\$ 131,07 (seu valor máximo) e reduz para R\$ 112,43. Assim, ocorre em geral, redução nos seus valores entre 3,6% e 15%. Ao se analisar os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 1% para 10%, vê-se que os seus valores, para incerteza de 1% varia entre 0,15234 m e 0,14778 m (seu valor mínimo) e sobe para 0,20812 m. Para, a incerteza de 10%, varia entre 0,17938 m e 0,15586 m (menor valor) e sobe para 0,21789 m. Portanto, ocorre em geral, aumento nos seus valores entre 4,7% e 17,8%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 0,2% e 8,9%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 6,1% e 8,8%.

#### Aumento da Incerteza de 1% para 20%

Ao se analisar o aumento da incerteza de 1% para 20%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$ , para incerteza de 1%, varia entre R\$ 67,60/m e R\$ 127,80/m e para incerteza de 20%, varia entre R\$ 34,41/m e R\$ 80,15/m. Com isto, ocorrem reduções nos seus valores entre 37,3% e 49,1%. Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 1%, ocorrem variações entre 0,15772 m e 0,34593 m. Para a incerteza de 20%, esta variação está entre 0,25218 m e 0,80833 m. Desta forma, tem-se um aumento entre 59,9% e 133,7%.

Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}^+$ , para incerteza de 1%, os mesmos apresentam variações entre 1,765 m/hr e 17,362 m/hr. Em relação a incerteza de 20%, estes valores estão entre 1,787 m/hr e 20,628 m/hr, ou seja, aumento entre 1,2% e 18,8%. Para o  $Rpm_{opt,n}^+$ , os seus valores apresentam um aumento de 18,7%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 1%, diminuem entre 4,0% a 49,1% em relação a incerteza de 20%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 1%, pode-se observar variações entre 0,22039 m e 0,44561 m, e para incerteza de 20%, tem-se variações entre 0,24109 m e 1,91441 m. Com isto, ocorrem aumentos entre 9,4% e 329,6%.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem reduções de 15,9% nos seus valores, quando a incerteza aumenta de 1% para 20%. Quando se analisa o aumento da incerteza de 1% para 20%, os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  apresentam aumentos entre 11,5% e 18,5%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,11}$ . Contudo, para os valores entre  $R_{rpm,12}$  e  $R_{rpm,19}$  apresentam reduções de 16%.

Quando ocorre aumento, no modelo determinístico, da incerteza de 1% para 20%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 1%) varia entre R\$ 108,84/m e R\$ 137,96/m (seu valor máximo) e depois cai para R\$ 132,30/m. Porém, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 20%), varia entre R\$ 100,09/m e R\$ 123,38/m (seu valor máximo) e reduz para R\$ 87,45/m. Assim, ocorre em geral, redução nos seus valores entre 8,0% e 33,9%. Ao se analisar os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 1% para 20%, vê-se que os seus valores, para incerteza de 1% varia entre 0,15234 m e 0,14778 m (seu valor mínimo) e sobe para 0,20812 m. Para, a incerteza de 20%, varia entre 0,23097 m e 0,16614 m (menor valor) e sobe para 0,23064 m. Portanto, ocorre em geral, aumento nos seus valores entre 10,8% e 51,6%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 1,2% e 18,8%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 13,1% e 18,6%.

#### Aumento da Incerteza de 10% para 20%

Finalizando, quando ocorre o aumento da incerteza de 10% para 20%, no modelo intervalar, o valor do  $Q_{opt,n}^+$ , para incerteza de 10%, varia entre R\$ 52,47/m e R\$ 106,64/m e para incerteza de 20%, varia entre R\$ 34,41/m e R\$ 80,15/m. Com isto, ocorrem reduções nos seus valores entre 24,8% e 34,4%. Para os valores de  $Z_{opt,n}^+$  para incerteza de 10%, ocorrem variações entre 0,18916 m e 0,46832 m. Para a incerteza de 20%, esta variação está entre 0,25218 m e 0,80833 m. Desta forma, há um aumento entre 33,3% e 72,6%.

Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}^+$ , para incerteza de 10%, os mesmos apresentam variações entre 1,769 m/hr e 18,909 m/hr. Em relação a incerteza de 20%, estes valores estão entre 1,787 m/hr e 20,628 m/hr, ou seja, aumento entre 1,0% e 9,1%. Os valores do  $Rpm_{opt,n}^+$  apresentam um aumento de 9,1%.

Os valores de  $Q_{opt,n}^-$  para incerteza de 10%, diminuem entre 2,0% a 34,3% em relação a incerteza de 20%. Contudo, para os valores de  $Z_{opt,n}^-$  para a incerteza de 10%, pode-se observar variações entre 0,23020 m e 0,68808 m, e para incerteza de 20%, há variações entre 0,24109 m e 1,91441 m. Com isto, ocorrem aumentos entre 4,7% e 178,2%.

Para os valores do  $Rop_{opt,n}^-$  ocorrem reduções de 8,3% nos seus valores, quando a incerteza aumenta de 10% para 20%. Quando se analisa o aumento da incerteza de 10% para 20%, os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$ , em certos momentos, apresentam aumentos entre 5,8% e 9,0%, ou seja, entre  $R_{rpm,1}$  e  $R_{rpm,11}$ . Contudo, para os valores entre  $R_{rpm,12}$  e  $R_{rpm,19}$  apresentam reduções de 8,3%.

Quando ocorre aumento, no modelo determinístico, da incerteza de 10% para 20%, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 10%) varia entre R\$ 104,89/m e R\$ 131,07/m (seu valor máximo) e depois cai para R\$ 112,43/m. Porém, o valor do  $Q_{opt,n}$  (para incerteza de 20%), varia entre R\$ 100,09/m e R\$ 123,38/m (seu valor máximo) e reduz para R\$ 87,45/m. Assim, ocorre em geral, redução nos seus valores entre 4,6% e 22,2%. Ao se analisar os valores do  $Z_{opt,n}$ , quando aumenta-se a incerteza de 10% para 20%, vê-se que os seus valores, para incerteza de 10% variam entre 0,17938 m e 0,15586 m (seu valor mínimo) e sobe para 0,17938 m. Para, a incerteza de 20%, varia entre 0,23097 m e 0,16614 m (menor valor) e sobe para 0,23064 m. Portanto, ocorre em geral, aumento nos seus valores entre 5,9% e 28,8%. Em relação aos valores do  $Rop_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 1,0% e 9,1%. Para os valores do  $Rpm_{opt,n}$  ocorrem aumentos entre 6,6% e 9,0%.

Para verificação dos modelos no LINGO para este problema ver apêndice D.

## Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho de tese tratou do desenvolvimento de um modelo intervalar para o problema de perfuração econômica de rochas. A relevância deste problema está no fato de que é muito difícil determinar com precisão o custo métrico perfurado e a vida da broca em perfuração de rochas, pois este processo apresenta grandes incertezas. Portanto, estes itens são de grande interesse para os operadores na tomada de decisão durante o processo de perfuração, já que o custo métrico perfurado é um dos principais indicadores de desempenho deste processo e o segundo impacta fortemente nos custos do processo, pois se a broca for retirada ainda “verde” gera custos desnecessários de viagem; e se retirado tardiamente pode gerar custos indesejáveis de pescaria por motivo de quebra de dentes, cones etc. Numa tentativa de preencher estas lacunas foi proposta e desenvolvida uma metodologia de otimização baseada em programação não linear intervalar para, ao invés de definir o custo métrico perfurado e a vida da broca por um valor determinado, definir os mesmos por um intervalo, incorporando as incertezas do processo de perfuração. Para a vida da broca foi desenvolvido um modelo com base no trabalho de WU *et al* (2006), onde os parâmetros de entrada do modelo são o rop e rpm.

Mas, além do modelo matemático intervalar foram, também, desenvolvidos um modelo determinístico para o problema de perfuração econômica de rochas e dois modelos de programação linear multi-objetivo para a definição dos valores extremos dos parâmetros do modelo, ou seja,  $rop_{\max}^+$ ,  $rop_{\min}^-$ ,  $rpm_{\max}^+$  e  $rpm_{\min}^+$ .

Em seguida dois exemplos, um sobre perfuração de poço de petróleo e outro perfuração de metais, foram usados para verificar se há uma melhora na qualidade dos seus planejamentos quanto a determinação dos seus parâmetros operacionais e o custo métrico perfurado. Com isto pode-se: i) avaliar a generalização do modelo; ii) avaliar e comparar os resultados dos modelos determinístico e intervalar nos dois exemplos e ver qual o modelo intervalar é superior ou inferior ao modelo determinístico. Na otimização determinística assumiu-se que os parâmetros incertos são determinísticos, com valores iguais aos valores médios dos respectivos parâmetros intervalares, ou seja, os limites superior e inferior das variáveis de decisão rop e rpm:  $rop_{\min}$ ,  $rop_{\max}$ ,  $rpm_{\min}$  e  $rpm_{\max}$ .

Com os resultados obtidos dos exemplos, pode-se observar que o modelo matemático intervalar não respondeu bem aos problemas de perfuração econômica de rocha e de furação de metais. No problema de perfuração em rochas os resultados do limite superior do custo métrico,  $Q_{opt,n}^+$  é menor do que  $Q_{opt,n}^-$ , contrariando os conceitos do modelo intervalar. Para o exemplo dos metais, o modelo mostrou que os valores do  $Q_{opt,n}^+$ , dependendo dos limites extremos impostos, são maiores do que  $Q_{opt,n}^-$  e outras vezes eram menores. Também, os valores dos  $Q_{opt,n}^+$ ,  $Q_{opt,n}^-$ ,  $Z_{opt,n}^+$  e  $Z_{opt,n}^-$  do modelo intervalar não conseguem englobar todos os valores dos dados fornecidos pelos exemplos de TANSEV (1975) e LEE, LIU e TARNG (1999). Porém, os resultados obtidos pelo modelo determinístico são melhores do que os do modelo intervalar, pois se aproximam mais dos valores reais apresentados nos exemplos.

Analisando os resultados do modelo intervalar com os dos modelos determinísticos, quando se aumenta a incerteza de 1%  $\rightarrow$  20%, 1%  $\rightarrow$  10% e 10%  $\rightarrow$  20%, verifica-se um comportamento idêntico para todos os resultados, ou seja,  $Rop_{opt,n}^+$ ,  $Rpm_{opt,n}^+$ ,  $Z_{opt,n}^+$ ,  $Z_{opt,n}^-$ ,  $Rop_{opt,n}$ ,  $Rpm_{opt,n}$  e  $Z_{opt,n}$  aumentam os seus valores. Os  $Q_{opt,n}^+$ ,  $Q_{opt,n}^-$ ,  $Q_{opt,n}$  e  $Rop_{opt,n}^-$  diminuem os seus valores. Por fim, os valores do  $Rpm_{opt,n}^-$  apresentam aumentos ou reduções dependendo dos limites extremos especificados no modelo intervalar.

As peculiaridades apresentadas acima podem ter acontecido por causa da dificuldade de ajuste dos dados ao modelo de vida da broca pelo método do erro quadrático, que não foi muito bom. Assim, podem ter sido geradas grandes diferenças de valores nos resultados fornecidos pelo modelo matemático intervalar. Fica claro que este modelo aditivo quando ajustado pelo erro quadrático faz com que a equação da vida da broca tenda para uma reta, gerando resultados inadequados e assim, contribuindo para os diferentes resultados encontrados no modelo intervalar, uma vez que a vida de uma broca normalmente apresenta uma função não linear.

Em relação aos modelos matemáticos baseado em programação linear multi-objetivo com restrição para definição dos valores extremos do modelo, ou seja,  $rop_{max}^+$ ,  $rop_{min}^-$ ,  $rpm_{max}^+$  e  $rpm_{max}^+$ , os mesmos funcionam, porém não de forma adequada para os

casos apresentados nesta tese, pois dependem de quantos elementos são inseridos nos modelos, da ordem de grandeza destes elementos e da ordem de grandeza dos coeficientes gerados pelo método erro quadrático para o modelo de vida da broca.

Alguns dos pontos originais decorrentes deste trabalho de tese para perfuração econômica em rochas, são:

- O desenvolvimento de um modelo matemático não linear intervalar para definir o custo métrico perfurado, incorporando as incertezas do processo de perfuração;
- Um novo modelo de vida para brocas de perfuração em rochas;
- Descrição formal do algoritmo de PLMO para se definir os parâmetros extremos incertos de entrada do modelo intervalar;
- Descrição formal do algoritmo para discretização dos intervalos incertos do modelo intervalar.

## Trabalhos Futuros

Outros trabalhos possíveis podem ser desenvolvidos a partir desta tese

Pode-se fazer uma extensão do modelo de vida da broca, retirando-se o rop e incorporando outras variáveis como o wob, a parte hidráulica (vazão da lama) e temperatura. Com isto, seriam verificados os efeitos do resfriamento e lubrificação da broca sobre a vida da mesma. Também, inserir um fator para abrasividade, caracterizando assim, melhor o desgaste da broca.

Na fórmula do custo métrico, inserir os tempos de viagem e de conexão e analisar as respostas do modelo intervalar e determinístico e compará-los.

Aplicar outras técnicas de ajuste/transformação de dados para melhorar a determinação dos coeficientes da vida da broca e com isto reavaliar o modelo.

## Referências Bibliográficas

- AGGARWAL A., SINGH H., “Optimization of Machining Techniques – A Retrospective and Literature Review”. **Sadhana**. Vol. 30. Part 6, 2005.
- ALI J.K. “Neural Networks: A New Tool for the Petroleum Industry?”. **SPE 27561**, 1994.
- AMORIM H., **Notas de Aula de Aspectos Econômicos da Usinagem**, UFRGS, 2003.
- ANDERSON D.R., SWEENEY D.J., WILLIAMS T.A. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. Thomson, 2ª edição, 2003.
- AREHART R.A. “Drill-Bit Diagnosis with Neural Networks”. **SPE Computer Applications**, 1990.
- BASKAR N. *et al*, “Optimization of Machining Parameters for Milling Operations using Non-Convencional Methods”. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 25: 1078-1088, 2005.
- BILGESU H.I., AL-RASHIDI A.F., AMINIAN K., AMERI S. “A New Approach for Drill Bit Selection”. **SPE 65618**, 2000.
- BOURGOYNE A. T. *et al*, **Applied Drilling Engineering**. SPE Text Book. Vol. 2 10 ed. 2005.
- BREWER R. C., Parameter Selection Problem in Machining. **Ann. CIRP** 14: 11, 1996.
- CAICEDO H.U., CALHOUN W.M. *Unique ROP Predictor using Bit-specific Coefficient of Slidin Friction and Mechanical Efficiency as a Function of Confined Compressive Strength Impacts Drilling Performance*. AADE-05-NTCE-60, 2005.
- CARIS M.H., SILVEIRA J.L.L. *Análise do Intervalo de Máxima Eficiência na Perfuração de Poços de Petróleo com Brocas Tricônicas*. Politécnica/UFRJ, 2009.
- CARPINTERI A., DIMASTROGIOVANNI L., PUGNO N. “Fractal coupled theory of drilling and wear”. **International Journal of Fracture**, 131, pp. 131-142, 2005.

CORREA, O. L. S., **Petróleo: Noções sobre Exploração, Perfuração, Produção e Microbiologia**, Ed. Interciência, 2003.

CRUZ A. B., *Otimização dos Critérios de Análise das Condições Econômicas no Processo de Fabricação por Usinagem*. Tese de mestrado. UFRJ, 2008.

CURRY D.A., PERRY P.B., EVANS J.M. New Method of Representing Rock Properties Over Entire Bit Run Improves Computer Generated Bit Recommendations. **SPE 87100**, 2004.

DENG JULONG, “Introduction to Grey System Theory”. **The Journal of Grey System**, Nr. 1, 1989.

DETOURNAY E., DEFOURNY P., “A Phenomological Model for the Drilling Action of Drag Bits”. **Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1992.

\_\_\_\_\_, “Method of Determining the Drilling Conditions Associated with the Drilling of a Formation with a Drag Bit”. **European Patent Application**, 1991.

\_\_\_\_\_, RICHARD T., SHEPHERD M., “Drilling Response of Drag Bits: Theory and Experiment”. **Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2008.

DINIZ A. E., MARCONDES F. C., COPPINI N. L., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Ed. Artliber. 3 ed., 2001.

DUTRA C.B.S. *Controle Preditivo Multiobjetivo para Processos com Atraso*. Tese de doutorado. UFSC, 2003.

FEAR M.J. How to Improve Rate of Penetration in Field Operations. **SPE Drill. & Completion 14** (1), March 1999.

FERRARESI D., 1986, **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 6ed. Edgard Blücher, São Paulo.

GEOFFROY H., MINH D. N., “Study on Interaction Between Rocks and Worn PDC’s Cutter”. **Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.** 34: 3-4, 1997.

GLOWKA D. A., **Development of a Method for Predicting the Performance and Wear of PDC Drill Bits**. Sandia National Laboratories, 1987.

GOPALAKRISHNAN B., KHAYYAL F. A. “Machine Parameter Selection for Turning with Constraints: An Analytical Approach Based on Geometric Programming”. *Int. J. Prod. Res.* 29: 1897–1908, 1991.

HATI S. K., RAO S. S., “Determination of Optimum Machining Conditions – Deterministic and Probabilistic Approaches”. **Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry**, 1976.

HINES W.W., MONTGOMERY D.C., GOLDSMAN D.M. *et al.* **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. LTC, 4ª edição, 2006.

HU, B. Q., WANG, S., “A Novel Approach in Uncertain Programming Part I: New Arithmetic and Order Relation for Interval Numbers”. **Journal of Industrial and Management Optimization**, Vol. 2, Nr. 4, 2006.

JONES, D. F., “Goal Programming in the Period 1990-2000. In: EHRGOTT, Matthias; GANDIBLEUX, Xavier. *Multipel Criteria Optimization: State of the Art Annotated Bibliographic Surveys*. Springer Verlag, 2004.

JUNIOR, D. S. A. **Metodologia para a Redução de Custos na Perfuração de Poços de Petróleo e Gás**. Tese de mestrado. Escola Politécnica, USP, 2008.

KAISER, M. J. “Modeling the Time and Cost to Drill an Offshore Well”. **Energy**, 34, pp. 1097-1112, 2009.

KAISER M. J., PULSIPHER A.G. “Functional Approximation and Optimal Specification of the Mechanical Risk Index”. **Risk Analysis**, Vol. 25, nº 5, 2005.

KOSKO B., **Neural Network and Fuzzy Systems – A Dynamic Approach to Machine Intelligence**, Prentice Hall of India, 1997.

KRONENBERG M. “Replacing the Taylor Formula by a New Tool Life Equation”. **International Journal Mach.Tool Des. Res.**, v.10, pp.193-202, 1970.

LAI, K.K. *et al.*, “A Class of Linear Interval Programming Problems and Its Application to Portfolio Selection”. **IEEE Transactions of Fuzzy Systems**, Vol. 10, Nr. 6, 2002.

LAL G. K., **Introduction to Machining Science**. 2 ed. New Age International Limited, New Delhi, 1996.

LEE B. Y., LIU H. S., TARNG Y. S. “Modeling and Optimization of Drilling Process”. **Journal of Materials Processing Technology** 74, 1998.

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, “An Abductive Network for Predicting Tool Life in Drilling”. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 35, No. 1, 1999.

LI, QIAO-XING, “Grey dynamic input-output analysis”. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, 359, 2009.

LIN, JEN-JIA, LI, CHIA-NUNG, “A grey programming model for regional transit-oriented development planning”. **Regional Science**, Vol. 87, Nr. 1, 2006.

LUCAS, S. M. F. **Gestão da Incerteza em Problemas de Programação Linear Multi-Objetivo com Coeficientes Intervalares**. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, 2007.

MACINI P., MAGAGNI M., VALENTE P. “Drill-Bit Catalog and Bit Index: A New Method for Bit Performance Evaluation”. **SPE 94798**, 2005.

MAJUMDER L., RAO S.S. “Interval-based optimization of aircraft wings under landing loads”. **Computers and Structures**, 87, pp. 225-235, 2009.

MAQSOOD, I., HUANG G.H., YEOMANS J.S. “An Interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty”. **European Journal of Operational Research**, 167, pp. 208-225, 2005.

MAVROTAS G. *Generation of efficient solutions in Multiobjective Mathematical Programming problems using GAMS. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method*. School of Chemical Engineering National Technical. University of Athens. Grécia, 2006.

MENDES J.R.P. **Raciocínio Baseado em Casos Aplicado ao Projeto de Poços de Petróleo**. Tese de doutorado. UNICAMP, 2001.

MENG Q., ARSECULARATNE J.A., MATHEW P. “Calculation of Optimum Cutting Conditions for Turning Operations using a Machining Theory”. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** v.40, pp.1709-1733, 2000.

MIRANDA G. W. A., **Uma Contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN**. Tese de doutorado. UNICAMP, 2003.

MISHNAEVSKY JR. L.L. “Physical Mechanisms of Hard Rock Fragmentation under Mechanical Loading: A Review”. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, Vol. 32, nº 8, PP. 763-766, 1995.

MOST – Ministry of Science and Technology. **Apostila Principle of Petroleum Engineering**. Mianmar. Site: <http://www.most.gov.mm/techuni/index.php>. Acessado em 03 de dezembro de 2008.

MUKHERJEE I., RAY P.K., 2005, “A Review of Optimization Techniques in Metal Cutting Processes”. **Computers e Industrial Engineering**, v.50, pp.15-34.

NETO, G. C. M. **Sistema Decisório Interativo de Alocação de Fluxo de Cargas**. Dissertação de Mestrado, IME, 1988.

NG, D. K. W., “Grey System and Grey Relational Model”. **ACM SIRIGE Bulletin**, Vol. 20, Nr. 2, 1994.

NOVASKI O. **Determinação das Condições Econômicas de Usinagem através de Parâmetros obtidos na Empresa**. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP, 1989.

\_\_\_\_\_, **Custos de Usinagem**. 1 ed. Unicamp, Campinas, SP, 1991.

NYGAARD R., HARELAND G. *How to Select PDC Bit for Optimal Drilling Performance*. SPE 107530, 2007.

OLIVEIRA, C., ANTUNES, C. H., “Multiple objective linear programming models with interval coefficients – na illustrated overview”. **European Journal of Operational Research**, 181, 2007.

OPARIN V.N., TANAINO A.S. “Assessment of Abrasivity by Physico-Mechanical Properties of Rocks”. **Journal of Mining Science**, vol. 45, nº 3, 2009.

ORABY S. E., HAYHURST D. R. “Tool Life Determination Based on the Measurement of Wear and Tool Force Ratio Variation”, **International Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.44, pp. 1261-1269, 2004.

PERRIN V.P., MENSA-WILMOT G., ALEXANDER W.L. “Drilling Index – A New Approach to Bit Performance Evaluation”. **SPE 37595**, 1997.

PLACIDO J.C.R., PINHO R. **Apostila de Brocas de Perfuração de Poços de Petróleo**. MSO, 2007.

POULACHON G., MOISAN A., JAWAHIR I. S. “Tool-Wear Mechanisms in Hard Turning with Polycrystalline Cubic Boron Nitride Tools”. **Wear**, v.250, pp. 576-586, 2001.

RABIA, H. “Specific Energy as a Criterion for Bit Selection”, **SPE**, 1985.

\_\_\_\_\_, **Oilwell Drilling Engineering Principles & Practices**, Graham & Trotman, 1985.

RAMOS, A. F. **Procedimento para tomada de decisão em terminais marítimos petroleiros**. Dissertação de Mestrado, IME, 1995.

RAO I. V., LAO G. K. “Tool Life High Cutting Speeds”, **International Journal Mach. Tool Des. Res.**, v.17, pp.235-243, 1977.

ROCHA, L. A. S., AZEVEDO, C.T. *et al*, **Perfuração Direcional**, Ed. Interciência, 2006.

RIBEIRO M. V., COPPINI N. L., **O Gerenciamento das Informações de Usinagem como uma Vantagem Competitiva**. UNICAMP, 2008. Site: <http://www.abepro.org.br>. Acessado em 14/03/2009.

RIBEIRO P. R., **Apostila de Engenharia de Perfuração**. UNICAMP, 2002.

ROSTAMI J., OZDEMIR L., NILSON B., **Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models**, 1996. Site: <http://mining.minee.edu>. Acessado em 14/03/2009.

SHABTAY D., KASPI M. “Optimization of Machining Economics Problem Under the Failure Replacement Strategy”, **International Journal Economics**, v.80, pp. 213-230, 2002.

SILVEIRA J. L. L., **Notas de Aula de Usinagem**, UFRJ, 2007.

- SINOR A., WARREN T.M. “Drag Bit Wear Model”. **SPE**, 1989.
- TAHA H. A. **Operations Research Introduction**. Prentice Hall, 6ª edição, 1997.
- TANSEV E. “A Heuristic Approach to Drilling Optimization”. **Society of Petroleum Engineers of AIME**, SPE 5546, 1975.
- THOMAS J. E., **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Ed. Interciência, 2004.
- TSAI P., *An Optimization Algorithm and Economic Analysis for a Constrained Machining Model*. Ph. D. thesis, West Virginia University, 1986.
- WANG P., LIANG M. “Concurrent Optimization of Machining and Tolerance Parameters”. **Flexible Automation and Intelligent Manufacturing**, FAIM 2004, Toronto, Canada.
- WALVEKAR A. G., LAMBERT B. K. “An Application of Geometric Programming to Machining Variable Selection”. **Int. J. Prod. Res.** 8: 3, 1970.
- WANG R. T., LIU S. T. “An Economic Machining Process Model with Interval Parameters”. **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, 2007.
- WIJK G. “The Stamp Test for Rock Drillability Classification”, **Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.** Vol. 26, Nr. 1, 1989.
- \_\_\_\_\_, “Rotary Drilling Prediction”, **Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.** Vol. 28, Nr. 1, 1991.
- WU X.Y., HUANG G.H., LIU L., LI J. B. “An interval nonlinear program for planning of waste management systems with economies-of-scale effects – A case study for the region of Hamilton, Ontario, Canada”. **European Journal of Operational Research**, 171 (2006), pp. 349-372.
- YEO S.H. “A Multipass Optimization Strategy for CNC Lathe Operations”. **International Journal Production Economics**, v.40, pp. 209-218, 1995.
- YILMAZ S., DEMIRCI OGLU C., AKIN S. “Application of artificial neural networks to optimum bit selection”. **Computers & Geosciences** 28 (2002), pp.261-269.

# Apêndice A - Complemento sobre Perfuração

## A.1 - Perfuração de Rochas

A perfuração de rochas tem como uma das áreas de interesse a resistência dos materiais que é o estudo das forças internas e deformações produzidas num corpo pela ação das forças externas.

A necessidade do estudo das propriedades e dos princípios de fragmentação das rochas é de grande importância por causa dos efeitos gerados na perfuração. Dos fatores que afetam o desempenho da broca e outros equipamentos de perfuração, o mais elementar é o tipo de formação perfurada. Este fator está além do controle do operador. O único meio de se conjugar estas necessidades impostas é estudando as características das formações, usando a broca que melhor se adapta às condições de vazão do fluido de perfuração usado, a velocidade de rotação da broca e a carga sobre a broca.

Os estudos das características da rocha resultam na melhora da taxa de penetração e vida da ferramenta que são de muita importância no caso de formações rochosas duras.

O problema mais fundamental de perfuração de rochas é saber quanto de energia deve ser transmitida para a rocha, por meio da broca, a fim de conseguir uma unidade de volume de rocha fragmentada.

As três características básicas da rocha que são necessárias para se calcular a energia requerida para sua fragmentação é a resistência à perfuração (dureza da rocha que está diretamente relacionada com as forças coercivas e forças de atrito internas), elasticidade e plasticidade.

Atualmente, a fragmentação de rocha por perfuração é acompanhada pelo desgaste da broca. Estes dois processos ocorrem simultaneamente e estão em paralelo um com outro. A habilidade de uma rocha desgastar a ferramenta de perfuração é normalmente chamada de abrasividade.

As características mecânicas das rochas são essencialmente dependentes dos tipos de deformação (plástica ou elástica) que agem sobre as rochas.

A rocha na profundidade encontrada pode ser atacada mecanicamente por forças verticais, esmagamento (*crushing*) ou de impacto; forças horizontais, cisalhamento (*shearing*), esmerilhamento (*abrading*), arrancamento (*gouging*) e pela combinação destas.

Nota-se que em perfuração rotativa o uso da dureza e abrasividade é a mais apropriada para se estimar a energia requerida para a fragmentação das rochas.

As análises das propriedades das rochas e estimação dos seus efeitos no processo de perfuração tornam-se mais apropriadas com um número reduzido de suas características.

A classificação das rochas baseado nas suas propriedades mecânicas tem como exemplo a determinação da medida da sua dureza. Este processo, segundo MOST (2008), é comparável em princípio com os testes convencionais feitos em metais (Brinell, Vickers, Rockwell).

De acordo com sua dureza todas as rochas são divididas em três grupos principais: rocha mole (*soft*), com dureza intermediária e rochas duras (*hard*).

Todos os fatores que influenciam as propriedades mecânicas das rochas podem ser divididos em dois grupos: natural e técnica.

Os fatores naturais são a composição mineral, compressão, porosidade, permeabilidade, presença ou ausência de fluidos nos poros das rochas, propriedades destes fluidos, sua temperatura e pressão etc.

Os fatores técnicos são tipos de forma e dimensão das brocas, velocidade de geração de cargas, duração de forças, direção das forças sob a superfície da rocha etc.

A dureza da rocha depende consideravelmente da quantidade de quartzo e feldspato. Também, depende essencialmente da porosidade das rochas.

Nota-se que a dureza da rocha em condições de grandes profundidades é diferente da dureza desta mesma rocha em pressão atmosférica, ou seja, depende da compressão da rocha. Quanto mais a rocha é comprimida maior a sua dureza (MOST, 2008).

Como já foi dito anteriormente, a abrasividade das rochas é a principal propriedade de desgaste das ferramentas de corte (impactando no seu tempo de vida), quando existe atrito entre as rochas e os corpos sólidos. Este estudo é de extrema importância, principalmente, em perfuração de poços de petróleo, pois definem o número de viagens (ou manobras) a serem dadas para a troca de ferramenta de corte e, por conseguinte, o custo final do poço, através do aluguel da sonda.

O coeficiente de atrito depende geralmente da pressão de contato da broca, velocidade de deslocamento da broca (rpm), propriedades do fluido e temperatura.

Um conceito muito importante em perfuração de rochas é aquele que chamamos de perfurabilidade, ou seja, a resistência das rochas a fragmentação pela perfuração. Quanto maior a sua resistência menor a taxa de penetração sob uma dada condição, então, diz-se que menor a perfurabilidade da rocha. Logo, a taxa de penetração pode ser usada como uma medida de perfurabilidade das rochas. Porém, esta medida é dependente não somente das propriedades intrínsecas da rocha; esta medida depende tanto dos fatores técnicos e das tecnologias empregadas, tais como: a carga na broca, rpm, vazão e qualidade do fluido de perfuração, do projeto da broca etc.

Assim, vê-se que existe a necessidade de estudar a mecânica das rochas para um melhor entendimento destes processos complexos.

## A.2 – Mecânica das Rochas

Em estudos sobre perfuração de rochas é necessário estudar a mecânica das rochas para que se possa entender a interação rocha/broca. Assim, mecânica das rochas é a parte da mecânica newtoniana que trata do comportamento das rochas, e de certa forma como respondem as alterações ou distúrbios provocados por perfurações, fluxo de fluidos, erosão e outros (ROCHA *et al*, 2006).

Uma vez que um corpo sofre um carregamento externo, ver figura 63, no seu interior são geradas forças que afetam tanto o seu comportamento como a sua deformação. Esta tensão pode ser dividida em duas componentes:  $\sigma$  ou tensão normal ao plano e tensão de cisalhamento  $\tau$  que é paralela ao plano. A tensão normal pode ser de

compressão (sendo considerada positiva) ou tração (sendo considerada negativa). Em suma, um sólido pode sofrer dois tipos de tensão: normal ou cisalhante (ROCHA *et al*, 2006).

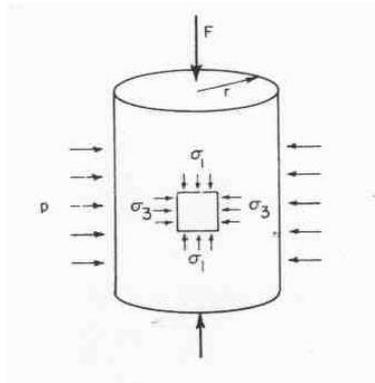


Figura 63 – Representação de forças em um corpo.

Fonte: Rocha e Azevedo, 2007.

Segundo BOURGOYNE *et al* (2005) os especialistas em mecanismo de rocha tem aplicado muitos critérios de falha numa tentativa de relacionar a resistência medida da rocha num simples teste de compressão no processo de perfuração rotativa. Este critério estabelece que a fratura ou o escoamento deve ocorrer quando a tensão de cisalhamento excede a soma da resistência coerciva do material e a resistência de fricção do plano de fratura, a isto denominamos de Critério de Mohr. Matematicamente o critério de Mohr é dado por:

$$\tau = \pm c + \sigma_n \tan \theta \quad (A.1)$$

onde:

$\tau$  – tensão de cisalhamento

$c$  – resistência coerciva do material

$\sigma_n$  – tensão normal ao plano de falha e

$\theta$  – ângulo interno de atrito

Este critério também pode ser representado pelo Círculo de Mohr de Tensões que é baseado em uma forma gráfica, um círculo conforme figura 64, onde pode ser representado e determinado todas as equações de transformação de tensões principais e a tensão de cisalhamento máxima. Neste caso, o círculo é representado por um sistema de coordenadas onde nas abscissas estão as tensões normais e as ordenadas são as tensões de cisalhamento (ROCHA *et al*, 2006).

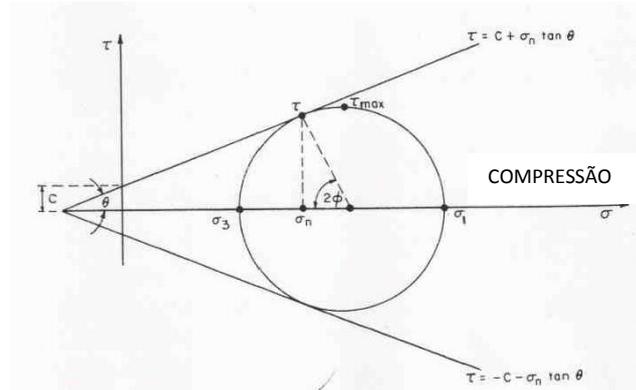


Figura 64 – Círculo de Mohr.

Fonte: Rocha e Azevedo, 2007.

Quando se estuda as tensões aplicadas às rochas e em solos deve ser levado em consideração que estes são meios porosos. Por isto, estudar a tensão efetiva é fundamental, já que podem ser aplicadas às tensões normais, mas não nas tensões cisalhantes. Além disso, é muito importante estudar o comportamento Tensão-Deformação das rochas. No estudo da deformação pode-se encontrar dois tipos: 1) deformação elástica: quando o carregamento for retirado, a rocha retorna a sua condição inicial e 2) deformação plástica, neste caso, a deformação torna-se permanente ao se retirar o carregamento. A forma de se analisar a tensão-deformação em um ensaio uniaxial de uma amostra de rocha é pela curva que leva este mesmo nome, veja figura 65. Nela é possível definir determinadas regiões características, tais como: elástica, plástica, dúctil e frágil (*Brittle*). Segundo ROCHA *et al* (2006) podem ser destacados alguns pontos importantes nesta curva: limite de proporcionalidade -  $\sigma_P$ , limite elástico -  $\sigma_E$ , resistência a compressão simples -  $C_0$  e tensão residual -  $\sigma_R$ .

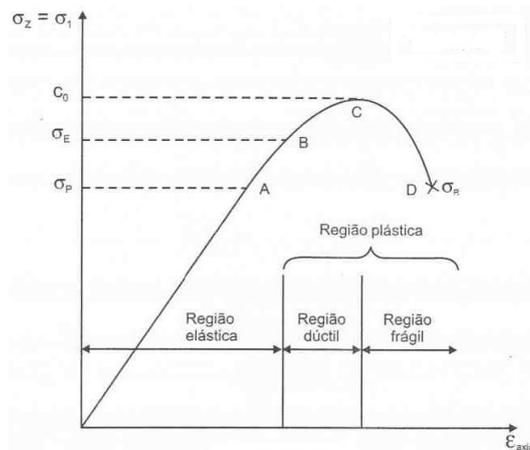


Figura 65 – Curva tensão – deformação em ensaio uniaxial.

Fonte: Rocha e Azevedo, 2007.

No estudo da mecânica das rochas é relevante destacar dois tipos básicos de rochas denominadas rochas dúcteis e frágeis. Rochas frágeis apresentam deformações plásticas antes de ocorrer ruptura e este tipo de comportamento é encontrado nos seguintes exemplares: granitos, arenitos cimentados e calcários. As rochas dúcteis têm capacidade de suportar um carregamento depois de certa deformação, não provocando uma ruptura abrupta. Os exemplares mais comuns onde se encontram estes comportamentos são folhelhos, algumas margas, carbonatos e arenitos não-cimentados (ROCHA *et al*, 2006).

Existe uma teoria definida como teoria da elasticidade linear para verificar o comportamento da relação linear da tensão-deformação. Esta teoria é dada pela Lei de Hooke tendo como coeficientes fundamentais o módulo de elasticidade ou de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{A.2})$$

Onde:

$E$  – módulo de elasticidade, dado em unidade de tensão

$\Delta\varepsilon$  – deformação adimensional

$\Delta\sigma$  - variação de tensão

O módulo de Young representa a rigidez do material, ou seja, é uma resistência à deformação.

O coeficiente de Poisson fornece a expansão lateral relativa a uma contração longitudinal quando uma tensão aplicada em certa direção afeta na direção ortogonal a esta, conforme figura 66.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{radial}}{\varepsilon_{axial}} = -\frac{\varepsilon_{horizontal}}{\varepsilon_{vertical}} \quad (A.3)$$

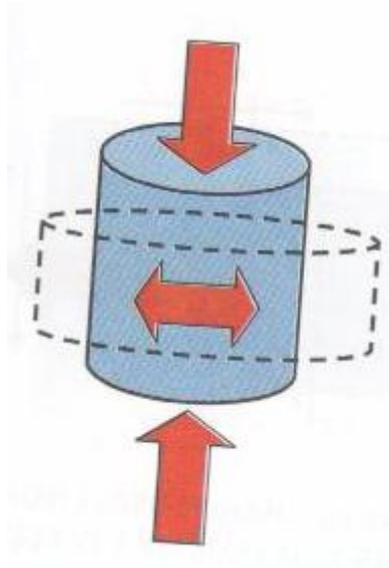


Figura 66 – Coeficiente de Poisson.

Fonte: Rocha e Azevedo, 2007.

A Lei de Hooke quando é aplicada a um elemento bidimensional é conhecida como Lei de Hooke para cisalhamento e quando o corpo for isotrópico, homogêneo e possuir comportamento linear-elástico é denominada Lei de Hooke Generalizada (ROCHA *et al*, 2006).

No estudo da tensão-deformação uma variável importante a ser considerada é o tempo. Na realidade as rochas quando sujeitas a carregamentos apresentam uma deformação instantânea e outra deformação posterior, daí serem conhecidas como rochas visco-elásticas. Este comportamento gera um efeito denominado de *creep*, ou seja, uma deformação que é função do tempo que pode ocorrer em materiais submetidos a tensões constantes. O efeito *creep* exibe três fases quando o estado de tensão se altera. A primeira fase é definida como *creep* primário ou estado transiente. Na seqüência, ocorre o estado permanente (ou *steady state*) ou *creep* secundário e o último é o *creep* acelerado ou terciário (ROCHA *et al*, 2006).

As falhas ou rupturas encontradas nas rochas são provocadas por cargas externas que geram tensões no seu interior tentando manter o seu estado de equilíbrio. Assim, nas rochas ocorrem modos de ruptura devido às tensões de compressão ou de tração, por exemplo: a ruptura por cisalhamento ocorre por causa da compressão e a ruptura por tração ocorre quando a rocha sofre uma força de tração (ROCHA *et al*, 2006).

Portanto, o corte da rocha é um processo básico de perfuração e escavação por meios mecânicos. Um perfeito entendimento dos mecanismos de fragmentação de rochas auxiliará no projeto de ferramentas e equipamentos de mineração, petróleo etc., melhorando a eficiência da perfuração como um todo.

## A.2.1 - Modelo de Forças em Brocas

Os trabalhos de DETOURNAY e DEFOURNAY (1992) e DETOURNAY *et al* (2008) tratam das forças sobre a broca relacionadas às forças de atrito desenvolvidas pelo movimento relativo entre o contato da broca e a rocha. Nestes estudos foram modelados os cortadores sem desgaste (*Sharp Cutter*), figura 67 e com desgaste (*Blunt Cutter*), figura 68.

No primeiro modelo, cortadores sem desgaste, um cortador perfeito sem desgaste traçou uma ranhura de área transversal constante sobre a superfície horizontal da rocha. O cortador tem um eixo de simetria vertical, e sua inclinação em relação à direção vertical é medida pelo ângulo *back rake* ( $\theta$ ). Durante o corte a força  $F_c$  (força de corte) é imposta pelo cortador sobre a rocha.  $F_{cs}$  e  $F_{cn}$  são as forças componentes que são paralelas e normais a superfície da rocha e é assumido que eles são proporcionais a seção transversal de área  $A$  de corte, ou seja, temos:

$$F_s^c = \varepsilon A \text{ e } F_n^c = \zeta \varepsilon A \quad (\text{A.4})$$

$\varepsilon$  é definida como a energia específica intrínseca e caracteriza uma ação pura de corte, ou seja, sem perda de energia específica devido ao atrito.  $\zeta$  é a razão entre as forças vertical e horizontal agindo sob a face de corte. As duas quantidades, a energia específica e a resistência a perfuração são definidas como:

$$E \equiv \frac{F_s}{A} \text{ e } S \equiv \frac{F_n}{A} \quad (\text{A.5})$$

Então, para um cortador perfeito (sem desgaste), tem-se:

$$E \equiv \varepsilon \quad (\text{A.6})$$

e

$$S \equiv \zeta \varepsilon \quad (\text{A.7})$$

As equações (A.6) e (A.7) representam a quantidade de energia total usada para cortar uma unidade de volume de rocha que é igual a energia específica intrínseca.

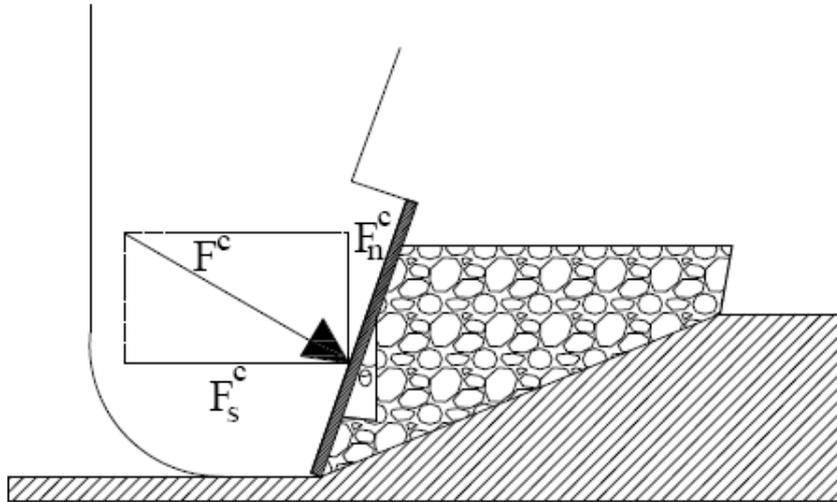


Figura 67 - Cortador sem Desgaste – Sharp.

Para o segundo modelo, cortador com desgaste, a força de atrito deve ser considerada. A força de corte  $F$  é dividida em duas componentes vetoriais:  $F^c$  é força transmitida pela face de corte e  $F_f$  é a força agindo na interface entre o plano de desgaste do cortador e a rocha, ver figura 68. Neste caso, assume-se que as componentes de corte  $F_n^c$  e  $F_s^c$  obedecem as relações postuladas para um cortador sem desgaste (*Sharp Cutter*). Além disso, assume-se que um processo de atrito é considerado na face entre o cortador e a rocha. Assim, as componentes  $F_n^f$  e  $F_s^f$  estão relacionadas por:

$$F_s^f = \mu F_n^f \quad (\text{A.8})$$

A soma das componentes das forças horizontais é:

$$F_s = F_s^f + F_s^c \quad (\text{A.9})$$

A soma das componentes das forças verticais é:

$$F_n = F_n^f + F_n^c \quad (\text{A.10})$$

Substituindo  $F_n^f$  como  $(F_n - F_n^c)$  e usando a equação (A.1),  $F_s$  pode ser definida como:

$$F_s = \mu \zeta \hat{\xi} A + \mu F_n \quad (\text{A.11})$$

Dividindo a equação acima pela área  $A$ , temos que a energia específica e a resistência a perfuração são dados por:

$$E = E_0 + \mu S \quad (\text{A.12})$$

Onde,  $E_0 = \mu \zeta \hat{\xi}$ .

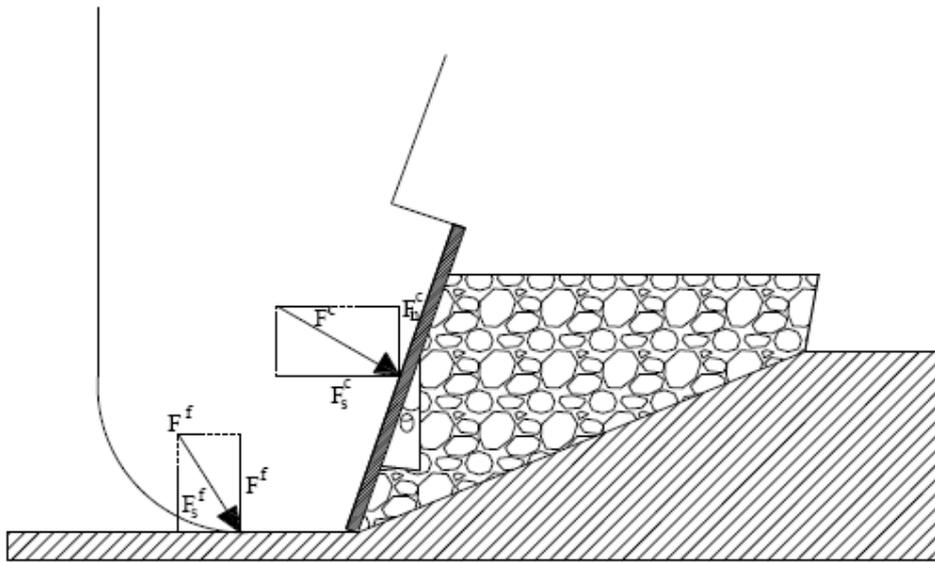


Figura 68 – Cortador com Desgaste – Blunt.

Nestes trabalhos os processos de corte e de atrito foram modelados baseados no modelo de um simples cortador, onde o torque ( $T$ ) e o peso sobre a broca ( $W$ ) podem ser decompostos em componentes horizontais e verticais:

$$T = T^c + T^f \quad (\text{A.13})$$

e

$$W = W^c + W^f \quad (\text{A.14})$$

Onde  $T^c$  e  $W^c$  são as componentes do torque e peso na broca associados com o processo de corte, enquanto  $T^f$  e  $W^f$  são os componentes correspondentes para o processo de atrito.

Mantendo a hipótese de que a magnitude da força sobre a face do cortador é proporcional a seção transversal  $A$  da ranhura traçada pelo cortador; as expressões para o torque do processo de corte  $T^c$  e a força axial  $W^c$  são desta forma dadas por:

$$T^c = \frac{1}{2} \varepsilon \delta a^2 \quad (\text{A.15})$$

e

$$W^c = \zeta \varepsilon \delta a \quad (\text{A.16})$$

Agora, vamos introduzir um novo parâmetro  $\gamma$  que incorpora as influências do projeto da broca sobre a resposta mecânica da broca, ou seja, a relação entre  $W$ ,  $T$ ,  $v$  e  $\omega$ .

$$\gamma = \frac{2T^f}{\mu a W^f} \quad (\text{A.17})$$

Usando as equações (A.15), (A.16) e (A.17), a expressão para o  $T^f$  torna-se:

$$T^f = \frac{1}{2} a \mu \gamma W - \frac{1}{2} a^2 \mu \gamma \zeta \varepsilon \delta \quad (\text{A.18})$$

Escrevendo  $T^f = T - T^c$  e usando a equação (A.15), obtêm-se a relação entre o torque a o peso sobre a broca:

$$T = \frac{1}{2} \left( -\mu \gamma \zeta \varepsilon \delta a^2 + \frac{1}{2} \mu \gamma a W \right) \quad (\text{A.19})$$

A expressão acima representa uma restrição entre os três parâmetros  $W$ ,  $T$  e  $\delta$ , assumindo a coexistência de dois processos: um de corte e outro de atrito.

Para finalizar, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de entender estes processo complexos por meio de métodos teóricos e experimentais.

MISHNAEVSKY (1995) faz uma revisão sobre os mecanismos físicos de fragmentação das rochas sob o efeito de cargas mecânicas. Neste trabalho são dadas informações sobre os estágios de fragmentação das rochas, dos mecanismos físicos para a formação da zona esmagada (*crushed*), dos mecanismos de lascamento (*chipping*) e formação de fendas (*crack*), a influência da taxa de carga, forma dos indutores e condições de corte quando ocorre o mecanismo de fragmentação das rochas.

ROSTAMI *et al* (1996) apresentam e discutem os modelos de previsão de desempenho e custos para equipamentos de escavação de túneis. Os modelos analisados são da Escola de Minas do Colorado (Colorado School of Mines – CSM) e do Instituto Norueguês de Tecnologia (Norwegian Institute of Technology – NTH).

WIJK (1989) descreve os parâmetros relevantes da rocha que influenciam no teste de carga para a classificação da perfurabilidade de rochas em perfuração percussiva. Neste teste a força e a profundidade de penetração para os cortadores de carbureto de tungstênio são determinados quando ocorre a fratura da rocha.

WIJK (1991) descreve o processo de destruição das rochas em perfuração rotativa, usando brocas tricônicas. Neste mesmo trabalho ele inicia uma discussão relativa a um modelo simples de perfuração econômica de rochas.

DETOURNAY (1991), DETOURNAY e DEFOURNAY (1992) investigam a resposta da perfuração executada por brocas tipo *drag* (arrasto), ou seja, brocas PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*). O trabalho examina as relações entre o peso na broca, torque, velocidade angular e taxa de penetração. O estudo desenvolve dois modelos, um para o cortador sem apresentar desgaste e outro apresentando desgaste no cortador, ficando evidenciada a interação entre os processos de corte e de atrito entre a ferramenta de corte e a rocha.

DETOURNAY *et al* (2008) apresentam um modelo completo de resposta de perfuração de brocas de arraste, tipo PDC. Este estudo trata da relação entre o peso na broca (*wob*), torque, taxa de penetração e velocidade angular da broca. O trabalho complementa o trabalho inicial de DETOURNAY e DEFOURNAY (1992), no qual demonstra a existência de uma restrição linear entre o torque, o peso na broca e a profundidade de corte.

## A.3 – Brocas

O processo de perfuração, pelo método percussivo ou rotativo, de um poço requer o uso de brocas de perfuração. De fato a broca é a ferramenta mais básica na perfuração, sendo que a sua seleção e definição das condições de operação é um dos problemas mais comuns que o engenheiro de perfuração encontra no seu dia-a-dia de trabalho/projeto de poço. Uma variedade enorme de brocas são fabricadas para as mais diversas situações encontradas durante as operações de perfuração rotativa. Para o engenheiro de perfuração é muito importante aprender os fundamentos de ação/funcionamento da broca, tal que ele possa entender com grande profundidade as diferenças entre os vários tipos de brocas disponíveis no mercado (BOURGOYNE *et al*, 2005; RIBEIRO, 2002).

A escolha errada de uma broca pode gerar custos indesejáveis, perda de capital ou mesmo inviabilizar o projeto de perfuração. Assim, é necessário um estudo meticuloso para a melhor escolha e melhor otimização de sua utilização, sempre focando no máximo rendimento, no uso da menor quantidade possível da mesma e na qualidade de limpeza do poço (CORRÊA, 2003, ROCHA *et al*, 2006).

### A.3.1 – Tipos de Brocas

Os tipos de brocas usadas em perfuração podem ser: brocas para perfuração percussiva e rotativa. As brocas de perfuração percussiva utilizam martelos a ar ou hidráulicos.

A broca de perfuração rotativa/percussiva é a ferramenta que faz a desagregação e ruptura das rochas ou formações a serem perfuradas em cada fase do projeto de poço. O princípio básico de atuação de uma broca de perfuração está na superação dos esforços exigidos para cortar ou triturar a rocha e no tipo de ataque despendido na formação. Esta pode ser por acunhamento, cisalhamento, esmerilhamento, esmagamento e também por erosão através da ação de jatos de fluidos. A broca encontra-se fixada na extremidade inferior da coluna de perfuração (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

Conforme dito anteriormente, como será o ataque à formação vai depender do tipo e das características da formação que se deseja atravessar. Para este último fator deve-se conhecer o grau de sua dureza e abrasividade, pois é fundamental na seleção das brocas e na definição do princípio de ataque (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

As brocas para perfuração rotativa podem, basicamente, ser distinguidas entre dois tipos: Brocas sem partes móveis e Brocas com partes móveis (BOURGOYNE *et al*, 2005; THOMAS, 2004).

As brocas sem partes móveis consistem de cortadores fixos que são partes integrantes do corpo da broca e giram conforme a coluna de perfuração. Seu mecanismo fundamental é a interação dente/formação, ou seja, no fundo do poço a broca ataca a formação por raspagem simultaneamente com a força normal provocada pelo peso sobre a broca (RIBEIRO, 2002).



Figura 69 – Broca PDC.

As brocas sem partes móveis ou Brocas de Arraste (*Drag Bits*) podem ser de Integral de Lâmina de aço (*Fish Tail* – Rabo de Peixe), Diamante Natural, Diamante Termicamente Estável (*Thermally Stable Polycrystalline* – TSP), PDC (*Polycrystalline Diamond Compact*) e Impregnadas (PLÁCIDO e PINHO, 2007; THOMAS, 2004).

As brocas com partes móveis consistem de cones cortadores que rotacionam sobre o seu próprio eixo e são fixados ao corpo da broca, provocando impacto e raspagem na formação (PLÁCIDO e PINHO, 2007; RIBEIRO, 2002).

Segundo PLÁCIDO e PINHO (2007), hoje em dia são empregados nas brocas de cones dois tipos de elementos de corte (dentes de aço usinados e insertos de carbureto de tungstênio) e três tipos de rolamentos (de esferas, cilindros, selados ou não e fricção).

Um efeito importante que está relacionado à estrutura de corte é o que denominamos cone *offset*, ou seja, é a excentricidade dos eixos de simetria dos cones em relação ao eixo axial do corpo da broca (RIBEIRO, 2002). O ângulo do cone *offset* varia aproximadamente de quatro graus para brocas usadas em formações moles até zero para brocas usadas em formações duras (BOURGOYNE *et al*, 1991; PLÁCIDO e PINHO, 2007; THOMAS, 2004).

As brocas com partes móveis (ou Brocas de Cone) podem ser divididas em monocônicas de insertos, bicônicas de insertos, tricônicas de insertos e tricônicas de dentes de aço (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

Entre os tipos de brocas de cone o mais utilizado atualmente é a broca tricônica, pois apresenta uma característica importante para as operações de perfuração que é a auto-limpeza (RIBEIRO, 2000).



Figura 70 – Broca Tricônica de Dentes Fresados.

Para este tipo de broca o seu sistema de rotação apresenta três configurações: rolamento convencional (aberto) com cilindros (roletes) e esferas, rolamento auto-lubrificado (selado) com cilindros e esferas, ambos podendo apresentar auto compensação ou não; e rolamento de fricção auto-lubrificado (ou *journal*) também conhecido como mancais de deslizamento (PLÁCIDO e PINHO, 2007; RIBEIRO, 2000).

No corpo da broca tricônica observa-se a seguinte composição (PLÁCIDO e PINHO, 2007):

- Extremidades rosqueadas no tubo de perfuração e na broca para se fazer a conexão entre ambos;
- Apresentam três eixos onde são montados os cones com rolamentos;
- Apresentam um reservatório para acúmulo de lubrificante para os rolamentos;
- Furos por onde o fluido de perfuração é circulado.

Existem outras brocas denominadas brocas especiais, tais como: brocas de jatos desviadoras, brocas coroas e brocas especiais, ou seja, trabalham em condições especiais como as brocas para perfurar com ar. Entre outras brocas especiais existem as brocas ampliadoras, brocas para perfurar diâmetros muito grandes ou muito pequenos etc (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

Um dado importante é o uso de um equipamento especial para perfuração direcional que é o motor de fundo (*Mud Motor*) ou motor de deslocamento positivo. Este motor é um motor hidráulico, fixado acima da broca e seu sistema de funcionamento é dado pelo deslocamento do fluxo de lama de perfuração circulando no seu interior. Seu objetivo maior é transmitir rotação e torque à broca sem levar em consideração a rotação da coluna. Sua aplicação vai desde poços verticais onde se pretende minimizar o desgaste da coluna como em poços direcionais para iniciar a seção de ganho de inclinação a partir do KOP – *Kick Off Point*, ou seja, ponto de desvio (ROCHA *et al*, 2006).

Logo, pode-se observar que a seleção adequada da broca de perfuração é fundamental para o sucesso da perfuração. Deve-se ter em mente que ela não pode ser

feita somente pela perspectiva do engenheiro/vendedor da broca ou do perfurador direcional, mas tem que se considerar o problema como um todo.

### A.3.1.1 – Classificação IADC de Brocas

No mercado existem diversos tipos de brocas e fabricantes, daí a necessidade de se desenvolver um sistema de classificação de brocas. Em 1972, a IADC (*Internacional Association of Drilling Contractors* – Associação Internacional de Empreiteiras de Perfuração) aprovou um sistema padrão de classificação para identificar tipos disponíveis de brocas tricônicas dos diversos fabricantes. Objetivando melhorar o sistema de classificação a IADC e o SPE (*Society of Petroleum Engineers* – Sociedade dos Engenheiros de Petróleo) em conjunto com os principais representantes da indústria de brocas desenvolveram um sistema padronizado de classificação das brocas. Em 1992 ocorreu uma revisão do sistema de classificação (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

A seguir é descrito o sistema de classificação da IADC. O sistema de classificação para brocas tricônicas é composto por quatro caracteres, sendo os três primeiros numéricos (C1, C2 e C3) e o último é por letra (K).

#### **C1 C2 C3 K**

Neste caso o primeiro caracter (C1) indica a SÉRIE, ou seja, define as características gerais da formação e classifica as brocas como dentes fresados ou insertos de tungstênio. Para as brocas de cone de rolamento existem oito series ou categorias, onde:

- i) As séries 1, 2 e 3 são usadas para as brocas de dentes de aço fresados.

Logo, quanto maior o número da série, mais duro/abrasivo será a rocha. Para a série 1 indica formação mais macia (mole – mais fácil de perfurar). Para a série 3 indica formação mais dura/abrasiva.

Basicamente temos: 1 – Mole, 2 – Média e 3 – Dura

ii) As séries 4, 5, 6, 7 e 8 são usadas para as brocas de insertos de tungstênio - TCI.

Analogamente a (i) a série 4 é aplicada as brocas de inserto de tungstênio para formações macias e a série 8 para formação muito dura/abrasiva.

Desta forma tem-se: 4 – Mole, 5 – Média – Mole, 6 – Média – Dura, 7 – Dura e 8 – Extremamente Dura.

O segundo caractere (C2) define o TIPO da formação quanto ao grau de dureza onde a broca será usada, podendo ser dividida em 3 ou 4 tipos. No caso do tipo 1 determina a formação mais macia em uma série, já o tipo 4 a formação é a mais dura em uma série. Os tipos 2 e 3 são os incrementos da dureza das formações.

Segundo PLÁCIDO e PINHO (2007):

- 1 – Definido como formações moles
- 2 - Definido como formações médias moles
- 3 - Definido como formações médias duras e
- 4 - Definido como formações duras.

Na tabela 47 temos a relação Dureza x UCS x Comentários:

Tabela 47 – Dureza x UCS\* x Comentários

<b>DUREZA</b>	<b>UCS (psi)</b>	<b>Comentários sobre as formações</b>
Mole	< 1000	Baixa resistência compressiva e alta perfurabilidade, tais como: argila ( <i>clay</i> ), marga ( <i>marl</i> ), argila tipo turfosa ( <i>gumbo</i> ), areia não consolidada ( <i>unconsolidated sand</i> ).
Mole para Média	1000 – 4000	Baixa resistência compressiva, tendo extratos intercalados com formações duras, tais como: areia ( <i>sand</i> ), argila xistosa ou folhelho ou argilito ( <i>shale</i> ), anidrita ( <i>anydrite</i> ) e sal ( <i>salt</i> ).
Média - Dura	4000 – 8000	Moderada resistência compressiva, tais como: areia ( <i>sand</i> ), argila xistosa ( <i>shale</i> ), anidrita ( <i>anydrite</i> ) e giz ( <i>chalk</i> ).
Média para Dura	8000 – 17000	Denso com aumento da resistência compressiva, mas não - abrasivo ou semi-abrasivo, tais como: argila xistosa ( <i>shale</i> ), siltito ( <i>siltstone</i> ), areia ( <i>sand</i> ), cal ou calcáreo ( <i>lime</i> ou <i>limestone</i> ), anidrita ( <i>anydrite</i> ) e dolomitos ( <i>dolomites</i> ).
Dura	17000 – 27000	Duro e denso com alta resistência compressiva e algumas camadas abrasivas, tais como: areia ( <i>sand</i> ), siltito ( <i>siltstone</i> ), basalto ( <i>basalt</i> ) e dolomitos ( <i>dolomites</i> ).
Extremamente Dura	> 27000	Muito dura e abrasiva, tais como: quartzito ( <i>quartzite</i> ) e formações vulcânicas ( <i>volcanics</i> ) como mármore, granito, gnaisses.

Fonte: *WorldOil's 2006 Drill Bit Classifier*

\**Unconfined Compressive Strenght* ou Resistência Compressiva Não Confinada

Deve-se ter em mente que estes valores são apenas descritivos, pois a dureza verdadeira sofre influência de vários fatores como a profundidade, pressão hidrostática, porosidade e entre outros que são de difícil mensuração.

O terceiro caracter (**C3**) indica o sistema de rolamento, lubrificação e calibre da broca, ou seja, qual o tipo de sistema de rotação e se o calibre é protegido ou não. Para

as brocas de dentes de aço fresados temos as categorias 1, 4, 5, 6 e 7. Para as brocas TCI, as categorias são 2, 5 e 7.

Conforme PLÁCIDO e PINHO (2007) observa-se que:

- 1 – Rolamento convencional
- 2 - Rolamento convencional não selado refrigerado a ar
- 3 - Rolamento convencional não selado com proteção no calibre
- 4 - Rolamento selado auto-lubrificado
- 5 - Rolamento selado com proteção no calibre
- 6 - Rolamento de fricção (*journal*) selado
- 7 - Rolamento de fricção (*journal*) selado com proteção no calibre
- 8 – Para perfuração direcional
- 9 - Outros

A letra (**K**) é um caracter alfanumérico que define outras características, tais como:

A: Air Application ou PARA PERFURAÇÃO A AR

B: Special Bearing Seal ou ROLAMENTO COM SELO ESPECIAL

C: Center Jet ou JATO CENTRAL

D: Deviation Control ou PARA MELHOR CONTROLE DIRECIONAL

E: Extended Jets (Nozzles) ou JATO COM EXTENSÃO

G: Gage/Body Protection ou PROTEÇÃO EXTRA NO CORPO PARA CALIBRE

H: Horizontal/ Steering Application ou PARA POÇO HORIZONTAL

J: Jet Deflection ou JATOS ESTENDIDOS PARA POÇO DIRECIONAL

L: Lug Pads ou JATOS CHATOS

M: Motor Application ou PARA USO DE MOTOR DE FUNDO

S: Standard Steel Tooth Model ou BROCA DE DENTES DE AÇO NORMAL

T: Two-Cone Bits ou BROCA DE DOIS CONES

W: Enhanced Cutting Structure ou INSERTOS REFORÇADOS

X: Chisel Tooth Insert ou INSERTO COM CINZEL

Y: Conical Tooth Insert ou INSERTO TIPO CÔNICO

Z: Other Shape Inserts ou OUTROS TIPOS DE INSERTO

Abaixo um exemplo do uso do sistema de classificação IADC:

135M (ou 1-3-5-M): brocas com os dentes fresados para perfurar formações moles à médias-duras e com baixa resistência compressiva; rolamento selado com proteção no calibre e aplicação de motor de fundo.

447X: brocas de insertos de carboneto de tungstênio para perfurar formações macias à duras e com baixa resistência compressiva; rolamento de fricção com proteção no calibre e insertos de cinzel.

637Y: brocas de insertos de carboneto de tungstênio para perfurar formações médias-duras a duras e com alta resistência compressiva; rolamento de fricção com proteção no calibre e insertos cônicos.

Segundo PLÁCIDO e PINHO (2007) o IADC desenvolveu um sistema de classificação para descrever todos os tipos de brocas de cortadores fixos. O sistema consiste de quatro caracteres, sendo o primeiro uma letra (K) e os três seguintes são números (C1, C2 e C3). Estes caracteres informam o tipo de cortadores, material do

corpo, densidade dos cortadores e tamanho dos cortadores, perfil da broca, desenho hidráulico para o fluido de perfuração e distribuição do fluxo.

### **K C1 C2 C3**

A letra **K** informa o tipo de corpo:

S → Corpo de aço e

M → Corpo de matriz

O número **C1** designa a densidade dos cortadores. Para brocas de PDC, cortadores Mosaico ou híbridos com cortadores de PDC se faz a contagem de cortadores baseada numa broca de 8 1/2” com cortadores de 1/2”, inclusive os *gage trimmers*<sup>1</sup>.

1 – 01 a 30 cortadores

2 – 31 a 40 cortadores

3 – 41 a 50 cortadores

4 – mais de 50 cortadores

Para as brocas de diamantes naturais e TSP apenas o tamanho dos cortadores.

6 – pedras menores que 3 ppq<sup>2</sup>

7 – pedras de 3 a 7 ppq

8 – pedras maiores que 7 ppq

O número **C2** identifica o tipo de cortador. Para as brocas PDC, cortadores Mosaico ou híbrido com cortadores de PDC:

1 – PDC maior que 1”

---

<sup>1</sup> Gage Trimmers – significa protetor de calibre, ou seja, sua função é prolongar a vida da broca

<sup>2</sup> ppq – pedra por quilate

- 2 – PDC entre 0,51” a 1”
- 3 - PDC entre 0,33” a 0,50”
- 4 – PDC menor que 0,33”

Para as brocas de diamantes naturais e TSP temos:

- 1 - Diamantes naturais
- 2 - Cortadores TSP
- 3 - Híbridos TSP + diversos e
- 4 - Broca impregnada.

O número **C3** designa o perfil da broca quanto ao comprimento

- 1 – Perfil raso
- 2 – Perfil curto
- 3 – Perfil médio
- 4 – Perfil longo

O código IADC tem como idéia básica fornecer o tipo de broca e facilitar a identificação das suas características principais.

### A.3.2 – Mecanismos de Corte pelas Brocas

Para operar uma broca de forma apropriada, o engenheiro de perfuração necessita entender sobre o mecanismo básico de corte da rocha quando está em execução no fundo do poço. Existem os seguintes mecanismos: acunhamento e

arrancamento (*wedging*), raspagem ou cisalhamento (*scraping*), percussão (*percussion*) ou esmagamento (*crushing*), esmerilhamento (*grinding*), erosão por ação de jato de fluido (*jetting*) e torção (*twisting*). De alguma forma, estes mecanismos estão interrelacionados. Embora um deles possa ser predominante para um dado tipo de broca, normalmente durante a perfuração simultaneamente mais de um mecanismo pode estar presente (BOURGOYNE *et al*, 2005).

Na perfuração percussiva o mecanismo usado é a técnica de percussão, ou seja, esmagamento, tipo bate-estaca (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

Em relação aos estudos sobre os mecanismos de corte para perfuração rotativa, eles serão feitos nas brocas do tipo sem partes móveis (*drags*) ou com partes móveis (*rolling cutters*).

Em relação as brocas tipo *drag*, elas são projetadas para perfurar basicamente pelo mecanismo de acunhamento evitando desgastes prematuros. Contudo, quando elas atuam pelo mecanismo de raspagem e esmerilhamento, a perfuração é lenta e o desgaste ocorre mais rapidamente. As brocas tipo *drag* de diamante são projetadas para perfurar uma formação com taxa de penetração muito pequena (BOURGOYNE *et al*, 2005).

As brocas tipo Rabo de Peixe o mecanismo de corte utilizado é o cisalhamento.

Para as brocas de diamante natural o mecanismo de corte é o esmerilhamento e arraste.

As brocas de PDC o mecanismo é o de cisalhamento.

A broca impregnada age por esmerilhamento quando perfurando alguma formação.

Brocas com partes móveis, as brocas de cone, apresentam os seguintes mecanismos de corte: acunhamento e arrancamento; apresentando também esmagamento. Quando projetadas com grande ângulo de cone *offset* são aplicadas em perfuração de formações moles utilizando todos os mecanismos básicos de remoção de rocha, predominando acunhamento e arrancamento. Para as brocas da série IADC 3, 7 e 8 o mecanismo predominante de corte é a percussão ou esmagamento. Como estes tipos

de brocas são projetadas para serem usadas em formações duras e frágeis/quebradiças (*Brittle*), ou seja, *offset* quase nulo, predominará o esmagamento e neste caso também a taxa de penetração tende a ser baixa e os custos de perfuração tendem a ser altos (BOURGOYNE *et al*, 2005; PLÁCIDO e PINHO, 2007).

Em resumo, para as brocas com parte móveis tipo tricônicas com dentes de aço os mecanismos de corte são acunhamento e arrancamento; tricônicas com insertos de carbureto de tungstênio o mecanismo é o esmagamento. Para as brocas de diamantes naturais e impregnadas o mecanismo é o esmerilhamento e para as brocas de PDC temos os mecanismos de corte por raspagem ou cisalhamento (PLÁCIDO e PINHO, 2007).

### A.3.3 – Tipos de Desgastes de Brocas

Um dos principais itens que afetam fortemente a perfuração de rochas é o desgaste das brocas, mais precisamente os seus cortadores. Segundo CARPINTERI, DIMASTROGIOVANNI, PUGNO (2005) a perfuração e desgaste são formas diferentes do mesmo fenômeno físico, isto é, fratura. Neste caso, a perfuração pode ser considerada simplesmente como uma fragmentação artificial. Por outro lado, o desgaste é estudado pela tribologia (*tribo*, do grego, significa esfregar, atritar, friccionar e *logo*, significa estudo), ou seja, o estudo da fricção. Portanto, a tribologia abrange as investigações científicas de todos os tipos de atrito, lubrificação e desgaste, também abrange as aplicações técnicas do conhecimento em tribologia.

Focando no desgaste, pode-se distinguir quatro formas principais (ROBINNOWICZ, 1995 *apud* CARPINTERI, DIMASTROGIOVANNI, PUGNO, 2005).

1 – Desgaste por adesão: ocorre quando dois corpos estão deslizando um sobre o outro e fragmentos são transferidos de uma das superfícies e aderem a outra.

2 – Desgaste abrasivo: ocorre quando superfícies duras e rugosas, ou superfícies contendo partículas duras, deslocam-se sobre uma superfície mais mole e cria uma série de ranhuras sobre esta superfície.

3 – Desgaste corrosivo: ocorre quando o deslocamento acontece em ambientes corrosivos. Na ausência de deslocamento, os produtos da corrosão formarão um filme na superfície. Este filme tende a diminuir ou mesmo interromper a corrosão, porém a ação do deslocamento desgasta o filme e então, o ataque corrosivo continua.

4 – Desgaste por fadiga na superfície: ocorre durante esforços repetidos por deslocamentos ou rolamentos sobre um determinado caminho, trilha. Os ciclos repetidos de carregamento e descarregamento aos quais os materiais são expostos podem induzir a formação de trincas na superfície ou na subsuperfície que eventualmente resultarão na formação de grandes fraturas na superfície.

Outras formas de desgaste são:

5 – *Fretting*: é um mecanismo de desgaste por adesão, ocorrendo quando as superfícies em contato sofrem deslocamentos oscilatórios tangenciais de pequenas amplitudes.

6 – Erosão: é um processo no qual a partícula conduzida num meio fluido colide numa superfície sólida e remove material dela.

7 – Desgaste por impacto: acontece quando duas superfícies colidem tendo uma alta velocidade relativa normal a sua superfície, tipo marteladas.

Segundo SINOR e WARREN (1989) as brocas apresentam duas categorias de desgaste, dependendo da causa básica do desgaste. A primeira é o desgaste abrasivo que é normalmente associado com o desenvolvimento de um desgaste plano e uniforme e com isto gerando a degradação do roto e encurtando a vida da broca. Isto é função da força aplicada sobre os cortadores, da temperatura, velocidade de corte, propriedade do cortador e propriedades da formação rochosa, tais como: porosidade, tamanho dos grãos, umidade, dureza dos minerais entre outras (OPARIN e TANAINO, 2009). A segunda categoria de desgaste é baseada no resultado dinâmico dos cortadores. Esta forma de desgaste é representada pelo lascamento, quebra e perda de cortadores. Os carregamentos dinâmicos podem ser causados por mudanças bruscas no controle de

superfície da coluna de perfuração e pelas forças induzidas pela interação cortador/rocha.

Baseado no que foi descrito acima na próxima seção será descrito o sistema de avaliação do IADC para desgaste das brocas.

### A.3.3.1 – Classificação IADC do Desgaste de Brocas

A avaliação e análise do desgaste de brocas são fundamentais para a otimização da perfuração. O analista que consegue interpretar bem estes desgastes obtém o máximo de rendimento de cada broca. O IADC desenvolveu um sistema mundial para avaliação e análise do desgaste de brocas semelhante ao sistema de classificação de brocas. Este sistema é aplicado a todos os tipos de brocas.

Esta tabela de avaliação de desgaste se baseia em um sistema composto por oito caracteres alfanuméricos (PLÁCIDO e PINHO, 2007):

**C1 C2 A3 A4 A5 C6 A7 A8**

Este sistema possui quatro fatores principais da broca: a estrutura de corte, os rolamentos, o calibre e as observações pertinentes ao motivo da retirada. Os quatro caracteres iniciais definem a estrutura cortante, sendo que os dois primeiros descrevem o desgaste dos dentes, insertos ou cortadores fixos das fileiras do interior e exterior tanto para brocas de cones como de diamante. Neste caso, **C1** e **C2** são números que variam de 0 a 8 de acordo com o desgaste. Estas variações são feitas comparando-se o tamanho original do dente ou cortador, onde os números aumentam com a quantidade de desgaste, ou seja, o zero indica que não houve desgaste e o oito apresenta desgaste total. Para isto o raio da broca é dividido em três partes; 2/3 internos serão classificados em **C1**, o 1/3 externo será classificado em **C2**. Partindo do pré-suposto que a vida útil da broca estará relacionada ao desgaste total dos insertos ou dentes, divide-se a altura da estrutura cortante em oito e o desgaste em frações de 1/8 da altura distribuídos a **C1** e **C2**. Quando se avalia o desgaste da broca deve-se registrar o valor médio de desgaste. Para as brocas de dentes a experiência de campo é muito importante para avaliar o seu

desgaste, pois ao analisar a broca será definido o desgaste tanto das fileiras internas como das externas.

Os caracteres **A3** e **A4** são alfanuméricos e indicam as características e a localização do desgaste principal. A característica principal do desgaste se refere ao motivo pelo qual a vida da broca foi limitada. A localização indica o ponto da broca onde ficou caracterizado o desgaste principal.

O caractere alfanumérico **A5** trata do estado dos rolamentos e selos de vedação. Nos rolamentos selados a avaliação é análoga à da estrutura de corte, atribuindo um número de 0 a 8 para sua vida útil. A designação do número é dada pela experiência do analista o que pode gerar resultados diferentes. Para rolamentos selados a avaliação trata de verificar se os selos apresentaram falhas, definindo o fim da vida útil da broca. Quando a avaliação é feita em brocas de cortadores fixos, identifica-se o **A5** com um X porque estas não possuem rolamentos.

O **C6** é um número dado em frações de 1/16 de polegada, indicando o calibre da broca. Se a broca está calibrada registra-se I, caso contrário registra-se o quão ela se apresenta descalibrada usando uma medida de 1/16”.

O **A7** é utilizado para se identificar a característica de desgaste da broca, ou seja, como fisicamente se alterou em relação a sua condição inicial (nova), podendo apresentar tubeira perdida, cone quebrado, interferência entre cones entre outros.

O **A8** serve para registrar o motivo que levou a retirada da broca.

A figura 71 mostra uma broca tricônica com desgaste.

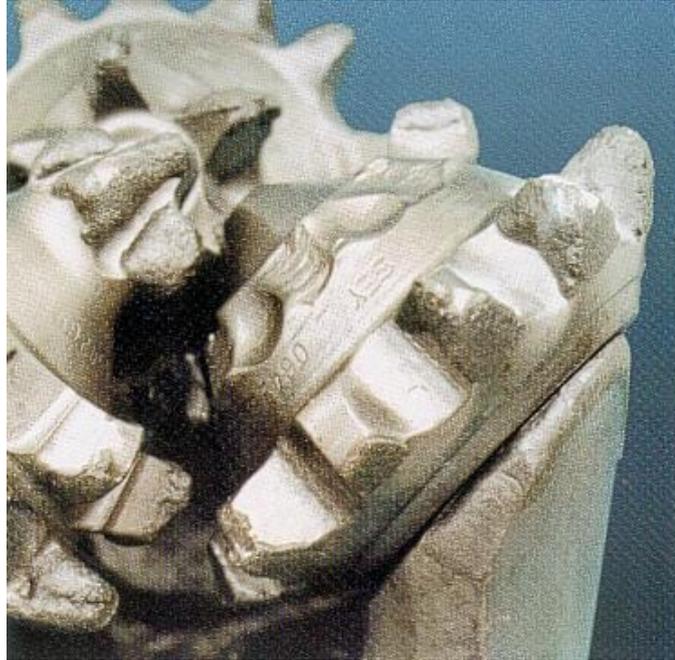


Figura 71 – Broca Tricônica com Desgaste.

Outros dados importantes para a análise dos registros da broca são: a profundidade de início e fim da perfuração, as condições de operação, o tipo, as tubeiras utilizadas, o tempo de perfuração e outros. Também são levadas em consideração as observações das condições de operação da broca normais ou especiais. Para as operações especiais as seguintes observações devem ser feitas:

- início de desvio
- diminuir, manter ou aumentar o ângulo
- velocidade de perfuração controlada por perda de circulação, troca de formação etc.
- utilização de motor de fundo, turbina
- perfurar com perda total de circulação
- perfurar com presença de H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio)
- perfurar sem condições ótimas, como incapacidade do equipamento de perfuração, as revoluções por minuto etc.

### A.3.4 – Seleção de Brocas de Perfuração

O processo de perfuração representado, principalmente pelo seu tempo é uma parte significativa do custo total do poço. Isto significa que a seleção das brocas, p.ex. por meio da taxa de penetração, tem considerável importância na redução dos custos de perfuração, uma vez que a escolha errada pode provocar custos inesperados como pescaria, grande tempo de manobra etc.

Assim, a seleção ótima das brocas e dos parâmetros de operação são importantes questões a serem resolvidas para a redução de custos na engenharia de perfuração. Em relação as brocas o primeiro passo é definir a localização e a profundidade do poço que são também fatores geradores de gastos na perfuração. A localização do poço é responsável pelo custo da preparação do projeto do poço, deslocamento da sonda para o local definido e o custo operacional diário para o processo de perfuração. A profundidade definirá a litologia a ser perfurada e desta forma, o tempo necessário para finalizar o poço. Um dos principais desafios é encontrar o desempenho ótimo da broca. A sua participação no orçamento do poço é relativamente pequena. Entretanto, o impacto da performance da broca no custo global do poço pode ser significativo, ou seja, é necessário usar esse produto com a maior eficiência e eficácia possível (YILMAZ, DEMIRCIÖGIN e AKIN, 2002). A seleção da broca mais apropriada para determinada seção do poço é um fator chave para se alcançar um desempenho superior.

Atualmente, as brocas são selecionadas baseadas na performance de brocas similares em poços *off-set* tomando como referência custo por metro, sob enfoque puramente econômico. A performance das brocas tem como parâmetro básico a sua taxa de penetração sob condições variadas de operação, visto pelo lado técnico/operacional da perfuração (BILGESU *et al*, 2000).

Contudo, a interação entre a broca/rocha que afeta a taxa de penetração não é entendida em detalhes, pois os fatores controláveis e ambientais são compostos por efeitos que apresentam interdependência e não-linearidade. Junte-se a isto, o fato que a complexidade aumenta pelos erros e inconsistência nos dados de perfuração, significando que a correlação com os fatores podem ser mascarados sem um tratamento de dados extensivos (FEAR, 1999).

Conforme KAISER e PULSIPHER (2005), os diversos fatores controláveis e ambientais existentes que afetam a seleção/desempenho das brocas são:

a) Parâmetros operacionais

- WOB: Weight On Bit – Peso sobre a Broca
- Taxa de Penetração
- RPM: Rotações por Minuto
- Projeto da Broca
- Desgaste dos dentes/mancal da broca
- Flow Rate: Fluxo de lama
- Torque
- Etc

b) Parâmetros ambientais

- Propriedades da formação
- Tipos de formação
- Profundidade perfurada
- Permeabilidade
- Porosidade
- Pressão dos poros
- Densidade da lama
- Etc

Uma forma atual para superar o problema de aquisição de dados se baseia no uso de dados obtidos em tempo real, por meio de sensores eletrônicos instalados no tubo de perfuração e transmitidos pela sonda até o escritório da empresa de serviços de *Log*.

Desta forma, as empresas na área de petróleo procuram desenvolver ferramentas/modelos matemáticos como apoio a decisão em projetos de perfuração *on-line x off-line*, com o intuito de melhorar o seu desempenho e reduzir custos.

### A.3.5 – Processo Básico de Seleção de Brocas

Sabe-se que poucos profissionais possuem os conhecimentos suficientes para a execução deste estudo. Os que trabalham nesta área estão ou estiveram diretamente relacionados as operações de perfuração de poços obtendo a sensibilidade necessária para definir qual a broca terá a melhor performance ou qual a melhor broca para determinado campo e quais os parâmetros operacionais para ferramenta. Na prática, a seleção da broca é feita muito pela tentativa e erro. É muito difícil selecionar a broca, pois deve-se levar em consideração diversos fatores tais como: geológicos, operacionais, de desenvolvimento tecnológico da ferramenta, os componentes de BHA, tipo de sonda, direção de poço e ainda, como não é possível perfurar o mesmo intervalo duas vezes, as comparações devem ser feitas entre as brocas sequenciais no mesmo poço ou entre as brocas utilizadas para perfurar a mesma formação em outros poços. Existe ainda muita subjetividade em se tratando do conhecimento geológico das rochas a serem perfuradas, exemplificando, uma rocha A, num determinado poço se encontra a uma profundidade maior ou menor do que a rocha B noutro poço.

O projeto de um poço passa por diversas atividades, conforme figura 72.

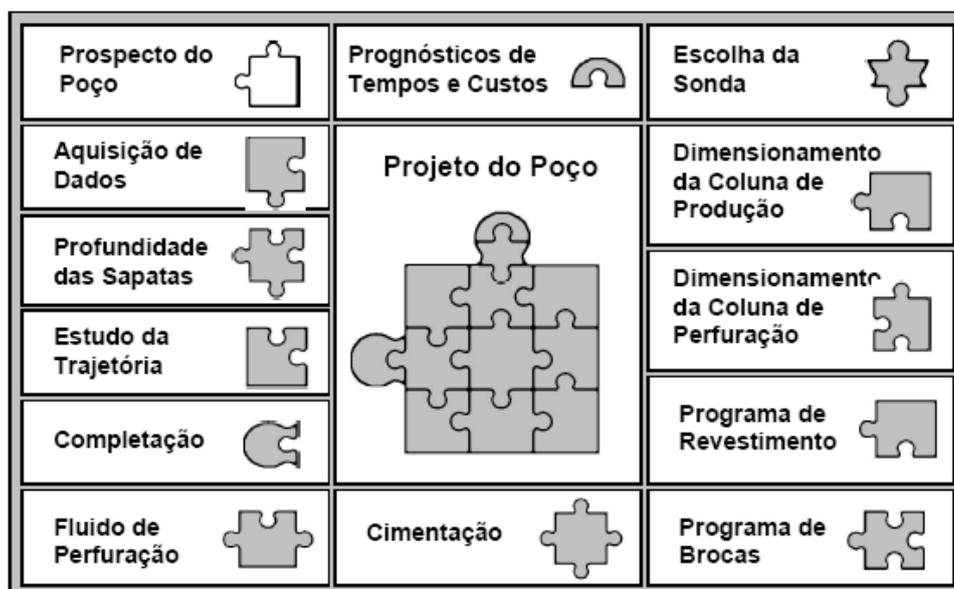


Figura 72 – Atividades de um projeto de poço.

Fonte: Mendes, 2001.

Dentre as diversas atividades do projeto de um poço o programa de brocas tem uma grande importância. Sendo que o programa de brocas pode ser dividido em:

- Definir os parâmetros mecânicos
- Definir os parâmetros hidráulicos
- Definir os parâmetros ambientais
- Análise do intervalo a ser perfurado
- Análise do desgaste das brocas e
- O próprio processo de seleção das brocas.

Sabe-se que o método mais comum de avaliação de performance de uma broca é baseado no custo por metro perfurado (MANCINI, MAGAGNI e VALENTE, 2005). Contudo, dificuldades de perfuração devido a formação e condições de perfuração direcional não são considerados neste método. Outro parâmetro controlável importante é o ROP que influencia no tempo de perfuração do poço e serve como parâmetro de decisão.

Geralmente o processo de perfuração é governado por dois tipos de variáveis, qualitativa e quantitativa. As variáveis qualitativas são aquelas que descrevem o estado do poço de petróleo e a facilidade de se obter bons dados geológicos. As variáveis quantitativas são aquelas que podem ser controladas e/ou as ambientais podendo ser calculadas durante a perfuração (PERRIN, MENSA-WILMOT e ALEXANDER, 1997).

A seleção de brocas passa primeiramente pela aquisição de dados tipo *log sonic* e *gamma ray*. Depois se faz a análise do tipo de formação, neste caso avalia-se a abrasividade/impacto da formação. Com estes dados obtidos mede-se a força de compressão da rocha dos intervalos de profundidade que se quer trabalhar. A partir destes dados e com os parâmetros da sonda, dos tipos de brocas e seus dados de projeto, seleciona-se as melhores brocas para cada intervalo a ser perfurado.

A seguir uma seqüência básica para a seleção de uma broca (PLÁCIDO e PINHO, 2007):

- 1) Adquirir informações relativas aos poços a serem perfurados: neste caso, deve-se obter informações sobre o objetivo do poço, seu diâmetro, dados do

intervalo a ser perfurado, sua formação, geologia, litologia, suas condições e necessidades especiais, identificar as restrições e os indicadores da perfuração.

- 2) Definir a estrutura de corte, o corpo e o perfil da broca: quanto aos cortadores são observados o seu tipo, tamanho, densidade, distribuição e sua inclinação.
- 3) Executar a análise econômica: observa-se o custo por metro perfurado e rentabilidade econômica entre outros parâmetros, sempre visando a mensuração do gasto e economia esperada com a broca escolhida.
- 4) Definir o desenho hidráulico: aqui, pretende-se definir a melhor hidráulica para a perfuração, incluindo o fluido de perfuração em função da limpeza do fundo do poço, ou seja, a retirada do cascalho e no resfriamento da broca.

Segundo PLÁCIDO e PINHO (2007) diversos critérios são utilizados para seleção de brocas:

O primeiro a ser analisado são os *Objetivos da perfuração*. Para tanto, inicialmente reúnem-se especialistas de várias áreas do conhecimento, iniciando discussões sobre questões técnicas, científicas e operacionais para a definição do local e do projeto do poço. Nesses encontros ocorrem divergências de opiniões, mesmo porque existem informações subjetivas, tais como: os tipos de rochas a serem perfuradas. A seguir na figura 73 e tabelas 48 e 49 exemplos de informações que ocorrem nestas reuniões. Quando as questões são direcionadas as brocas deve-se ter em mãos informações detalhadas de BHA e das formações rochosas, limitando assim as opções de brocas. Logo, como exemplo algumas questões a serem respondidas: é um poço pioneiro, exploratório, direcional? Quais os requisitos operacionais para a perfuração do poço? Assim, pode-se definir as melhores características da broca e atender as necessidades das empresas de perfuração e os seus requisitos de perfuração.

SECTION DETAILS										
Sec	MD	Inc	Azi	TVD	+N-S	+E-W	DLeg	TFace	VSec	Target
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	
2	1810,00	0,00	0,00	1810,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	
3	2197,80	38,78	267,52	2169,86	-5,47	-126,19	3,000	267,52	126,30	T1_v4
4	2883,42	38,78	267,52	2687,75	-23,50	-542,70	0,000	0,00	543,20	
5	3084,38	38,78	267,52	2860,00	-29,49	-680,56	0,000	0,00	681,60	

Parent Wellpath: No wellbore data is available  
Tie on MD: 0,00

Rig:  
Ref. Datum: SS-62 @ 24,00m

Type	Target	Azimuth	Origin	Type	N/S	E/W	From TVC
Target	T1_v4	267,52	Slot		0,00	0,00	0,00

WELLBORE TARGET DETAILS (MAP CO-ORDINATES)

Name	TVD	+N-S	+E-W	Northing	Easting	Shape
T1_v4	2687,75	-23,50	-542,70	7525526,50	401561,30	Point
T2_v4	2715,49	-11,62	-695,87	7525538,38	401408,13	Point
T3_v4	2729,24	3,16	-886,83	7525553,16	401217,17	Point
T4_v4	2746,49	20,86	-1115,53	7525570,86	400968,47	Point
T5_v4	2751,74	61,39	-1458,20	7525611,39	400645,50	Point

CASING DETAILS

TVD	MD	Name	Size
1040,00	1040,00	30"	30
1710,00	1710,00	13 3/8"	13-3/8

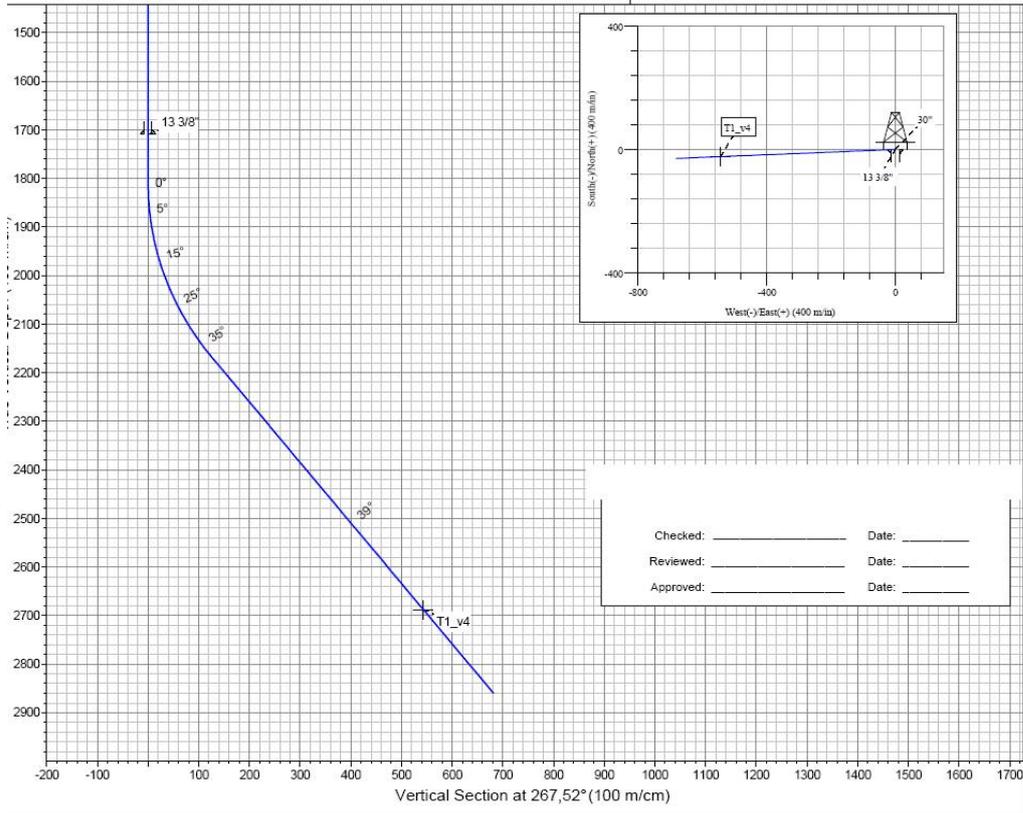


Figura 73 – Dados sobre a direção de um poço.

Tabela 48 - Dados sobre questões técnicas e operacionais

<b>EXEMPLO REPRESENTANDO RESULTADOS DE SUCESSIVAS REUNIÕES SOBRE QUESTÕES TÉCNICAS E OPERACIONAIS</b>	
<b>Poço:</b>	1-BLG-38HP-BA
<b>Objetivo:</b>	Perfurar poço piloto com inclinação de 38° para subsidiar perfuração do poço produtor para compor a produção do reservatório KJL-30 do campo de Baleia Grande
<b>Sonda:</b>	NS-200
<b>Previsão de Início:</b>	21/12/2030
<b>Coordenadas Geográficas:</b>	Lat: 32° 34' 33" S Long: 45° 32' 45" W
<b>Construção do Poço:</b>	DMA (ancoragem com previsão de 3 a 5 dias – convencional);
	Fase 1 (Jateamento 30” – 3 juntas);
	Fase 2 (Perfuração 17.1/2” – revestimento 13.3/8” – sapata 1740 m);
	Instalação da BAP (FC-191);
	Descida do BOP
	Fase 3 (Perfuração 12.1/4” – piloto – final previsto 3050 m);
	Perfilagem a cabo
	Abandono
<b>Reservatório:</b>	Poços correlação: 4-BLG-3 / 9-BLG-23 (Bloco Norte da área de Baleia Grande)
	Presença de 55 m (vertical) de folhelho entre os reservatórios BLG-100 / 200 e entre BLG-200 / 300;

	Avaliar resultados do poço piloto e definir a trajetória do poço horizontal (Pretende-se produzir pelo BLG-200 e uma parte pelo BLG-100). Projeto inicial está com aterrização prevista para 78°
	Perfurar piloto 12.1/4” até 30/40 m abaixo da formação marco vermelho (aproximadamente 3050 m);
	Poço não será com completação inteligente e não será efetuada testemunhagem;
<b>Perfuração Fase 1 (17.1/2”):</b>	Broca a ser definida pelos especialistas + Motor de Fundo com BH=1,0° + GR + RES + PWD;
	A princípio seria utilizado sônico em memória para a fase 17.1/2”. Baker não dispõe do equipamento para utilização no momento (está previsto para ser utilizado em ATP-BRC)
	Será avaliada a necessidade da utilização de drilling jar;
<b>Perfuração fase 2 (12.1/4”):</b>	BHA: Broca PDC + Autotrack + GR + RES + PWD;
	Não será possível utilizar broca full-drift, somente broca normal
	Será enviado como contingência MF 8” (máxima vazão);
	Repassar preventivamente cada seção perfurada;
	Para downlink a vazão deve ser de 750 gpm e durante a perfuração de 650 gpm;
<b>Perfilagem a cabo:</b>	GR, Resistividade, Densidade/Neutrão, GR Espectral, Sônico Dipolar;
	Amostragem de óleo e lateral da rocha (toolpusher);
<b>Cabeça de Poço:</b>	Utilizar sistema com anti-rotacional e pré-carga (mesmo sendo utilizada sonda ancorada);

**Abandono:**

Avaliar qual sistema será utilizado (Checar se Drillquip pode efetuar sem problemas para poços de produção).

Avaliar se serão efetuados tampões sucessivos de forma a cobrir todo o poço aberto, ou isolamento das zonas porosas, o que for mais eficiente.

*(Adaptado)*

Tabela 49 – Informações relativas a brocas

Item	Description
1	Broca Tricônica - 3 x 20 / 18
2	9 1/2" Ultra XL PDM (BH = 1.0°) c/w 17 3/8" UBHS & float
3	String Stabiliser
4	Stop Sub (sub de terminação eletrônica)
5	OnTrak Sub (MWD, Restividade, Gama, PWD, vibração)
6	BCPM (Pulser - 57mm Restrictor, Normal Flow)
7	Stop Sub (sub de terminação eletrônica)
8	Filter Sub + screen
9	String Stabiliser
10	8" Short Drill Collar
11	X-Over Sub
12	JETCAM Tool

13	X-Over Sub
14	4 x 8" DC
15	8" Jars
16	1 x 8" DC
17	Crossover
18	3 x 6 3/4" Drill Collars
19	6 x 5" HWDP
20	Drillpipe to surface

O segundo critério a ser analisado é o *Rendimento, Economia, Taxa de Penetração, custo*: na perfuração procura-se o menor tempo necessário para se perfurar um poço. Assim, a broca escolhida ao entrar em serviço deve atuar durante um grande intervalo de tempo, evitando o tempo de manobra. Procura-se também selecionar as brocas, sob o ponto de vista econômico, as que sejam de menor custo, dando-se prioridade as brocas de diamantes. Quando isto não é possível opta-se pelas tricônicas. A taxa de penetração está diretamente ligada aos dois itens anteriores. Os especialistas desta área normalmente trabalham com estatísticas descritivas (média, mediana) e com limites mínimos e máximos das variáveis de tempo de broca no fundo do poço e da metragem perfurada. Estas variáveis servem como referência para as suas previsões através dos dados dos poços de correlação. Contudo, se olharmos pelo lado geológico, a mesma informa a dureza da rocha. Brocas utilizadas em formações duras possuem um coeficiente de penetração maior em função da densidade dos seus cortadores e da projeção de seus dentes. Assim, quanto maior a profundidade perfurada, basicamente, aplica-se brocas mais duras. Entretanto, esta regra nem sempre está correta, pois brocas, normalmente quando utilizadas em formações moles poderá apresentar grande eficiência em partes mais profundas do poço. Conforme dito anteriormente, broca com menor preço é o procurado pela companhia perfuradora, porém, analisando por outro

ângulo, o custo da perfuração pode ser reduzido quando a broca de diamante puder ser reutilizado.

O terceiro item a ser analisado é o *Fluido de Perfuração*: este fator é demasiadamente importante para que as brocas desempenhem as suas funções da melhor forma possível. Existem no mercado tipos e qualidades diversas de fluidos de perfuração ou lama de perfuração. Os de base óleo aumentam o rendimento das brocas de PDC atuando nas estruturas de corte. Para as brocas de diamante natural e TSP depende da litologia. As lamas a base de água geram problemas de limpeza já que reagem as formações na fase aquosa do fluido de perfuração.

A *Energia Hidráulica*: está relacionada a limpeza e o resfriamento da broca. A unidade usada é o cavalo de força hidráulica por polegada quadrada de superfície em toda a extensão do poço. A otimização hidráulica é função da boa seleção das brocas e dos parâmetros de operação (WOB e RPM). As brocas de diamante para apresentar maiores eficiências quanto a limpeza e ao resfriamento devem trabalhar com escalas hidráulicas específicas. Danos térmicos a estrutura de corte e o resfriamento inadequado da broca são provocados por dois fatores, o índice de potência hidráulica (HSI) e os regimes de surgência insuficientes. A não limpeza adequada da broca ocasionará o seu encrramento e como consequência provocará um baixo rendimento.

Quanto as *Restrições operacionais* temos que certos parâmetros operacionais dificultam a utilização de certas brocas, por exemplo, potência da bomba de lama, peso sobre a broca (WOB) e a velocidade de rotação (RPM), vazão no fundo do poço. O que se procura é otimizar o uso dos equipamentos de BHA, a capacidade de pressurização das bombas da sonda e a eficiência de perfuração executada pela broca. Porém, as vezes o melhor parâmetro usado em uma broca não o é em outra ou não é possível de ser usado pela sonda em operação. Logo, trabalha-se com a solução mais viável para se entregar o projeto. Assim, pelos poços de correlação geográficos tenta-se obter informações de projetos análogos sobre a trajetória do poço, o tamanho e o número de fases ou o tipo de operação que será executada, por exemplo, jateamento da fase inicial. A lógica por trás deste processo é que no poço a ser perfurado serão necessários parâmetros análogos para a sua execução.

Em relação ao *WOB e RPM*: quando o *WOB* apresenta certas limitações, as brocas mais adequadas são as de *PDC*, pois apresentam maior taxa de penetração em comparação com brocas de rolos. Em relação ao *RPM*, a velocidade inadequada que atua na broca pode gerar problemas de vibração e resistências que afetam o controle do desgaste da broca e diminui a sua duração. Em altas velocidades de rotação, as brocas de diamante possuem um desempenho maior que as de rolos.

E se for *Poços Direcionais*? O fato de ser um poço direcional vai influenciar na definição das características das brocas tricônicas ou de diamantes. As brocas de diamante podem ser utilizadas em poços horizontais, uma vez que apresentam seções homogêneas extensas, o que lhes confere uma maior durabilidade. Os parâmetros principais das brocas que influenciam na seleção das brocas mais adequadas para poços direcionais são: densidade de cortadores, a quantidade de canaletas, o controle de vibração e o calibre da broca.

A *Análise de históricos* trata da análise dos poços de correlação (*offset wells*) ou poços vizinhos. Dentre as várias análises a análise do intervalo a ser perfurado é o mais longo e deve-se obter informações do histórico das brocas usadas em perfurações nas regiões próximas, definido por um raio ou por formações geológicas análogas (correlação geológica) denominado poço de correlação, conforme figura 74.

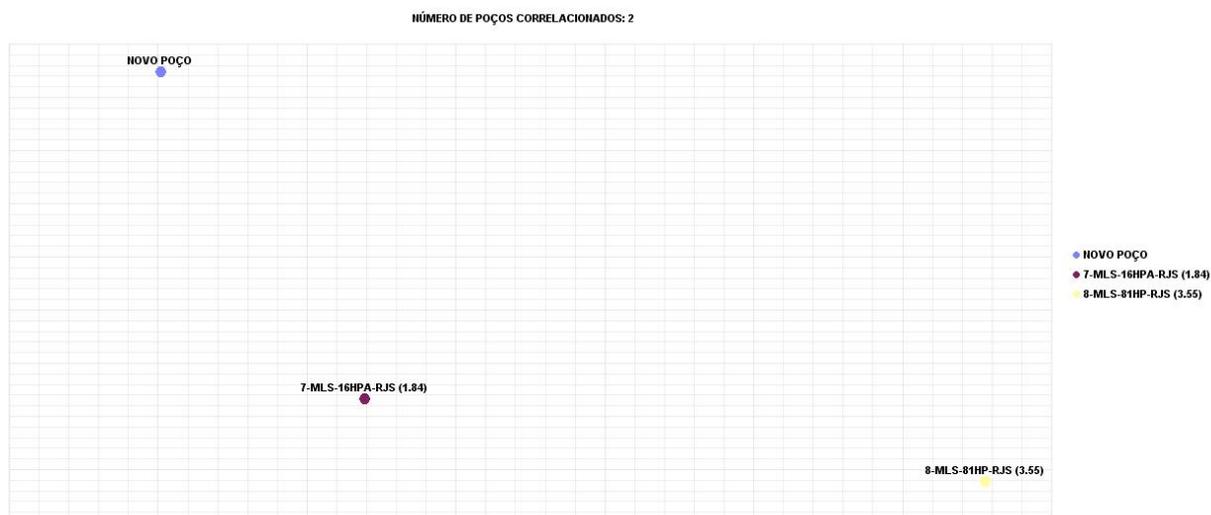


Figura 74 – Poços de correlação.

Com estes poços tenta-se entender as condições no fundo do poço, os limites para sua perfuração e geralmente, auxilia na seleção de brocas. Esta atividade inicia com a coleta dos registros de brocas e as informações relativas ao poço. Os dados obtidos devem ser atuais na medida do possível e refletir os tipos de broca recentes. Desta forma, consideram-se as brocas mais usadas e faz-se o *benchmark* nos poços de correlação. Estas análises são consideradas como conhecimento adquirido e lições aprendidas para que possam auxiliar na análise de outros poços, no desenvolvimento tecnológico e de novos produtos. A correlação é baseada numa região circular e sem considerar os poços de correlação geológicos, normalmente, são adquiridos históricos de vários poços, isto se o raio de ação for grande, levando assim, a um estudo mais abrangente. Caso contrário, se o raio for pequeno, obtém-se poucos dados, porém com maior exatidão para a previsão de perfuração do poço seguinte, conforme figura 75.

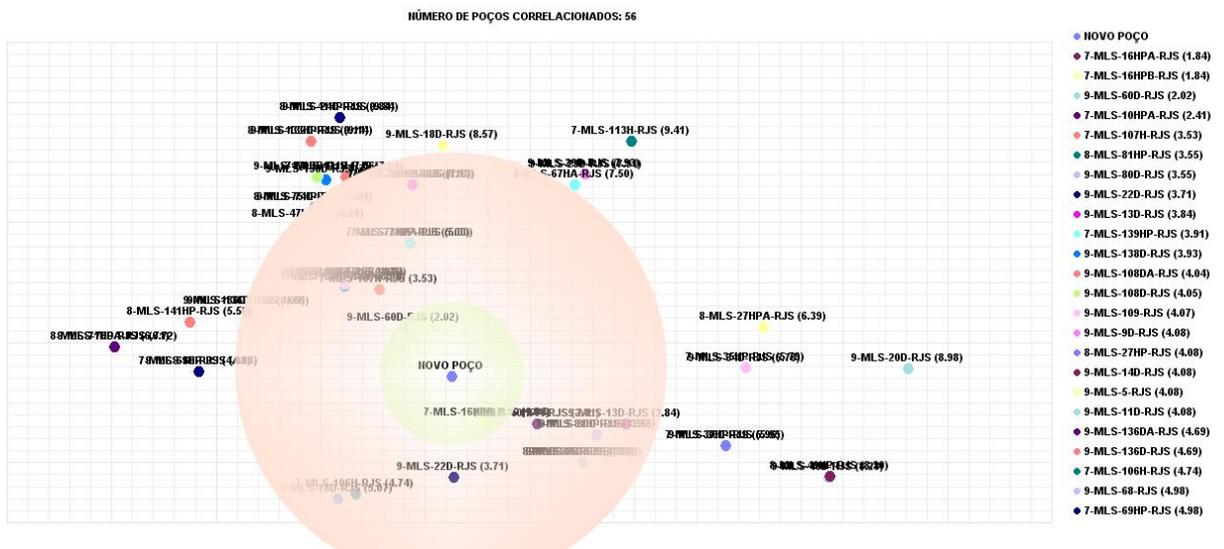


Figura 75 – Poços de correlação geográficos definidos por um raio.

Quanto as *Formações Nodulares ou Fraturadas* temos que a maioria das brocas de diamante não se aplicam a este tipo de formação, pois causam dano por impacto na estrutura cortante. Portanto, outras estruturas cortantes são utilizadas e que podem perfurar com eficiência.

*Ampliação:* aqui, é analisado o uso de brocas de rolos, para operações de ampliação com duração maior que duas horas, pois pode provocar danos no calibre de uma broca de diamante. Outro fator a ser considerado é a vibração lateral.

*Poços profundos:* nestes poços o tempo de manobra é muito grande em relação ao tempo de perfuração. Logo, a eficiência da perfuração fica comprometida ficando demasiadamente reduzida. Para estes casos, a broca a ser considerada é a de diamante, pois oferece uma duração maior, diminuindo a quantidade de manobras e aumentando a eficiência da perfuração.

*Poço de diâmetro reduzido:* quando o poço tem diâmetro inferior a 6 ½”, reduz-se o tamanho dos rolamentos em todas as brocas de rolos. Conseqüentemente cria-se uma restrição ao WOB. O uso da broca de diamante é o mais recomendado visando, neste caso, o aumento do coeficiente de penetração e a permanência da broca no poço durante um maior período.

*Uso do motor de fundo:* o motor de fundo pode trabalhar no interior do poço com altas velocidades, maior que 250 RPM. Um RPM elevado gera aumento da carga térmica nos rolamentos e provoca aceleração das falhas nas brocas. Com o intuito de otimizar o RPM e os objetivos da perfuração é conveniente o uso de brocas de diamante que não possuam partes móveis.

*Os Atributos do meio ambiente:* ao perfurar um poço, o mesmo é dividido em intervalos com seções de diâmetros diferentes apresentando atributos comuns em relação ao meio ambiente. Estes atributos são divididos em categorias de parâmetros quanto ao tipo de rocha, meio ambiente e operação. A análise em detalhes de cada categoria fornecerá os parâmetros individuais para a seleção de brocas tricônicas ou de diamantes. As brocas de diamante são as preferidas em relação as brocas tricônicas quando estas apresentam ritmo de perfuração superior as tricônicas em uma dada formação. Em função disto, ao se iniciar a escolha de alguma broca, o primeiro passo é o estudo para se selecionar as de diamante.

*O Tipo de rocha/Litologia:* Ao se perfurar um solo ocorre a interação entre a broca e as formações rochosas. Estas rochas possuem características variadas que necessitam de ser analisadas para orientar na escolha da melhor ferramenta que ofereça a maior durabilidade e desempenho. Os geólogos, nessa fase do processo obtêm os

dados dos topos das formações rochosas, eras e litologias previstas pela interpretação sísmica em conjunto com as litologias perfuradas pelos poços de correlação. A litologia é a primeira informação a ser obtida para se selecionar a melhor broca assim, identificado os dados de forma precisa em relação as formações a serem perfuradas no intervalo determinado, fica mais fácil definir a estrutura de corte ótima para superar a sua resistência, a densidade de cortadores necessária que requer a aplicação, o desenho hidráulico, a duração da broca e a sua taxa de perfuração, seja para brocas tricônicas ou de diamante.

A *Transição* informa a mudança de dureza de cada intervalo da formação alvo. Com isto, esforços diferentes são gerados no perfil da broca durante a transição, além de vibrações axiais, de torção e laterias. O critério para a seleção da broca está na qualidade e densidade específica dos cortadores.

A *Homogeneidade* informa a composição mineralógica da formação. Quando a formação apresenta homogeneidade (uma única litologia) ocorre uma flexibilização da escolha da broca em relação as suas características de agressividade, ou seja, uma menor densidade de cortadores. No caso das brocas tricônicas a sua escolha é feita de acordo com a dureza da rocha. Uma outra situação que pode ocorrer é quando se prevê a perfuração de diferentes formações com diversas litologias, ou seja, aparecem pequenas lentes ou batentes de formações diferentes que podem levar a outras decisões. Neste caso, a escolha é mais difícil já que ocorrem ações de corte diferente e cada litologia necessita de um tipo específico para falhar mais facilmente. Isto pode gerar uma redução da durabilidade de uma broca do tipo PDC por meio de quebra de cortadores ou pelo seu enceramento. Nas brocas de cone pode gerar a quebra de dentes ou insertos ou o seu desgaste precoce.

*Tendência de desvio*: geralmente está relacionado com a perfuração de transição. O critério básico de seleção para estes casos é o tipo de calibre.

*Vibração*: fator importante no rendimento e duração das brocas de perfuração. Portanto, o controle de vibração é um elemento importante para a tecnologia e o projeto das mesmas. A escolha do calibre adequado da broca, entre outros parâmetros, tem uma participação fundamental para se determinar o nível de controle de vibração tanto para brocas tricônicas ou de diamantes.

Outro critério a ser levado em consideração na seleção de brocas são os registros dos perfis geofísicos, tais como: registro neutrônico, raios gama, sônico, densidade, potencial espontâneo, indução e análise da resistência à compressão.

Como o único item que não foi estudado foi o de resistência à compressão ou força compressiva da rocha, este será abordado a seguir.

Este é um método qualitativo para se calcular a dureza da rocha; muito aplicado quando se deseja usar brocas de PDC. A resistência à compressão a que se refere neste trabalho é a resistência à compressão de rochas não confinadas, ou seja, é a sua dureza a pressão atmosférica. Assim, quanto maior a compressibilidade mais difícil será a sua perfuração necessitando de brocas com maior densidade de diamantes, cortadores ou insertos. Atualmente, diversos programas usam a informação da velocidade sônica para obter um valor correspondente ao *Unconfined Compressive Strength - UCS*. Observa-se que o valor da dureza das rochas não confinadas é muito mais baixo que o das rochas confinadas, ou comprimidas. No mercado existem programas que calculam a dureza das rochas referente a dureza da rochas confinadas, valor este muito próximo das formações no fundo do poço. Neste programas os registros usados são os sônicos e de raios gama, além de uma quantidade enorme de dados de registro da lama de perfuração.

A broca também pode ser selecionada pelo tipo de formação. Ao se conhecer as propriedades físicas das formações facilita a escolha das brocas para um dado intervalo definido. Quando a formação é elástica, a mesma tende a se deformar quando ocorre compressão ao invés de fraturar. Como a rocha tem resistência a compressão relativamente baixa, pode ocorrer que a broca não corte com tanta facilidade. Para as brocas de PDC é recomendado o uso de cortadores grandes. Antes, as brocas de dentes de aço e com insertos de carbureto de tungstênio eram aplicadas em formações moles à médias, daí foram desenvolvidas brocas de PDC para estas formações, obtendo taxas de penetração até três vezes maiores que as brocas de rolos.

Outro item que auxilia na seleção de brocas é o desgaste das brocas. Contudo, a análise do desgaste padrão para as brocas em poços de correlação é subjetiva, ou seja, varia de analista para analista, criando uma grande subjetividade para se chegar a uma consistente conclusão. Vários são os fatores que afetam o desgaste das brocas: fatores geológicos, fatores de operação e de manejo e transporte.

Os fatores geológicos devem ser bem estudados antes de se determinar qual o tipo de broca a ser aplicada na formação em questão. Dentre os fatores geológicos temos a abrasividade gerando na broca um desgaste precoce em todas as suas estruturas, sendo o calibre o parâmetro mais afetado, reduzindo o raio do poço; a resistência específica da rocha é função da litologia e dos eventos geológicos ocorridos. Este depende da cimentação dos grãos, forma e tamanho.

Os fatores de operação podem ser evitados, pois são modificados em campo conforme o desempenho observado da perfuração. Estes fatores estão relacionados com a geologia e com a geometria do poço. Os principais fatores operacionais são: o WOB, neste caso, conforme os dentes ou cortadores se degradam aumenta-se o peso. Este aumento vai depender do ROP adequado ou se alcançou o limite definido nas indicações de operação da broca, senão ocorrerá um desgaste da broca antes do tempo normal, tanto para brocas de diamante como para de cones. O RPM significa Rotações por Minuto e define a velocidade de rotação. O fato das brocas poderem funcionar com altas RPMs não é um fator restritivo para suas aplicações, uma vez que para as brocas de diamante por apresentarem desenho adequado podem ser usadas com motor de fundo ou turbina. Da mesma forma as brocas tricônicas especiais podem ser usadas com altas RPMs. O ponto principal nesta questão é o equilíbrio entre o valor da velocidade de rotação e a máxima taxa de penetração possível sem criar problemas para a perfuração ou a broca. Desta forma, em formações moles ao se elevar a RPM pode-se obter proporcionalmente uma taxa de penetração maior. Porém, o inverso pode ocorrer para formações duras. As brocas tricônicas projetadas para serem usadas com motor de fundo ou turbina trabalham com velocidade de rotação elevada, podendo variar de 50 a 600 rpm dependendo do diâmetro da broca, e no caso das turbinas alcançam mais que 1000 rpm. Estes projetos procuram desenvolver melhorias em pontos específicos da broca, tais como: o sistema de rolamento, hidráulica, recobrimento de carbureto de tungstênio para proteger contra a abrasão, selo e graxa para operar em condições de alta temperatura com segurança.

Outro fator é a limpeza do fundo do poço que é fundamental para se evitar o desgaste prematuro da broca, ou seja, a lama de perfuração faz a limpeza no fundo do poço e carrega cascalhos até a superfície. Com isto, a broca não faz retrabalho ou

embola. Esta atividade além de resfriar os dentes ou cortadores da broca, lubrifica a mesma impedindo o seu desgaste.

A geometria do poço é outro fator operacional importante porque ao se fazer um desvio de poço é necessário executar certas operações não aconselháveis como WOB, RPM para diminuir, manter ou aumentar o ângulo do desvio, pois gera desgastes precoces nas brocas.

Por último o Manejo e Transporte da broca deve ser feito com todo o cuidado procurando mantê-las intactas para evitar a redução da duração de sua vida operacional. Mais especificamente na broca de diamante, os cortadores apresentam elevada fragilidade e podem simplesmente rachar com um elevado impacto comprometendo sua durabilidade.

## A.4 – Análise do Tipo de Broca x Rocha

Segundo (PLÁCIDO e PINHO, 2007) as brocas sem partes móveis têm como características de projeto: o número e forma dos cortadores ou lâminas, a metalurgia da broca e dos elementos cortadores, o tamanho e a posição das passagens do fluido. A sua vantagem é que não apresentam partes móveis e rolamentos o que elimina alguns problemas durante a perfuração e aumenta a sua confiabilidade. Estas brocas são classificadas como: de Lâmina de aço ou Rabo de Peixe, Diamante Natural, Diamante Sintético (TSP e PDC) e Impregnadas.

As brocas tipo Lâmina de aço são boas para formações moles e inconsolidadas. Quando atuam em formações duras e abrasivas fazem com que a taxa de penetração caia abruptamente. Assim, se faz necessário mudar a estratégia de uso, neste caso, alterar a forma do elemento cortante e o ângulo de ataque. Se aplicadas em formações plásticas apresentam um problema de enceramento (*balling*). Devido aos problemas apresentados anteriormente estas brocas foram substituídas por outros tipos de brocas.

As brocas de diamantes naturais são ideais para formações com durezas que variam de média a duras. Esta possui uma característica importante que é o perfil ou a forma da estrutura cortante. Outros itens importantes são o tamanho e a densidade dos

cortadores. Estas brocas para terem um bom resfriamento e apresentarem boa limpeza no fundo do poço devem ter uma potência hidráulica de 2,5 hhp/pol<sup>2</sup> no fundo e uma perda de carga entre 500 a 1000 psi na face da broca.

As brocas TSP são empregadas em rochas duras como calcário, arenitos finos e duros e em outras formações.

As brocas de diamantes naturais e impregnadas apresentam grande eficiência em formações duras e abrasivas, em poços profundos, com temperaturas elevadas; em poços de diâmetros pequenos, em situações de alta rotação e quando utilizadas com motores de fundo e turbinas.

As brocas de PDC obtêm resultados satisfatórios quando são empregadas em formações que variam de moles a meio duras, abrasivas e que não sejam plásticas. Os elementos cortantes apresentam duas camadas: uma de diamante sintético ligada a outra de carbureto de tungstênio. Neste tipo de broca, dependendo de sua finalidade, os elementos da matriz apresentam uma posição adequada garantindo o seu maior rendimento possível. Também, para este tipo de broca o tamanho, a forma e a quantidade de cortadores são elementos fundamentais. Outros parâmetros que devem ser observados são: a exposição, o ângulo de ataque (*back rake*) e a orientação dos cortadores (*side rake*), pois afetam a taxa de penetração da broca.

As brocas de partes móveis possuem dois tipos de perfis. Um é o *Long Taper* aplicado em poços verticais e podendo suportar um maior peso sobre a broca. O segundo é o *Short Taper* que facilita a limpeza, pois a energia hidráulica se concentra numa área menor.

Para estas brocas certos fatores afetam o seu desgaste: abrasividade da formação, peso sobre a broca, a função de limpeza e o resfriamento da broca, rotação e vibração.

Em se tratando de brocas com partes móveis, as de cone são fornecidas em grandes variedades de tipos de dentes, insertos e rolamentos. Os dentes e insertos possuem diversos tamanhos e formas. Os rolamentos presentes neste tipo de broca podem ser de esferas ou mancais, selados ou não-selados. Estas brocas são utilizadas em praticamente todos os tipos de formações. Apresentando grande *offset* são adequadas para formações moles. Caso contrário, se adequa bem para rochas duras e frágeis.

A definição das brocas de perfuração rotativa (em relação a formação) levando em consideração os procedimentos operacionais e o comprimento do tamanho dos elementos cortantes (dentes) é feita pelos seguintes critérios: i) para formações moles: dentes longos, baixo peso sobre a broca (WOB) e alta RPM e ii) para formações duras: dentes curtos, alto WOB e baixo RPM.

## A.5 – Ferramentas Aplicadas na Seleção das Brocas

Os programas de perfuração no mundo inteiro estão sendo desafiados a atuarem em profundidades cada vez maiores para a prospecção de petróleo, levando em consideração o perfil do poço e sua formação.

Sob o enfoque do fabricante das brocas normalmente espera-se que desenvolvam produtos que perfurem mais rápido e/ou em maiores profundidades, onde o ambiente é mais agressivo, sem que tenham que ser retiradas para troca, ou pelo menos que minimizem estas trocas.

Para que isto ocorra, empresas e a academia devem desenvolver novas tecnologias e ferramentas que auxiliem nestes objetivos. Sob este enfoque um breve resumo sobre as diversas ferramentas aplicadas na seleção/performance de brocas.

CAICEDO e CALHOUN (2005) desenvolveram um modelo de previsão da taxa de penetração baseado em regressão não linear aplicando a teoria de energia específica e eficiência mecânica como função da força de resistência da rocha.

RABIA (1985) desenvolveu um modelo matemático usando como variável dependente a energia específica e variáveis independentes como WOB, RPM, diâmetro da broca e ROP. Com isto obteve uma relação com o custo por metro baseado na média e coeficiente de variabilidade da energia específica.

Outro trabalho nesta área foi executado por MACINI, MAGAGNI e VALENTE (2005) onde desenvolveram uma metodologia chamada Índice de Broca para avaliar o desempenho da broca através de uma função linear. Neste modelo, o analista define o peso de cada variável independente.

MACINI, MAGAGNI e VALENTE (2006) tratam de um modelo não linear para avaliar a performance das brocas, denominado Intervalo Mínimo utilizando a combinação de custo por metro, energia específica e índice da broca de uma formação italiana.

CURRY et al (2005) desenvolveram um modelo não linear regressivo para medir o desempenho da perfuração baseado na estimativa do limite técnico da energia específica de dados de pressão, litologia e dados sônicos.

BILGESU *et al* (2000) desenvolveram uma metodologia baseada em Redes Neurais Artificiais – RNA obtendo um coeficiente de correlação entre 0,857 e 0,975 para previsão dos tipos de brocas pela RNA e os tipos de broca no campo estudado.

ALI (1994) faz um estudo sobre a aplicação de RNA como uma nova ferramenta para a indústria do petróleo, inclusive seleção e monitoramento das brocas de perfuração.

AREHART (1990) desenvolveu uma RNA para fazer um diagnóstico da broca de perfuração baseado no desgaste dos dentes da broca tendo como *inputs* ROP, WOB, RPM, Torque e HSI (*Hydraulic Horsepower per Square Inch*).

NYGAARD e HARELAND (2007) desenvolveram um modelo de seleção de brocas por meio do *Balanced Scorecard* – BSC.

Cada artigo citado apresenta pontos fortes e fracos dos métodos propostos. Os modelos lineares são fáceis de serem aplicados, no entanto, exige a intervenção do homem, e assim, influenciando na escolha das brocas principalmente quando se trata de uma análise multidimensional perdendo a subjetividade.

As RNAs são muito boas para tratamento de relações não lineares/complexas, porém, limitam-se a determinadas características da análise do problema e aos limites dos dados apresentados no estudo.

A regressão linear/não linear apresenta a dificuldade de não tratar problemas multidimensionais, ou seja, multi-*inputs* e multi-*outputs* ao mesmo tempo.

## Apêndice B - Etapas de Execução da Tese e Algoritmos

B1 – Obter os dados abaixo para implementar o Banco de Dados.

B1.1 – Dados Operacionais

ROP

RPM

B1.2 – Custos

BROCA

SONDA

B1.3 – Dados da rocha/broca

Tipo de rocha

Dureza da rocha

Resistência Não Compressiva da rocha – UCS

Perfurabilidade da rocha -  $\bar{V}$

Tipo de broca e suas características, tais como: nº de cortadores, diâmetro

$\mu$  - coeficiente de atrito de deslocamento: Para a maioria das rochas, este coeficiente varia entre 0,8 e 0,5. Um valor de 0,60 seria um bom número para uso geral (Green Bowling State University).

$\varphi$  – ângulo interno de atrito: Para as rochas = 30°. Como tipicamente está em torno de 25 – 35°, o coeficiente de atrito  $\mu = \tan(\varphi)$  está entre 0,5 a 0,7 (Green Bowling State University).

$\xi$  - constante de atrito entre a interface da rocha e do cortador que varia entre 0,5 – 0,8 ou 0,5 – 1,0 (DETOURNY, 2008 e DETOURNY, 1991).

$\gamma$  é uma constante da broca, neste caso incorpora a influência do projeto da broca e o seu valor está entre 1 – 1,33. Seu valor padrão é 1 quando não é fornecido pelo fabricante da broca (DETOURNY, 2008 e DETOURNY, 1991).

$\varepsilon$  – é energia específica intrínseca e o seu valor depende de vários fatores, porém seu valor pode ser substituído pela Resistência Compressiva Não Confinada (UCS) das rochas, ou seja, a UCS é uma boa aproximação (DETOURNY, 2008).

#### B2 – Montar o Banco de Dados

Montar o Banco de Dados com  $i=1,\dots,I$  dados no formato de tabela, principalmente com os dados do ROP e RPM para a próxima etapa a seguir.

#### B3 – Regressão Linear

Fazer a regressão linear (erro) baseado nos dados do ROP e RPM retirados do banco de dados acima. O objetivo é determinar os  $C_m, D_m, p$  baseado na fórmula da vida da broca (Z) adaptado do modelo de Wu *et al* (2006). Esta regressão é feita no Lingo conforme abaixo.

$$erro = \sum (valor\_real - TV\_Teórico)^2$$

e

$$Z = \frac{1}{\sum_{m=1}^M C_m X_m + D_m (X_m)^p} \quad \text{ou} \quad Z = \frac{1}{C_1 rop + C_2 rpm + D_1 (rop)^p + D_2 (rpm)^p}$$

#### B4 – Separar em Rol os Dados

Separar os dados em rol, ou seja, ordem crescente de valores do tempo de vida  $g(C_m, D_m, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)$ ,  $g(C_m, D_m, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)$  e das funções  $f_m(C_m, D_m, p; rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+)$  e  $f_m(C_m, D_m, p; rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-)$  para serem utilizados no cálculo de  $rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$  e  $rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-$  por meio dos percentis  $P_{25} = rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-$  e  $P_{75} = rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$ , como abaixo:

$$L = \left( \frac{k}{100} \right) \cdot n$$

<b>n</b>	<b>rop<sub>n</sub></b>	<b>rpm<sub>n</sub></b>	<b>C<sub>n</sub> ou g<sub>n</sub></b>
1	rop <sub>1</sub>	rpm <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> ou g <sub>1</sub>
2	rop <sub>2</sub>	rpm <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> ou g <sub>2</sub>
3	rop <sub>3</sub>	rpm <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> ou g <sub>3</sub>
4	rop <sub>4</sub>	rpm <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> ou g <sub>4</sub>
5	rop <sub>5</sub>	rpm <sub>5</sub>	C <sub>5</sub> ou g <sub>5</sub>
6	rop <sub>6</sub>	rpm <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> ou g <sub>6</sub>
7	rop <sub>7</sub>	rpm <sub>7</sub>	C <sub>7</sub> ou g <sub>7</sub>
8	rop <sub>8</sub>	rpm <sub>8</sub>	C <sub>8</sub> ou g <sub>8</sub>
9	rop <sub>9</sub>	rpm <sub>9</sub>	C <sub>9</sub> ou g <sub>9</sub>
10	rop <sub>10</sub>	rpm <sub>10</sub>	C <sub>10</sub> ou g <sub>10</sub>

P<sub>25</sub>

P<sub>75</sub>

B5 – Definir  $rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$  e  $rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-$

Encontrar através de otimização, ou seja, MOLP os valores de  $rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$  e  $rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-$ , segundo as fórmulas abaixo e dados da tabela acima, onde os dados de  $i = 1$  a  $3$  serão usados para o cálculo  $rop_{\min}^-, rpm_{\min}^-$  e os dados de  $i = 8$  a  $10$  serão usados para o cálculo  $rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$ .

Para  $rop_{\max}^+, rpm_{\max}^+$  temos,

$$\text{Min } \sum_{i=1}^I g_i \left( C_m, D_m, p; rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+ \right) \cdot Y_{m,i}, m = 1, \dots, M$$

s.a.

$$f_m \left( C_m, D_m, p; rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+ \right) \leq Y_{m,i} \cdot g \left( C_m, D_m, p; rop_{\max,i}^+, rpm_{\max,i}^+ \right), m = 1, \dots, M \text{ e } i = 1, \dots, I$$

O modelo MOLP para  $rop_{\max}^+$  e  $rpm_{\max}^+$  usado é o método da restrição, que neste caso é a função  $rpm_{\max}^+$ . Logo, temos:

$$\text{Min } g_8 Y_{1,8} + g_9 Y_{1,9} + g_{10} Y_{1,10} \rightarrow \text{Min } rop_{\max}^+$$

$$\text{Min } g_8 Y_{2,8} + g_9 Y_{2,9} + g_{10} Y_{2,10} \rightarrow \text{Min } rpm_{\max}^+$$

Portanto temos,

$$\text{Min } g_8 Y_{1,8} + g_9 Y_{1,9} + g_{10} Y_{1,10}$$

s.a.

$$g_8 Y_{2,8} + g_9 Y_{2,9} + g_{10} Y_{2,10} \leq \varepsilon_{2,1}$$

$$C_2 X_{2,8} \leq g_8 Y_{2,8}$$

$$C_2 X_{2,9} \leq g_9 Y_{2,9}$$

$$C_2 X_{2,10} \leq g_{10} Y_{2,10}$$

$$D_2 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{2,8} \right) \leq g_8 Y_{2,8}$$

$$D_2 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{2,9} \right) \leq g_9 Y_{2,9}$$

$$D_2 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{2,10} \right) \leq g_{10} Y_{2,10}$$

$$C_1 X_{1,8} \leq g_8 Y_{1,8}$$

$$C_1 X_{1,9} \leq g_9 Y_{1,9}$$

$$C_1 X_{1,10} \leq g_{10} Y_{1,10}$$

$$D_1 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{1,8} \right) \leq g_8 Y_{1,8}$$

$$D_1 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{1,9} \right) \leq g_9 Y_{1,9}$$

$$D_1 \left( \left\langle \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\rangle_{1,10} \right) \leq g_{10} Y_{1,10}$$

O modelo MOLP para  $rpm_{\max}^+$  e  $rop_{\max}^+$  usado é o método da restrição, que neste caso é a função  $rop_{\max}^+$ . Logo, temos:

$$\text{Min } g_8 Y_{1,8} + g_9 Y_{1,9} + g_{10} Y_{1,10} \rightarrow \text{Min } rop_{\max}^+$$

$$\text{Min } g_8 Y_{2,8} + g_9 Y_{2,9} + g_{10} Y_{2,10} \rightarrow \text{Min } rpm_{\max}^+$$

Portanto temos,

$$\text{Min } g_8 Y_{2,8} + g_9 Y_{2,9} + g_{10} Y_{2,10}$$

s.a.

$$g_8 Y_{1,8} + g_9 Y_{1,9} + g_{10} Y_{1,10} \leq \varepsilon_{1,1}$$

$$C_1 X_{1,8} \leq g_8 Y_{1,8}$$

$$C_1 X_{1,9} \leq g_9 Y_{1,9}$$

$$C_1 X_{1,10} \leq g_{10} Y_{1,10}$$

$$D_1 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{1,8} \leq g_8 Y_{1,8}$$

$$D_1 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{1,9} \leq g_9 Y_{1,9}$$

$$D_1 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{1,10} \leq g_{10} Y_{1,10}$$

$$C_2 X_{2,8} \leq g_8 Y_{2,8}$$

$$C_2 X_{2,9} \leq g_9 Y_{2,9}$$

$$C_2 X_{2,10} \leq g_{10} Y_{2,10}$$

$$D_2 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{2,8} \leq g_8 Y_{2,8}$$

$$D_2 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{2,9} \leq g_9 Y_{2,9}$$

$$D_2 \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{2,10} \leq g_{10} Y_{2,10}$$

Para  $rop_{\min}^-$ ,  $rpm_{\min}^-$  temos:

$$\text{Max } \sum_{i=1}^I g_i \left( \begin{array}{c} \overline{p} \\ \underbrace{\phantom{p}} \end{array} \right) X_{m,i} , m = 1, \dots, M$$

s.a.

$$f_m \left( C_m, D_m, p; rop_{\min,i}^-, rpm_{\min,i}^- \right) \geq Y_{m,i} \cdot g \left( C_m, D_m, p; rop_{\min,i}^-, rpm_{\min,i}^- \right), m = 1, \dots, M \text{ e } i = 1, \dots, I$$

Para o modelo MOLP para  $rop_{\min}^-$  e  $rpm_{\min}^-$ , a restrição é a função  $rpm_{\min}^-$ . Logo, temos:

$$\text{Max } g_1 Y_{1,1} + g_2 Y_{1,2} + g_3 Y_{1,3} \rightarrow \text{Max } rop_{\min}^-$$

$$\text{Max } g_1 Y_{2,1} + g_2 Y_{2,2} + g_3 Y_{2,3} \rightarrow \text{Max } rpm_{\min}^-$$

Portanto temos,

$$\text{Max } g_1 Y_{1,1} + g_2 Y_{1,2} + g_3 Y_{1,3}$$

s.a.

$$g_1 Y_{2,1} + g_2 Y_{2,2} + g_3 Y_{2,3} \geq \varepsilon_{3,1}$$

$$C_2 X_{2,1} \geq g_1 Y_{2,1}$$

$$C_2 X_{2,2} \geq g_2 Y_{2,2}$$

$$C_2 X_{2,3} \geq g_3 Y_{2,3}$$

$$D_2 \left( C_{2,1} \right) \geq g_1 Y_{2,1}$$

$$D_2 \left( C_{2,2} \right) \geq g_2 Y_{2,2}$$

$$D_2 \left( C_{2,3} \right) \geq g_3 Y_{2,3}$$

$$C_1 X_{1,1} \geq g_1 Y_{1,1}$$

$$C_1 X_{1,2} \geq g_2 Y_{1,2}$$

$$C_1 X_{1,3} \geq g_3 Y_{1,3}$$

$$D_1 \left( C_{1,1} \right) \geq g_1 Y_{1,1}$$

$$D_1 \left( C_{1,2} \right) \geq g_2 Y_{1,2}$$

$$D_1 \left( C_{1,3} \right) \geq g_3 Y_{1,3}$$

Para o modelo MOLP para  $rpm_{\min}^-$  e  $rop_{\min}^-$ , a restrição é a função  $rop_{\min}^-$ . Logo, temos:

$$\text{Max } g_1 Y_{1,1} + g_2 Y_{1,2} + g_3 Y_{1,3} \rightarrow \text{Max } rop_{\min}^-$$

$$\text{Max } g_1 Y_{2,1} + g_2 Y_{2,2} + g_3 Y_{2,3} \rightarrow \text{Max } rpm_{\min}^-$$

Portanto temos,

$$\text{Max } g_1 Y_{2,1} + g_2 Y_{2,2} + g_3 Y_{2,3}$$

s.a.

$$g_1 Y_{1,1} + g_2 Y_{1,2} + g_3 Y_{1,3} \geq \varepsilon_{3,2}$$

$$C_1 X_{1,1} \geq g_1 Y_{1,1}$$

$$C_1 X_{1,2} \geq g_2 Y_{1,2}$$

$$C_1 X_{1,3} \geq g_3 Y_{1,3}$$

$$D_1 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{1,1} \geq g_1 Y_{1,1}$$

$$D_1 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{1,2} \geq g_2 Y_{1,2}$$

$$D_1 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{1,3} \geq g_3 Y_{1,3}$$

$$C_2 X_{2,1} \geq g_1 Y_{2,1}$$

$$C_2 X_{2,2} \geq g_2 Y_{2,2}$$

$$C_2 X_{2,3} \geq g_3 Y_{2,3}$$

$$D_2 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{2,1} \geq g_1 Y_{2,1}$$

$$D_2 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{2,2} \geq g_2 Y_{2,2}$$

$$D_2 \left( \begin{matrix} \overline{p} \\ \underline{p} \end{matrix} \right)_{2,3} \geq g_3 Y_{2,3}$$

B6 – Determinar os  $rop_{\min}^+, rpm_{\min}^+$  e  $rop_{\max}^-, rpm_{\max}^-$

Uma vez determinados os valores de  $rop_{\min}^+, rpm_{\min}^+$  e  $rop_{\max}^-, rpm_{\max}^-$ , devemos encontrar os valores de  $rop_{\min}^+, rpm_{\min}^+$  e  $rop_{\max}^-, rpm_{\max}^-$ . Estes valores são definidos por um procedimento definido a seguir.

$$\frac{rop_{\max}^+ - rop_{\min}^-}{N} = I_{rop} \text{ ou } \frac{rpm_{\max}^+ - rpm_{\min}^-}{N} = I_{rpm}$$

$$R_{rop,n} = rop_{\max}^+ - n \cdot I_{rop}, n = 1, \dots, N-1 \quad \text{ou} \quad R_{rpm,n} = rpm_{\max}^+ - n \cdot I_{rpm}$$

B7 – Determinar o  $Rop_{opt,n}^+, Rpm_{opt,n}^+, Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$

Após esta etapa, deve-se inserir os dados nos modelos matemáticos chamados  $Q^+$  e  $Q^-$  e obter os resultados dos  $Rop_{opt,n}^+, Rpm_{opt,n}^+, Rop_{opt,n}^-$  e  $Rpm_{opt,n}^-$ .

$$MinQ^+ = I \cdot (C_1 rop^+ + C_2 rpm^+ + D_1 (rop^+)^p + D_2 (rpm^+)^p)$$

s.a.

$$H \leq N^+ \cdot rop^+$$

$$rop^+ - R_{rop,n} \geq 0$$

$$-rop^+ + rop_{\max}^+ \geq 0$$

$$rpm^+ - R_{rpm,n} \geq 0$$

$$-rpm^+ + rpm_{\max}^+ \geq 0$$

$$1 < p < 2$$

$$C_m, D_m \in \Re$$

$$n = 1$$

$$R_{rop,1} = rop_{\max}^+ - 1 \cdot I_{rop} \quad e$$

$$n = 1$$

$$R_{rpm,1} = rpm_{\max}^+ - 1 \cdot I_{rpm}$$

$$MinQ^+ = I \cdot (C_1 rop^+ + C_2 rpm^+ + D_1 (rop^+)^p + D_2 (rpm^+)^p)$$

s.a.

$$H \leq N^+ \cdot rop^+$$

$$rop^+ - R_{rop,1} \geq 0$$

$$-rop^+ + rop_{\max}^+ \geq 0$$

$$rpm^+ - R_{rpm,1} \geq 0$$

$$-rpm^+ + rpm_{\max}^+ \geq 0$$

$$1 < p < 2$$

$$C_m, D_m \in \mathfrak{R}$$

e

$$MinQ^- = I \cdot (C_1 rop^- + C_2 rpm^- + D_1 (rop^-)^p + D_2 (rpm^-)^p)$$

s.a.

$$H \leq N^- \cdot rop^-$$

$$rop^- - rop_{\min}^- \geq 0$$

$$-rop^- + R_{rop,1} \geq 0$$

$$rpm^- - rpm_{\min}^- \geq 0$$

$$-rpm^- + R_{rpm,1} \geq 0$$

$$1 < p < 2$$

$$C_m, D_m \in \mathfrak{R}$$

Depois fazer os cálculos para  $n = N - 1$  e montar a tabela abaixo.

Exemplo para  $N = 10$ , então temos  $n = N - 1 = 9$ .

$n$	$R_{rop,n}$	$R_{rpm,n}$	$Rop_{opt,n}^+$	$Rpm_{opt,n}^+$	$Q_{opt,n}^+$	$Rop_{opt,n}^-$	$Rpm_{opt,n}^-$	$Q_{opt,n}^-$	$Q_{opt,n}^+ - Q_{opt,n}^-$
1	$R_{rop,1}$	$R_{rpm,1}$	$Rop_{opt,1}^+$	$Rpm_{opt,1}^+$	$Q_{opt,1}^+$	$Rop_{opt,1}^-$	$Rpm_{opt,1}^-$	$Q_{opt,1}^-$	$Q_{opt,1}^+ - Q_{opt,1}^-$
2	$R_{rop,2}$	$R_{rpm,2}$	$Rop_{opt,2}^+$	$Rpm_{opt,2}^+$	$Q_{opt,2}^+$	$Rop_{opt,2}^-$	$Rpm_{opt,2}^-$	$Q_{opt,2}^-$	$Q_{opt,2}^+ - Q_{opt,2}^-$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
9	$R_{rop,9}$	$R_{rpm,9}$	$Rop_{opt,9}^+$	$Rpm_{opt,9}^+$	$Q_{opt,9}^+$	$Rop_{opt,9}^-$	$Rpm_{opt,9}^-$	$Q_{opt,9}^-$	$Q_{opt,9}^+ - Q_{opt,9}^-$

O critério estabelecido é a menor diferença entre  $Q_n^+ - Q_n^-$  dentre os diversos  $n$ 's.

## Apêndice C - Modelos Matemáticos do Exemplo Perfuração de Petróleo

### C1 – Regressão Linear

A regressão foi feita variando o p de 1,9 até 1,1 com passo de 0,1. Depois de 1,1 até 1,01 com passo 0,01. Abaixo o modelo matemático no LINGO.

```
Sets:
linhas/1..13/: tv, solucao, rop, rpm;
Endsets

Data:
rpm = 100 100 100 100 100 100 120 120 120 120 130 130 140;
rop = 2.0 3.0 3.8 6.1 6.4 8.9 7.6 11.2 11.4 12.2 9.0 11.3 10.4;
tv = 32.8 110.1 98.0 61.6 60.8 178.0 82.8 89.6 205.2 85.4 82.8
144.6 156.0;

enddata

p = 1.0101;

!c1 >= 0.000001;
!c2 >= 0.000001;
!d1 >= 0.000001;
!d2 >= 0.000001;
!@FREE(d1);
!@FREE(d2);

@for(linhas: solucao = 1/(c1*rop + c2*rpm - d1*(rop^p) -
d2*(rpm^p)));

Min = @sum(linhas: (tv - solucao)^2);
```

### C2 – Definição dos $rop_{\max}^+$ , $rpm_{\max}^+$ e $rop_{\min}^-$ , $rpm_{\min}^-$

```
!Calculo do Rop+,max (Y110) e Rpm+,max (Y210) no MOLP;

!min = 89.6*Y110 + 144.6*Y111 + 205.2*Y112 + 85.4*Y113;
min = 85.4*Y210 + 82.8*Y211 + 144.6*Y212 + 156.0*Y213;

89.6*Y110 + 144.6*Y111 + 205.2*Y112 + 85.4*Y113 <= 0.0314855;
!85.4*Y210 + 82.8*Y211 + 144.6*Y212 + 156.0*Y213 <= 7.216368;

89.6*Y110 >= 0.0000006040291*11.2;
144.6*Y111 >= 0.0000006040291*11.3;
205.2*Y112 >= 0.0000006040291*11.4;
85.4*Y113 >= 0.0000006040291*12.2;
```

```
89.6*Y110 >= 0.0006664855*(11.2^1.01);
144.6*Y111 >= 0.0006664855*(11.3^1.01);
205.2*Y112 >= 0.0006664855*(11.4^1.01);
85.4*Y113 >= 0.0006664855*(12.2^1.01);
```

```
85.4*Y210 >= 0.01387763*120;
82.8*Y211 >= 0.01387763*130;
144.6*Y212 >= 0.01387763*130;
156.0*Y213 >= 0.01387763*140;
```

```
85.4*Y210 >= 0.0131072*(120^1.01);
82.8*Y211 >= 0.0131072*(130^1.01);
144.6*Y212 >= 0.0131072*(130^1.01);
156.0*Y213 >= 0.0131072*(140^1.01);
```

```
@FREE(Y110);
@FREE(Y111);
@FREE(Y112);
@FREE(Y113);
@FREE(Y210);
@FREE(Y211);
@FREE(Y212);
@FREE(Y213);
```

```
!Calculo do Rop+,min (Y101) e Rpm+,min (Y201) no MOLP;
```

```
!max = 32.8*Y101 + 110.1*Y102 + 98.0*Y103 + 61.6*Y104;
max = 32.8*Y201 + 110.1*Y202 + 98.0*Y203 + 61.6*Y204;
```

```
32.8*Y101 + 110.1*Y102 + 98.0*Y103 + 61.6*Y104 >= 0.000009000034;
!32.8*Y201 + 110.1*Y202 + 98.0*Y203 + 61.6*Y204 >= 5.4;
```

```
32.8*Y101 <= 0.0000006040291*2.0;
110.1*Y102 <= 0.0000006040291*3.0;
98.0*Y103 <= 0.0000006040291*3.8;
61.6*Y104 <= 0.0000006040291*6.1;
```

```
32.8*Y101 <= 0.0006664855*(2.0^1.01);
110.1*Y102 <= 0.0006664855*(3.0^1.01);
98.0*Y103 <= 0.0006664855*(3.8^1.01);
61.6*Y104 <= 0.0006664855*(6.1^1.01);
```

```
32.8*Y201 <= 0.01387763*100;
110.1*Y202 <= 0.01387763*100;
98.0*Y203 <= 0.01387763*100;
61.6*Y204 <= 0.01387763*100;
```

```
32.8*Y201 <= 0.0131072*(100^1.01);
110.1*Y202 <= 0.0131072*(100^1.01);
98.0*Y203 <= 0.0131072*(100^1.01);
61.6*Y204 <= 0.0131072*(100^1.01);
```

```
@FREE(Y101);
@FREE(Y102);
@FREE(Y103);
@FREE(Y104);
@FREE(Y201);
```

```
@FREE (Y202);
@FREE (Y203);
@FREE (Y204);
```

C3 – Calcular os  $Rop_{opt,n}^+$ ,  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ ,  $Rpm_{opt,n}^-$  intervalares.

```
!Cálculo da FO inferior ou negativa, que é o maior custo métrico de perfuração;
```

```
!Preço da sonda off-shore (H): US$ 250,00/hora;
```

```
!Preço da broca tricônica (I): US$ 418,00;
```

```
!X1MN = ROP MIN NEGATIVO;
```

```
!X2MN = RPM MIN NEGATIVO;
```

```
!X1N = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP NEGATIVA;
```

```
!X2N = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM NEGATIVA;
```

```
!NN = CONSTANTE NEGATIVA;
```

```
!R1N = INTERVALO PARA O X1MN;
```

```
!R2N = INTERVALO PARA O X2MN;
```

```
H = 250;
```

```
I = 418;
```

```
R1N = 2.497;
```

```
R2N = 101;
```

```
X1MN = 1.980;
```

```
X2MN = 99;
```

```
C1 = 0.0000006040291;
```

```
C2 = 0.01387763;
```

```
D1 = 0.0006664855;
```

```
D2 = 0.0131072;
```

```
p = 1.01;
```

```
NN = 108;
```

```
Min = I*(C1*X1N + C2*X2N - D1*(X1N^p) - D2*(X2N^p));
```

```
H <= NN*X1N;
```

```
X1N - X1MN >= 0;
```

```
-X1N + R1N >= 0;
```

```
X2N - X2MN >= 0;
```

```
-X2N + R2N >= 0;
```

```
!Cálculo da FO superior ou positiva, que é o menor custo métrico de perfuração;
```

```
!Preço da sonda off-shore (H): US$ 250,00/hora;
```

```
!Preço da broca tricônica (I): US$ 418,00;
```

```
!X1MP = ROP MAX POSITIVO;
```

```
!X2MP = RPM MAX POSITIVO;
```

```
!X1P = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP POSITIVA;
```

```
!X2P = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM POSITIVA;
```

```
!NP = CONSTANTE POSITIVA;
```

```
!R1N = INTERVALO PARA O X1MP;
```

```
!R2N = INTERVALO PARA O X2MP;
```

```
H = 250;
```

```
I = 418;
```

```
R1N = 2.497;
```

```
R2N = 101;
```

```

X1MP = 12.322;
X2MP = 141;
C1 = 0.0000006040291;
C2 = 0.01387763;
D1 = 0.0006664855;
D2 = 0.0131072;
p = 1.01;
NP = 120;

Min = I*(C1*X1P + C2*X2P - D1*(X1P^p) - D2*(X2P^p));
H <= NP*X1P;
X1P - R1N >= 0;
-X1P + X1MP >= 0;
X2P - R2N >= 0;
-X2P + X2MP >= 0;

```

C4 – Calcular os  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  determinísticos.

```

!Cálculo da FO DETERMINISTICO, que é o maior custo métrico de
perfuração;
!Preço da sonda off-shore (H): US$ 250,00/hora;
!Preço da broca tricônica (I): US$ 418,00;
!X1NMAX = LIMITE SUPERIOR DA RESTRIÇÃO DO ROP;
!X2NMAX = LIMITE SUPERIOR DA RESTRIÇÃO DO RPM;
!X1NMIN = LIMITE INFERIOR DA RESTRIÇÃO DO ROP;
!X2NMIN = LIMITE INFERIOR DA RESTRIÇÃO DO RPM;
!N      = CONSTANTE;
!X1N    = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP;
!X2N    = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM;

H = 250;
I = 418;
X1NMAX = 7.410;
X1NMIN = 2.239;
X2NMAX = 121;
X2NMIN = 100;
C1 = 0.0000006040291;
C2 = 0.01387763;
D1 = 0.0006664855;
D2 = 0.0131072;
p = 1.01;

Min = (H/X1N) + I*(C1*X1N + C2*X2N - D1*(X1N^p) - D2*(X2N^p));
X1N >= X1NMIN;
X1N <= X1NMAX;
X2N >= X2NMIN;
X2N <= X2NMAX;

```

## Apêndice D - Modelos Matemáticos do Exemplo Metais

### D1 – Regressão Linear

A regressão foi feita variando o  $p$  de 1,9 até 1,1 com passo de 0,1. Depois de 1,1 até 1,01 com passo 0,01. Abaixo o modelo matemático no LINGO.

```
Sets:
    linhas/1..25/: tv, solucao, rop, rpm;
Endsets

Data:
    rpm = 398 318 796 265 265 531 531 1194 637 796 796 796 796 1194
955 531 637 955 955 637 796 1194 398 318 318;
    rop = 3.6 4.6 7.2 1.0 2.4 4.8 7.6 10.7 5.7 7.2 11.5 11.5 2.9
17.2 13.8 1.9 9.2 8.6 3.4 2.3 2.9 4.3 1.4 1.1 2.9;
    tv = 0.0299 0.0764 0.0896 0.0901 0.0902 0.0902 0.0912 0.1193
0.1194 0.1194 0.1210 0.1210 0.1352 0.1480 0.1490 0.1500 0.1503 0.1504
0.1795 0.1795 0.1797 0.2100 0.2103 0.2992 0.4190;

enddata

p = 1.01;

!c1 >= 0.000001;
!c2 >= 0.000001;
!d1 >= 0.000001;
!d2 >= 0.000001;

!@FREE (d1);
!@FREE (d2);

@for(linhas: solucao = 1/(c1*rop + c2*rpm - d1*(rop^p) -
d2*(rpm^p)));

Min = @sum(linhas: (tv - solucao)^2);
```

### D2 – Definição dos $rop_{\max}^+$ , $rpm_{\max}^+$ e $rop_{\min}^-$ , $rpm_{\min}^-$

```
!Calculo do Rop+,max e Rpm+,max no MOLP;

!min = 0.1503*Y11 + 0.1193*Y12 + 0.1210*Y13 + 0.1210*Y14 + 0.1490*Y15
+ 0.1480*Y16;
min = 0.1795*Y21 + 0.1504*Y22 + 0.1490*Y23 + 0.2100*Y24 + 0.1193*Y25 +
0.1480*Y26;
```

```

0.1503*Y11 + 0.1193*Y12 + 0.1210*Y13 + 0.1210*Y14 + 0.1490*Y15 +
0.1480*Y16 <= 3877.61;
!0.1795*Y21 + 0.1504*Y22 + 0.1490*Y23 + 0.2100*Y24 + 0.1193*Y25 +
0.1480*Y26 <= 4461;

0.1503*Y11 >= 52.56350*9.1680;
0.1193*Y12 >= 52.56350*10.7400;
0.1210*Y13 >= 52.56350*11.4600;
0.1210*Y14 >= 52.56350*11.4600;
0.1490*Y15 >= 52.56350*13.7520;
0.1480*Y16 >= 52.56350*17.1900;

0.1503*Y11 >= 50.73966*(9.1680^1.01);
0.1193*Y12 >= 50.73966*(10.7400^1.01);
0.1210*Y13 >= 50.73966*(11.4600^1.01);
0.1210*Y14 >= 50.73966*(11.4600^1.01);
0.1490*Y15 >= 50.73966*(13.7520^1.01);
0.1480*Y16 >= 50.73966*(17.1900^1.01);

0.1795*Y21 >= 0.6918983*955;
0.1504*Y22 >= 0.6918983*955;
0.1490*Y23 >= 0.6918983*955;
0.2100*Y24 >= 0.6918983*1194;
0.1193*Y25 >= 0.6918983*1194;
0.1480*Y26 >= 0.6918983*1194;

0.1795*Y21 >= 0.6443704*(955^1.01);
0.1504*Y22 >= 0.6443704*(955^1.01);
0.1490*Y23 >= 0.6443704*(955^1.01);
0.2100*Y24 >= 0.6443704*(1194^1.01);
0.1193*Y25 >= 0.6443704*(1194^1.01);
0.1480*Y26 >= 0.6443704*(1194^1.01);

@FREE (Y11);
@FREE (Y12);
@FREE (Y13);
@FREE (Y14);
@FREE (Y15);
@FREE (Y16);
@FREE (Y21);
@FREE (Y22);
@FREE (Y23);
@FREE (Y24);
@FREE (Y25);
@FREE (Y26);

!Calculo do Rop+,min e Rpm+,min no MOLP;

max = 0.0901*Y11 + 0.2992*Y12 + 0.2103*Y13 + 0.1500*Y14 + 0.1795*Y15 +
0.0902*Y16;
!max = 0.0901*Y21 + 0.0902*Y22 + 0.2992*Y23 + 0.4190*Y24 + 0.0764*Y25
+ 0.2103*Y26;

!0.0901*Y11 + 0.2992*Y12 + 0.2103*Y13 + 0.1500*Y14 + 0.1795*Y15 +
0.0902*Y16 >= 516;

```

```
0.0901*Y21 + 0.0902*Y22 + 0.2992*Y23 + 0.4190*Y24 + 0.0764*Y25 +
0.2103*Y26 >= 1284;
```

```
0.0901*Y11 <= 52.56350*0.9540;
0.2992*Y12 <= 52.56350*1.1460;
0.2103*Y13 <= 52.56350*1.4340;
0.1500*Y14 <= 52.56350*1.9080;
0.1795*Y15 <= 52.56350*2.2920;
0.0902*Y16 <= 52.56350*2.3880;
```

```
0.0901*Y11 <= 50.73966*(0.9540^1.01);
0.2992*Y12 <= 50.73966*(1.1460^1.01);
0.2103*Y13 <= 50.73966*(1.4340^1.01);
0.1500*Y14 <= 50.73966*(1.9080^1.01);
0.1795*Y15 <= 50.73966*(2.2920^1.01);
0.0902*Y16 <= 50.73966*(2.3880^1.01);
```

```
0.0901*Y21 <= 0.6918983*265;
0.0902*Y22 <= 0.6918983*265;
0.2992*Y23 <= 0.6918983*318;
0.4190*Y24 <= 0.6918983*318;
0.0764*Y25 <= 0.6918983*318;
0.2103*Y26 <= 0.6918983*398;
```

```
0.0901*Y21 <= 0.6443704*(265^1.01);
0.0902*Y22 <= 0.6443704*(265^1.01);
0.2992*Y23 <= 0.6443704*(318^1.01);
0.4190*Y24 <= 0.6443704*(318^1.01);
0.0764*Y25 <= 0.6443704*(318^1.01);
0.2103*Y26 <= 0.6443704*(398^1.01);
```

```
@FREE (Y11);
@FREE (Y12);
@FREE (Y13);
@FREE (Y14);
@FREE (Y15);
@FREE (Y16);
@FREE (Y21);
@FREE (Y22);
@FREE (Y23);
@FREE (Y24);
@FREE (Y25);
@FREE (Y26);
```

D3 – Calcular os  $Rop_{opt,n}^+$ ,  $Rpm_{opt,n}^+$  e  $Rop_{opt,n}^-$ ,  $Rpm_{opt,n}^-$  intervalares.

!Cálculo da FO superior ou positiva, que é o menor custo métrico de perfuração - CUSTO METRICO INFERIOR;

!Preço da máquina CNC MCV-641 comparação com Romi D600 (H): R\$ 17,27/hora;

!Preço da broca HSS 12mm marca Irwin (I): R\$ 20,00;

!X1MP = ROP MAX POSITIVO;

!X2MP = RPM MAX POSITIVO;

!X1P = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP POSITIVA;

!X2P = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM POSITIVA;

```

!NP = CONSTANTE POSITIVA;
!R1N = INTERVALO PARA O X1MP;
!R2N = INTERVALO PARA O X2MP;

```

```

H = 17.27;
I = 20;
R1N = 16.541;
R2N = 1158;
X1MP = 17.362;
X2MP = 1206;
C1 = 52.56350000;
C2 = 0.69189830;
D1 = 50.73966000;
D2 = 0.64437040;
p = 1.01;
NP = 30;

```

```

Min = I*(C1*X1P + C2*X2P - D1*(X1P^p) - D2*(X2P^p));
H <= NP*X1P;
X1P - R1N >= 0;
-X1P + X1MP >= 0;
X2P - R2N >= 0;
-X2P + X2MP >= 0;

```

!Cálculo da FO inferior ou negativa, que é o maior custo métrico de perfuração - CUSTO METRICO SUPERIOR;

!Preço da máquina CNC MCV-641 comparação com Romi D600 (H): R\$ 17,27/hora;

!Preço da broca HSS 12mm marca Irwin (I): R\$ 20,00;

!X1MN = ROP MIN NEGATIVO;

!X2MN = RPM MIN NEGATIVO;

!X1N = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP NEGATIVA;

!X2N = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM NEGATIVA;

!NN = CONSTANTE NEGATIVA;

!R1N = INTERVALO PARA O X1MN;

!R2N = INTERVALO PARA O X2MN;

```

H = 17.27;
I = 20;
R1N = 1.765;
R2N = 310;
X1MN = 0.945;
X2MN = 263;
C1 = 52.56350000;
C2 = 0.69189830;
D1 = 50.73966000;
D2 = 0.64437040;
p = 1.01;
NN = 21.8;

```

```

Min = I*(C1*X1N + C2*X2N - D1*X1N^(p) - D2*X2N^(p));
H <= NN*X1N;
X1N - X1MN >= 0;
-X1N + R1N >= 0;

```

```
X2N - X2MN >= 0;  
-X2N + R2N >= 0;
```

D4 – Calcular os  $Rop_{opt,n}$  e  $Rpm_{opt,n}$  determinísticos.

```
!Cálculo da FO DETERMINISTICO, que é o maior custo métrico de perfuração;
```

```
!Preço da sonda off-shore (H): R$ 17,27/hora;  
!Preço da broca tricônica (I): R$ 20,00;  
!X1NMAX = LIMITE SUPERIOR DA RESTRIÇÃO DO ROP;  
!X2NMAX = LIMITE SUPERIOR DA RESTRIÇÃO DO RPM;  
!X1NMIN = LIMITE INFERIOR DA RESTRIÇÃO DO ROP;  
!X2NMIN = LIMITE INFERIOR DA RESTRIÇÃO DO RPM;  
!N      = CONSTANTE;  
!X1N    = VARIÁVEL DE DECISÃO ROP;  
!X2N    = VARIÁVEL DE DECISÃO RPM;
```

```
H = 17.27;  
I = 20;  
X1NMAX = 16.951;  
X1NMIN = 8.743;  
X2NMAX = 1182;  
X2NMIN = 711;  
C1 = 52.56350000;  
C2 = 0.69189830;  
D1 = 50.73966000;  
D2 = 0.64437040;  
p = 1.01;
```

```
Min = (H/X1N) + I*(C1*X1N + C2*X2N - D1*(X1N^p) - D2*(X2N^p));
```

```
X1N >= X1NMIN;  
X1N <= X1NMAX;  
X2N >= X2NMIN;  
X2N <= X2NMAX;
```

D5 - Custo da máquina por hora de trabalho ( $S_m$ )

D5.1 - Dados do Centro de Usinagem Vertical Romi D600:

Preço do CNC: R\$ 200.000,00

Medida Frontal: 2.600 mm

Medida de Profundidade: 2.680 mm

Medida da Altura: 2.700 mm

Área ocupada pela máquina CNC: 7 m<sup>2</sup>

D5.2 - Dados do local onde está instalado o CNC:

Local: Bonsucesso

Aluguel do Galpão: R\$ 3.600,00

Área do Galpão: 350 m<sup>2</sup>

Para a determinação do custo da máquina, valor este que será posteriormente a base para a determinação do custo de um produto, vários fatores deverão ser considerados:

$$S_m = \frac{1}{H} \cdot \left[ \frac{V_{mi}}{M} + V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \cdot j + E_m \cdot K_e \cdot j + k_{mc} \right]$$

Onde:

↪ H - É o número de horas de trabalho por ano, normalmente = 2200 horas / ano, ou seja, 44 horas de trabalho semanais e 50 semanas por ano;

↪  $\left( \frac{V_{mi}}{M} \right)$  = Depreciação = custo de reposição do equipamento ao final de sua

vida útil: Todo equipamento tem uma vida útil, durante a qual deverá ser apropriado o custo de sua reposição. Isto denomina-se depreciação, a qual é calculada linearmente da seguinte forma:

$$Depreciação = \frac{\text{Valor de aquisição do bem}}{\text{Vida útil do bem}} = \frac{V_{mi}}{M}$$

O equipamento novo foi adquirido por R\$ 200.000,00 e tem uma vida útil de 10 anos, a sua depreciação (reposição do bem) será:

$$Depreciação = \frac{R\$200.000,00}{10} = R\$20.000,00 / ano$$

$$\Rightarrow \left[ V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M} \cdot j \right] = \text{custo de oportunidade}$$

Ninguém aporta capital sem que o mesmo seja remunerado. Não se fará uma aplicação de capital, por exemplo na poupança, sem que após um determinado período o mesmo seja acrescido de uma remuneração – juros.

O mesmo ocorre em uma empresa, ou seja, o acionista não fará um investimento de capital (aquisição de um bem) sem que o mesmo seja remunerado, uma vez que existe a opção de aplicar este recurso no mercado financeiro.

Desta forma, qualquer capital investido deverá ser remunerado, a uma taxa de juro determinada pelo acionista, a qual denomina-se de TMA – taxa mínima de atratividade. Quando a mesma não é determinada, utiliza-se uma taxa de juro livre de risco. No Brasil esta é a SELIC, que é divulgada pelo Banco Central, que é a taxa que o governo remunera os recursos que toma emprestado no mercado para financiar suas atividades. A expressão do custo de oportunidade em equipamento novo é:

$$\text{Custo de Oportunidade}_{equip. novo} = V_{mi} \cdot \underbrace{j}_{\text{Taxa de juro}}$$

*valor inicial do equip.*

Caso o equipamento seja usado, devemos considerar seu valor inicial descontando-se a % de vida já incorrida, ou seja:

$$\% \text{ da vida já incorrida} = \frac{\overbrace{m}^{\text{Idade do bem}}}{\underbrace{M}_{\text{Vida útil do bem}}}$$

Este valor deverá ser retirado do valor inicial do equipamento, para a determinação correta do valor investido que deverá ser remunerado. Assim sendo:

$$\text{Custo de oportunidade equip. usado} = \left( V_{mi} - V_{mi} \frac{m}{M} \right) \times j$$

O equipamento adquirido já tem uma idade de 3 anos, e que o empresário deseje que seu capital seja remunerado a 10% ao ano:

$$\text{Custo\_de\_oport.} = \left( R\$200.000 - R\$200.000 \times \frac{3}{10} \right) \times 0,1 = R\$14.000 / \text{ano}$$

$$\Rightarrow E_m \cdot K_e \cdot j = \text{custo das instalações industriais}$$

Quando da instalação de um equipamento o seu custo não é o único capital aportado, mas também temos a instalação industrial no qual este será instalado, que também tem um custo que deverá ser remunerado.

Para tanto, temos a área ocupada pelo equipamento e o custo de construção desta área (obras civis e utilidades), que será calculado por:

$$\text{custo das instalações industriais} = \underbrace{E_m}_{\text{área ocupada (m}^2\text{)}} \times \underbrace{K_e}_{\text{Custo por m}^2} \times \underbrace{j}_{\text{Taxa de juro}}$$

$$E_m = 7m^2$$

$$K_e = \frac{R\$3.600}{350m^2} = R\$10,29/m^2$$

$$j = 10\% a.a.$$

$$Custo\_de\_inst.ind. = 7 \times 10,29 \times 0,1 = R\$7,20/ano$$

↪  $k_{mc}$  = Custo da manutenção anual da máquina

Todo equipamento durante a sua vida útil requer manutenção. Se a empresa tem equipamento similar em suas instalações, poderá utilizar os apontamentos do departamento de manutenção e determinar o custo anual incorrido. Caso contrário deverá utilizar a recomendação fabricante, ou estimar um custo anual.

Normalmente estima-se que um equipamento consuma anualmente entre mão de obra e peças de reposição, em torno de 5% do seu valor de aquisição.

Baseado nas informações do representante da Romi, o custo de manutenção médio para este equipamento estaria em torno de R\$ 4.000,00 / ano.

Portanto,

$$S_m = \frac{1}{2.200} \cdot (4.000 + 20.000 + 7,20 + 4.000) = \frac{38.007,20}{2.200} = R\$17,27/hora$$