

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS – PPGEM

JAMES LUIGI ROMANÓ

MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAÇÃO DE
ZONAS DE PERDA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDO DE
PERFURAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira

CURITIBA
MARÇO - 2017

JAMES LUIGI ROMANÓ

**MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAÇÃO DE
ZONAS DE PERDA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDO DE
PERFURAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira

**CURITIBA
MARÇO – 2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R759m Romanó, James Luigi
2017 Modelo numérico para determinação de zonas de perda de circulação de fluido de perfuração em poços de petróleo / James Luigi Romanó.-- 2017.
102 f.: il.; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2017.
Bibliografia: p. 95-98.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Temperatura. 3. Fraturas - Localização. 4. Poços de petróleo - Fluidos de perfuração. 5. Modelos matemáticos. I. Junqueira, Silvio Luiz de Mello. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

JAMES LUIGI ROMANÓ

MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE PERDA DE CIRCULAÇÃO DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO EM POÇOS DE PETRÓLEO

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia Térmica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Silvio L. M. Junqueira, Dr.
UTFPR - orientador

Prof. George Stanescu, Dr.
UFPR

Prof. Admilson T. Franco, Dr.
UTFPR

Curitiba, 31 de Março de 2017

À minha família:

Elma e Letícia;

E ao meu pai James Scholl Romanó (in memoriam).

RESUMO

Durante a perfuração de poços de petróleo, a determinação do perfil de temperaturas no poço é importante para tomada de decisões relativas ao processo de cimentação, para a seleção de revestimento do poço e equipamentos e, sobretudo, na identificação de zonas de influxo e perda de circulação. Neste trabalho é proposto um modelo matemático da transferência de calor em regime transitório do escoamento de fluido de perfuração em poços fraturados com perda de circulação. O poço é representado de maneira simplificada através de um cilindro anular concêntrico, cuja parede externa (interface poço-formação) apresenta uma ou mais fraturas discretas. Para a obtenção do modelo térmico é realizado um balanço de energia com foco nas trocas de calor entre a coluna de perfuração, região anular e formação rochosa. A característica principal do modelo proposto é a possibilidade de detecção da posição e número de fraturas a partir do perfil do gradiente térmico da região anular ao longo do poço. Para tanto, com o código numérico, obtido via método dos volumes finitos, investiga-se a influência de parâmetros: da fratura (profundidade relativa, perda de circulação, número e distância entre fraturas), físicos (tempo de circulação) e do regime de escoamento (número de Reynolds e viscosidade dos fluidos de perfuração). As variáveis-resposta principais analisadas são a temperatura da região anular e o gradiente térmico. Como variáveis-resposta secundárias são utilizadas as evoluções térmicas da temperatura no fundo do poço e na saída da região anular. É constatado que o aumento da profundidade relativa ou número de fraturas diminui a temperatura do fundo do poço, sem causar variação significativa na temperatura de saída do anular. Para a variação da perda de circulação, o efeito na temperatura do fundo do poço é similar ao da variação do aumento da profundidade relativa da fratura, no entanto são observadas diferenças na temperatura de saída. Além disso, é verificado que, conforme se aumenta o número de fraturas distribuídas ao longo da profundidade do poço, a temperatura do poço tende ao caso de poço não fraturado. De maneira similar é evidenciada a tendência de que a diminuição na distância entre fraturas se aproxima dos resultados para um poço com uma única fratura. Finalmente, o aumento da perda de circulação facilita a detecção de fraturas devido a respectiva mudança na descontinuidade do perfil do gradiente térmico da região anular.

Palavras-chave: Localização de fraturas, Perfil de temperatura, fluido de perfuração, modelo numérico, poços de petróleo

ABSTRACT

During oil drilling operations, the wellbore temperature profile is used when selecting well casing materials, making cementation related decisions, and, most importantly, to identify loss zones. In this work, a transient heat transfer mathematical model for a fractured wellbore is proposed. The well has its geometry simplified to a concentric annular cylinder which has one or more discrete fracture in its external wall (well-formation interface). In order to obtain the thermal model an energy balance is used, focusing the heat transfer between the pipe, the annular region and the formation. The key characteristic of the model is the fracture detection through thermal gradient graphical analysis. The thermal gradient is an output of the solution of the discretized energy equation in the domains, obtained through the finite volume method. The following parameters are investigated: fracture depth, fracture number, fracture interference, loss circulation, circulation time, Reynolds number and drilling fluid viscosity. The analysis is done through the analysis of the annular region temperature profile and its gradient, along with the thermal evolution of both the bottomhole and outlet temperatures. It is verified that increasing the fracture relative depth or number decreases the bottomhole temperature, while having no significant impact in the outlet temperature. The same bottomhole temperature effect is noted when increasing loss rate, however outlet temperature changes are observed. In a similar way, when decreasing the distance between fractures, the temperature profile in the annular region trends to a wellbore with a single fracture. Finally, increasing loss rate favors fracture detection, since the discontinuity in the annular region thermal gradient profile is intensified.

Key-words: loss zone location, temperature profile, drilling fluid

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Caracterização do problema	14
1.2	Objetivos.....	18
1.3	Justificativa.....	19
1.4	Organização do trabalho.....	19
2	Revisão bibliográfica.....	20
2.1	Modelos térmicos para cálculo direto e reverso em poços de perfuração	20
2.2	Síntese do capítulo 2.....	30
3	Formulação matemática.....	32
3.1	Geometria	32
3.2	Hipóteses simplificadoras.....	33
3.3	Equações do modelo.....	34
3.3.1	Região anular.....	35
3.3.2	Coluna de perfuração.....	40
3.3.3	Formação rochosa.....	41
3.3.4	Interface anular-formação.....	41
3.4	Condições de contorno e iniciais	42
3.5	Síntese do capítulo 3.....	43
4	Modelagem Numérica	44
4.1	Integração da equação de transporte.....	44
4.2	Discretização	45
4.2.1	Geração da malha	46
4.2.2	Discretização temporal	47
4.2.3	Esquema de aproximação para os termos advectivos.....	48
4.2.4	Discretização da equação da energia – seção anular	48
4.2.5	Discretização da equação da energia – coluna de perfuração	49
4.2.6	Discretização da equação da energia – formação rochosa	50
4.2.7	Síntese das equações discretizadas	52
4.2.8	Fluxograma de solução	51
4.3	Síntese do capítulo 4.....	Erro! Indicador não definido.

5	Verificação numérica.....	53
5.1	Poço não fraturado.....	53
5.2	Poço fraturado	55
5.3	Síntese do Capítulo 5.....	58
6	Resultados.....	59
6.1	Parâmetros analisados.....	59
6.1.1	Fluidos utilizados e justificativa	60
6.2	Teste de malha	62
6.3	Análise de sensibilidade paramétrica	64
6.3.1	Efeito da temperatura de entrada	65
6.3.2	Efeito da massa específica do fluido de perfuração	65
6.3.3	Efeito da vazão volumétrica do fluido de perfuração.....	66
6.3.4	Efeito da viscosidade do fluido de perfuração.....	67
6.4	Análise do poço não fraturado para diferentes fluidos de perfuração	68
6.5	Variação da posição da fratura	71
6.6	Variação da perda de circulação	77
6.7	Efeito do tempo de circulação no perfil do gradiente de temperatura.....	80
6.8	Comparação para diferentes regimes de escoamento	82
6.8.1	Caso 1: Escoamento laminar na coluna de perfuração e na região anular - LLL	83
6.8.2	Caso 2: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e laminar na região anular - TLL.....	84
6.8.3	Caso 3: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e na região anular antes da fratura e laminar acima da fratura - TTL	85
6.8.4	Caso 4: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e em toda extensão da região anular - TTT	86
6.9	Variação do número de fraturas.....	87
6.10	Variação da distância relativa entre fraturas	89
7	Considerações Finais	92
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	93
	Referências	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Perda de circulação durante a perfuração (Adaptado de: COOK <i>et. al</i> , 2012).....	15
Figura 1.2 – Diagrama de interpretação de dados para modelagem direta e reversa do processo térmico do poço	17
Figura 1.3 – Modelagem direta ou reversa: exemplo de perfil (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular	18
Figura 3.1 – Representação esquemática do conjunto poço-formação: geometria e condições de contorno	32
Figura 3.2 – Volumes de controle para os balanços de energia em: (a) região anular e (b) coluna de perfuração	35
Figura 4.1 – Significado físico dos termos da equação generalizada de transporte	45
Figura 4.2 – Esquema da malha utilizada na discretização da equação da energia na formação rochosa (Adaptado de: VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).....	46
Figura 4.3 – Esquema da malha utilizada na discretização da equação da energia na região anular e coluna de perfuração (Adaptado de: VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).....	47
Figura 4.4 – Fluxograma de solução	51
Figura 5.1 – Evolução do perfil de temperatura na região anular do poço	54
Figura 5.2 – Perfil de temperatura da região anular do poço não fraturado sem a presença de fraturas com $t_c=0, 1, 3, 12, 24h$	56
Figura 5.3 –Distribuição de temperaturas da região anular com $z_f=0,88$ e $Q=0,25$ (Símbolos representam os resultados de Chen <i>et al.</i> , 2014)	57
Figura 5.4 –Efeito da perda de circulação (Q) no perfil de temperaturas da região anular com $z_f=0,88$ e $t_c=12h$ (Símbolos representam os resultados de Chen <i>et al.</i> , 2014).....	58
Figura 5.5 –Efeito da posição da fratura no perfil de temperaturas da região anular com $Q=0,25$ e $t_c=12h$ (Símbolos representam os resultados de Chen <i>et al.</i> , 2014)	58
Figura 6.1 – Perfil de viscosidade em função da temperatura para os fluidos de perfuração escolhidos (Adaptado de: Santoyo, 1997)	61

Figura 6.2 – Teste de malha para a formação rochosa na direção r , com $nz=80$ e $nt=1600$	63
Figura 6.3 – Teste de malha para a profundidade do poço na direção z , com $nt=1600$ e $nr=80$	63
Figura 6.4 – Teste de número de intervalos de tempo com $nr=80$ e $nz=160$	64
Figura 6.5 – Efeito da temperatura de entrada no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $\rho=1200kg/m^3$, $\lambda=0,02m^3/s$, $\mu=5cP$	65
Figura 6.6 –Efeito da massa específica do fluido no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\lambda=0,02m^3/s$, $\mu=5cP$	66
Figura 6.7 – Efeito da vazão volumétrica de entrada no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\rho=1200kg/m^3$, $\mu=5cP$	66
Figura 6.8 – Efeito da viscosidade na temperatura do fundo do poço (T_{fp}) ao longo do tempo, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\rho=1200kg/m^3$, $\lambda=0,02m^3/s$	67
Figura 6.9 – Efeito da viscosidade do fluido no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\rho=1200kg/m^3$, $\lambda=0,02m^3/s$	68
Figura 6.10 – Perfis para o poço não fraturado: (a) temperatura da coluna, (b) temperatura do anular e (c) gradiente de temperatura do anular, para $t_c=24h$	70
Figura 6.11 – Perfil de temperatura da região anular para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$ e $t_c=12h$	72
Figura 6.12 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$ e $t_c=12h$	74
Figura 6.13 – Temperatura do fundo do poço (T_{fp}) ao longo do tempo para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$	75
Figura 6.14 – Temperatura da saída do anular (T_s) ao longo do tempo para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$	76
Figura 6.15 –Perfil de temperatura da região anular para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$ e $t_c=12h$	77
Figura 6.16 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$ e $t_c=12h$	78
Figura 6.17 – Temperatura do fundo do poço (T_{fp}) ao longo do tempo para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$	79
Figura 6.18 – Temperatura da saída do anular (T_s) ao longo do tempo para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$	80

Figura 6.19 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para: (a) efeito do tempo de circulação e (b) vista em detalhe, considerando $z_f=0,75$ e $Q=0,20$	81
Figura 6.20 – Perfis para o Caso (1) LLL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=2000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$	83
Figura 6.21 – Perfis para o Caso (2) TLL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=5000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$	84
Figura 6.22 – Perfis para o Caso (3) TTL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=6000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$	85
Figura 6.23 – Perfis para o Caso (4) TTT: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=7500$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$	86
Figura 6.24 – Efeito do número de fraturas sobre o perfil: (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular, considerando $t_c=1h$ para o fluido f1	88
Figura 6.25 – Efeito do número de fraturas sobre o perfil: (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular, considerando $t_c=1h$ para o fluido f5	89
Figura 6.26 – Perfil de temperatura da região anular: (a) efeito da variação da distância relativa entre fraturas e (b) vista em detalhe, considerando $z_f=0,75$, $Q=0,20$ e $t_c=1h$ para o fluido f1	90
Figura 6.27 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular: (a) efeito da variação da distância relativa entre fraturas e (b) vista em detalhe, considerando $z_f=0,75$, $Q=0,20$ e $t_c=1h$ para o fluido f1	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos trabalhos relevantes da revisão da literatura	30
Tabela 3.1 – Correlações para coeficiente de transferência de calor h_{af}	37
Tabela 3.2 – Correlações para coeficiente de transferência de calor h_c	38
Tabela 4.1 – Coeficientes da discretização da convecção unidimensional transiente da seção anular	49
Tabela 4.2 – Coeficientes da discretização da convecção unidimensional transiente da coluna.....	50
Tabela 4.3 – Coeficientes da discretização da condução radial transiente da formação	50
Tabela 4.4 – Coeficientes das equações de balanço de energia para cada região ...	52
Tabela 5.1 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido de perfuração para verificação do poço não fraturado	54
Tabela 5.2 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido de perfuração	55
Tabela 5.3 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido para a verificação numérica de poço com fratura.....	56
Tabela 6.1 – Faixa de valores dos parâmetros analisados.	60
Tabela 6.2 – Número de Reynolds na entrada da coluna e início do anular	61
Tabela 6.3 – Condições do poço e propriedades do fluido de perfuração para o teste de malha	62
Tabela 6.4 – Condições do poço não fraturado e propriedades do fluido de perfuração	69
Tabela 6.5 – Parâmetros utilizados na análise de variação do número de fraturas	87

LISTA DE SIGLAS

TFP	Temperatura do fundo do poço
MVF	Método dos Volumes Finitos
C.C	Condição de contorno
DTS	Distributed Temperature Sensing
V.C.	Volume de Controle

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Romanos

a	Coefficiente de discretização	[-]
A	Área	[m ²]
c_p	Calor específico	[J/(kg.K)]
d_f	Distância entre fraturas	[-]
D	Diâmetro	[m]
\vec{g}	Vetor aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Coefficiente de transferência de calor	[W/(m ² K)]
H	Entalpia	[J]
i, j, e, w	Posição das superfícies de controle	[-]
I, J, E, W	Posição dos centros dos volumes de controle	[-]
k	Condutividade Térmica	[W/(m.K)]
L	Comprimento total do poço/tubo	[m]
\dot{m}	vazão mássica	[kg/s]
n	Índice de lei de potência	[-]
N, S, E, W	Posições cardiais da malha computacional	[-]
N_f	Número de fraturas	[-]
p	Pressão	[Pa]
q	Calor	[J]
q_{af}	Calor trocado entre região anular e formação	[J]
q_{ap}	Calor trocado entre região anular e coluna	[J]
Q	Perda de circulação	[-]
r	Raio	[m]
S	Termo fonte	[-]
t	Tempo	[s]
Δt	Incremento de tempo	[s]
T	Temperatura	[K]
T_0	Temperatura de entrada	[K]
T_{surf}	Temperatura na superfície	[K]

T_{fundo}	Temperatura no fundo do poço	[K]
\vec{u}	Vetor velocidade do escoamento	[m/s]
U	Coefficiente de transferência de calor global	[W/(m ² .K)]
v	Velocidade na direção axial do poço	[m/s]
V	Volume	[m ³]
w	Espessura	[m]
z	Profundidade	[m]
Z_f	Profundidade da fratura	[m]
Δz	Altura do volume de controle	[m]

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica	[m ² s ⁻¹]
Δ	Erro percentual	[-]
θ	Ângulo	[rad]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa·s]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
Γ	Coefficiente de difusividade da variável genérica ϕ	[-]
σ	Gradiente geotérmico	[K/m]
ϕ	Variável genérica	[-]

Sobrescritos

L	Abaixo da fratura	[-]
rp	Regime permanente	[-]
sf	Sem fraturas	[-]
U	Acima da fratura	[-]

Subscritos

a	Anular	[-]
af	Entre anular e a formação	[-]
ac	Entre anular e a coluna de perfuração	[-]
c	Coluna de perfuração	[-]

f	Formação	[-]
m	Relativo ao fluido de perfuração	[-]
p	Parede do poço	[-]
Q	Centro do volume de controle	[-]

1 INTRODUÇÃO

Durante o último século, a indústria petrolífera realizou grandes avanços no desenvolvimento de tecnologias de perfuração e técnicas que permitem que a construção de poços seja um empreendimento seguro e rentável. No entanto, com a descoberta de novas fontes de hidrocarboneto em reservatórios geologicamente complexos, a indústria continua a desenvolver tecnologias para atender o desafio de manter a integridade do poço quando submetido aos riscos de segurança que comprometem a viabilidade à longo prazo.

Dentre os processos específicos que ocorrem na indústria petrolífera, a motivação do trabalho é o processo de perfuração. Em particular, a perda de circulação de fluidos é um dos maiores problemas encontrados durante a operação de perfuração, que é definida como a fuga de fluido de perfuração para a formação rochosa através dos poros ou de fissuras (descontinuidades) no conjunto poço-formação (GOINS, 1952). As regiões da formação para as quais o fluido de perfuração escoar são conhecidas como zonas de fuga e contribuem significativamente para o tempo não produtivo (*nonproductive time* - NPT) do processo de perfuração (COOK *et al.*, 2012).

A geração de fraturas resulta de falhas de tração, o que ocorre quando a tensão exercida na formação excede a tensão circunferencial ao redor do poço e a força de tração da rocha, geralmente devido a densidade do fluido de perfuração ou a pressão do poço. Para operar com segurança em intervalos instáveis, de baixa pressão ou fraturados naturalmente é preciso identificá-los e priorizar a perfuração dentro destes intervalos (COOK *et al.*, 2012; ALMAGRO *et al.*, 2014).

Segundo Selley e Sonnenberg (2014), durante o processo de perfuração existe uma janela de operação definida por dois limites de pressões: o limite inferior é determinado pela pressão dos poros no interior da formação e o limite superior é dado pela pressão de fratura, sendo a pressão em que pode ocorrer o fraturamento da formação. Considerando a janela de operação existem dois fenômenos possíveis caso as condições de pressão do poço estejam fora desta janela de pressão: influxo ou *kick* e invasão ou perda de circulação.

Quando a pressão do poço é menor que a pressão de poros, ocorre escoamento de fluido da formação para o interior do poço. O fenômeno em questão é chamado de *kick*,

sendo uma condição indesejável na perfuração que pode causar, em circunstâncias extremas, o fluxo descontrolado de hidrocarbonetos – *blowout* (COOK *et al.*, 2012).

Por outro lado, sempre que a pressão no interior do poço é maior que a pressão de poros da formação, o fluido de perfuração do interior do poço invade a formação rochosa (ABBAS *et al.*, 2004), caracterizando a perda de circulação. Esta condição é denominada como *overbalance* e geralmente esta presente ao longo do processo de perfuração, sendo intensificada na presença de fraturas.

Por ser um fenômeno indesejável, a perda de circulação pode ser controlada a partir de diferentes técnicas e processos. Uma das maneiras corretivas de controlar a perda de circulação, e reestabelecer a circulação de fluido de perfuração no interior do poço, consiste em adicionar partículas de granulometria selecionada em conjunto com o fluido de perfuração (WHITFILL e HEMPHILL, 2003). Tais partículas são denominadas de materiais de perda de circulação - LCM (*lost circulation materials*).

Segundo Chen *et al.* (2014), as medidas corretivas que incorporam LCM podem ser melhoradas com as informações sobre o número e localização das fraturas. Além disso, este conhecimento pode ajudar na avaliação da necessidade de revestimento adicional, na profundidade em que é necessária a cimentação da parede do poço e seleção da broca, válvulas e equipamentos de maneira geral (SANTOYO, 1997).

Dentre os métodos existentes para a detecção de fraturas, uma das maneiras de se determinar a posição de fraturas é através da análise térmica do poço, especificamente do perfil e gradiente de temperaturas na região anular em contato com a formação rochosa.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme o contexto apresentado, o foco do trabalho se encontra na localização de zonas de fratura. Na Figura 1.1 é apresentado um esquema da operação de perfuração com as principais formas de perda de circulação: formações cavernosas, formações naturais, induzidas e altamente impermeáveis. A broca, que se encontra na extremidade da coluna de perfuração, rotaciona para promover a ruptura e desagregação das rochas a fim de se atingir maiores profundidades. Durante o processo de perfuração, ocorre escoamento do fluido de perfuração através da coluna de perfuração, da broca e da região anular. O fluido de perfuração tem elevada importância no escoamento, possuindo algumas funções principais, como o carregamento dos cascalhos, removidos da formação

rochosa pela broca, transmitir força hidráulica, estabilizar o campo de pressão e resfriamento da broca, entre outros.

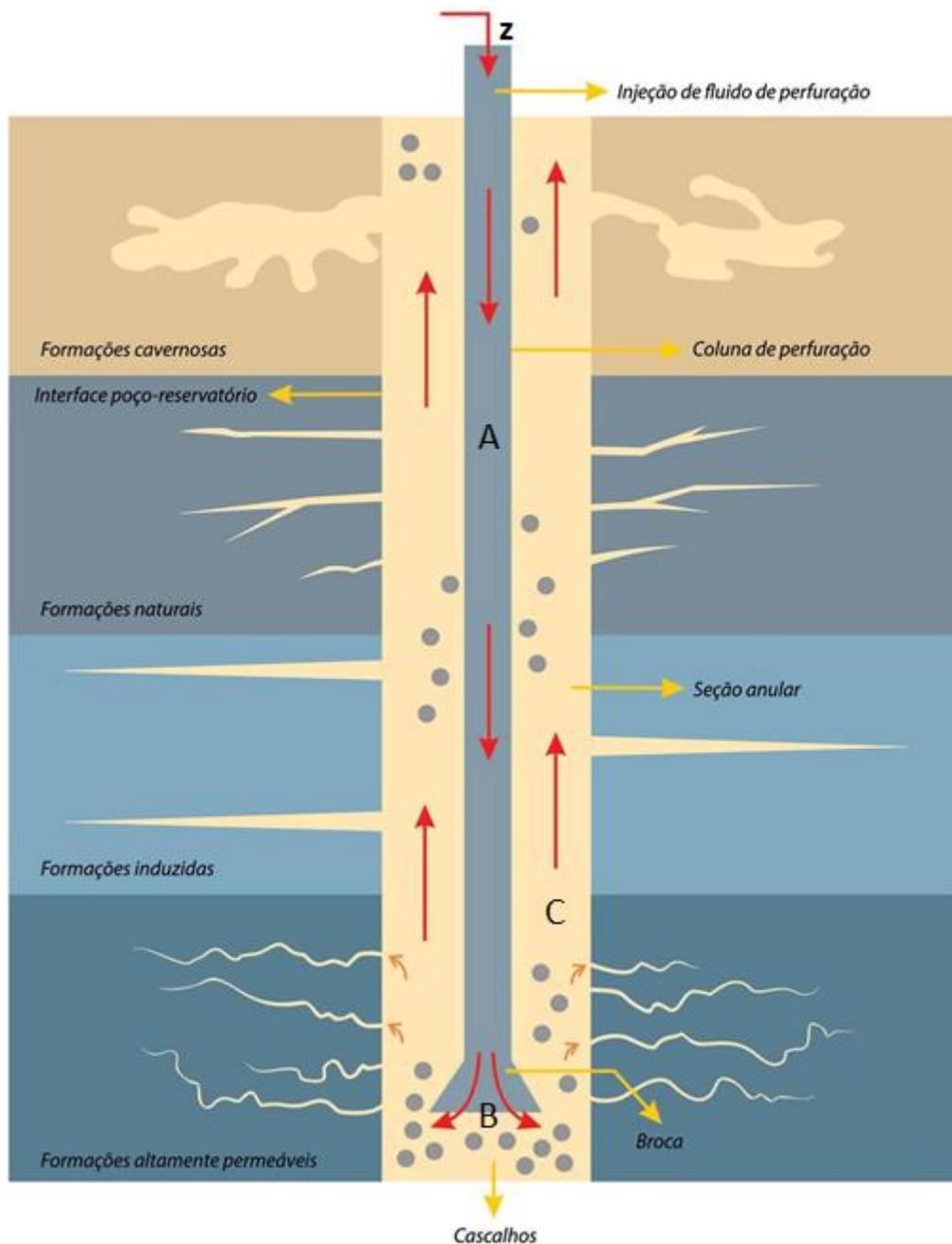


Figura 1.1 – Perda de circulação durante a perfuração (Adaptado de: COOK *et. al*, 2012)

Além de receber parcialmente a energia transmitida pela rotação da broca, o fluido realiza transferência de calor com a formação rochosa adjacente, que se encontra a temperaturas elevadas em altas profundidades devido ao gradiente de temperatura geotérmico (THOMPSON e BURGESS, 1985). Basicamente, o escoamento do fluido pode ser separado em 3 regiões principais:

- A) Coluna de perfuração, onde ocorre escoamento do fluido de perfuração pela superfície até o fundo do poço;
- B) Fundo do poço, região da broca, onde ocorre a transição do fluido entre o fim da coluna e o início do escoamento da seção anular.
- C) Seção anular, onde ocorre o escoamento do fluido de perfuração desde o fundo do poço até a superfície.

Ressalta-se que na região C da Figura 1.1, o fluido que retorna pela região anular pode estar em contato tanto com a formação rochosa não revestida quanto com o poço já cimentado, sendo que ambas as ocasiões podem existir a geração ou presença de fraturas. Para o atual trabalho, estas fraturas promovem o escoamento direcional do fluido do poço em sentido à formação rochosa.

A temperatura do fluido de perfuração em cada região (A, B ou C) é dependente de uma série de processos térmicos. Com relação à região A, na entrada do poço o fluido é injetado na coluna de perfuração com uma temperatura especificada. Conforme é realizado o escoamento do fluido através da coluna no sentido positivo da direção z (i.e., direção axial em direção ao fundo do poço) a temperatura é influenciada pelos seguintes fatores: profundidade do poço (que afeta a temperatura do fluido que escoar através da região anular, que troca calor diretamente com a região da coluna), velocidade do escoamento e o tempo de operação.

Na região B, onde se encontra a broca, ocorre a transição do escoamento do fluido de perfuração entre a coluna de perfuração e a região anular. Esta região apresenta uma grande perturbação no escoamento devido a forte interação com a formação rochosa.

Na região C, em que o fluido de perfuração escoar através da região anular, a temperatura é função da: taxa de transferência de calor por convecção no fluido, taxa de transferência de calor por condução entre o fluido na região anular e a coluna de perfuração, taxa de transferência de calor por condução da formação adjacente, o tempo de circulação e a vazão mássica do fluido. Desta forma, a temperatura do fluido de perfuração é função da taxa de circulação, do tempo de circulação, das propriedades térmicas do fluido e das propriedades térmicas do poço.

Com relação ao comportamento térmico do poço descrito e a relação com a perda de circulação, existem duas formas de modelagem possíveis (direta e reversa), que

dependem das informações de entrada, conforme mostra o diagrama esquemático da Figura 1.2.

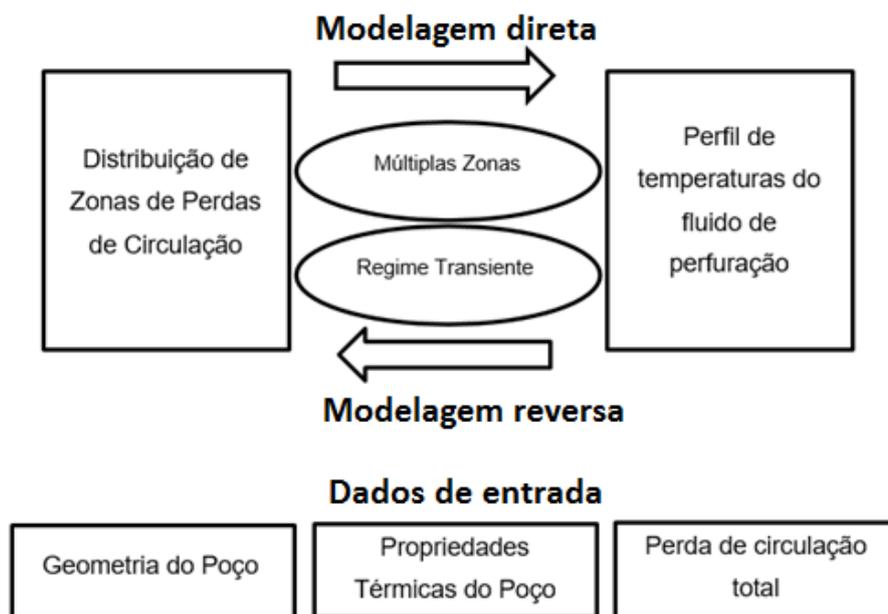


Figura 1.2 – Diagrama de interpretação de dados para modelagem direta e reversa do processo térmico do poço

Na primeira forma de modelagem, denominada de direta, além dos dados de entrada (geometria do poço, propriedades térmicas do poço e perda de circulação total), são conhecidos o número, posição e perda de circulação individual das fraturas (caso sejam múltiplas). Através de uma análise transiente é obtido o perfil de temperaturas da coluna de perfuração, região anular e formação.

Na segunda modelagem, denominada de reversa, tem-se conhecimento do perfil de temperaturas, geralmente por distribuição de sensores de temperatura (DTS – *distributed temperature sensing*) e dos dados de geometria, propriedades térmicas e perda de circulação total. A diferença principal é que, com a análise do perfil do gradiente de temperaturas do poço, pode ser identificada e determinada a distribuição de zonas de perda de circulação.

Na Figura 1.3 é possível observar um exemplo dos perfis de temperatura e, respectivo, gradiente ao longo do poço, para uma determinada configuração de operação. Em uma primeira análise pode-se obter o perfil de temperatura da região anular (Figura 1.3a) através da modelagem direta, conhecendo a posição da fratura na formação. Em uma segunda análise, por modelagem reversa, com o perfil de temperatura obtido em campo (e.g., por sensores), pode-se identificar com uma determinada eficiência o ponto

de inflexão da curva de temperatura, através do perfil do gradiente de temperatura (Figura 1.3b), que coincide com a descontinuidade da perda de circulação pela fratura.

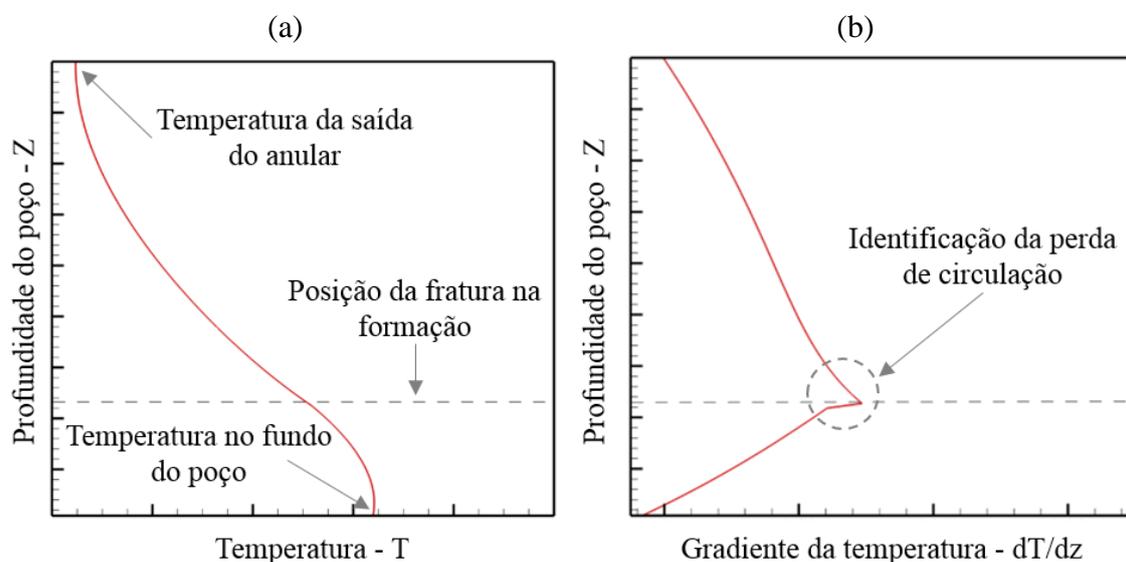


Figura 1.3 – Modelagem direta ou reversa: exemplo de perfil (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal neste trabalho é o desenvolvimento de um modelo computacional capaz de localizar o número e a posição de fraturas através da análise do perfil de temperaturas ao longo de um poço de petróleo.

Como objetivos específicos e inerentes para o trabalho se encontram o desenvolvimento do código computacional para obtenção do perfil de temperaturas na coluna de perfuração, na região anular e na formação rochosa, implementação da modelagem reversa para detectar as zonas de perda de circulação a partir do perfil de temperatura e análise do comportamento térmico de um poço na presença de perda de circulação por uma ou mais fraturas discretas.

Para caracterizar a perda de circulação em poços fraturados foram realizadas variações nos parâmetros: profundidade relativa, intensidade de perda de circulação, número e distância entre fraturas, velocidade de entrada e tempo de circulação. As variáveis resposta principais para a análise do problema são os perfis de temperatura e gradiente de temperatura da região anular. Como variáveis resposta auxiliares ao problema, são utilizadas as evoluções térmicas das temperaturas de saída do anular e do fundo do poço.

1.3 JUSTIFICATIVA

A perda de circulação causa, entre outros fatores, um decréscimo na capacidade de remoção de detritos durante o processo de perfuração, já que uma das funções do fluido de perfuração é manter os sólidos em suspensão (BUGBEE, 1953). Considerando apenas o fenômeno de invasão, estima-se que os custos envolvidos em tempo de produção ocioso estejam entre dois e quatro bilhões de dólares anuais (COOK *et al.*, 2012). Esse custo é associado à perda de fluido de perfuração, gastos com medidas corretivas e paradas na perfuração.

Existem diversas formas de medição direta de perdas de circulação, como métodos radioativos (FIRMINHAC, 1956), eletromagnéticos (BECKER *et al.*, 1987), tomografia por difração (TURA *et al.*, 1992), microsísmicos (DAI *et al.*, 2011; BLOCH *et al.*, 2003), difração multifocal (RAUCH-DAVIES, 2014). Métodos como a ressonância magnética nuclear, tomografia por difração e eletromagnéticos sofrem dificuldades práticas em termos de localizar as fraturas. Enquanto isso, os métodos microsísmicos não são adequados para detecção de fraturas de baixa espessura (MAXWELL, 2009), pois o método não consegue assimilar dimensões tão limitadas. Consequentemente, fica clara a necessidade de buscar e aperfeiçoar novas metodologias para o mapeamento das fraturas.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A sequência deste documento é dividida em sete capítulos. No Capítulo 1 foi vista a introdução, objetivos e justificativa do trabalho. No Capítulo 2 é realizada a revisão bibliográfica, ressaltando os trabalhos mais importantes publicados na literatura. O Capítulo 3, que apresenta a modelagem matemática, contém a geometria, as condições de contorno e inicial, as equações de balanço que modelam o problema e as hipóteses simplificadoras adotadas para o problema. A modelagem numérica, que contém detalhes sobre a discretização das equações do modelo matemático é apresentada no Capítulo 4 e no Capítulo 5 se encontram os problemas de verificação numérica: poço não fraturado e fraturado. No Capítulo 6 são apresentados os principais resultados do trabalho, para fluidos de perfuração de diferentes comportamentos reológicos e poços com formações rochosas com uma ou mais fraturas discretas. A dissertação se encerra no Capítulo 7 com as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são revisados os trabalhos encontrados na literatura que utilizam modelos térmicos em poços de petróleo. São apresentados dois tipos de modelagem: o primeiro é composto de modelos matemáticos relevantes que tratam de obtenções numéricas ou analíticas do campo de temperaturas em poços de petróleo (modelagem direta). O segundo tipo é constituído por métodos de diagnóstico de fratura e determinação de perfis de escoamento a partir de um campo de temperaturas (modelagem reversa).

2.1 MODELOS TÉRMICOS PARA CÁLCULO DIRETO E REVERSO EM POÇOS DE PERFURAÇÃO

Como mencionado, esta primeira seção tem foco na análise dos estudos de transferência de calor relacionados ao desenvolvimento e aplicações de simuladores numéricos para determinação de distribuições de temperatura de poços em condições de circulação. Algumas diferenças fundamentais entre os métodos analíticos e os modelos numéricos para a formulação térmica estão presentes. A mais importante é relacionada à capacidade de um simulador oferecer a descrição completa das distribuições de temperatura existentes em um poço, sobre condições de regime permanente e transiente. Outra vantagem é a possibilidade da obtenção das informações enquanto ocorre a perfuração ou após o término do processo.

A avaliação da distribuição de temperatura dentro e ao redor do poço é uma tarefa bastante complexa e depende de um grande número de variáveis. Por este motivo, qualquer modelo de transferência de calor deve conter hipóteses simplificadoras objetivando-se resolver as equações do seu respectivo modelo e obter soluções. Até agora, a literatura apresentou vários modelos para estimativa da distribuição de temperaturas de poços de perfuração ou simplesmente da temperatura do fundo do poço, que é de grande interesse para o engenheiro de perfuração. Alguns destes modelos foram desenvolvidos para aplicações práticas. Conforme o poder computacional foi aumentando, menos

hipóteses simplificadoras precisaram ser incluídas. Portanto, os métodos mais recentes geralmente possuem maior complexidade e acurácia.

Alguns dos modelos a serem apresentados são de modelagem reversa. Já se possui o campo de temperaturas obtido por DTS ou por modelagem numérica e determinam-se parâmetros de interesse, que geralmente são o comprimento ou largura de fraturas, características de vazamento e intervalos de injeção. Basicamente, a obtenção paramétrica é realizada através de um algoritmo de otimização que minimiza os erros entre as temperatura previstas pelo modelo e os dados de campo.

Farris (1941) realizou a primeira tentativa de estimar o campo de temperaturas ao publicar um estudo sobre as temperaturas em circulação e estáticas de cinco poços de petróleo da costa do Golfo. O pesquisador desenvolveu cartas que possibilitam a correlação entre a profundidade e a temperatura do fundo do poço para cinco poços de perfuração, que possuíam profundidade total variando entre 1600 a 3400m. Apesar da imprecisão e simplificações grosseiras presentes em seu modelo, o Instituto Americano de Petróleo recomendou seu uso para determinar o cronograma de cimentação de projetos de poços (API, 1974). As severas deficiências das cartas desenvolvidas por Farris (1941) motivaram os pesquisadores a desenvolverem modelos matemáticos mais precisos para determinação das temperaturas durante a circulação.

Um modelo transiente que possuía como objetivo a obtenção das mudanças na temperatura da formação causadas pela circulação de fluido de perfuração foi desenvolvido por Edwardson *et al.* (1962). O estudo também incluiu a análise anterior e posterior da operação. A base do modelo foi a solução matemática da equação diferencial da condução de calor em coordenadas radiais. A solução desta equação foi apresentada na forma gráfica para determinar a variação causada no perfil de temperaturas da formação por diferentes diâmetros de poço, para históricos de circulação arbitrários. A distribuição de temperatura dentro do poço não foi considerada. Edwardson *et al.* (1962) concluíram seus estudos estabelecendo que as variações no campo de temperaturas da formação causadas pela circulação do fluido são bem significantes ao redor da parede do poço.

O modelo de Edwardson foi expandido por Tragesser *et al.* (1967), que desenvolverem um novo método capaz de estimar o perfil de temperaturas em função dos seguintes parâmetros: profundidade, diâmetro da coluna de perfuração, vazão mássica, propriedades térmicas e hidrodinâmicas do fluido, propriedades termofísicas da formação e estado térmico inicial do poço. Com estas informações, o modelo obtinha o histórico

transiente de temperaturas para toda a extensão da região anular e da coluna de perfuração do poço. A conclusão principal deste estudo foi que a temperatura máxima do poço ocorre na região anular e que o parâmetro de maior influência é a vazão mássica.

Raymond (1969) desenvolveu um modelo numérico que tinha como objetivo principal a obtenção do campo de temperaturas do fluido durante a perfuração ou circulação. Durante seus estudos, Raymond (1969) desenvolveu modelos generalizados para cálculo das temperaturas, para condições temporais transientes e pseudo-transientes. Raymond (1969) defendia o uso do princípio da superposição e funções de van Everdingen e Hurst para a obtenção de soluções numéricas para a condição transiente (VAN EVERDINGEN e HURST, 1949). No entanto, foi concluído que a solução obtida através do modelo pseudo-transiente é capaz de atingir a acurácia necessária para fins práticos. Tanto o modelo transiente quanto o pseudotransiente forneciam uma estimativa da temperatura do fluido de perfuração como função da posição e do tempo. Uma das observações realizadas por Raymond (1969) foi de que a presença de circulação diminuiu consideravelmente a temperatura do fluido e da formação. Foi constatado, por fim, que a temperatura máxima do fluido de perfuração ocorre entre um quarto e um terço da região anular, contados a partir do fundo do poço.

Apesar de Raymond (1969) ter produzido modelos aceitáveis para resolver o problema da transferência de calor em um sistema de perfuração, dados insuficientes nas propriedades do fluido de perfuração e incertezas nos valores dos coeficientes de transferência de calor limitavam a sua precisão. Uma avaliação mais detalhada do seu modelo principal foi realizada por Sump e Williams (1973) e Kutasov *et al.* (1988). Os pesquisadores compararam os valores de temperatura do fundo do poço previstos por Raymond com os mensurados em campo. Concluíram que nenhum dos métodos de Raymond previa adequadamente a temperatura de circulação do fluido de perfuração, com erros chegando até 12%. Muitas características principais da perfuração não foram consideradas no modelo de Raymond (1969), o que justificaria o erro. As características não consideradas foram as seguintes:

- (i) O tempo que uma formação é exposta ao escoamento do fluido de perfuração depende da profundidade (as profundidades mais rasas são expostas aos maiores períodos de exposição à transferência de calor do escoamento).
- (ii) A temperatura do fluido de perfuração em uma profundidade depende da profundidade total do poço.

- (iii) As discontinuidades operacionais da circulação do fluido afetam o processo durante a perfuração.
- (iv) A presença das colunas de revestimento cimentadas em várias profundidades têm impacto no perfil de temperaturas.
- (v) O impacto das fontes de energia causadas pela perfuração afeta significativamente o processo.

Apesar destas limitações é importante notar que, em termos do desenvolvimento teórico da relação entre a transferência de calor e o poço de perfuração, o trabalho de Raymond (1969) foi e é até hoje um dos métodos mais compreensivos da literatura. Conseqüentemente, seu trabalho serviu como base para grande parte das pesquisas recentes no assunto.

Holmes e Swift (1970) desenvolveram um modelo numérico simples para cálculo da temperatura do fundo do poço. Eles utilizaram uma conclusão importante do trabalho de Edwardson *et al.* (1962): a temperatura do poço é relativamente constante em qualquer ponto suficientemente longe da broca. Com isso, o modelo pôde ser simplificado. Foi concluído que uma boa aproximação da transferência de calor entre a região anular e a formação é de que a condução é dada por um gradiente de temperatura linear. Foram então obtidos campos de temperatura em função da profundidade, vazão mássica, características do fluido de perfuração, propriedades do reservatório e diâmetro da coluna de perfuração. A grande vantagem deste método foi a sua simplicidade e maior acurácia. Porém, a hipótese de regime permanente utilizada foi considerada crítica, sendo satisfeita somente após longos tempos de circulação.

Um aprimoramento do trabalho de Raymond (1969) foi realizado por Keller *et al.* (1973), ao desenvolver um modelo bidimensional de transferência de calor transiente para o poço. O modelo contemplou os efeitos da geração de energia do sistema de perfuração e a perturbação causada pelo revestimento. Durante a análise de seus resultados, os pesquisadores realizaram a comparação com soluções de regime permanente obtidas pelo próprio código. Foi concluído que, para o modelo desenvolvido, a solução aproximada obtida pela hipótese de regime permanente é capaz de representar adequadamente o perfil de temperaturas do fluido de perfuração durante a circulação. Keller *et al.* (1973) também concluíram que a energia viscosa do escoamento, a energia rotacional e a energia da broca têm efeitos importantes no balanço de energia do sistema.

Também baseados nos estudos de Raymond (1969), Sump e Williams (1973) desenvolveram um modelo para determinar a evolução térmica de poços durante operações de cementação. Essencialmente, a principal diferença entre o modelo anterior e o modificado foi a metodologia para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor do fluido de perfuração e as condutividades térmicas da formação. Os parâmetros térmicos foram determinados através de uma análise de regressão a partir de dados obtidos em campo de sete poços. Sump e Williams (1973) concluíram que as técnicas recomendadas pelo Instituto Americano de Petróleo para previsão de temperaturas de circulação e cementação eram incorretas. Com a implementação de seu modelo, a diminuição do erro entre as temperaturas previstas e medidas foi marcante: de uma faixa de erro anterior de 16,4% a 27,8% para 4,7% a 16,1%.

Na década seguinte, Wooley (1980) desenvolveu um modelo computacional com o principal diferencial de possuir funcionalidade para diferentes condições operacionais. Enquanto os modelos anteriores resolviam o problema para (1) perfuração, cementação e circulação, (2) injeção ou produção monofásica ou (3) injeção ou produção bifásica, o modelo de Wooley (1980) se mostrou capaz de resolver combinações sequenciais dos problemas térmicos provenientes destas operações. Assim, com apenas um código computacional se tornou possível a modelagem da vida completa de um poço. Algumas das considerações utilizadas no modelo foram: (i) efeito da variação da profundidade do poço com o tempo durante a perfuração, (ii) presença de descontinuidades na circulação do fluido de perfuração, (iii) variação das propriedades térmicas do fluido com a profundidade e (iv) as perturbações causadas pelo projeto de completação do poço. Uma das validações realizadas por Wooley (1980) foi a solução analítica obtida por Carslaw e Jaeger (1959). Conforme será visto no Capítulo 5, esta validação está proposta para o código a ser desenvolvido neste trabalho.

Após a conclusão de seu simulador, Wooley (1980) realizou uma análise paramétrica da influência da temperatura de entrada, vazão mássica e profundidade do poço no perfil de temperaturas. As seguintes verificações foram realizadas: para vazões elevadas, há pouca variação de temperatura no fluido durante os processos de circulação, produção ou injeção; a temperatura de entrada tem grande influência no perfil de temperaturas do poço, sendo esta influência menos relevante para baixas vazões; a vazão mássica possui forte correlação com a temperatura da parede do poço durante a produção; a profundidade altera significativamente a temperatura do fundo do poço durante a circulação, mas não durante a produção.

Marshall e Bentsen (1982) desenvolveram um modelo térmico para poços utilizando o método das diferenças finitas. O objetivo era realizar uma análise de sensibilidade paramétrica do perfil de temperaturas em poços de petróleo durante a cementação e a perfuração. Foi obtido um sistema de quatro equações diferenciais parciais. O sistema de equações descrevia os balanços de energia para a coluna de perfuração, para a parede do poço, para a região anular e para a formação. Os pesquisadores concluíram que os seguintes parâmetros têm impacto relevante na distribuição de temperaturas do poço: (i) capacidade térmica e massa específica do fluido de perfuração; (ii) vazão mássica do fluido de perfuração; (iii) gradiente geotérmico; (iv) temperatura de entrada do fluido; (v) condutividade térmica da formação; (vi) tempo de circulação e (vii) profundidade. A análise paramétrica foi realizada com os perfis de temperatura da região anular, para investigar a influência dos parâmetros mencionados no comportamento térmico do sistema de perfuração do poço. A conclusão final foi de que, para o modelo desenvolvido, a hipótese de regime permanente não poderia ser adotada, porque em condições reais este estado quase nunca seria atingido.

O primeiro modelo térmico que contemplou o efeito da compressibilidade dos fluidos de perfuração foi desenvolvido por Mitchell (1982). Na verdade, tratou-se de uma extensão da teoria desenvolvida por Wooley (1980) para a elaboração de um novo simulador numérico. As principais novidades deste simulador em relação ao estado da arte na época foram: (i) processos de perfuração utilizando ar e (ii) escoamento bifásico de água e vapor para processos de produção e injeção. Duda (1985) realizou as primeiras aplicações do simulador, ao estudar os efeitos de resfriamento produzidos durante os processos de circulação e injeção para estes escoamentos. Os resultados da simulação mostraram que altas vazões mássicas produziram menores temperaturas no poço. Para estes casos, o fluido tende a diminuir ainda mais a temperatura do poço se a massa específica for aumentada.

Após desenvolver uma solução analítica que descreve o processo de transferência de calor no poço, Arnold (1990) indicou que quando há circulação de fluido, é possível a obtenção do perfil de temperaturas apenas com a troca térmica entre as formações rochosas ao redor do poço e o fluido. A sua solução assumiu fluxo de calor constante nas paredes do poço e condução de calor transiente na formação. A validação foi realizada comparando as medidas de TFP da literatura com as obtidas pelo modelo. Em seguida, testou a influência de diferenças condições operacionais na temperatura do fundo do poço. Arnold (1990) concluiu demonstrando que aparentemente a hipótese de regime

permanente no fluxo de calor pode ser assumida. Foi observado que a temperatura da região anular sob condições de circulação varia rapidamente nas primeiras horas de circulação, mas que essa variação diminui progressivamente com o aumento do tempo.

Beirute (1991) desenvolveu um modelo térmico capaz de mensurar os efeitos de queda livre do escoamento durante as operações de cementação. O simulador essencialmente utilizava um conjunto de equações diferenciais para descrever os processos térmicos na coluna de perfuração, anular, revestimento e formação que era resolvido através do método das diferenças finitas. A principal inovação deste modelo foi uma aproximação para representar a variação das propriedades térmicas do fluido de perfuração e os coeficientes de transferência de calor na formulação matemática do problema, através de correlações obtidas na literatura. No entanto, se tratava de apenas uma aproximação, já que não foram utilizadas correlações apropriadas para fluidos não-newtonianos. O simulador foi validado com as soluções analíticas encontradas na literatura. Beirute (1991) identificou que a composição do fluido de perfuração e o perfil de temperatura estático da formação afetam diretamente a confiabilidade dos cálculos. Conseqüentemente, concluiu que a composição do fluido de perfuração é necessária para calcular as propriedades térmicas e estimar os coeficientes de transferência de calor.

O modelo analítico de Arnold (1990) foi generalizado por Hasan *et al.* (1996), que apresentou um modelo de previsão do perfil de temperaturas do fluido em circulação direta ou reversa. O modelo incluiu a condição de fluxo de calor variável na interface entre o poço e a formação, através do princípio da superposição no tempo. Assim, o fluxo de calor pôde ser representado através da adição de fontes de calor constantes em intervalos de tempo sucessivos. Os resultados indicaram que os campos de temperatura estimados diferem significativamente das estimadas em modelos que desprezam a variação no fluxo de calor da interface.

Até o momento, não haviam sido considerados poços com múltiplos gradientes de temperatura ou poços direcionais nos simuladores presentes na literatura. Chen e Novotny (2003) desenvolveram um modelo de diferenças finitas transiente capaz de obter os perfis de temperaturas para estas condições, que ainda incluía a opção de utilizar vazão mássica do fluido de perfuração variável. O modelo foi validado para dois casos offshore e dois casos onshore. Uma análise de sensibilidade foi realizada para investigar o efeito da vazão mássica, diâmetro e reologia do fluido de perfuração na temperatura do fundo do poço. Foi concluído por Chen e Novotny (2003) que a viscosidade, propriedades térmicas e diâmetro da coluna de perfuração têm impacto no perfil de temperaturas próximo do

fundo do poço e não podem ser ignoradas. Outra observação importante para o projeto da fase de cimentação é de que três parâmetros são importantes: temperatura do fundo do poço, temperatura máxima do poço e a sua respectiva posição.

Conforme exposto por Aadnoy (1996), Gill (1989) e Bjorvekoll *et. al* (1994), o aquecimento do fluido de perfuração causa grandes variações na pressão efetiva do fundo do poço. Esta variação é principalmente causada pela expansão ou contração do fluido de perfuração, sendo o fenômeno conhecido como balonismo da lama. Aadnoy (1996) investigou as variações no volume de fluido devido as mudanças de pressão e temperatura no poço inteiro. Após a análise dos resultados, foi concluído que 90% da variação volumétrica total no poço é proveniente da variação do volume do fluido. Logo, foi implicado que poderia ser utilizada apenas variação volumétrica do fluido de perfuração

Karstad *et al.* (2006) foram os primeiros a desenvolver um modelo numérico incorporando os resultados de Aadnoy (1996). Além da determinação dos perfis de temperatura durante circulações direta e reversa, o modelo de Karstad *et al.* (2006) determinava valores de pressão no fundo do poço. Ambos os resultados foram comparados com dados de medição em campo e indicaram que o modelo possui boa acurácia dentro da sua faixa de aplicação. Através de sua pesquisa, as seguintes conclusões foram obtidas:

- (i) Durante perfuração rápida, o gradiente de temperatura da formação não-perturbada pode ser determinado diretamente com as medidas de temperatura do fundo do poço.
- (ii) Variações da vazão mássica e da velocidade de rotação da broca alteram significativamente a TFP.
- (iii) A circulação de fluido, enquanto não há perfuração, implica no resfriamento do fundo do poço e no aumento na temperatura de saída. Este efeito é fortemente dependente do tempo de circulação e da vazão mássica.
- (iv) Operações de circulação realizadas em profundidade constante implicam em uma maior temperatura de saída do fluido.

Os efeitos térmicos devido à fricção durante a perfuração foram incorporados no modelo numérico tridimensional e transiente desenvolvido por Nguyen *et al.* (2010). Seu simulador numérico consistiu de cinco módulos: trajetória de poço, torque, hidráulica, transferência de calor e estabilidade do poço. Cada módulo possuía finalidade para

estudos específicos. O foco principal, no entanto, foi a análise de estabilidade do poço. Segundo os pesquisadores, os seguintes parâmetros têm efeito considerável na janela de operação: força de coesão, ângulo de fricção interna, constante de Biot, diâmetro da coluna de perfuração e ângulo de inclinação (para poços altamente inclinados). Também foi concluído que o pré-aquecimento da formação reduz a probabilidade de fratura do poço. O resfriamento da formação, por sua vez, tem o efeito contrário.

Um modelo térmico para escoamento de fluidos monofásicos ou multifásicos em poços verticais, com desvio e horizontais foi criado por Ouyang e Belanger (2004). O modelo foi utilizado para obtenção do campo de temperaturas e para determinação do perfil de escoamento a partir de campos de temperatura mensurados por sensores distribuídos de fibra ótica (DTS). Além disso, foram realizadas análises de sensibilidade para vários parâmetros importantes: ângulo de desvio do poço, efeito Joule-Thompson e variação nas fases do fluido. Os pesquisadores chegaram à conclusão que a temperatura do poço não varia significativamente para seções horizontais ou levemente inclinadas graças à pequena variação na temperatura geotérmica. Desta forma, a determinação do perfil de escoamento através do cálculo reverso se torna bastante complicada devido à quantidade limitada de informações obtidas pelo modelo térmico. Os autores determinaram que o desvio angular máximo para que seja possível realizar o cálculo reverso a partir do campo de temperaturas seja 75°.

Zhouyi *et al.* (2010) apresentaram um modelo térmico de reservatórios transiente e tridimensional para cálculo do perfil de temperaturas (cálculo direto) e um método de simulação de linhas de corrente para resolver o problema da determinação do escoamento (cálculo reverso). O modelo foi aplicado para um poço horizontal de produção de óleo em Sincor. Os resultados mostraram que é possível identificar a posição e quantidade de água que adentra o poço horizontal, resolvendo parcialmente o problema encontrado por Ouyang e Belanger (2004).

Um modelo numérico para interpretação de dados obtidos por DTS durante o fraturamento hidráulico foi desenvolvido por Seth *et al.* (2010). O principal diferencial inovador do simulador foi a implementação de um modelo de propagação de fraturas. Com os resultados obtidos, foi demonstrado que o mecanismo de transferência de calor dominante durante o processo de injeção é o convectivo, causado pelo escoamento de líquido na fratura, confirmando a sua importância na determinação de parâmetros de perda, como a porcentagem de perda individual das fraturas.

O trabalho de Seth *et al.* (2010) foi sucedido por Hoang *et al.* (2011), que integrou ao modelo desenvolvido a modelagem reversa, a fim de estimar a vazão mássica tanto no poço quanto nas fraturas utilizando os dados obtidos pelo DTS durante o processo de injeção com a presença de fraturamento hidráulico em várias zonas. O escoamento na fratura foi contabilizado no simulador através da adição de novos termos no modelo para contabilizar a variação de temperatura atrás do revestimento. Bons resultados para o escoamento foram obtidos, quando comparados com dados experimentais. Estimou-se, baseado nas medidas de DTS e cálculo do modelo, que a maioria do fluido injetado escoou através da primeira zona de fraturamento hidráulico. O perfil de temperaturas apresentou, na maioria dos casos, um grande aumento abaixo desta zona, indicando o decréscimo significativo da vazão mássica.

Um modelo inovador foi desenvolvido por Yu *et al.* (2014) para determinação da posição das fraturas através de análise de dados obtidos por DTS. Neste modelo, a análise gráfica da derivada da temperatura da região anular com relação à profundidade foi utilizada para identificar a localização da zona de perda. De acordo com os resultados, a posição de um salto nesta curva coincide com a profundidade da fratura e é suficiente em magnitude para ser identificado.

Chen *et al.* (2014), do mesmo grupo de pesquisa que desenvolveu o trabalho de Yu *et al.* (2014), publicaram uma análise mais aprofundada, utilizando o mesmo modelo térmico. As seguintes conclusões foram as mais importantes:

- (i) Perda contínua de circulação resulta num decréscimo na temperatura do fluido de perfuração tanto na coluna de perfuração quanto na região anular, resfriando especialmente o fundo do poço.
- (ii) Em relação à posição, fraturas mais profundas implicam em uma taxa de resfriamento do fluido de perfuração mais rápida e por consequência uma temperatura em regime permanente menor.
- (iii) Considerando a profundidade da zona de perda constante, quanto maior a taxa de perda de circulação, maior o salto no gráfico da derivada da temperatura em relação à profundidade. Por outro lado, com taxa de perda constante, tem-se um salto maior caso a posição da fratura esteja mais afastada do fundo do poço.

2.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO 2

Conforme exposto, um grande número de modelos térmicos foi desenvolvido para a solução do problema de transferência de calor relacionado à circulação do fluido de circulação, geometria do poço e formação. A Tabela 2.1 contém resumidamente os trabalhos mais importantes encontrados na literatura.

Tabela 2.1 – Resumo dos trabalhos relevantes da revisão da literatura

Autor	Trabalho
Holmes (1970)	Desenvolveu um modelo analítico para determinar campo de temperaturas em regime permanente
Hasan <i>et al.</i> (1996)	Incorporou no modelo de Holmes o fluxo térmico variável e temperatura de entrada do fluido variável
Karstad <i>et al.</i> (2008)	Proveu um modelo aprimorado de previsão de perfil de temperaturas para circulação direta ou reversa
Edwardson <i>et al.</i> (1962)	Modelo transitório para determinação da temperatura da formação
Raymond <i>et al.</i> (1969)	Modelo transitório para cálculo do perfil de temperaturas pelo método das diferenças finitas
Wooley <i>et al.</i> (1980)	Aprimorou o modelo de Raymonds, para diferentes condições de operação
Chen e Novotny (2003)	Desenvolveu um simulador para previsão de perfis de temperatura em poços com múltiplos gradientes de temperatura
Nguyen <i>et al.</i> (2010)	Modelo numérico 3d transitório considerando os efeitos térmicos provocados pelo atrito da broca durante a perfuração
Ouyang <i>et al.</i> (2004)	Modelo térmico multifásico para poços direcionais
Seth <i>et al.</i> (2011)	Modelo térmico para calcular o perfil de temperaturas durante o processo de fraturamento hidráulico
Hoang <i>et al.</i> (2011)	Integrou ao modelo de Seth <i>et al.</i> (2010) a modelagem reversa para determinar a taxa de perda de circulação das fraturas
Chen <i>et al.</i> (2014)	Modelo para detecção de fraturas a partir do perfil de temperaturas

No entanto, carece na literatura um simulador térmico capaz de realizar a obtenção dos perfis de temperatura e localização das zonas fraturadas com precisão adequada.

Considerando a proposta deste projeto em analisar os efeitos térmicos de um poço de perfuração e detectar zonas de fratura, alguns aspectos relevantes o distinguem dos trabalhos encontrados na literatura. O principal diferencial deste trabalho está relacionado à reologia do fluido, o qual é representado como um fluido de viscosidade variável, provocando direto impacto no cálculo do coeficiente de transferência de calor.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo é realizada a formulação do problema, sendo apresentadas a geometria, as condições de contorno e iniciais, as equações de balanço e as hipóteses simplificadoras adotadas.

3.1 GEOMETRIA

Na Figura 3.1 é apresentado o modelo esquemático do processo de circulação e da perda de fluido de perfuração num poço. O poço possui profundidade L , a coluna de perfuração tem raio r_c e a distância entre o centro do poço e a interface entre a região anular e a formação rochosa é representada por r_p . As condições de contorno serão explicada na Seção 3.4.

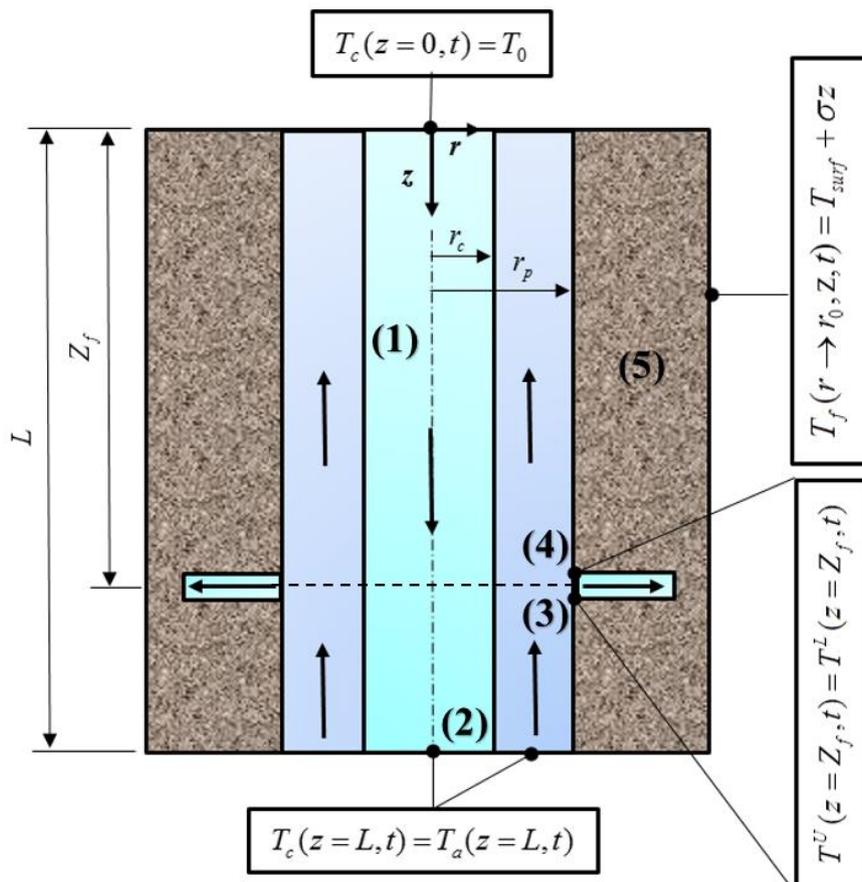


Figura 3.1 – Representação esquemática do conjunto poço-formação: geometria e condições de contorno

A fratura representada encontra-se à profundidade $z = Z_f$ e os sobrescritos para o perfil de temperaturas U e L representam as posições imediatamente acima e abaixo da fratura, respectivamente.

Ainda na Figura 3.1, nota-se que o problema pode ser dividido em 5 regiões:

- 1) Coluna de perfuração;
- 2) Transição entre a coluna de perfuração e a seção anular;
- 3) Seção anular abaixo da posição da fratura;
- 4) Seção anular acima da posição da fratura;
- 5) Formação rochosa.

As condições de contorno identificadas na Figura 3.1 serão apresentadas em detalhes na Seção 3.4.

3.2 HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

Para simplificar as equações de energia que descrevem o comportamento térmico do poço e da formação que o cerca, algumas hipóteses sobre os mecanismos principais de transferência de calor e do comportamento do escoamento precisam ser consideradas. As hipóteses fundamentais são as seguintes:

Todos os domínios (1-5):

- i. Axissimetria.
- ii. Propriedades constantes, exceto a viscosidade do fluido de perfuração que varia em função da temperatura (detalhes na Seção 6.1.1);
- iii. Não há mudança de fase;
- iv. Não há fontes ou sumidouros de energia;
- v. Efeitos de expansão térmica são desprezados;
- vi. Gravidade atuante em z e constante;
- vii. A transferência de calor por radiação é desprezada.

Coluna de perfuração (1):

- i. Transferência de calor do escoamento em z por convecção;
- ii. Transferência de calor com a região anular por condução;

- iii. Escoamento completamente desenvolvido;
- iv. Gradiente de temperatura na direção radial desprezado;

Região de Transição (2):

- i. Temperatura da saída da coluna igual a temperatura no início da seção anular;
- ii. Vazão do fluido constante na passagem do fluido da coluna de perfuração para a seção anular;
- iii. Desconsiderar troca de calor devido a interação do fluido com a formação rochosa no fundo do poço.

Região anular (3 e 4):

- i. Transferência de calor do escoamento em z por convecção;
- ii. Transferência de calor com a coluna de perfuração por condução;
- iii. Transferência de calor com a formação rochosa por condução;
- iv. Escoamento completamente desenvolvido, tanto na entrada da região 3 quanto no início da região 4;
- v. Gradiente de temperatura na direção radial desprezado;
- vi. Perda de circulação para as fraturas com vazão constante;
- vii. Regime de escoamento laminar ou turbulento, dependendo das condições utilizadas;
- viii. Resistência térmica desprezada em relação a formação rochosa.

Formação rochosa (5):

- i. Transferência de calor por condução na direção radial;
- ii. Transferência de calor por convecção associada a perda de circulação é desprezada;
- iii. Gradiente de temperatura constante ao longo de z .

3.3 EQUAÇÕES DO MODELO

Para determinar a equação de conservação de energia do fluido de perfuração na coluna de perfuração (domínio 1) e na região anular (domínios 3 e 4 – antes e após a fratura), são realizados balanços de energia em volumes de controle diferenciais, como

mostrado na Figura 3.2. A seguir as equações da energia são obtidas para cada região, com base em Chen *et al.* (2014):

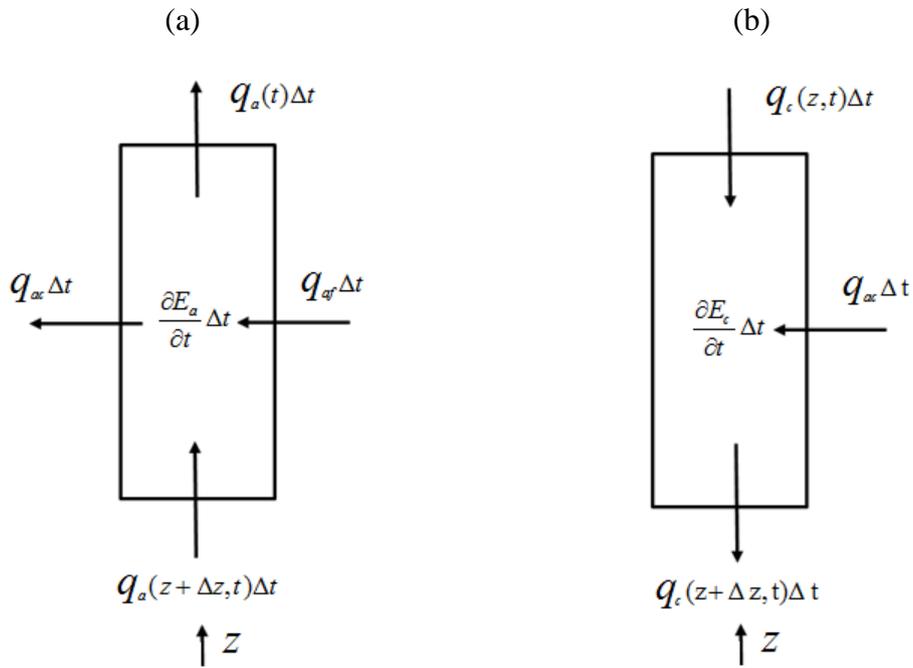


Figura 3.2 – Volumes de controle para os balanços de energia em:
(a) região anular e (b) coluna de perfuração

3.3.1 Região anular

Considerando um balanço de energia no volume de controle (BEJAN, 2006) para a região anular, tem-se:

$$\underbrace{q_a(z+\Delta z,t)\Delta t}_I - \underbrace{q_a(z,t)\Delta t}_II + \underbrace{q_{af}(z,t)\Delta t}_III - \underbrace{q_{ac}(z,t)\Delta t}_IV = \underbrace{\frac{\partial E_a}{\partial t} \Delta t}_V \quad 3.1$$

sendo q_a a taxa de transferência de calor de calor sendo transferida axialmente no volume de controle por advecção, q_{af} a taxa de transferência de calor entre a parede do poço e a da região anular, q_{ac} a taxa de transferência de calor entre a região anular e a coluna de perfuração e E a energia interna total.

Existe mudança na vazão volumétrica na transição entre as regiões 3 e 4, sendo realizado um equacionamento para cada região.

Para a região 3, tem-se que:

$$\begin{aligned}
& \underbrace{c_m \dot{m}_a^L T_a^L(z + \Delta z, t) \Delta t}_I - \underbrace{c_m \dot{m}_a^L T_a^L(z, t) \Delta t}_II + \underbrace{2\pi r_p \Delta z h_{af} (T_p - T_a^L)}_{III} - \\
& \underbrace{2\pi r_c \Delta z U_{ac} (T_a^L - T_c)}_{IV} = \underbrace{c_m \rho_m A_a \Delta z}_{V} \frac{\partial T_a^L(z)}{\partial t}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

onde \dot{m}_a^L é a vazão mássica que escoar na região 3, T_a^L a temperatura do fluido na região anular imediatamente abaixo da fratura, T_p a temperatura da parede do poço, A_a a área da seção anular, c_m o calor específico do fluido, h_{af} o coeficiente de transferência de calor devido à convecção na região anular sobre a formação rochosa, ρ_m a massa específica do fluido, r_c o raio da coluna, r_p o raio do poço e U_{ac} o coeficiente global de transferência de calor.

A obtenção do coeficiente de transferência de calor h , que é função das propriedades termofísicas e de transporte do fluido e da geometria do poço para a região anular e para a região da coluna de perfuração é um trabalho complexo. Portanto, são utilizadas correlações numéricas, que são função de números adimensionais do escoamento, para se obter uma estimativa. Para determinar o coeficiente de transferência de calor da região anular h_{af} , são utilizadas correlações para o número de Nusselt.

Primeiramente é necessário definir os seguintes números adimensionais:

- Número de Nusselt (razão entre a taxa de transferência de calor total e a taxa de transferência de calor condutiva):

$$Nu = \frac{hD_h}{k_m} \tag{3.3}$$

sendo D o diâmetro hidráulico do poço e k_m a condutividade térmica do fluido.

- Número de Reynolds (razão entre as forças inerciais e viscosas):

$$Re = \frac{\rho v_m D}{\mu} \tag{3.4}$$

sendo ρ a massa específica, v_m a velocidade média e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

- Número de Prandtl, que fornece uma medida entre a difusividade de quantidade de movimento e o transporte de energia por difusão nas camadas limite hidrodinâmica e térmica, respectivamente:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k_m} \quad 3.5$$

sendo c_p o calor específico e k_m a condutividade térmica do fluido.

Na Tabela 3.1 encontram-se as correlações utilizadas para obtenção do coeficiente de transferência de calor da região anular h_{af} . Ressalta-se a importância da escolha da correlação apropriada.

Tabela 3.1 – Correlações para coeficiente de transferência de calor h_{af}

Correlação	Referência	Condições
$Nu = 4,364$	Incropera e DeWitt (2002)	$Re < 2300$
$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.333}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$	Seider e Tate (1936, <i>apud</i> SANTOYO <i>et al.</i> , 2003)	$\left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ 10000 \leq Re \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$
$Nu = \frac{f/8(Re-1000)Pr}{1+12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}$ $f = (0,79 \ln(Re) - 1,64)^{-2}$	Gnielinski (1976 <i>apud</i> SANTOYO <i>et al.</i> , 2003)	$\left[\begin{array}{l} 0.5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$

sendo μ_w a viscosidade do fluido avaliada na temperatura da parede.

Para obtenção do coeficiente global de transferência de calor, U_{ac} , é utilizado um circuito térmico para a transferência de calor da coluna de perfuração até a região anular, sendo obtida a seguinte relação:

$$q_{ac} = \frac{T_p - T_a}{\frac{1}{2\pi r_{ci} h_c \Delta s} + \frac{1}{2\pi k_s \Delta s} \ln \left[\frac{r_{co}}{r_{ci}} \right] + \frac{1}{2\pi r_{co} h_{af} \Delta s}} = 2\pi r_{ci} U_{ac} (T_p - T_a) \Delta s \quad 3.6$$

onde r_{ci} é o raio interno da coluna de perfuração, r_{ce} o raio externo, Δs a espessura da parede da coluna, h_c e h_{af} o coeficiente de transferência de calor do escoamento na coluna de perfuração e na região anular, respectivamente e k_s a condutividade térmica da parede da coluna de perfuração. Desta forma, o coeficiente global de transferência de calor pode ser obtido por:

$$U_{ac} = \frac{1}{\frac{r_{ce}}{r_{ci} h_c} + \frac{r_{ce}}{k_s} \ln \left[\frac{r_{ce}}{r_{ci}} \right] + \frac{1}{h_{af}}} \quad 3.7$$

Nota-se que para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor é necessário o conhecimento do coeficiente de transferência de calor do escoamento na coluna h_c , que também é obtido através de correlações numéricas, expostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Correlações para coeficiente de transferência de calor h_c

Equação	Referência	Condições
$Nu = 4,364$	Incropera e DeWitt (2002)	$Re < 2300$
$Nu = \frac{f / 8(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f / 8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$	Gnielinski (1976 <i>apud</i> SANTOYO <i>et al.</i> , 2003)	$\left[\begin{array}{l} 0,5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6 \\ L / D \geq 10 \end{array} \right]$
$f = (0,79 \ln(Re) - 1,64)^{-2}$		
$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n$	Dittus e Boelter (1930 <i>apud</i> SANTOYO <i>et al.</i> , 2003)	$\left[\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ 10000 \leq Re \\ L / D \geq 10 \end{array} \right]$
$n = 0,4$: aquecimento; $n = 0,3$: resfriamento.		

Desta forma, pode ser feita uma discussão sobre o significado de cada termo da Equação 3.2:

- I) Energia que sai por advecção no volume de controle anular;
- II) Energia que entra por advecção no volume de controle anular;
- III) Transferência de calor entre a formação rochosa e a região anular do volume de controle;
- IV) Transferência de calor entre a região anular e a coluna de perfuração através da parede da coluna de perfuração;
- V) Variação da energia interna do volume de controle da região anular.

Se o limite para $\Delta z \rightarrow 0$ for aplicado na Figura 3.2 e em seguida realizada a divisão por $2\pi r_p \Delta z h_{af}$, é possível obter o balanço de energia em termos dos coeficientes térmicos:

$$\alpha_1^L \frac{\partial T_a^L(z, t)}{\partial t} = \alpha_2^L \frac{\partial T_a^L(z, t)}{\partial z} - (T_a^L - T_p) + \alpha_3^L (T_c - T_a^L) \quad 3.8$$

onde cada coeficiente é expresso por:

$$\alpha_1^L = \frac{\rho_m c_m A_a}{2\pi r_p h_{af}}; \quad \alpha_2^L = \frac{c_m \dot{m}_a^L}{2\pi r_p h_{af}}; \quad \alpha_3^L = \frac{r_c U_{ac}}{r_p h_{af}} \quad 3.9$$

Os coeficientes α_1^L , α_2^L e α_3^L possuem o mesmo significado físico dos coeficientes acima da fratura α_1^U , α_2^U e α_3^U . Assim, cada coeficiente obtido representa a sensibilidade da temperatura do volume de controle à variação:

α_1 : de energia interna;

α_2 : devido à convecção na direção z ;

α_3 : térmica na coluna de perfuração.

Na região 4, ocorre perda de circulação e conseqüentemente diminuição da vazão mássica. Logo, a Equação 3.2 é reescrita:

$$c_m \dot{m}_a^U T_a^U(z + \Delta z, t) \Delta t - c_m \dot{m}_a^U T_a^U(z, t) \Delta t + 2\pi r_p \Delta z h_{af} (T_p - T_a^U) - 2\pi r_c \Delta z U_{ac} (T_a^U - T_c) = c_m \rho_m A_a \Delta z \frac{\partial T_a^U(z)}{\partial t} \quad 3.10$$

com T_a^U sendo a temperatura da região anular acima da fratura e \dot{m}_a^U a vazão mássica do escoamento na região anular acima da fratura.

De maneira análoga à realizada na Equação 3.2, divide-se a Equação 3.10 por $2\pi r_w \Delta z h_{af}$ e com a atribuição de $\Delta z \rightarrow 0$ para evidenciar os coeficientes discutidos anteriormente, tem-se:

$$\alpha_1^U \frac{\partial T_a^U(z, t)}{\partial t} = \alpha_2^U \frac{\partial T_a^U(z, t)}{\partial z} - (T_a^U - T_p) + \alpha_3^U (T_c - T_a^U) \quad 3.11$$

sendo os coeficientes da região 4:

$$\alpha_1^U = \frac{\rho_m c_m A_a}{2\pi r_p h_{af}}; \quad \alpha_2^U = \frac{c_m \dot{m}_a^U}{2\pi r_p h_{af}}; \quad \alpha_3^U = \frac{r_c U_{ac}}{r_p h_{af}} \quad 3.12$$

Nota-se que o coeficiente que sofre influência direta da fratura é o α_2 , visto que a vazão mássica diminui imediatamente após a fratura.

Para um maior número de fraturas presentes no poço, é utilizada a mesma metodologia, exceto que para cada fratura deve ser alterado o valor do fluxo mássico e corrigido os novos valores de α_2 .

3.3.2 Coluna de perfuração

Aplicando o balanço de energia na coluna de perfuração, tem-se:

$$\underbrace{q_a(z,t)\Delta t}_{VI} - \underbrace{q_c(z+\Delta z,t)\Delta t}_{VII} + \underbrace{q_{ac}(z,t)\Delta t}_{VIII} = \underbrace{\frac{\partial E_c}{\partial t} \Delta t}_{IX} \quad 3.13$$

Como a vazão mássica do fluido de perfuração \dot{m}_c é uniforme dentro da coluna de perfuração por todo o poço, obtém-se:

$$\underbrace{c_m \dot{m}_c T_c(z+\Delta z,t)}_{VI} - \underbrace{c_m \dot{m}_c T_c(z,t)}_{VII} = \underbrace{2\pi r_c U_{ac}(T_a - T_p)\Delta z}_{VIII} - \underbrace{c_m \rho A_c \Delta z \frac{\partial T_c(z)}{\partial t}}_{IX} \quad 3.14$$

sendo T_c a temperatura da coluna de perfuração e A_c a respectiva área.

Discutindo-se cada termo do balanço de energia da coluna de perfuração (Equação 3.13) individualmente, tem-se que:

- VI) Energia que sai por advecção no volume de controle da coluna de perfuração;
- VII) Energia que entra por advecção no volume de controle da coluna de perfuração;
- VIII) Transferência de calor entre a região anular e a coluna de perfuração através da parede da coluna de perfuração;
- IX) Variação transiente da energia interna do volume de controle da coluna de perfuração;

Realizando a divisão por $2\pi r_p \Delta z U_{ap}$ de maneira semelhante à realizada na região anular e tomando-se o limite de $\Delta z \rightarrow 0$, são evidenciadas as constantes térmicas referentes à coluna de perfuração:

$$\beta_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} = \beta_2 \frac{\partial T_c}{\partial z} + (T_a - T_c) \quad 3.15$$

sendo os coeficientes definidos por:

$$\beta_1 = \frac{\rho_m c_m A_c}{2\pi r_p U_{ac}}; \beta_2 = -\frac{c_m \dot{m}_c}{2\pi r_c U_{ac}} \quad 3.16$$

Novamente, cada coeficiente obtido representa a sensibilidade da temperatura do volume de controle à variação:

β_1 : de energia interna;

β_2 : devido à convecção na direção z .

3.3.3 Formação rochosa

O perfil de temperaturas da formação rochosa depende da profundidade z , da distância até o centro da coluna r e do tempo t . A condução de calor que ocorre no domínio da formação é modelado pela Equação 3.17:

$$\frac{\partial T_f(z, r, t)}{\partial t} = \alpha_f \left(\frac{\partial^2 T_f(z, r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f(z, r, t)}{\partial r} \right) \quad 3.17$$

sendo α_f a difusividade térmica da formação rochosa e T_f a temperatura da formação rochosa. Conforme será visto adiante, o campo de temperaturas varia em função da profundidade pela condição de contorno imposta na extremidade da formação rochosa, de perfil linear de temperaturas (a temperatura aumenta de maneira constante conforme a profundidade aumenta desde a superfície até o fundo do poço).

3.3.4 Interface anular-formação

A equação de compatibilidade na interface entre o domínio da região anular e a formação rochosa é realizada através da igualdade entre o fluxo térmico das duas regiões, Equação 3.18:

$$\underbrace{2\pi r_p h_f (T_f(z, r = r_p, t) - T_a)}_X = \underbrace{2\pi r_p k_f \frac{\partial T_f(z, r = r_p, t)}{\partial r}}_{XI} \quad 3.18$$

sendo o significado físico correspondente:

- X) Transferência de calor por convecção entre a parede do poço e a região anular adjacente;
- XI) Transferência de calor por condução entre a parede do poço e a formação rochosa.

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E INICIAIS

A condição inicial do poço não fraturado escolhida, em uma tentativa de melhor representar o estado inicial do poço quando se inicia a circulação, é de utilizar um campo inicial $T = T(z)$:

$$T(z) = T_{surf} + \sigma z \quad 3.19$$

sendo T_{surf} a temperatura da superfície e σ o gradiente geotérmico, que é a taxa de variação da temperatura do interior da formação rochosa com a profundidade a partir da superfície em $Z=0$. Ressalta-se que o gradiente varia com o fluxo local de calor e condutividade térmica da formação (FRIDLEIFSSON *et al.*, 2008).

Para o problema fraturado, utiliza-se o campo de temperaturas proveniente da solução em regime permanente do escoamento no poço não fraturado. Assim, para a coluna de perfuração, região anular e formação rochosa, tem-se que (respectivamente) as Equações 3.20, 3.21 e 3.22:

$$T_c(z, t = 0) = T_c^{rp}(z) \quad 3.20$$

$$T_a(z, t = 0) = T_a^{rp}(z) \quad 3.21$$

$$T_f(r, z, t = 0) = T_f^{rp}(r, z) \quad 3.22$$

As condições de contorno consideradas no problema, conforme ilustrado na Figura 3.1, são as seguintes:

- Temperatura de entrada do fluido de perfuração conhecida:

$$T_c(z = 0, t) = T_0 \quad 3.23$$

- Igualdade de temperatura na transição do fundo do poço, na transição entre a coluna de perfuração e a seção anular:

$$T_c(z = L, t) = T_a(z = L, t) \quad 3.24$$

- Continuidade no perfil de temperaturas na presença de fraturas, tanto na coluna de perfuração quanto na região anular:

$$T_a^U(z = Z_f, t) = T_a^L(z = Z_f, t) \quad 3.25$$

$$T_c^U(z = Z_f, t) = T_c^L(z = Z_f, t) \quad 3.26$$

- Regiões da formação rochosa suficientemente afastadas possuem perfil linear de temperaturas:

$$T_f(r \rightarrow r_0, z, t) = T_{surf} + \sigma z \quad 3.27$$

sendo r_0 a extremidade da formação rochosa que, por hipótese, não é perturbada termicamente pelo escoamento que ocorre no poço e tem uma dimensão elevada comparada às dimensões do diâmetro da coluna e anular.

3.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo, apresentou-se a geometria do poço, as equações de balanço que modelam a transferência de calor, bem como as hipóteses e as condições de contorno e inicial adotadas para a solução.

As equações desenvolvidas pelo balanço de energia em volume de controle deste capítulo serão utilizadas como base para a construção da modelagem numérica.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo é descrita a modelagem numérica do trabalho. Inicialmente é realizada uma integração da equação de transporte para uma variável genérica, seguido do detalhamento da discretização da formação rochosa e do poço, incluindo a escolha de discretização para o esquema transiente e geração da malha.

4.1 INTEGRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE TRANSPORTE

O Método dos Volumes Finitos (MVF), descrito por Patankar (1980), é utilizado para a discretização espacial das equações fundamentais do trabalho. O método baseia-se na integração da equação diferencial a ser resolvida, assumindo uma variável genérica. Ao utilizar o MVF, são atendidas as equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia em todo o domínio.

Introduzindo uma variável geral ϕ , a forma conservativa das equações do problema, incluindo para quantidade escalares como a temperatura, pode ser escrita segundo a Equação 4.1 (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad 4.1$$

sendo ρ a massa específica, t o tempo, \vec{u} o vetor velocidade, Γ o coeficiente de difusividade relacionado à variável ϕ e S_ϕ o termo fonte.

Nota-se que, a partir da equação de transporte da propriedade ϕ (Equação 4.1) é possível obter as equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia. Por exemplo, a equação da energia é realizada através da troca da variável ϕ por T e utilização de uma equação de estado. O passo principal do método dos volumes finitos consiste na integração da Equação 4.1 sobre um volume de controle, ou seja:

$$\int_{vc} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{vc} \nabla \cdot (\rho\phi\vec{u}) dV = \int_{vc} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{vc} S_\phi dV \quad 4.2$$

Utilizando o teorema da divergência de Gauss, é possível reescrever as integrais de volume respectivas aos termos advectivos e difusivos como integrais de superfície. Assim, a Equação 4.2 pode ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho \phi dV \right) + \int_{SC} \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{u}) dA = \int_{SC} \vec{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{VC} S_{\phi} dV \quad 4.3$$

sendo o produto $\vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{u})$ o componente de fluxo da propriedade ϕ devido ao escoamento na direção do vetor normal \vec{n} e VC e SC são o volume de controle e a superfície de controle, respectivamente. Fisicamente, a Equação 4.3 pode ser descrita, conforme a representação da Figura 4.1.

Taxa de aumento de ϕ no VC	+	Taxa da variação de ϕ por convecção	=	Taxa da variação de ϕ por difusão	+	Taxa da variação de ϕ devido às fontes
---------------------------------	---	--	---	--	---	---

Figura 4.1 – Significado físico dos termos da equação generalizada de transporte

Neste trabalho é utilizada a equação para regime transiente, sendo que para a obtenção das condições iniciais a equação é simplificada para o problema transiente, sem a presença de fraturas. Com essa simplificação do termo transiente, obtém-se:

$$\int_{SC} \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{u}) dA = \int_{SC} \vec{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{VC} S_{\phi} dV \quad 4.4$$

Para a parte transiente, também é necessária a integração com respeito ao tempo em um incremento de tempo Δt . Assim, é obtida a forma mais geral da equação de transporte, Equação 4.5:

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \rho \phi dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_{SC} \vec{n} \cdot (\rho \phi \vec{u}) dA dt = \int_{\Delta t} \int_{SC} \vec{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{VC} S_{\phi} dV dt \quad 4.5$$

4.2 DISCRETIZAÇÃO

Nesta seção são apresentadas a geração da malha, a discretização da equação de transporte para a energia e esquema de interpolação utilizados no código numérico.

4.2.1 Geração da malha

A aproximação discreta da equação de conservação de energia pelo MVF tem por objetivo dividir o domínio de cálculo em certo número de subdomínios. O conjunto dos subdomínios gerados é denominado malha numérica. No presente trabalho, as malhas utilizadas são unidimensionais. Para a coluna de perfuração e seção anular, é gerada uma malha unidimensional na direção z , enquanto que para a formação rochosa, para cada nó gerado na direção z para a malha da coluna é gerada uma respectiva malha unidimensional em r .

Como nas malhas utilizadas é resolvida apenas a equação da energia, significa que as malhas são escalares, pois a única variável do problema é uma propriedade escalar intensiva, a temperatura. Desta forma não são necessárias malhas deslocadas adicionais para expressar o valor da variável e suas derivadas nas faces dos volumes de controle. A Figura 4.2 apresenta um desenho esquemático da malha computacional unidimensional utilizada na formação. R é o centro do volume de controle principal, os pontos W e E são os centros dos volumes de controle vizinhos e w e e são as respectivas superfícies de controle. A coordenada maiúscula K é utilizada para localizar os centros de volumes de controle e a minúscula k é responsável por expressar a localização das superfícies de controle.

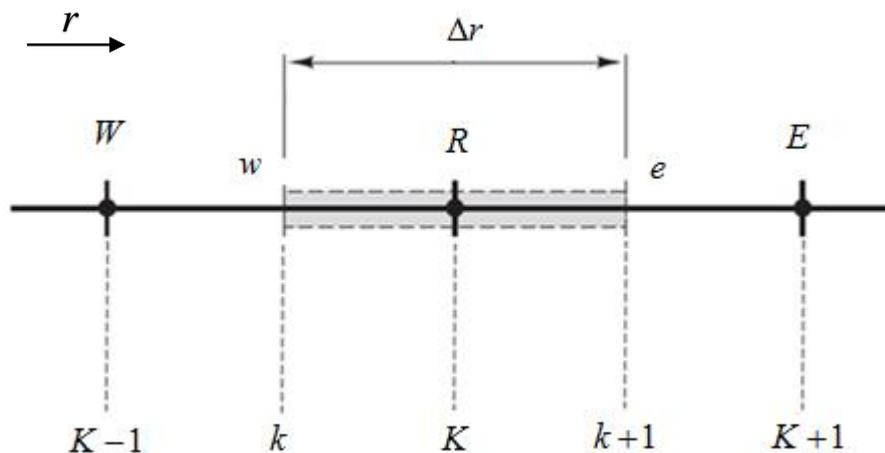


Figura 4.2 – Esquema da malha utilizada na discretização da equação da energia na formação rochosa

Com relação à malha unidimensional utilizada na coluna de perfuração e na região anular, exposta na Figura 4.3, trata-se de uma malha similar à utilizada para a formação,

porém na direção z . Para este caso, R é o centro do volume de controle principal, os pontos centrais N e S são os centros dos volumes de controle vizinhos (acima e abaixo, respectivamente) e n e s são as superfícies de controle vizinhas. A coordenada maiúscula J é utilizada para localizar os centros de volumes de controle e a minúscula j é responsável por expressar a localização das superfícies de controle na malha gerada.

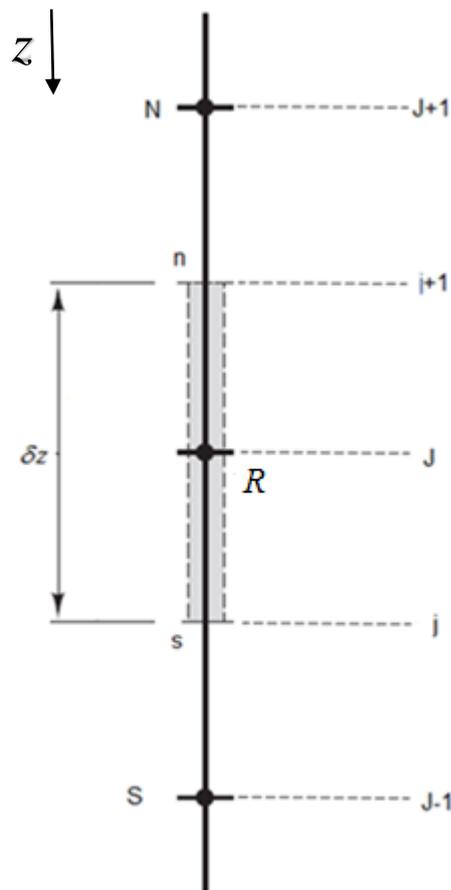


Figura 4.3 – Esquema da malha utilizada na discretização da equação da energia na região anular e coluna de perfuração

4.2.2 Discretização temporal

A escolha adotada para este trabalho como esquema transiente foi a formulação implícita, devido à robustez e estabilidade (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007). Na formulação implícita, após a discretização das equações, o campo de temperaturas do instante de tempo posterior é obtido através da solução de um sistema de matriz diagonal-dominante. Em cada equação do sistema, a variável de cada posição futura é função da

mesma variável em posições adjacentes, não sendo possível obter uma relação explícita em função do campo anterior.

O procedimento de marcha transiente se inicia em um campo inicial de temperaturas. Em seguida, é solucionado o sistema descrito para obtenção do campo de temperaturas no instante de tempo posterior, denominado T . O processo é então repetido, com o campo de temperaturas do instante de tempo T_i recebendo os valores de T e calculando-se o campo no novo instante de tempo $i+1$, conforme pode ser visto na Seção 4.2.7 (Figura 4.4).

4.2.3 Esquema de aproximação para os termos advectivos

Tanto na coluna de perfuração como na região anular ocorre transferência de calor por advecção devido às variações de temperatura no próprio fluido com a profundidade, sendo necessária a escolha de um esquema de interpolação.

O esquema de interpolação *upwind* (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007) calcula fluxos através das faces do volume de controle, portanto é uma formulação conservativa. Além disso, possui apenas coeficientes positivos e, possuindo uma matriz de coeficientes diagonalmente dominante, pode ser resolvido com maior facilidade computacionalmente. A velocidade do escoamento no problema é constante, exceto nos pontos em que há a perda de circulação devido à presença da fratura. Portanto, julga-se apropriada a escolha do esquema *upwind*.

4.2.4 Discretização da equação da energia – seção anular

Integrando a Equação 4.3, relativa ao balanço de energia na região anular, é obtida a Equação 4.6:

$$\int_{\Delta V} \left(\int_{\Delta t} \alpha_1 \frac{\partial T_a}{\partial t} dt \right) dz = \int_{\Delta t} \left(\int_{\Delta A} \alpha_2 \frac{\partial T_a}{\partial z} dz \right) dt - \int_{\Delta t \Delta V} (T_a - T_p) dz dt + \int_{\Delta t \Delta V} \alpha_3 (T_c - T_a) dz dt \quad 4.6$$

Simplificando, tem-se que:

$$\int_{\Delta V} \alpha_1 (T_a - T_a^0) dz = \int_{\Delta t} ((\alpha_2 T_a)^n - (\alpha_2 T_a)^s) dt - T_a (1 + \alpha_3) \Delta z \Delta t + (T_c - T_p) \Delta z \Delta t \quad 4.7$$

Dividindo por $\Delta z \Delta t$, simplificando as integrais remanescentes e utilizando o esquema *upwind*, é obtida a Equação 4.8:

$$\alpha_1 (T_a - T_a^0) \frac{\Delta z}{\Delta t} = \alpha_2 (T_a^N - T_a) - T_a (1 + \alpha_3) \Delta z + (T_c - T_p) \Delta z \quad 4.8$$

A equação discretizada resultante tem a forma:

$$a_Q T_Q = a_N T_N + a_S T_S + S_Q T_Q + S_k + a_Q^0 T_Q^0 \quad 4.9$$

sendo que os coeficientes da Equação 4.9 estão presentes na Tabela 4.1. Nota-se que para garantir a estabilidade numérica o coeficiente S_a deve ser negativo.

Tabela 4.1 – Coeficientes da discretização da convecção unidimensional transiente da seção anular

a_N	a_S	a_Q^0	S_k	$S_a T_a$	a_Q
0	α_2	$\alpha_1 \frac{\Delta z}{\Delta t}$	$T_c - T_p$	$-T_a (1 + \alpha_3)$	$a_N + a_S + a_Q^0 - S_a$

4.2.5 Discretização da equação da energia – coluna de perfuração

Assim como foi realizado para região anular, inicialmente se utiliza a equação obtida no balanço de energia do volume de controle, neste caso para a coluna de perfuração. Integrando a Equação 4.8, obtém-se a Equação 4.10:

$$\int_{\Delta V} \left(\int_{\Delta t} \beta_1 \frac{\partial T_c}{\partial t} dt \right) dz = \int_{\Delta t} \left(\int_{\Delta A} \beta_2 \frac{\partial T_c}{\partial z} dz \right) dt + \int_{\Delta t} \left(\int_{\Delta V} T_a - T_c dz \right) dt \quad 4.10$$

Após as integrações e simplificações, tem-se que:

$$\beta_1 (T_c - T_c^0) \frac{\Delta z}{\Delta t} = \beta_2 (T_c - T_c^s) + (T_a - T_c) \Delta z \quad 4.11$$

nota-se que o esquema *upwind* sofreu uma alteração, já que o sentido do escoamento foi alterado de positivo para negativo.

A Tabela 4.2 contém os coeficientes para que a Equação 4.11 esteja no formato da Equação 4.9.

Tabela 4.2 – Coeficientes da discretização da convecção unidimensional transiente da coluna

a_N	a_S	a_Q^0	S_K	$S_c T_c$	a_Q
0	β_2	$\beta_1 \frac{\Delta z}{\Delta t}$	T_a	$-T_c$	$a_N + a_S + a_Q^0 - S_c$

4.2.6 Discretização da equação da energia – formação rochosa

Para a conservação da energia na formação rochosa, não há escoamento e portanto, não há a existência de termos advectivos. Além disso, a discretização é unidimensional na direção r .

Integrando a equação da conservação da energia e considerando z constante, tem-se que:

$$\iint_{\Delta r t} \frac{\partial T_f}{\partial t} dr dt = \iint_{\Delta r t} \alpha_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} dr dt + \iint_{\Delta r t} \frac{\alpha_f}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} dr dt \quad 4.12$$

Simplificando a Equação 4.12 e aproximando as derivadas de primeira e segunda ordem para a integração, tem-se que:

$$(T_f - T_f^0) \Delta r = \left[\left(\frac{\partial T_f}{\partial r} \right)^e - \left(\frac{\partial T_f}{\partial r} \right)^w \right] \frac{\Delta t}{\Delta r} + \frac{\alpha_f}{r_Q} [(T_f)^e - (T_f)^w] \Delta t \quad 4.13$$

Em seguida, são utilizados os esquemas de interpolação para a discretização completa da Equação 4.13. A forma discretizada final do balanço de energia para a formação rochosa está apresentada na Equação 4.14:

$$(T_f - T_f^0) \frac{\Delta r^2}{\Delta t} = T_f^{I+1} - 2T_f^I + T_f^{I-1} + \frac{\Delta r}{r_p + j \cdot \Delta r} (T_f^{I+1} - T_f^I) \quad 4.14$$

Finalmente, a Tabela 4.3 apresenta os coeficientes do balanço de energia discretizado.

Tabela 4.3 – Coeficientes da discretização da condução radial transiente da formação

a_E	a_W	a_Q^0	S_k	$S_f T_f$	a_Q
$1 + \frac{\Delta r}{r_p + j \cdot \Delta r}$	1	$\frac{(\Delta r)^2}{\Delta t}$	0	$T_f \left(-2 - \frac{\Delta r}{r_p + j \cdot \Delta r} \right)$	$a_W + a_E + a_Q^0 - S_f$

4.2.7 Fluxograma de solução

Na Figura 4.4 encontra-se o fluxograma de solução do código numérico. Nota-se que a Subrotina A, que determina o campo de temperaturas em regime permanente do poço não fraturado, é utilizada novamente no cálculo transiente do poço após a introdução da fratura. Além disso, verifica-se que o campo de temperaturas inicial da simulação do poço não fraturado é a solução de regime permanente do poço não fraturado.

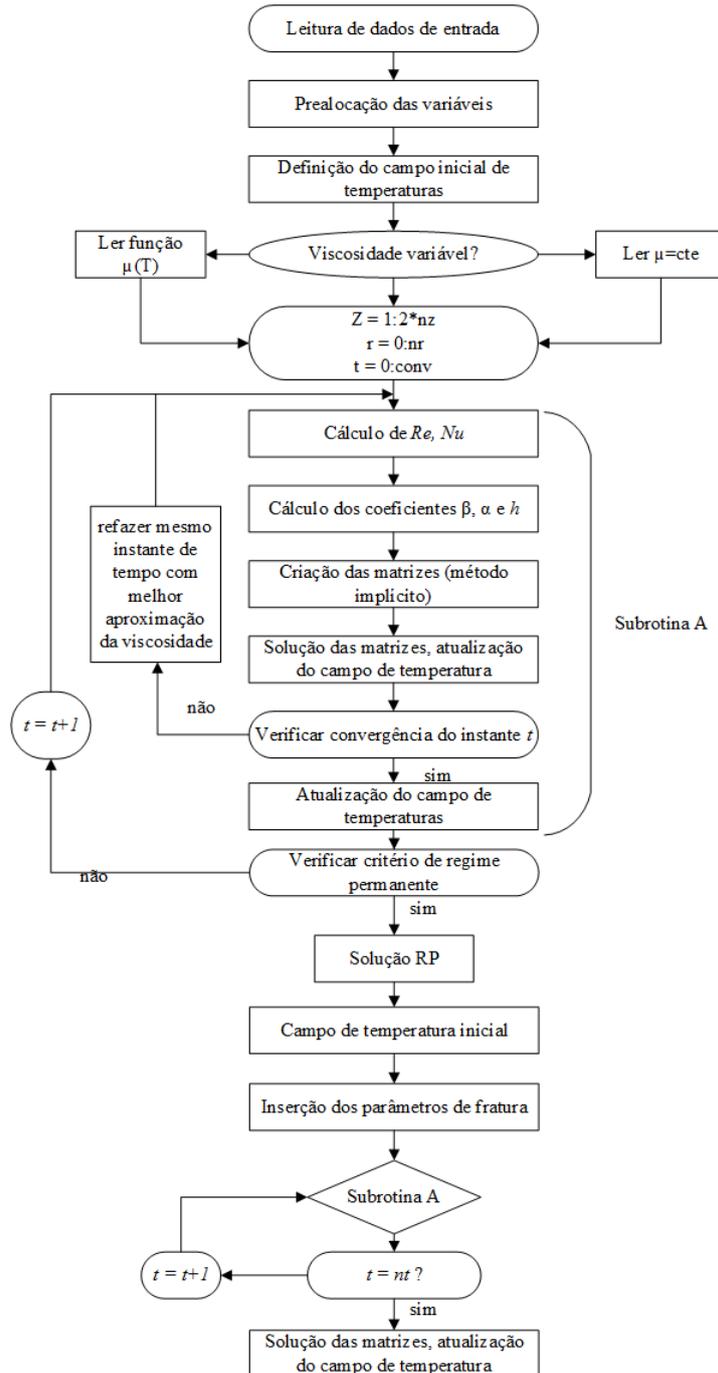


Figura 4.4 – Fluxograma de solução

4.2.8 Síntese das equações discretizadas

A Tabela 4.4 realiza uma síntese das equações obtidas através da aplicação da conservação de energia em um volume de controle diferencial, seguidas pela discretização através do MVF.

Tabela 4.4 – Coeficientes das equações de balanço de energia para cada região

<i>Coeficientes</i>	a_N	a_S	a_Q^0	S_k	$S_Q T_Q$
<i>Anular</i>	0	α_2	$\alpha_1 \frac{\Delta z}{\Delta t}$	$T_c - T_p$	$-T_a(1 + \alpha_3)$
<i>Coluna</i>	β_2	0	$\beta_1 \frac{\Delta z}{\Delta t}$	T_a	$-T_c$
<i>Equações</i>	$a_Q T_Q = a_N T_N + a_S T_S + S_Q T_Q + S_k + a_Q^0 T_Q^0$			$a_Q = a_N + a_S + a_Q^0 - S_Q$	
<i>Coeficientes</i>	a_E	a_W	a_Q^0	S_k	$S_Q T_Q$
<i>Formação</i>	$1 + \frac{\Delta r}{r_p + j \cdot \Delta r}$	1	$\frac{(\Delta r)^2}{\Delta t}$	0	$T_f \left(-2 - \frac{\Delta r}{r_p + j \cdot \Delta r} \right)$
<i>Equações</i>	$a_Q T_Q = a_E T_E + a_W T_W + S_Q T_Q + S_k + a_Q^0 T_Q^0$			$a_Q = a_E + a_W + a_Q^0 - S_Q$	

4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO 4

Neste capítulo os principais aspectos do MVF foram abordados, incluindo as escolhas de formulação e discretização das equações desenvolvidas no Capítulo 3.

No próximo capítulo serão abordados diferentes problemas de verificação do modelo, expondo as potencialidades e limites do código desenvolvido.

5 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo é realizada a verificação numérica do código desenvolvido através da comparação de resultados da literatura referentes a poços com duas configurações diferentes: não fraturado (RAYMOND, 1969) e fraturado (CHEN *et al.*, 2014).

No primeiro caso, é realizada uma comparação entre os resultados obtidos para a temperatura do fundo do poço e a temperatura de saída para um poço não fraturado e não cimentado com profundidade total $L = 6100\text{m}$ (RAYMOND, 1969).

No segundo caso, os resultados para um poço fraturado de profundidade total $L = 4575\text{m}$ com diferentes posições de fratura z_f e perda de circulação Q obtidos por Chen *et al.*, (2014) são comparados com os obtidos através do código desenvolvido neste trabalho.

5.1 POÇO NÃO FRATURADO

O primeiro problema verificado refere-se a um poço sem revestimento com 6.100m de profundidade localizado no Golfo do México, o qual tem sido utilizado por pesquisadores para validar simuladores numéricos durante o desenvolvimento de códigos (RAYMOND, 1969; ARNOLD 1990; HOLMES e SWIFT, 1970).

Na Tabela 5.1 consta-se uma compilação dos dados relacionados ao processo de perfuração deste poço, os quais são foram utilizados como dados de entrada para a simulação numérica. Detalhes sobre o poço são encontrados em Holmes e Swift (1970).

Os perfis de temperatura da região anular para tempos de circulação de 2 e 16 horas foram determinados e apresentados na Figura 5.1, conforme também obtido por Raymond (1969). Na Tabela 5.2 estão presentes as comparações dos resultados obtidos com o código desenvolvido neste trabalho e os obtidos por Arnold (1990) e Raymond (1969) para as temperaturas de saída e fundo do poço. Os símbolos Δ_1 , Δ_2 e Δ_3 se referem a diferença percentual na temperatura em relação a Raymond(1969), Arnold (1990) e resultados em campo, respectivamente, segundo a Equação 5.1:

$$\Delta_i = \max \left| \frac{T - T_i}{T_i} \right| \quad 5.1$$

sendo max o maior desvio percentual encontrado, ou seja: da temperatura de saída ou da temperatura do fundo do poço.

Tabela 5.1 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido de perfuração para verificação do poço não fraturado

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidade do Poço	Z	6100	[m]
Diâmetro da coluna	D_c	0,114	[m]
Diâmetro do Poço	D_p	0,219	[m]
Vazão volumétrica	χ	0,0126	[m ³ /s]
Massa específica do fluido	ρ	1200	[kg/m ³]
Temperatura de entrada	T_0	57,2	[°C]
Gradiente geotérmico	σ	2,92	[°C/100m]
Difusividade térmica da formação	α	$9,685 \cdot 10^{-7}$	[m ² /s]
Temperatura da superfície	T_{surf}	26,7	[°C]
Condutividade térmica da parede da coluna	k_s	43,33	[W/m.K]
Condutividade térmica do fluido	k	2,25	[W/m.K]
Condutividade térmica da formação	k_f	2,25	[W/m.K]
Viscosidade do fluido de perfuração	μ	0,045	[Pa.s]

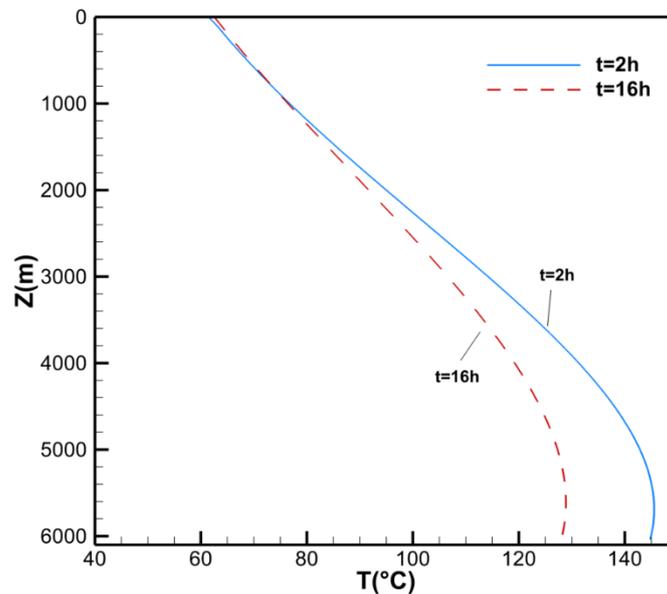


Figura 5.1 – Evolução do perfil de temperatura na região anular do poço

Os cálculos realizados por Raymond (1969) mostram que a temperatura do fluido de perfuração na saída $T_{saída}$ sobe de 26,7 °C para 60 °C durante as primeiras 2 horas de circulação t_c e após 16h tende ao valor constante de 63 °C. Um comportamento térmico

similar ao observado por Raymond (1969) é encontrado durante as simulações numéricas, exceto que a temperatura de saída estabilizou em 62,5 °C. No caso da temperatura de fundo do poço T_{fundo} , observa-se que há queda do valor inicial de 204,4 °C (devido ao gradiente geotérmico imposto) para 144,1°C após duas horas e 128,0°C após 16 horas de tempo de circulação. Sugere-se que a explicação para a diferença entre os resultados comparados pode estar associada à geometria simplificada do poço (sem cimentação). Assim, se espera que os processos de transferência de calor entre o poço e a formação ocorram de forma mais rápida e intensa com a presença da cimentação.

Tabela 5.2 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido de perfuração

	Presente		Raymond (1969)		Arnold (1990)		Campo	
	2	16	2	16	2	16	2	16
t_c (h)	2	16	2	16	2	16	2	16
T_{fundo} (°C)	144,1	128,0	145,0	128,0	147,0	147,0	143,0	127,0
$T_{\text{saída}}$ (°C)	61,4	62,5	60,0	63,0	59,0	64,0	60,0	63,0
Δ_1 (%)	2,3	0,8	-	-	1,7	14,8	1,4	0,8
Δ_2 (%)	4,1	12,9	1,7	12,9	-	-	2,72	13,6
Δ_3 (%)	2,3	0,8	1,4	0,8	2,8	15,7	-	-

5.2 POÇO FRATURADO

Nesta verificação numérica um poço com 4573m de profundidade com perda de circulação por fratura discreta foi verificado. Informações complementares sobre os dados de entrada do programa, condições do reservatório e propriedades do fluido de perfuração estão presentes em Chen *et al.* (2014) e resumidos na Tabela 5.3. O foco desta análise ainda está no perfil de temperaturas da região anular e na temperatura do fundo do poço, levando em consideração os efeitos da introdução da fratura.

A Figura 5.2 ilustra a mudança no perfil de temperatura da região anular para diferentes tempos de circulação ($t_c=0, 1, 3, 12, 24$ h) antes da introdução da fratura. É assumido que no início da circulação, os perfis de temperatura do poço e da formação seguem a distribuição linear geotérmica. A taxa de variação de temperatura no fluido de perfuração diminui após 12h de circulação e é assumido regime permanente após 24 horas, conforme também obtido por Chen *et al.* (2014).

Tabela 5.3 – Condições do reservatório/poço e propriedades do fluido para a verificação numérica de poço com fratura

Parâmetros	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidade do Poço	Z	4573	[m]
Diâmetro da coluna	D_c	0,084	[m]
Diâmetro do Poço	D_p	0,156	[m]
Vazão volumétrica	λ	0,02	[m ³ /s]
Massa específica do fluido	ρ	1198	[kg/m ³]
Temperatura de entrada	T_0	45	[°C]
Gradiente geotérmico	σ	3,31	[°C/100m]
Difusividade térmica da formação	α	$1,2 \cdot 10^{-6}$	[m ² /s]
Temperatura da superfície	T_{surf}	15,28	[°C]
Condutividade térmica da parede da coluna	k_p	50	[W/m.K]
Condutividade térmica do fluido	k	0,6	[W/m.K]
Condutividade térmica da formação	k_f	1,3	[W/m.K]
Viscosidade do fluido de perfuração	μ	0,045	[Pa.s]

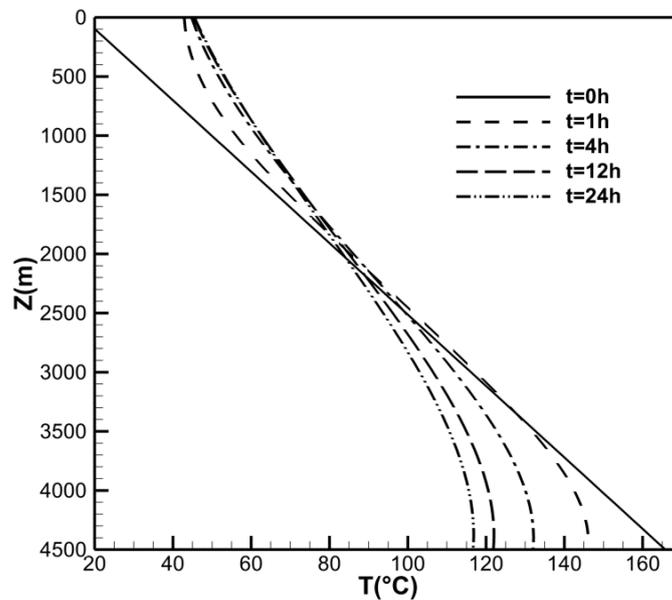


Figura 5.2 – Perfil de temperatura da região anular do poço não fraturado sem a presença de fraturas com $t_c=0, 1, 3, 12, 24h$

O campo de temperaturas inicial após a introdução da fratura é apresentado na Figura 5.3, quando imposta uma perda de circulação de $Q = 0,25$, que corresponde a fuga de 25% do fluido injetado pela coluna para a formação rochosa. A fratura é localizada em uma profundidade relativa de aproximadamente $z_f = 0,88$. O cálculo da profundidade relativa de fratura é dado pela Equação 5.2:

$$z_f = \frac{Z_f}{L} \quad 5.2$$

sendo z_f a profundidade da fratura e $L = 4573\text{m}$ a profundidade total do poço.

Com a introdução da fratura, a temperatura da região anular diminui nas regiões mais profundas do poço, conforme ilustrado na Figura 5.3, que compara os resultados obtidos no presente trabalho com os encontrados por Chen *et al.* (2014). Uma diminuição de 27°C na temperatura do fundo do poço T_{fundo} é observada durante as 24h de perda de circulação, sendo que nas últimas 12h a diminuição de temperatura foi significativamente menor. Portanto, o efeito da perda da circulação no perfil de temperatura é mais significativo nos estágios iniciais de circulação.

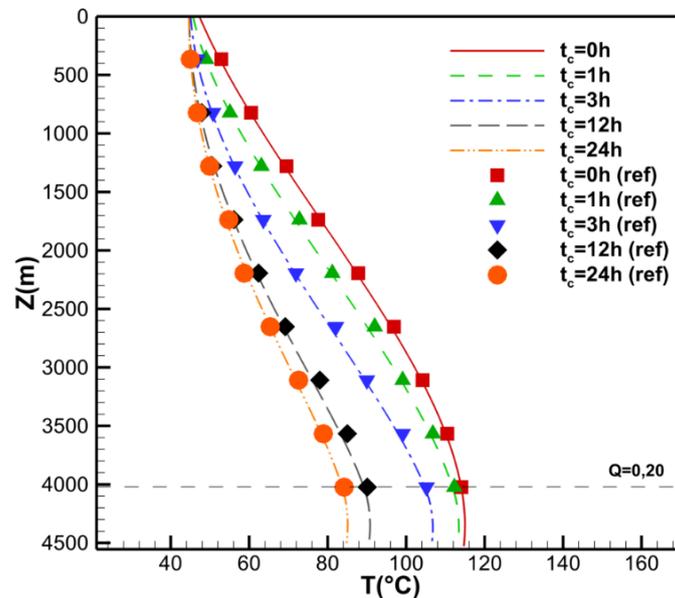


Figura 5.3 – Distribuição de temperaturas da região anular com $z_f=0,88$ e $Q=0,25$ (Símbolos representam os resultados de Chen *et al.*, 2014)

A Figura 5.4 ilustra a evolução do perfil de temperatura da região anular para $z_f=0,88$ e $Q=0,10, 0,20$ e $0,40$. Observando a variação da perda de circulação Q , nota-se que o aumento da perda de circulação diminui a temperatura da região anular por todo o domínio para as condições citadas.

O efeito da variação da posição relativa de fratura z_f no perfil de temperaturas da região anular para perda de circulação $Q=0,25$ e tempo de circulação $t_c=12\text{h}$ está exposto na Figura 5.5. É possível observar que o aumento da profundidade relativa de fratura z_f diminui a temperatura no fundo do poço, sendo que para a variação da profundidade relativa de $z_f=0,66$ para $z_f=0,88$ foi observado uma redução de $10,8^\circ\text{C}$.

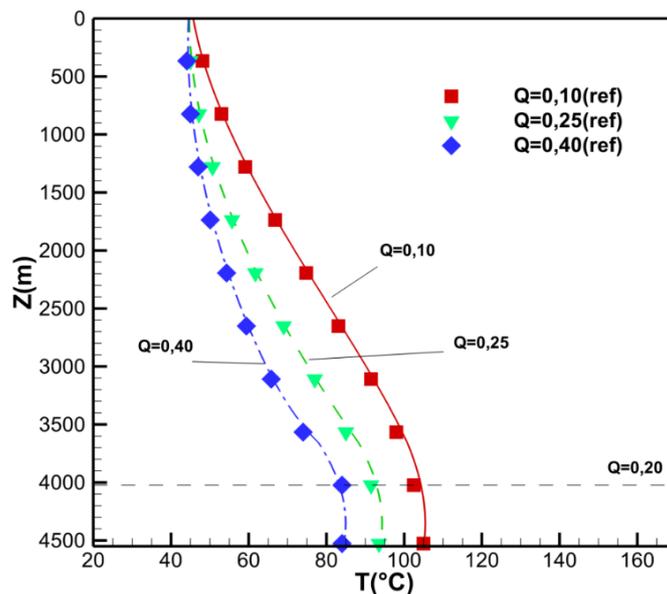


Figura 5.4 –Efeito da perda de circulação (Q) no perfil de temperaturas da região anular com $z_f=0,88$ e $t_c=12\text{h}$ (Símbolos representam os resultados de Chen *et al.*, 2014)

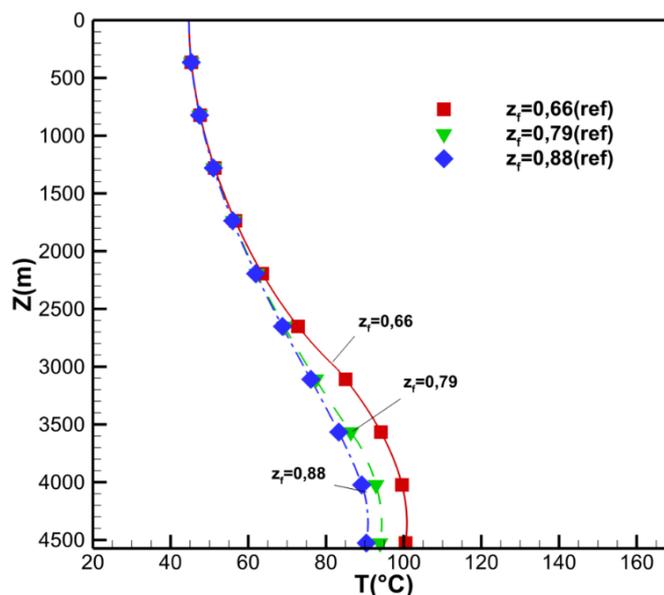


Figura 5.5 –Efeito da posição da fratura no perfil de temperaturas da região anular com $Q=0,25$ e $t_c=12\text{h}$ (Símbolos representam os resultados de Chen *et al.*, 2014)

5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO 5

Neste capítulo foram analisados dois problemas para verificar o modelo desenvolvido neste trabalho: o primeiro foi referente a um poço não fraturado e o segundo de um poço com uma fratura discreta, sendo que ambos apresentaram boa concordância quando comparados com resultados da literatura. No próximo capítulo são apresentados os principais resultados do trabalho.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os principais resultados do presente trabalho. Inicialmente são expostos os principais parâmetros analisados e respectivas faixas de valores investigadas. Na sequência são visualizados os testes de malha computacionais realizados para determinadas configurações de simulação. Uma análise de sensibilidade paramétrica preliminar para poços sem a presença de fratura é realizada com o objetivo de evidenciar algumas características dos parâmetros (massa específica, vazão volumétrica de entrada, viscosidade e temperatura de entrada) do problema. Ainda para um poço não fraturado é feita a análise para os diferentes fluidos de perfuração utilizados neste trabalho que serve como base para a análise dos resultados dos poços com a presença de fraturas. Em seguida os resultados dos principais parâmetros do problema investigado: profundidade relativa de fratura (z_f), perda de circulação (Q), tempo de circulação (t_c), regime de escoamento, número de fraturas (N_f) e distância relativa entre fraturas (d_f) são expostos.

6.1 PARÂMETROS ANALISADOS

Os parâmetros analisados, neste trabalho, podem ser divididos em dois grupos: relativos à fratura e ao fluido.

O primeiro parâmetro relativo às fraturas analisado é a profundidade relativa (z_f). Sabe-se, da revisão bibliográfica, que a posição relativa da fratura em relação à profundidade total tem efeitos importantes no perfil de temperaturas, como por exemplo a temperatura do fundo do poço.

Outro parâmetro importante analisado é a porcentagem da vazão mássica perdida em cada fratura (Q). De acordo com Chen *et al.* (2014), a perda de circulação é um parâmetro fundamental pois influi diretamente na intensidade da descontinuidade da curva do gradiente da temperatura (dT/dz), que é utilizada para detectar a posição de cada fratura discreta. O número de fraturas no poço é outro parâmetro analisado, de forma a investigar os efeitos da interferência de fraturas e de ser mostrado o potencial do simulador frente à uma geometria multifaturada, quando o efeito térmico é simultâneo.

Ainda em relação a fratura, é realizada a variação da distância relativa entre duas fraturas, para verificar o efeito de interferência na detecção de fraturas (dT/dz), com o objetivo de quantificar de forma correta o número de fraturas na formação rochosa para determinada configuração de operação.

Especificamente sobre o fluido, a propriedade em análise é a viscosidade, que é função da temperatura. Na Seção 6.1.1 são apresentados os diferentes fluidos de perfuração utilizados para condições específicas de trabalhos publicados na literatura.

Outra análise realizada neste trabalho, é em relação aos regimes de escoamento do fluido (laminar ou turbulento), que podem ser verificados em diferentes regiões do conjunto poço-formação investigados.

Na Tabela 6.1 estão apresentadas as faixas de valores dos parâmetros discutidos e variados no trabalho.

Tabela 6.1 – Faixa de valores dos parâmetros analisados.

Parâmetros	Valores analisados	Seção
Profundidade relativa da fratura (z_f)	0,3; 0,6; 0,75; 0,9	(6.5)
Perda de circulação (Q)	0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,5	(6.6)
Tempo de circulação (t_c)	1; 2; 4; 6; 8; 12; 24 h	(6.7)
Regime de escoamento	LLL; TLL; TTL; TTT	(6.8)
Número de fraturas (N_f)	0, 1, 2, 3	(6.9)
Distância entre fraturas (d_f)	2,5%; 5%; 10%; 15%; 20%	(6.10)

6.1.1 Fluidos utilizados e justificativa

O critério de escolha para os fluidos de perfuração utilizados foi de possuir o comportamento da viscosidade em função da temperatura mais distinto. A Figura 6.1 apresenta o efeito da temperatura na viscosidade dos fluidos f1, f2, f3, f4 e f5. A geração de correlações viscosidade-temperatura para os fluidos de perfuração é uma tarefa complexa e os dados utilizados no trabalho foram retirados do trabalho numérico-experimental de Santoyo (1997) e Santoyo *et al.* (2003). Vale destacar que o fluido f1 é um fluido hipotético para comparação de um fluido que independe da mudança de viscosidade em relação a temperatura.

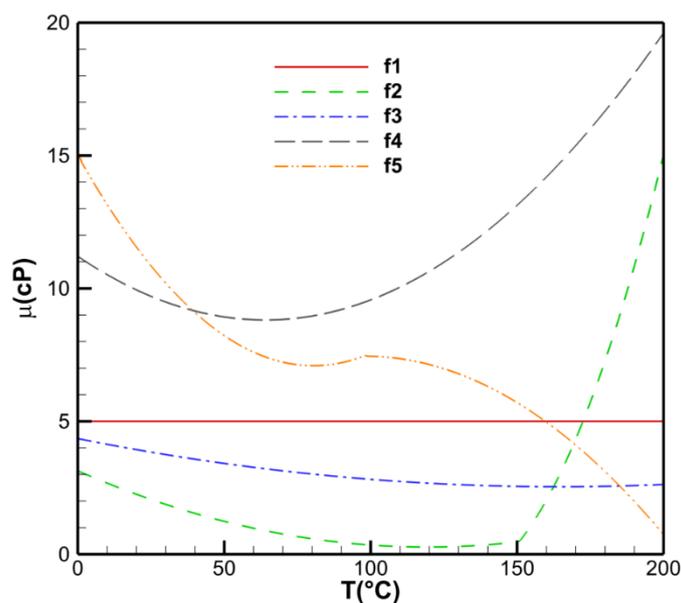


Figura 6.1 – Perfil de viscosidade em função da temperatura para os fluidos de perfuração escolhidos (Adaptado de: Santoyo, 1997)

Além da viscosidade, os fluidos de perfuração selecionados possuem variação na massa específica, devido à diferentes composições na formulação do fluido, conforme pode ser visto na Tabela 6.2. Nesta tabela é calculado o número de Reynolds da entrada da coluna, assim como da região anular, para uma configuração de temperatura de entrada prescrita $T_0=45^\circ\text{C}$, vazão volumétrica de $\lambda=0,02\text{ m}^3/\text{s}$ e tempo de circulação de 24h, considerando que o raio interno da coluna é $r_i=84,1\text{mm}$ e o raio externo até a interface da formação rochosa é $r_p=106,3\text{mm}$, com espessura da parede da coluna de 15mm. Para o cálculo do número de Reynolds do início da região anular (Re_a) é necessário obter a temperatura do fundo do poço (T_{fp}) para um determinado tempo de processo de circulação de fluido no poço (e.g., $t_c = 24\text{h}$), assim como a viscosidade para esta temperatura T_{fp} . Ressalta-se que para esta configuração de operação padrão o regime de escoamento é turbulento tanto na coluna quanto na seção anular do poço.

Tabela 6.2 – Número de Reynolds na entrada da coluna e início do anular

Fluido	ρ [kg/m ³]	μ [cP] (T_0)	μ [cP] (T_{fp})	T_{fp} [°C]	Re_c (T_0)	Re_a (T_{fp})
f1	1100	5,0	5,0	121	33150	13571
f2	1040	1,4	0,3	133	113560	206948
f3	1060	3,5	2,6	130	45767	25149
f4	1050	8,6	9,8	105	18402	6609
f5	1050	8,7	7,1	122	18343	9123

6.2 TESTE DE MALHA

Para garantir a independência dos resultados em relação ao número de volumes de controle na direção z (n_z), Equação 6.1, e r (n_r), Equação 6.2, e ao número de incrementos de tempo (n_t), Equação 6.3, para um tempo físico total fixo, são realizados testes uma condição crítica do trabalho, considerando a formação com uma fratura ($N_f = 1$), perda de circulação de $Q = 0,50$, posição da fratura $z_f = 0,75$. O resumo dos parâmetros e propriedades do fluido de perfuração e do poço utilizados são apresentados na Tabela 6.3.

$$n_z = \frac{L}{\Delta z} \quad 6.1$$

$$n_r = \frac{r_0}{\Delta r} \quad 6.2$$

$$n_t = \frac{t_c}{\Delta t} \quad 6.3$$

Tabela 6.3 – Condições do poço e propriedades do fluido de perfuração para o teste de malha

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidade do Poço	Z	4455	m
Diâmetro da coluna	D_c	0,084	m
Diâmetro do poço	D_p	0,156	m
Vazão volumétrica	λ	0,02	m ³ /s
Temperatura de entrada	T_0	45	°C
Gradiente geotérmico	σ	3,311	°C/100m
Difusividade térmica da formação	α	$1,2 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Temperatura da superfície	T_{surf}	15,28	°C
Condutividade térmica da parede da coluna	k_p	50	W/m.K
Condutividade térmica do fluido	k	0,6	W/m.K
Condutividade térmica da formação	k_f	1,3	W/m.K
Profundidade relativa de fratura	z_f	0,75	-
Perda de circulação	Q	0,50	-

As Figura 6.2 e Figura 6.3 apresentam o teste de independência de malha, em função do perfil de temperatura na região anular, respectivamente, para a formação rochosa na direção r e para a profundidade do poço na direção z , considerando uma determinada configuração de poço.

Com base nos resultados foram determinados como satisfatórios o número de volumes de controle de $n_r = 40$ e $n_z = 80$ para as simulações numéricas. O critério dos testes utilizado é em relação a variação da temperatura entre uma malha e o respectivo refino, com o dobro do número de volumes de controle ou incrementos de tempo, quando atingida diferença inferior a 1%. Da mesma forma, a Figura 6.4 mostra o teste de independência do número de intervalos de tempo, resultando em $n_t = 800$.

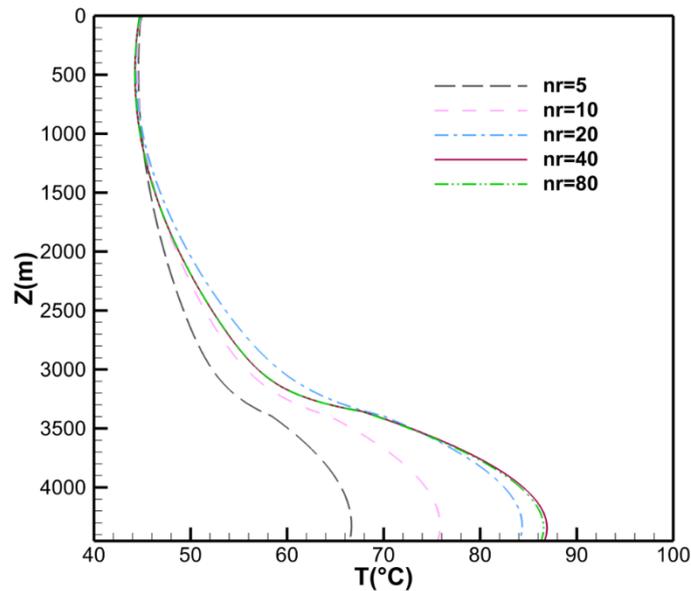


Figura 6.2 – Teste de malha para a formação rochosa na direção r , com $n_z=80$ e $n_t=1600$

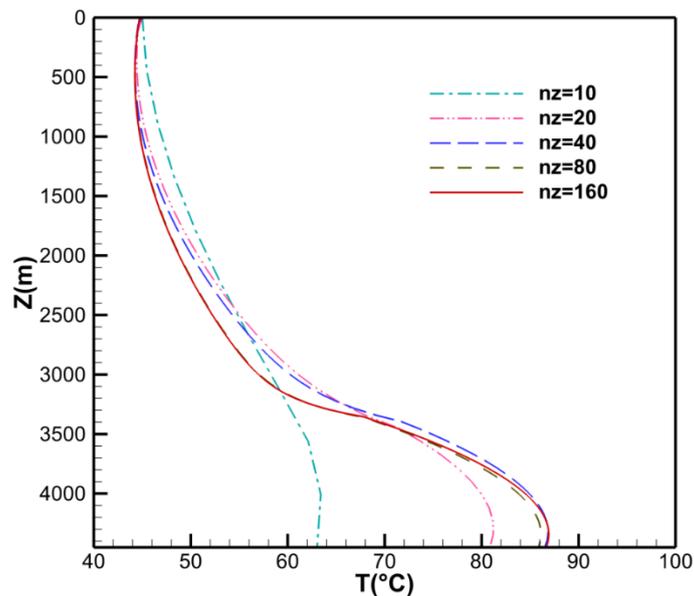


Figura 6.3 – Teste de malha para a profundidade do poço na direção z , com $n_t=1600$ e $n_r=80$

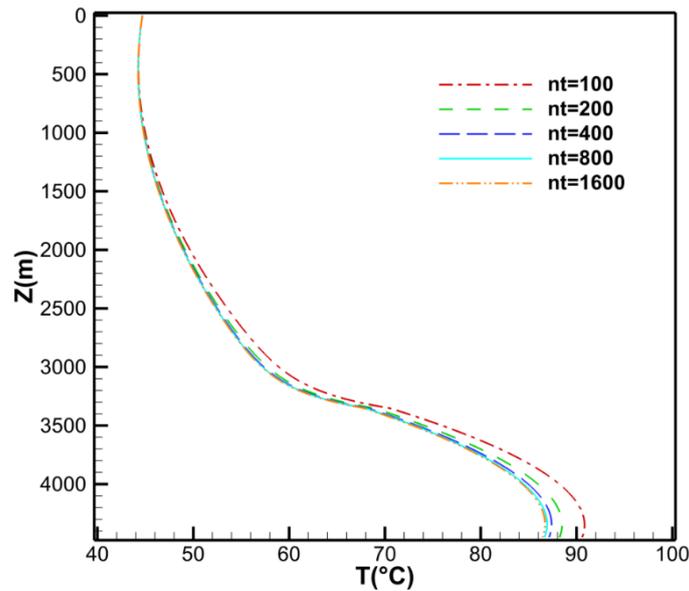


Figura 6.4 – Teste de número de intervalos de tempo com $nr=80$ e $nz=160$

6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Os perfis de temperatura de um poço durante a circulação são influenciados por muitas variáveis. A definição correta destas variáveis para o cálculo do perfil de temperatura pode ser uma tarefa difícil e complexa. Portanto, é importante ressaltar o efeito de cada variável no perfil de temperaturas.

Para descobrir a importância de uma variável, uma análise de sensibilidade paramétrica deve ser realizada através do cálculo do perfil de temperaturas em circulação para múltiplos valores da variável investigada, enquanto as outras permanecem constantes. Os cálculos em questão não servem para avaliar previsões de temperatura em qualquer poço específico, mas ajudam a avaliar o impacto de cada variável estudada nos efeitos térmicos durante a perfuração. É importante notar que as conclusões com base nas análises de sensibilidade só são válidas para as condições especificadas.

Esta análise de sensibilidade permite o melhor entendimento de aspectos do problema, sendo os principais: demonstrar quais variáveis têm maior efeito no perfil de temperaturas e determinar quanto de esforço é necessário para definir adequadamente cada variável.

6.3.1 Efeito da temperatura de entrada

O efeito da temperatura de entrada (em $Z = 0$ na coluna) do fluido de perfuração no perfil de temperatura da região anular está apresentado na Figura 6.5, para temperaturas de entrada de $T_0 = 15, 30$ e 45 °C, considerando um tempo de circulação de $t_c = 24$ h. Observa-se que a temperatura de entrada tem grande influência nas zonas superficiais do poço em análise, tendo menor influência conforme o fluido se encontra em zonas mais profundas.

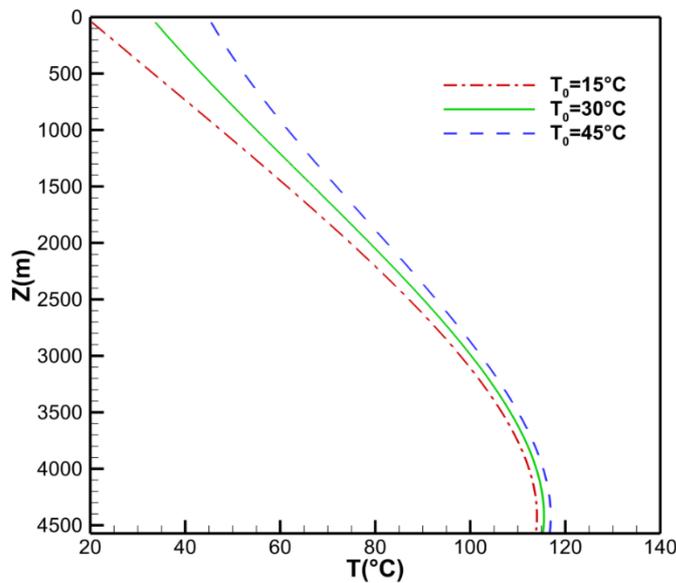


Figura 6.5 – Efeito da temperatura de entrada no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24$ h, $\rho=1200$ kg/m³, $\lambda=0,02$ m³/s, $\mu=5$ cP

6.3.2 Efeito da massa específica do fluido de perfuração

O efeito da massa específica no perfil de temperaturas da região anular está ilustrado na Figura 6.6, para um tempo de circulação de $t_c = 24$ h. Nota-se que a massa específica possui maior influência nas zonas mais profundas, com pouca alteração no campo de temperaturas para baixas profundidades. Além disso, é observado que o resfriamento é praticamente constante conforme o fluido retorna à superfície. Num caso real, conforme o fluido começa a escoar com maior quantidade de cascalhos de volta à superfície, a massa específica efetiva aumenta. Assim, espera-se que a temperatura da região anular seja maior durante o processo de perfuração, mesmo desconsiderando a energia transmitida pela rotação da broca.

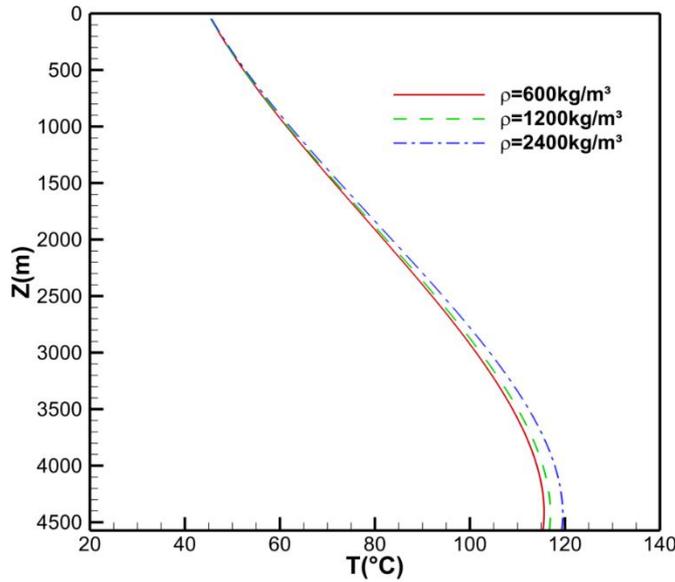


Figura 6.6 – Efeito da massa específica do fluido no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\lambda=0,02m^3/s$, $\mu=5cP$

6.3.3 Efeito da vazão volumétrica do fluido de perfuração

A Figura 6.7 apresenta o efeito da vazão volumétrica no perfil de temperaturas da região anular, considerando tempo de circulação $t_c = 24h$. Nota-se que o aumento da velocidade do escoamento diminui a temperatura da região anular, especialmente para profundidades maiores. Isso ocorre devido ao menor tempo que o fluido de perfuração fica em contato com a formação aquecida devido ao gradiente térmico ao longo do poço.

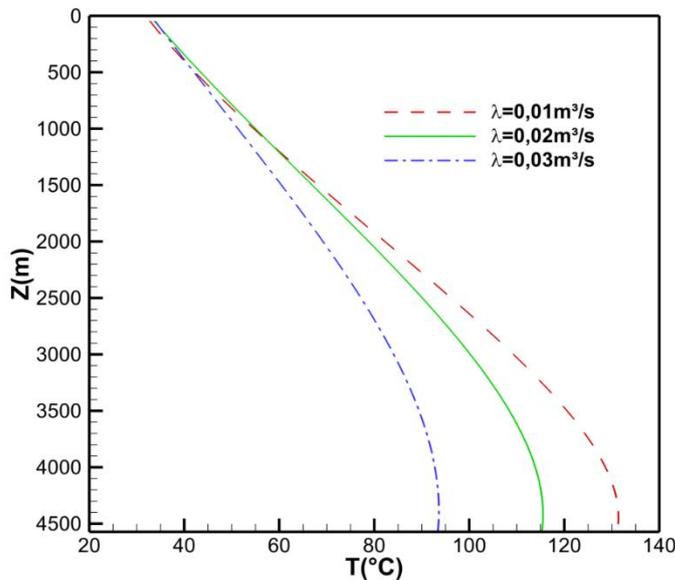


Figura 6.7 – Efeito da vazão volumétrica de entrada no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\rho=1200kg/m^3$, $\mu=5cP$

6.3.4 Efeito da viscosidade do fluido de perfuração

O efeito transiente da viscosidade na temperatura do fundo do poço está representado na Figura 6.8, onde estão representados os valores de $\mu = 5, 10, 50$ cP, para um tempo de circulação do poço de $t_c = 24$ h. Pode ser observado que a temperatura decai continuamente de 148°C para 116°C para uma viscosidade de 5 cP, de 145°C para $110,2^\circ\text{C}$ com 10 cP e de $137,1^\circ\text{C}$ para $91,4^\circ\text{C}$ com 50 cP. Dentro das condições apresentadas, nota-se que o aumento da viscosidade diminui a temperatura do fundo do poço de maneira mais expressiva, principalmente nas primeiras horas de circulação.

Na Figura 6.9, que mostra o efeito viscoso no perfil de temperaturas da região anular é observado que a temperatura da região anular diminui sensivelmente para grandes profundidades, tendo pouco impacto perto da superfície. O fluido mais viscoso de viscosidade ($\mu = 50$ cP) apresenta maior temperatura de saída $T_{saída}$, enquanto os demais fluidos apresentam pouca diferença na temperatura de saída $T_{saída}$.

A menor temperatura ao longo do anular para fluidos com maior viscosidade é justificado pelo aumento da transferência de calor por convecção, sendo que o calor por condução da formação para a região anular exerce menos influência quanto maior a viscosidade. Desta forma, o fluido mais viscoso possui um menor coeficiente de transferência de calor, devido a redução do número de Re , reduzindo a variação de temperatura ao longo de toda extensão do poço.

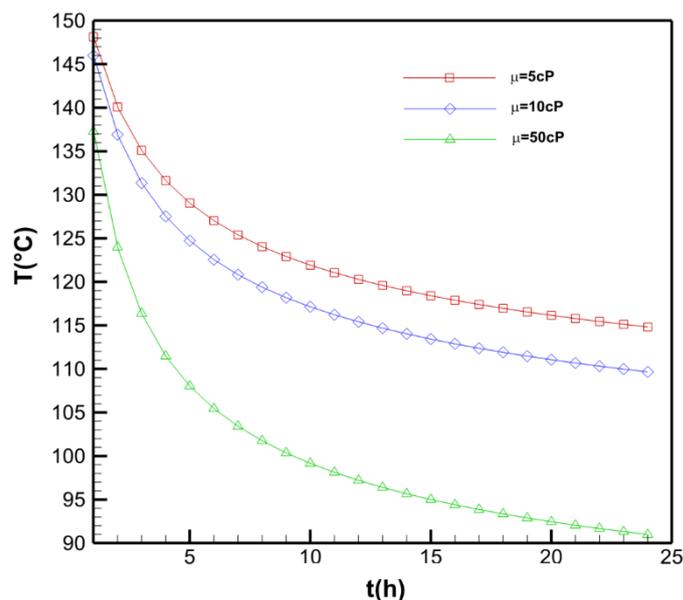


Figura 6.8 – Efeito da viscosidade na temperatura do fundo do poço (T_f) ao longo do tempo, com $t_c=24$ h, $T_0=45^\circ\text{C}$, $\rho=1200\text{kg/m}^3$, $\lambda=0,02\text{m}^3/\text{s}$

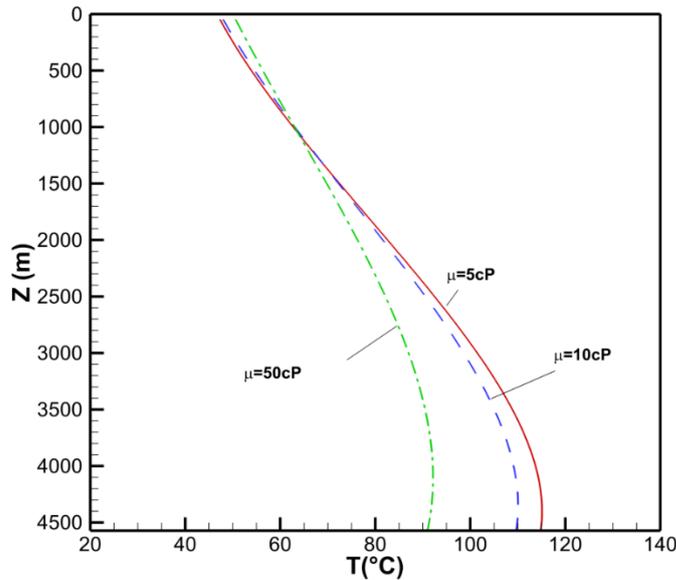


Figura 6.9 – Efeito da viscosidade do fluido no perfil de temperaturas da região anular, com $t_c=24h$, $T_0=45^\circ C$, $\rho=1200kg/m^3$, $\lambda=0,02m^3/s$

6.4 ANÁLISE DO POÇO NÃO FRATURADO PARA DIFERENTES FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

A compreensão das análises de poços fraturados é facilitada através do estudo do comportamento térmico do poço não fraturado. Esta seção apresenta os resultados para um poço não fraturado, para os diferentes fluidos de perfuração da Seção 6.1.1. Na Tabela 6.4 é apresentado um resumo dos demais parâmetros do fluido e do poço.

O gradiente de temperatura ao longo da região anular (dT/dz), utilizado na sequência do trabalho, é essencial para a localização das fraturas, sendo expresso por:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{T_a(z + \Delta z) - T_a(z)}{\Delta z} \quad 6.4$$

sendo Δz a distância entre dois nós verticais da malha e T_a a temperatura na região anular.

A Figura 6.10 apresenta os perfis de temperatura da coluna (Figura 6.10.a), da região anular (Figura 6.10.b) e do gradiente de temperatura da região anular (Figura 6.10.c), para o poço não fraturado, considerando os fluidos f1, f2, f3, f4 e f5, com um tempo de circulação de $t_c=24h$.

Vale ressaltar que para configuração de operação de cada fluido o regime de escoamento na coluna e na seção anular é turbulento ao longo de todo poço, conforme exposto na Tabela 6.2.

Tabela 6.4 – Condições do poço não fraturado e propriedades do fluido de perfuração

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Profundidade do Poço	Z	4500	m
Diâmetro da coluna	D_c	0,084	m
Diâmetro do poço	D_p	0,156	m
Vazão volumétrica	λ	0,02	m ³ /s
Temperatura de entrada	T_0	45	°C
Gradiente geotérmico	σ	3,311	°C/100m
Difusividade térmica da formação	α	$1,2 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Temperatura da superfície	T_{surf}	15,28	°C
Condutividade térmica da parede da coluna	k_p	50	W/m.K
Condutividade térmica do fluido	k	0,6	W/m.K
Condutividade térmica da formação	k_f	1,3	W/m.K

Na Figura 6.10.(a) observa-se o perfil de temperatura ao longo da coluna de perfuração. Com base no fluido hipotético f1 (com viscosidade constante), resalta-se o perfil de temperatura do fluido f2, que possui comportamento diferente dos demais. Com excessão do fluido f2, a evolução da temperatura ao longo do interior da coluna é, de certa forma, semelhante para os demais fluidos. A principal diferença do fluido f2 esta na curva de viscosidade (Figura 6.1), que apresenta valores em função da temperatura, significativamente menores que para os demais fluidos. Com isso o valor de número de Re é elevado em comparação com os demais fluidos, para uma mesma vazão imposta na entrada da coluna. Para o caso específico de f2 o Re da seção anular é intensificado devido a redução significativa da viscosidade para altas temperaturas. Neste ponto da análise ocorre um efeito competitivo entre o processo de transferência de calor por condução (que favorece o aumento da temperatura na direção do fundo do poço) e convecção (que dificulta a influência do gradiente geotérmico da formação sobre o transporte do fluido) ao longo do poço. Para um fluido com baixa viscosidade, conforme exposto anteriormente na Seção 6.3.4 (análise de sensibilidade da viscosidade), é possível observar uma maior variação de temperatura ao longo poço (devido ao processo condutivo do gradiente geotérmico imposto na formação). Por outro lado, o aumento do número de Re ou velocidade do fluido (Seção 6.3.3, análise de sensibilidade da vazão volumétrica), mostra uma redução na variação de temperatura ao longo do poço, devido ao menor tempo que o fluido tem de trocar calor com a formação.

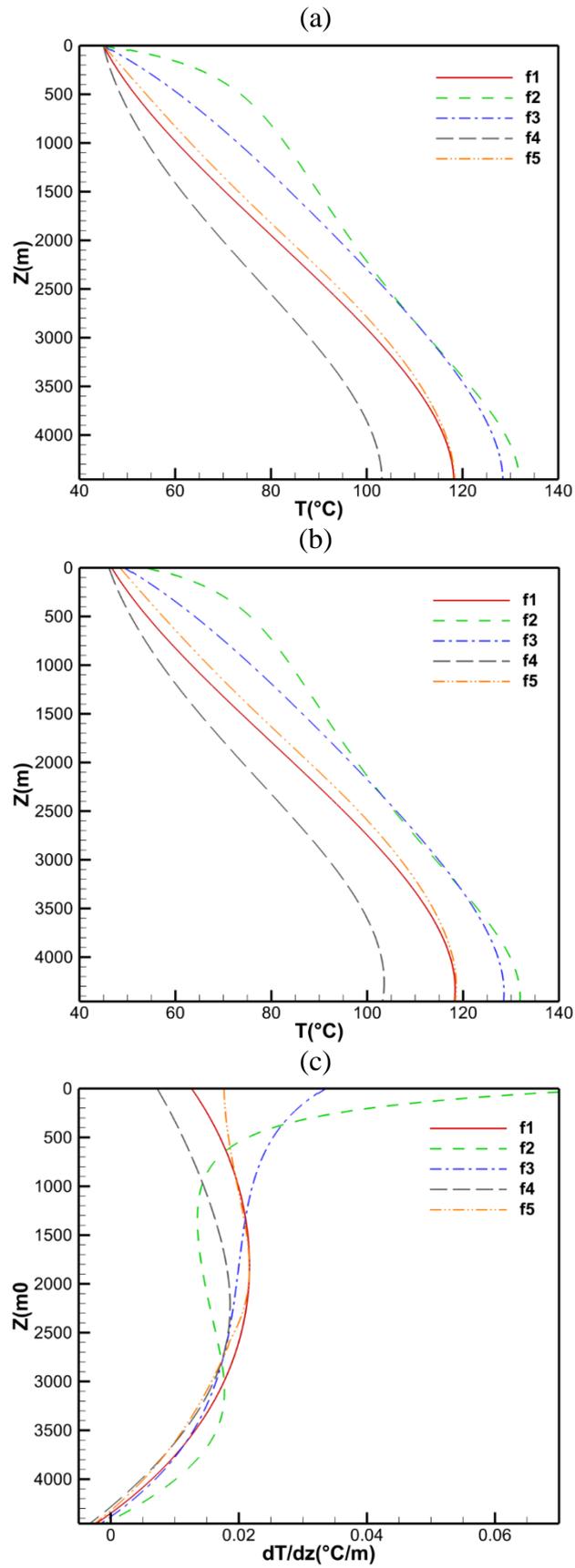


Figura 6.10 – Perfis para o poço não fraturado: (a) temperatura da coluna, (b) temperatura do anular e (c) gradiente de temperatura do anular, para $t_c=24h$.

Para o fluido f3, que também apresenta um valor baixo de viscosidade em relação aos demais fluidos, este efeito competitivo também encontra-se presente. Como o Re da região anular deste fluido é menor do que para a região no interior da coluna, apresentando com isso um perfil ao longo do poço de forma mais linear que f2. Para o fluido f4, com as maiores viscosidades em relação a variação de temperaturas apresentadas, mostra este efeito competitivo (entre condução e convecção) de forma oposta ao fluido f2, devido ao valor de número de Re baixo (Tabela 6.2) e viscosidade alta (conforme exposto na Seção 6.3.4). No fluido f5, embora a viscosidade seja maior que o fluido f1, observa-se que o perfil se apresenta semelhante. Este fato é devido ao valor do número de Re menor que f1 tanto na coluna quanto no anular, que possui o efeito de aumentar a diferença de temperatura ao longo do poço.

Na Figura 6.10.(b), são visualizados os perfis de temperatura ao longo da região anular, que agora possui o sentido do fundo do poço $Z=4455\text{m}$ até a superfície em $Z=0$. Com isso, a direção do escoamento faz com que o fluido seja resfriado ao longo do anular, devido ao gradiente de temperatura imposto na formação rochosa, i.e., $z=0$: $T=15,28^\circ\text{C}$, $z=4455$: $T=167,62^\circ\text{C}$. Em comparação com os perfis da coluna (Figura 6.10.a), observa-se pouca diferença, com exceção da temperatura de saída, em $Z=0$, que possui pouca diferença para cada fluido utilizado.

Os perfis de gradiente de temperatura da região anular para o poço não fraturado são apresentados na Figura 6.10.(c). No fundo do poço, devido à condição de contorno de temperatura do reservatório, o gradiente de temperaturas é aproximadamente igual, embora a temperatura do fundo do poço seja diferente para cada fluido. Para cada ponto de inflexão observado na Figura 6.10.(b), observa-se uma mudança significativa no perfil do gradiente de temperaturas. Este tipo de característica será melhor abordado e evidenciada na presença de fraturas na formação rochosa.

6.5 VARIAÇÃO DA POSIÇÃO DA FRATURA

A Figura 6.11 mostra o perfil de temperatura da região anular para o efeito da profundidade de uma fratura discreta, z_f (destacada por uma linha tracejada na horizontal), considerando uma perda de circulação de $Q=0,20$, com um tempo de circulação de $t_c=12\text{h}$, para diferentes fluidos. Observa-se que a presença da fratura distorce de forma sutil os perfis de temperatura na região da fratura.

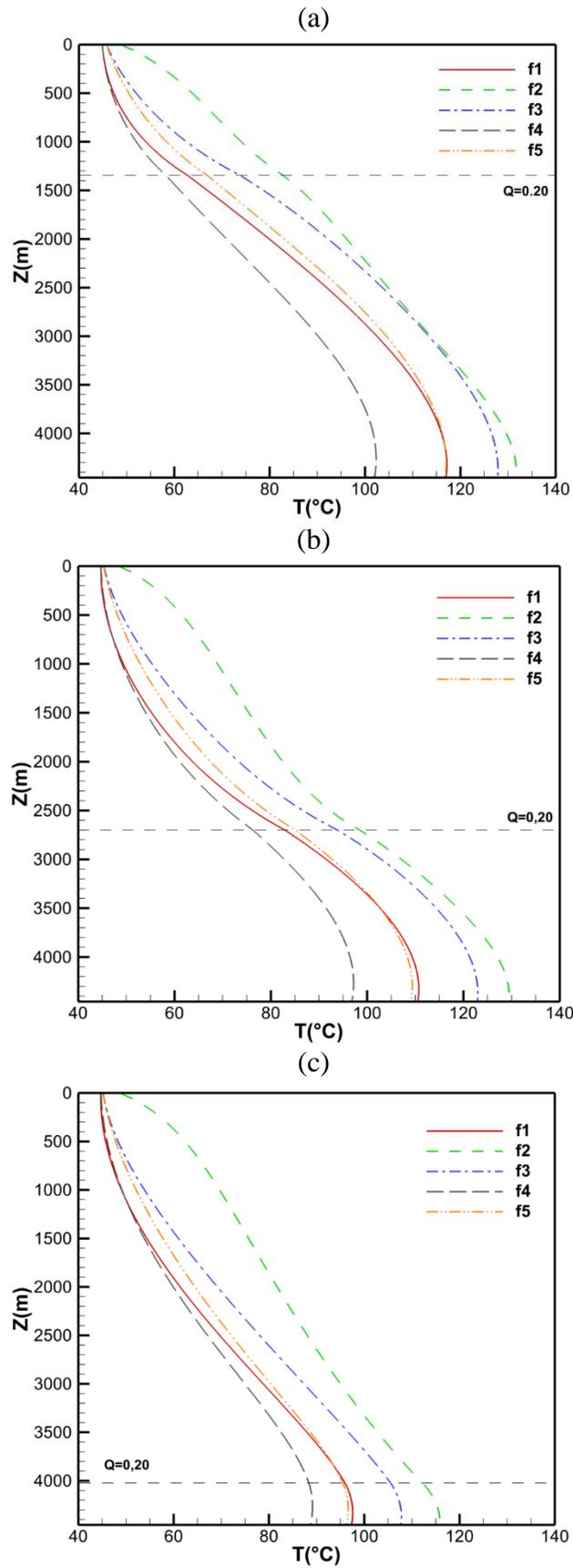


Figura 6.11 – Perfil de temperatura da região anular para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$ e $t_c=12h$

Percebe-se que a temperatura ao longo do poço diminui conforme a profundidade relativa da fratura z_f aumenta, observada de forma mais evidente no fundo do poço.

Na Figura 6.12 é apresentado o perfil do gradiente de temperatura da região anular para diferentes profundidades da fratura $z_f = [0,30, 0,60 \text{ e } 0,90]$, considerando $Q=0,20$ e $t_c=12\text{h}$, para os fluidos. Observa-se que as curvas entre os fluidos são semelhantes, exceto para o fluido f2, que possui gradiente de temperatura crescente conforme o fluido escoar na região anular próximo à saída em $Z=0$. Constata-se que o valor do gradiente máximo da temperaturas aumentou, para quase todos os fluidos, de $z_f = 0,30$ (Figura 6.12.a) para $z_f = 0,60$ (Figura 6.12.b) e diminuiu em $z_f = 0,90$ (Figura 6.12.c). Para a posição relativa de fratura em $z_f = 0,90$, apenas o fluido f2 apresentou um ponto de máximo local do perfil, que coincide com a posição da fratura.

É importante observar que, embora o impacto na temperatura do fundo do poço seja maior para fraturas mais profundas, não significa que seja mais fácil de detectá-las, visto que a descontinuidade no perfil do gradiente térmico pode ser menos pronunciada.

A evolução da temperatura do fundo do poço ao longo do tempo para cada profundidade de fratura ($z_f = 0,30, 0,60 \text{ e } 0,90$), considerando $Q=0,20$ e $t_c=12\text{h}$, para cada fluido (f1, f2, f3, f4 e f5) está demonstrada na Figura 6.13. Nota-se que o decréscimo de temperatura linear e contínuo, encontrado para profundidade relativa de $z_f = 0,30$ (Figura 6.13.a) é alterado conforme se aumenta a profundidade relativa em $z_f = 0,60$ (Figura 6.13.b) e $z_f = 0,90$ (Figura 6.13.c). Com a localização da fratura em zonas mais profundas, o impacto na temperatura do fundo do poço ocorre de maneira mais intensa e imediata para todos os fluidos. Por exemplo, na Figura 6.13.(c), o fluido f4 tem queda de 10°C nas primeiras 4 horas de circulação e 5°C nas 8 horas seguintes. Em contrapartida, analisando uma posição mais perto da superfície do poço (Figura 6.13.a), nota-se que o decréscimo na temperatura ao longo do tempo é aproximadamente constante, de maneira independente do fluido. Outra constatação, conforme já exposta, porém com maior evidência nesta análise, em relação à temperatura do fundo do poço (T_{fp}), é de que a diminuição total na T_{fp} é mais elevada para maiores profundidades relativas de fratura z_f .

Na Figura 6.14 é apresentado a temperatura de saída da região anular do poço ao longo do tempo, para as mesmas condições. Observa-se que a posição relativa de fratura não possui influência significativa na temperatura de saída, independente do fluido analisado para estas condições. Desta forma, apenas o monitoramento da temperatura de saída do anular pelo operador do poço não lhe fornece informações sobre a posição da fratura.

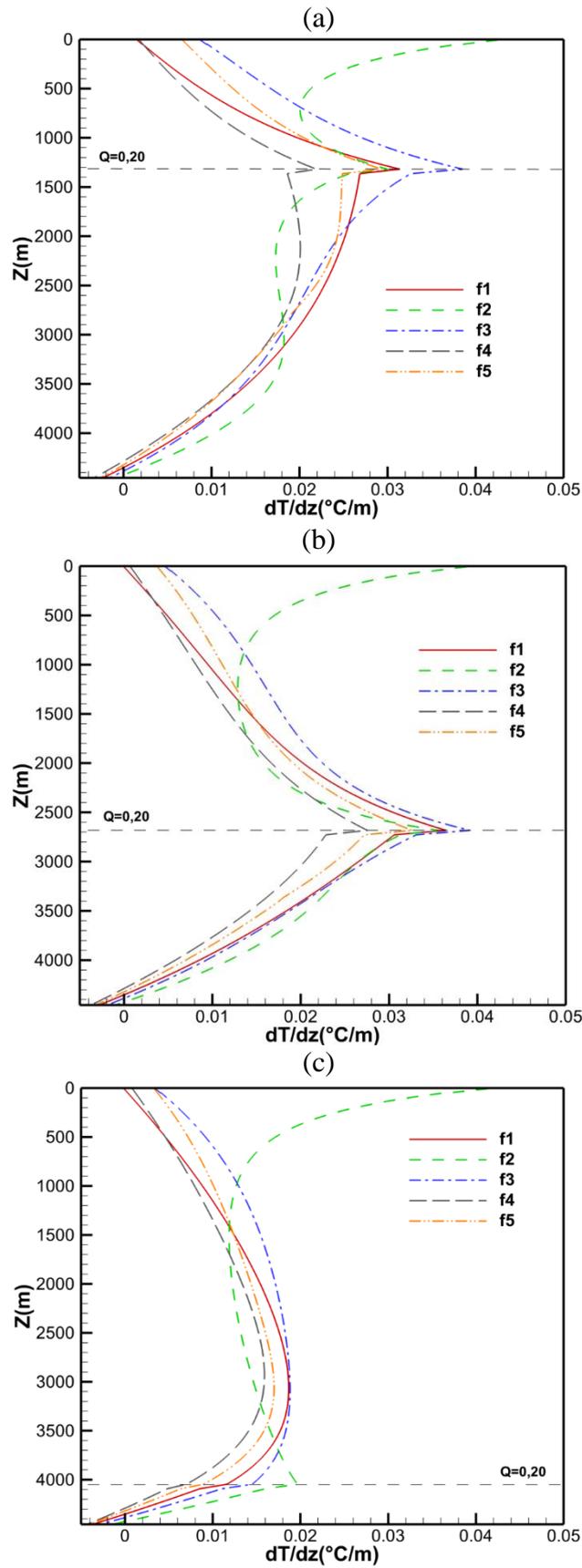


Figura 6.12 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$ e $t_c=12h$

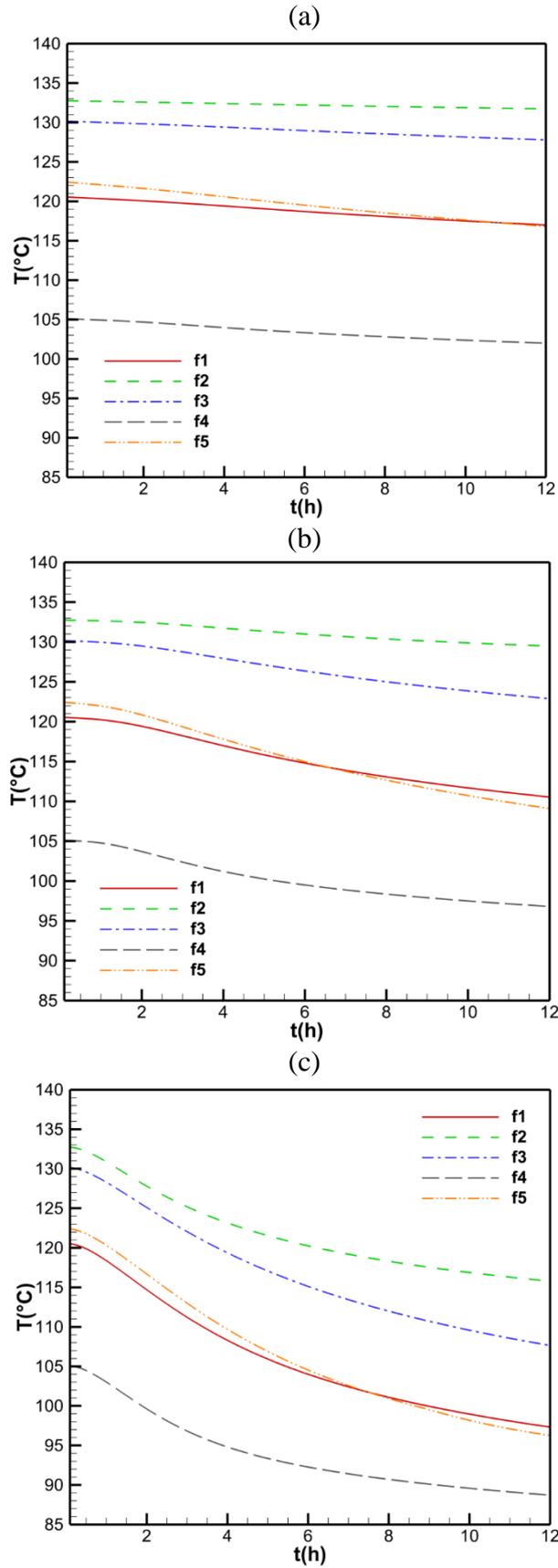


Figura 6.13 – Temperatura do fundo do poço (T_{fp}) ao longo do tempo para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$

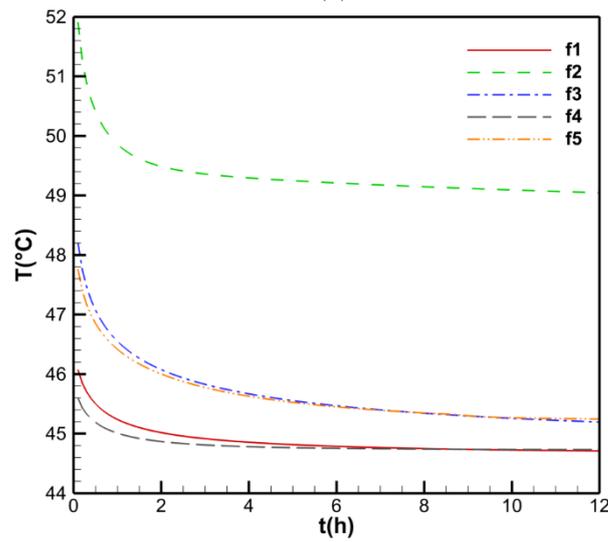
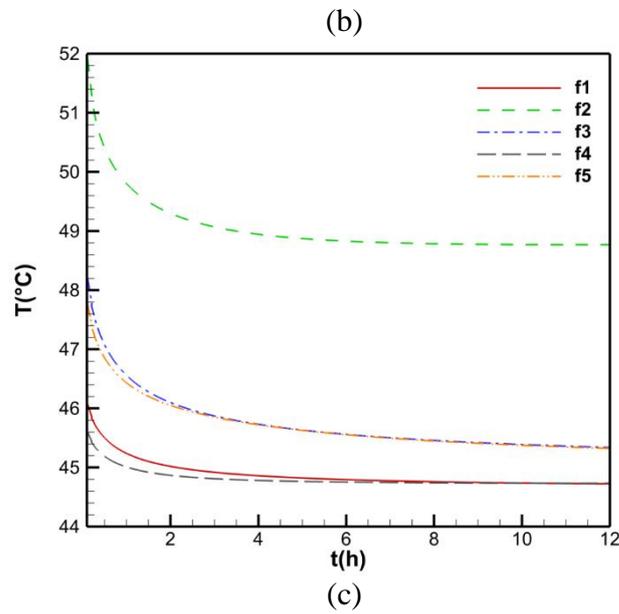
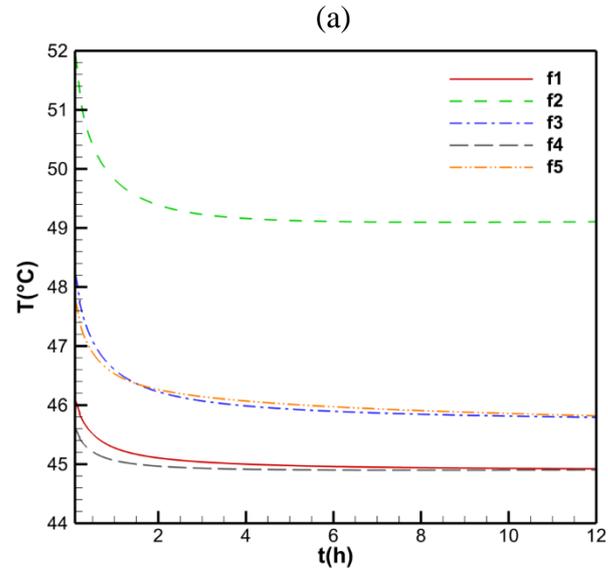


Figura 6.14 – Temperatura da saída do anular (T_s) ao longo do tempo para $z_f =$ (a) 0,30, (b) 0,60 e (c) 0,90, considerando $Q=0,20$

6.6 VARIAÇÃO DA PERDA DE CIRCULAÇÃO

A Figura 6.15 mostra o perfil de temperatura da região anular para o efeito da perda de circulação Q , considerando $z_f = 0,75$ e $t_c = 12h$, para os fluidos f1, f2, f3, f4 e f5. Observa-se que a distorção nos perfis de temperatura causadas pela presença da fratura em $z_f = 0,75$ é intensificada com o aumento de Q . Além disso, o aumento da invasão de fluido na formação rochosa diminui a temperatura da região anular por toda a extensão. Isso ocorre devido à redução da quantidade de fluido escoando após a fratura, fornecendo uma menor troca de calor com a coluna de perfuração, que sofre menos influência da formação adjacente ao anular.

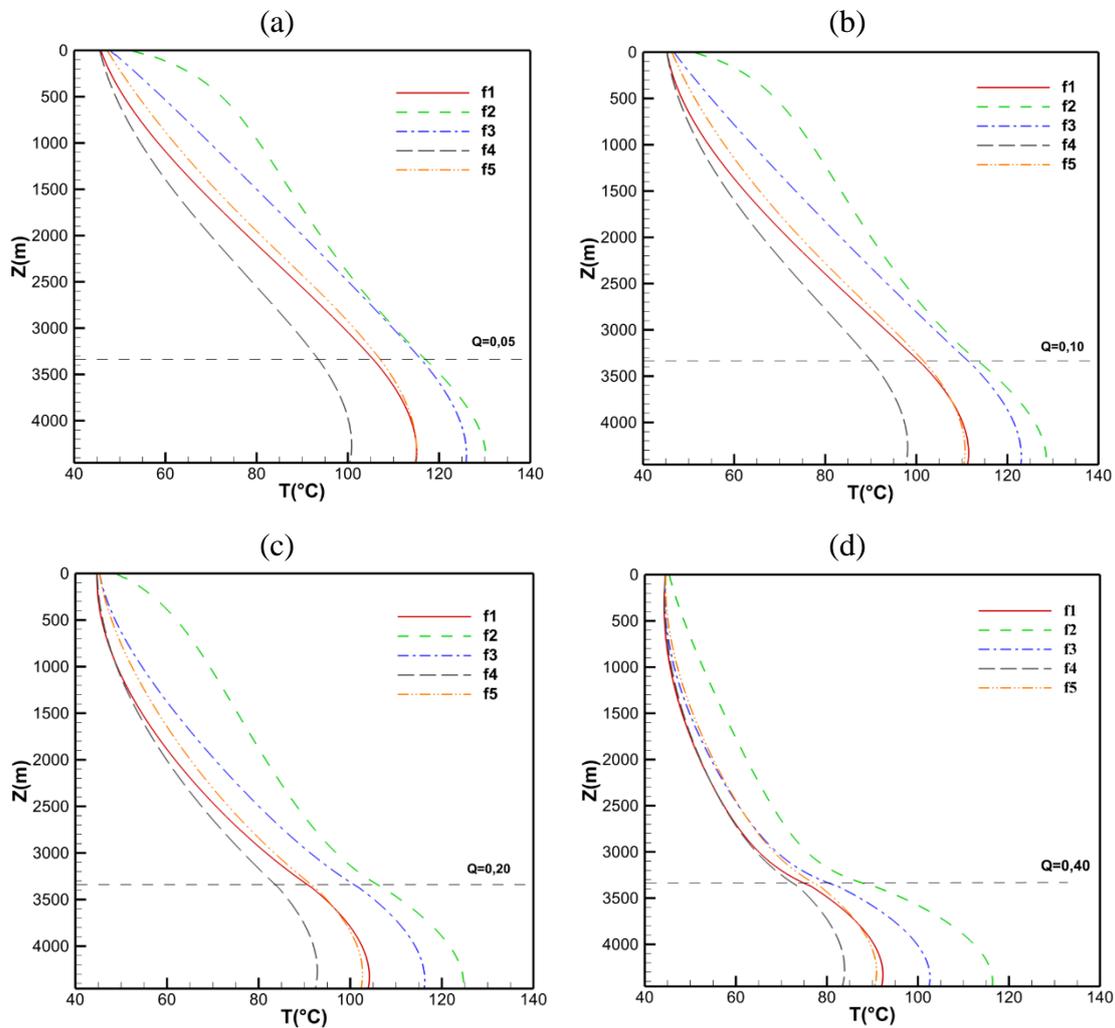


Figura 6.15 – Perfil de temperatura da região anular para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f = 0,75$ e $t_c = 12h$

Na Figura 6.16, que mostra o perfil do gradiente de temperatura da região anular para o efeito da perda de circulação Q (com $z_f = 0,75$ e $t_c = 12h$ para diferentes fluidos),

observa-se que, em função do fluido, a detecção das fraturas a partir do gradiente pode ser dificultada. Como exemplo, na Figura 6.16.(a), que possui perda de circulação $Q = 0,05$, percebe-se que a descontinuidade na zona de fratura é mais evidente para o fluido f2, que coincide com o ponto de máximo, do que para os outros fluidos. É possível observar ainda que os valores do gradiente e a descontinuidade na posição da fratura são aumentados com o aumento de Q . Desta forma, a detecção de fraturas é facilitada pelo aumento da fuga de fluido.

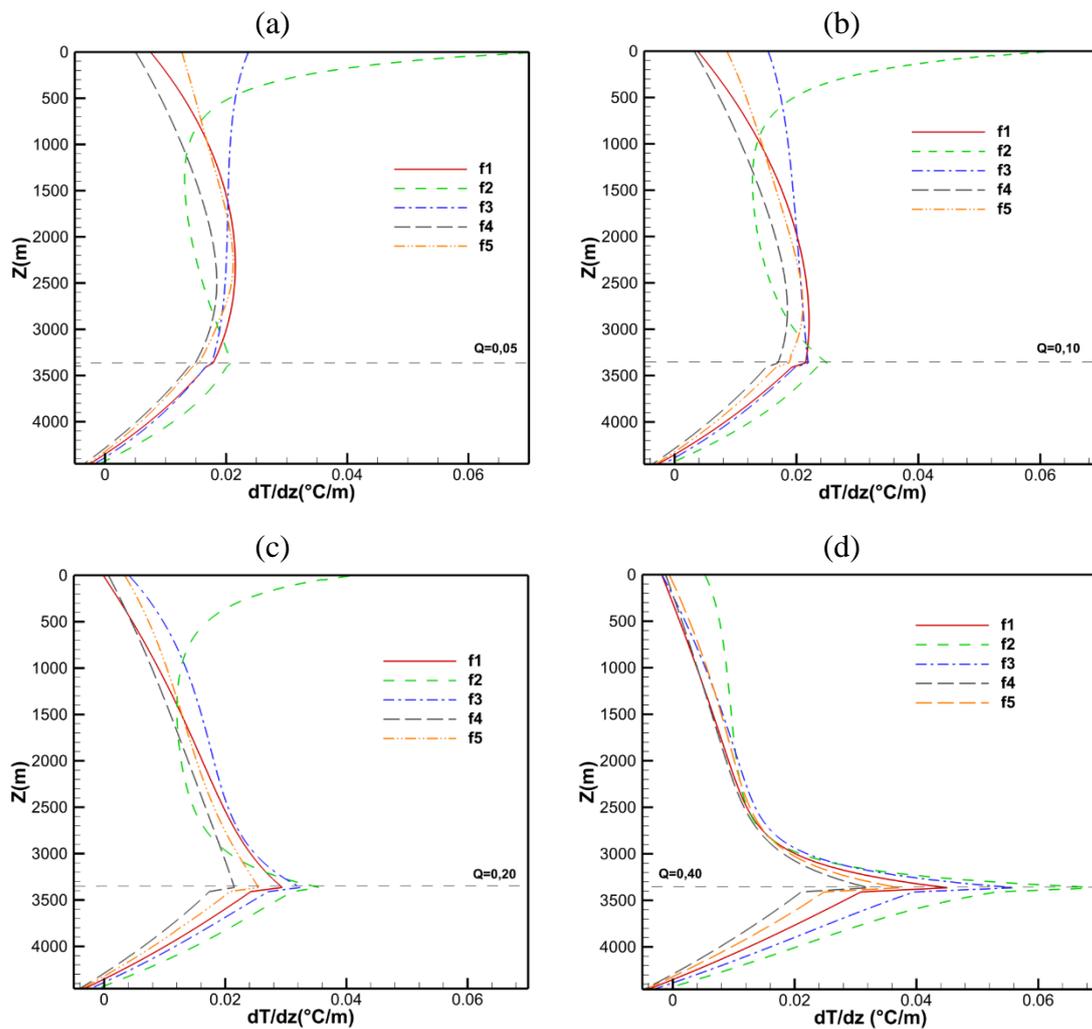


Figura 6.16 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$ e $t_c=12\text{h}$

Na Figura 6.17 é visualizada a evolução da temperatura do fundo do poço ao longo do tempo, para o efeito da perda de circulação Q , considerando $z_f=0,75$ e $t_c=12\text{h}$ para os fluidos f1, f2, f3, f4 e f5. Observa-se que o aumento da perda de circulação Q implica em maior queda na temperatura do fundo do poço. Assim, neste ponto da análise, o aumento de Q possui o mesmo efeito que o aumento de z_f (Figura 6.13), sendo inconclusivo avaliar

apenas pela queda na temperatura do fundo do poço (e.g., por medição de temperatura próxima à broca) a posição da fratura ou intensidade de perda de circulação. Com isso, a análise em conjunto com a temperatura da saída do anular é necessária.

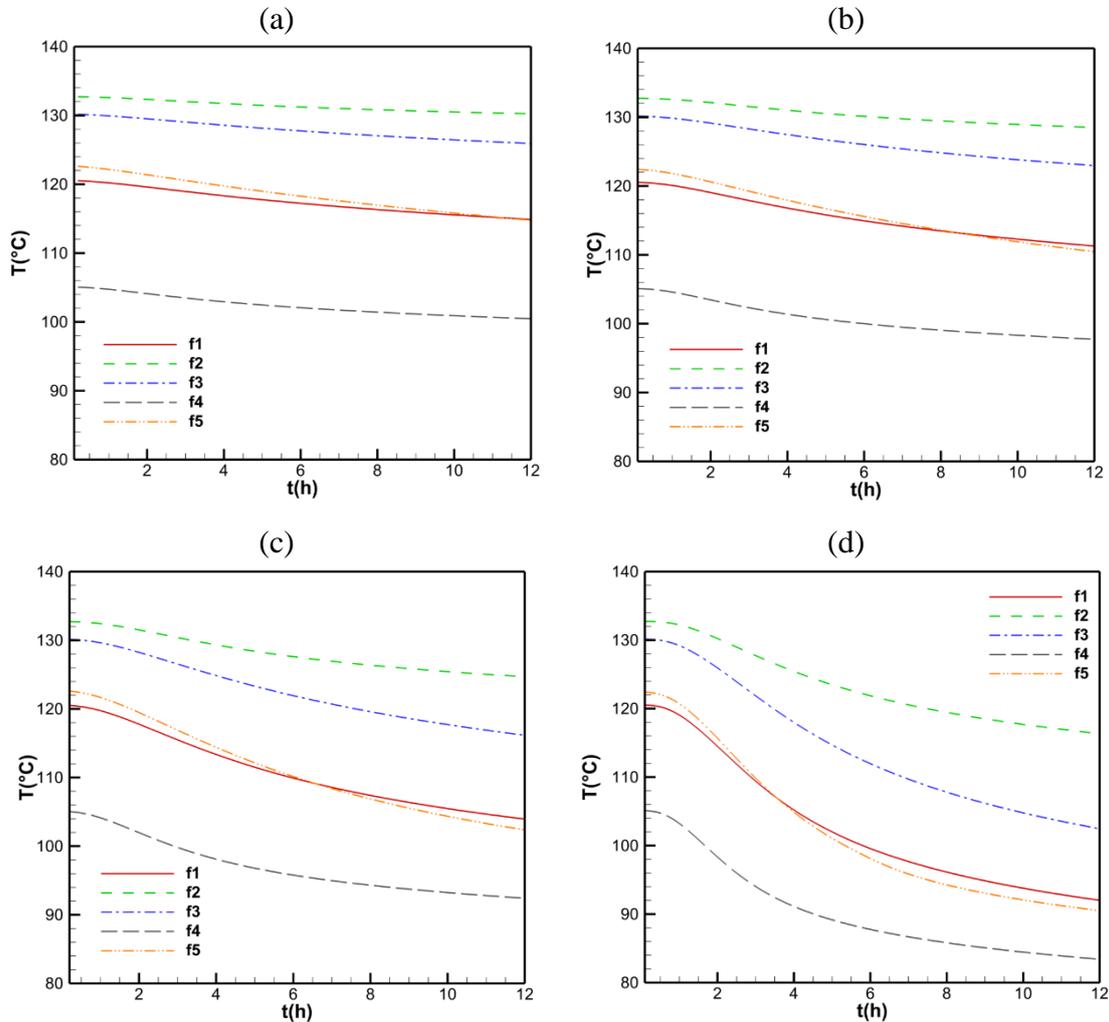


Figura 6.17 – Temperatura do fundo do poço (T_{fp}) ao longo do tempo para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$

Na Figura 6.18 é visualizada a evolução da temperatura da saída da região anular do poço ao longo do tempo, para o efeito da perda de circulação Q . É verificado que o aumento da invasão tende a diminuir a temperatura de saída, independentemente do fluido. Além disso, nota-se que a maior parte da queda de temperatura ocorre para um tempo de circulação de até 2 horas. Uma constatação importante é que, através do monitoramento da evolução da temperatura de saída, é possível caracterizar se a queda na temperatura do fundo do poço é devido a uma fratura mais profunda ou devido a uma maior perda de circulação, visto que o aumento da invasão afeta significativamente a

temperatura de saída do anular, enquanto o mesmo não ocorre para a profundidade da fratura (Figura 6.14).

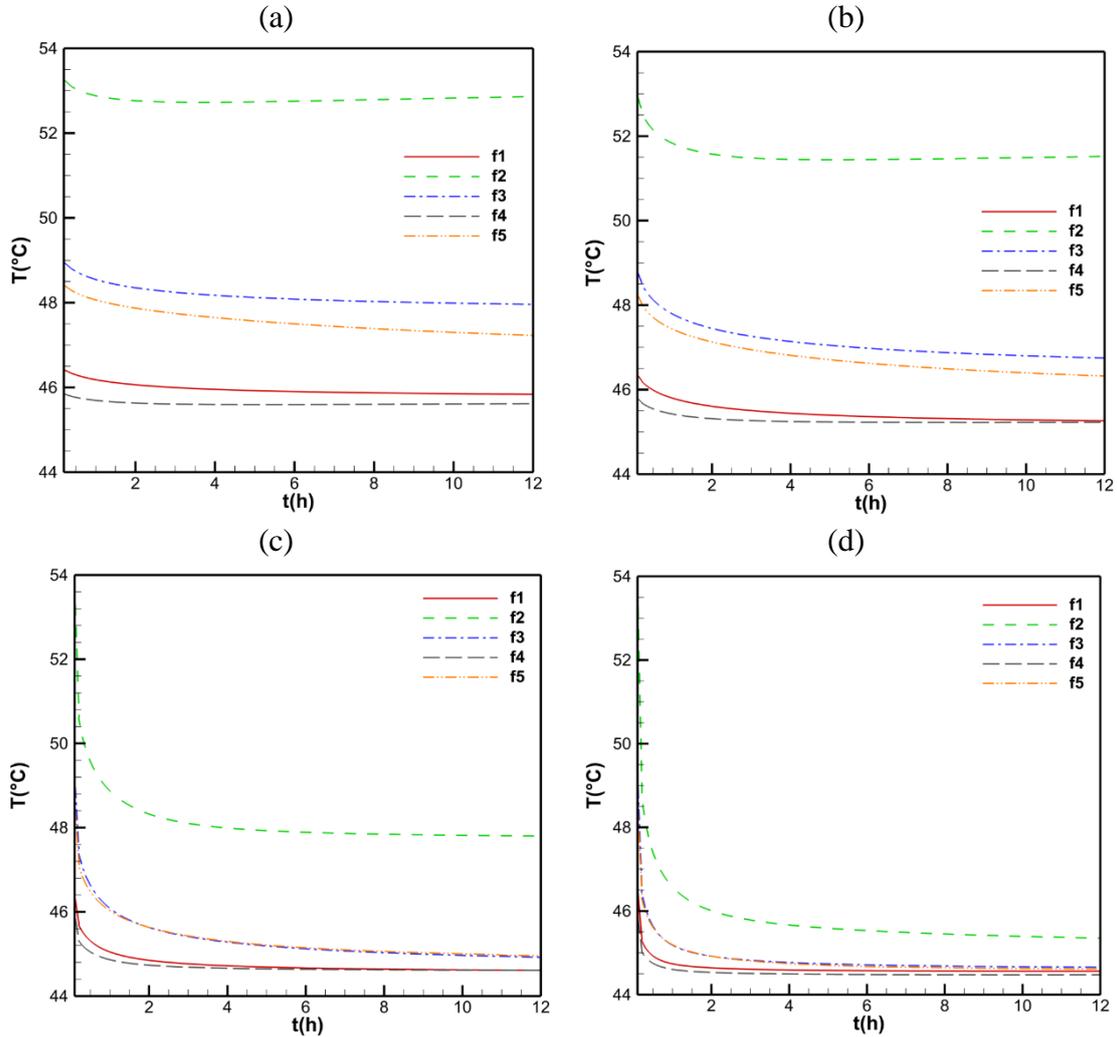


Figura 6.18 – Temperatura da saída do anular (T_s) ao longo do tempo para $Q =$ (a) 0,05; (b) 0,10; (c) 0,20; (d) 0,40, considerando $z_f=0,75$

6.7 EFEITO DO TEMPO DE CIRCULAÇÃO NO PERFIL DO GRADIENTE DE TEMPERATURA

A Figura 6.19 mostra a evolução do perfil do gradiente de temperatura da região anular, para diferentes tempos de circulação t_c , considerando $z_f = 0,75$ e $Q = 0,20$. Observa-se que existe um aumento na descontinuidade no gráfico do gradiente na região da fratura até um patamar, sendo posteriormente decrescido ao longo do tempo. O poço sofre grandes mudanças no perfil de temperatura durante as primeiras horas após a introdução da fratura, como visto na Figura 6.17 e Figura 6.18. Assim, sugere-se que essa variação de temperatura mais acentuada aumenta a descontinuidade na posição da fratura.

Depois que o poço se encontra com o perfil de temperatura mais estável, a descontinuidade passa a diminuir com o aumento do tempo, podendo ser menor que a encontrada nos instantes iniciais (e.g., em $t_c=1h$ para $t_c=24h$).

Desta forma, pode-se ressaltar que análises para tempos de circulação menores podem ser interessantes, devido a menor influência que o gradiente geotérmico imposto no final da formação rochosa possui sobre os perfis do gradiente de temperatura.

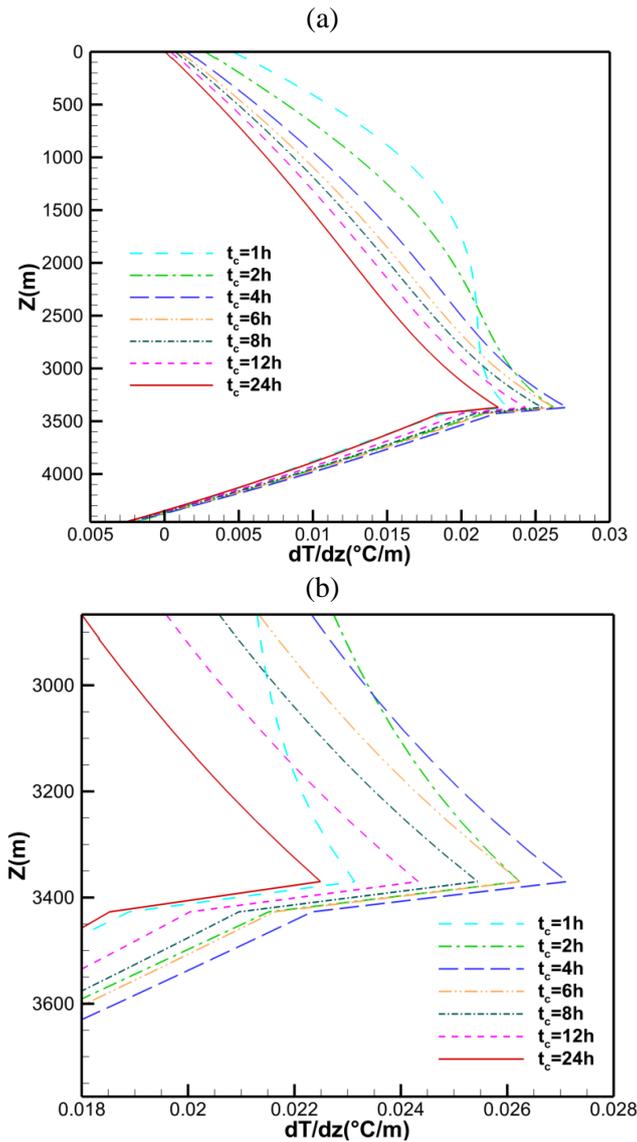


Figura 6.19 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular para: (a) efeito do tempo de circulação e (b) vista em detalhe, considerando $z_f=0,75$ e $Q=0,20$

6.8 COMPARAÇÃO PARA DIFERENTES REGIMES DE ESCOAMENTO

O coeficiente de transferência de calor é dependente do regime de escoamento. Portanto, a troca de calor e perfis de temperatura do fluido de perfuração são afetados diretamente pelos regimes de escoamento nas regiões da coluna de perfuração e anular.

Com base na distribuição dos regimes de escoamento no poço, os casos podem ser categorizados em quatro casos:

- (1) Escoamento laminar na coluna de perfuração e na região anular (LLL);
- (2) Escoamento turbulento na coluna de perfuração e laminar na região anular (TLL);
- (3) Escoamento turbulento na coluna de perfuração e na região anular antes da fratura e laminar acima da fratura (TTL);
- (4) Escoamento turbulento na coluna de perfuração e na região anular (TTT).

Como a viscosidade dos fluidos de perfuração selecionados varia com a temperatura, afetando diretamente o número de Reynolds ao longo do poço, as análises foram realizadas para apenas o fluido de viscosidade constante (f_1). O número de Reynolds do interior da coluna é ajustado através da variação da vazão volumétrica do poço para se obter o regime desejado em cada situação.

Uma questão analisada e significativa importância a ser considerada é a forma complexa que o ajuste do número de Reynolds pode ser realizado. Duas formas possíveis de realizar a alteração mudando o escoamento são: (i) diminuição da velocidade pela alteração da vazão mássica ou (ii) aumento da viscosidade. No entanto, as duas formas de mudar o número de Reynolds têm efeitos opostos: a diminuição da velocidade faz com que o escoamento ocorra por mais tempo e possa trocar maior quantidade de calor com a formação rochosa, aumentando o perfil de temperaturas do poço. Todavia, o aumento da viscosidade, como visto anteriormente, diminui o coeficiente de transferência de calor causando isolamento parcial da região da coluna, fazendo com que o fluido não aqueça rapidamente pela formação e diminua o perfil de temperaturas. Desta forma, os parâmetros foram ajustados para ilustrar corretamente a descontinuidade da fratura.

O estudo é focado na região anular (perfil de temperatura e respectivo gradiente), para ilustrar os efeitos principais dos regimes na identificação de fraturas. Portanto, é utilizado um tempo de circulação $t_c=1h$, visto que para menores tempos de circulação a descontinuidade do perfil de gradiente de temperatura apresenta menor influência da condição do gradiente geotérmico imposto ao final da formação rochosa.

6.8.1 Caso 1: Escoamento laminar na coluna de perfuração e na região anular - LLL

A Figura 6.20 apresenta o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular, para $Re_c=2000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$ e $z_f=0,75$. Observa-se que, devido à baixa transferência de calor entre a região anular e a formação, o efeito na redistribuição de temperatura (Figura 6.20.a) é extremamente pequeno, chegando a ser insignificante perto do fundo do poço. Para as regiões acima da fratura, há pequena diminuição na temperatura, por toda a extensão, devido ao alto efeito da condição do gradiente geotérmico imposto. A Figura 6.20.(b) ilustra o efeito da descontinuidade no perfil do gradiente de temperatura. Considerando a intensidade tênue da descontinuidade e a perda de fluido significativa ($Q=0,20$), ressalta-se a importância da precisão da medição de temperaturas para situações em campo com condições similares.

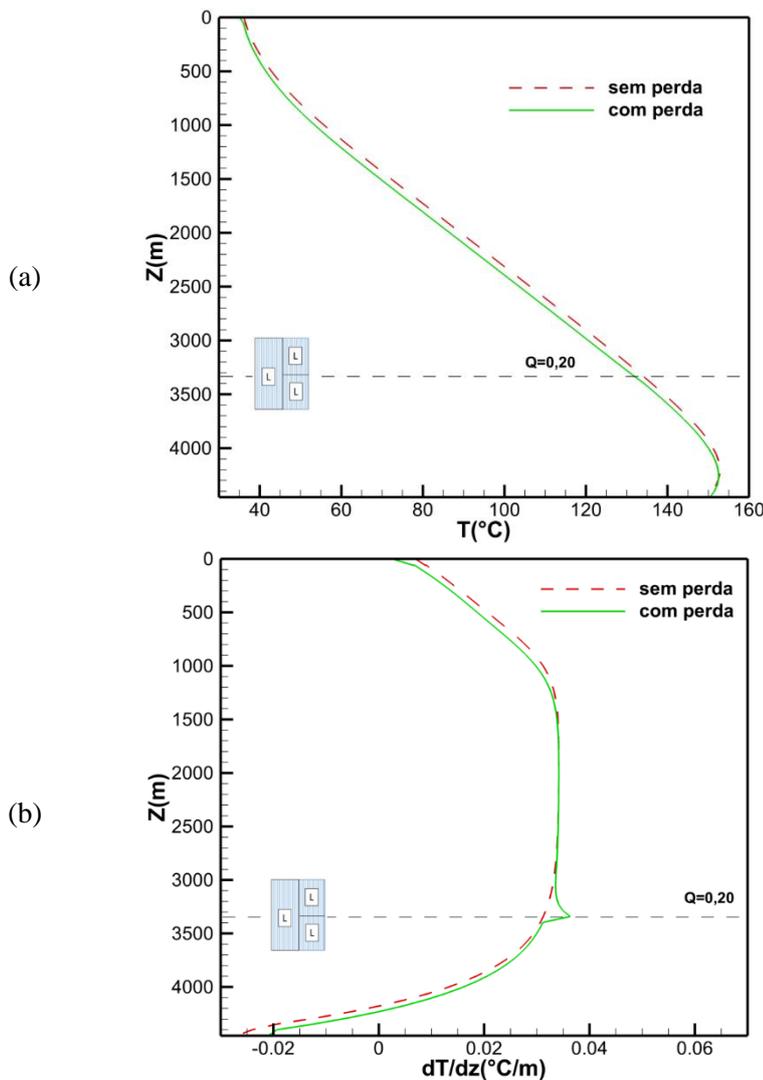


Figura 6.20 – Perfis para o Caso (1) LLL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=2000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$

6.8.2 Caso 2: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e laminar na região anular - TLL

A Figura 6.21 apresenta o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular, para $Re_c=5000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$ e $z_f=0,75$. Assim como para o Caso (1), no perfil de temperatura da região anular (Figura 6.21.a) houve diminuição no perfil de temperaturas. Nota-se que, abaixo da fratura, não há mudança significativa nos perfis. Com relação ao perfil do gradiente de temperaturas da região anular (Figura 6.21.b), observa-se que a extensão na direção z da descontinuidade é aumentada com a mudança de regime na coluna de perfuração (e aumento de velocidade na região anular). Desta forma, a detecção de fraturas é facilitada para o Caso (2) em relação ao Caso (1).

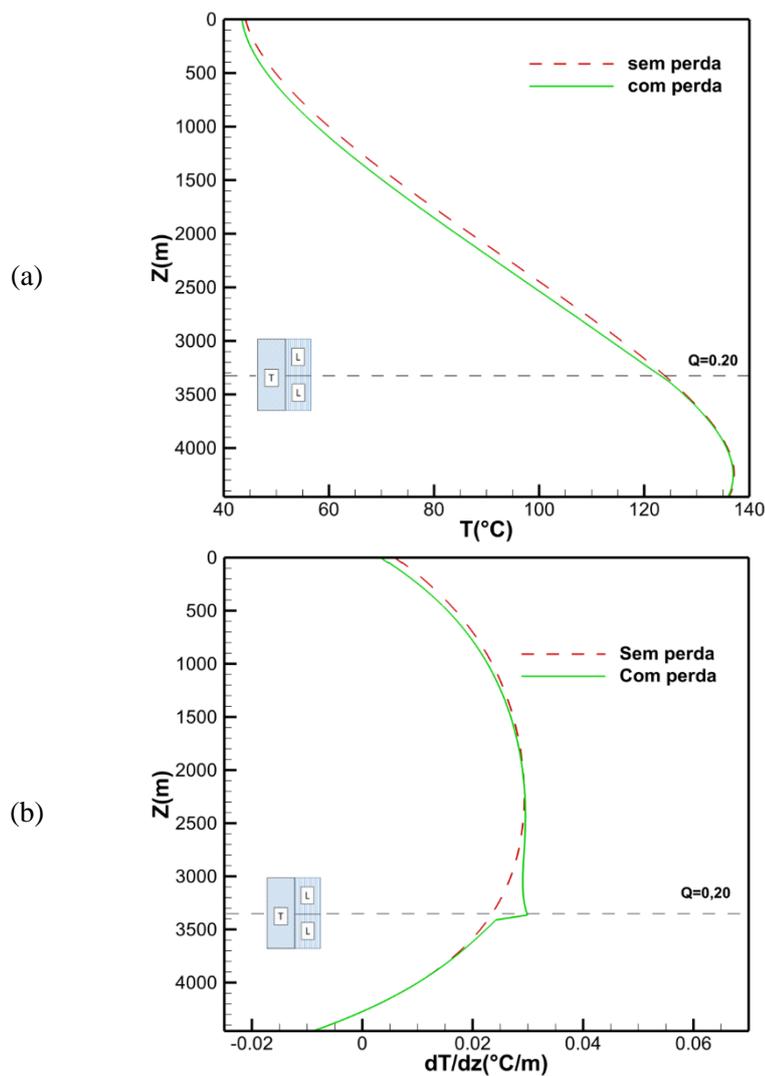


Figura 6.21 – Perfis para o Caso (2) TLL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=5000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$

6.8.3 Caso 3: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e na região anular antes da fratura e laminar acima da fratura - TTL

A Figura 6.21 apresenta o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular, para $Re_c=6000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$ e $z_f=0,75$. Com a perda de circulação, a velocidade do escoamento na região anular acima da fratura é imediatamente diminuída. Para certos tipos de geometria e configurações de escoamento, a variação da velocidade causa estabilização e transição de regime no escoamento.

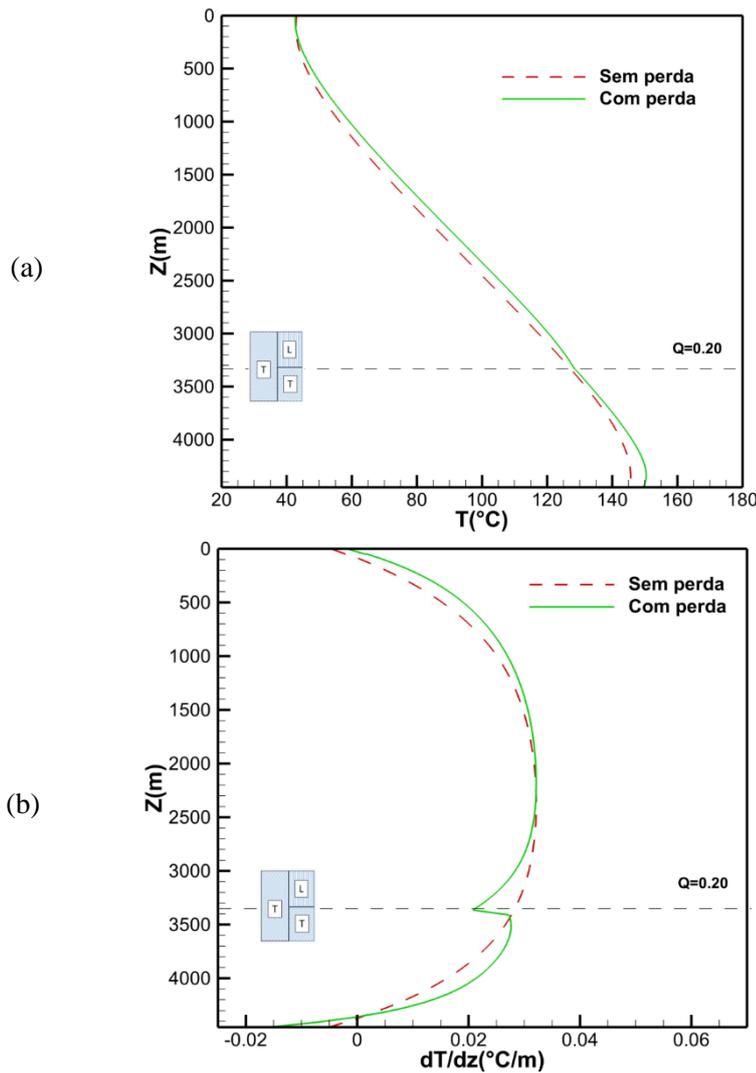


Figura 6.22 – Perfis para o Caso (3) TTL: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=6000$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$

Observando o perfil de temperaturas da região anular (Figura 6.21.a), nota-se que a perda de circulação aumentou o perfil de temperaturas, exceto próximo da saída ($Z=0$). Isso ocorre pois o regime laminar, que ocorre no escoamento acima da fratura, tem maior troca de calor por condução com a formação, devido às velocidades mais baixas. Por sua

vez, o calor transferido à região anular influencia a temperatura da coluna, que escoia até o fundo do poço com maior temperatura, afetando a T_{fp} . Este efeito também pode ser observado na Figura 6.21.(b) através da descontinuidade do perfil do gradiente de temperatura.

6.8.4 Caso 4: Escoamento turbulento na coluna de perfuração e em toda extensão da região anular - TTT

A Figura 6.23 apresenta o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular, para $Re_c=7500$, $t_c=1h$, $Q=0,20$ e $z_f=0,75$. Para este número de Reynolds de entrada, o escoamento é turbulento por toda a extensão da região anular e da coluna.

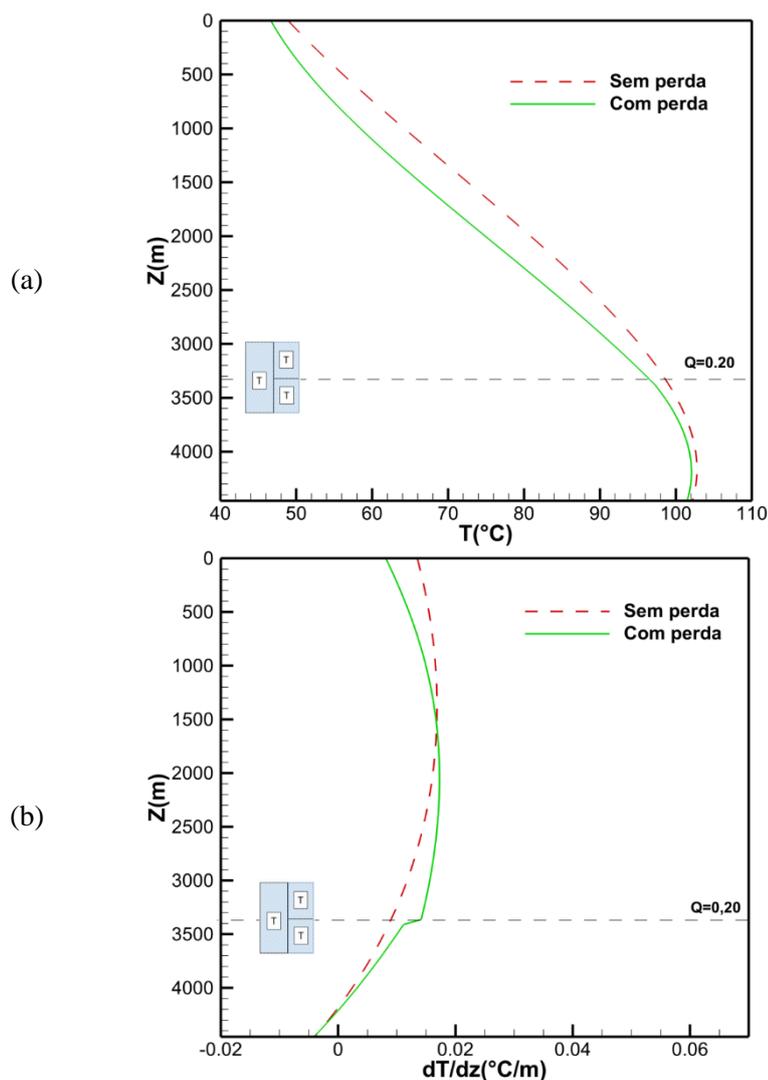


Figura 6.23 – Perfis para o Caso (4) TTT: (a) temperatura e (b) gradiente de temperatura da região anular, considerando $Re_c=7500$, $t_c=1h$, $Q=0,20$, $z_f=0,75$

É possível observar no perfil de temperaturas da região anular (Figura 6.23.a) que a diferença de temperaturas entre o perfil com e sem fratura é a mais pronunciada entre as combinações de regimes analisadas. Outra diferença mais evidente que nas outras configurações é a maior diminuição na temperatura de saída da região anular em $Z=0$. Com relação ao perfil do gradiente de temperaturas da região anular (Figura 6.23.b), são observadas maiores diferenças nos perfis, desde a região da fratura abaixo de $Z=3337\text{m}$ até a saída em $Z=0$. Deve ser ressaltado que tanto a coluna quanto a região anular, para esta configuração específica, se encontram em região de transição de escoamento. A descontinuidade do gradiente em z_f , para este caso é bem localizada, porém menos evidente que os demais casos apresentados. Outro aspecto que também prejudica este tipo de regime é o tempo de circulação pequeno utilizado ($t_c=1\text{h}$). Por outro lado, de maneira geral, a descontinuidade que ocorre no escoamento turbulento é mais pronunciada e de mais fácil detecção, conforme já constatado nas análises anteriores deste trabalho.

6.9 VARIAÇÃO DO NÚMERO DE FRATURAS

Na Tabela 6.5 se encontram as posições de fratura z_f e a perda de circulação em cada fratura (Q_a) utilizada para a variação do número de fraturas N_f .

A Figura 6.24 mostra o efeito da variação do número de fraturas sobre o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular para o fluido f1. A partir da Figura 6.24.(a), observa-se que o maior impacto no perfil de temperatura da região anular ocorre para $N_f=1$, e conforme se aumenta o número de fraturas, a temperatura se aproxima do poço não fraturado ($N_f=0$).

A partir do gradiente de temperaturas (Figura 6.24.b) observa-se que para o fluido utilizado, as descontinuidades mais evidentes (e gradientes máximos) ocorrem para menores valores de N_f . À medida que o número de fraturas é aumentado (e a perda de circulação distribuída), o perfil do gradiente também tende ao do poço não fraturado.

Tabela 6.5 – Parâmetros utilizados na análise de variação do número de fraturas

<i>parâmetro</i>	$N_f = 0$	$N_f = 1$	$N_f = 2$	$N_f = 3$
z_f	-	0,75	0,5; 0,75	0,25; 0,50; 0,75
Q_a	-	0,20	0,10	0,067

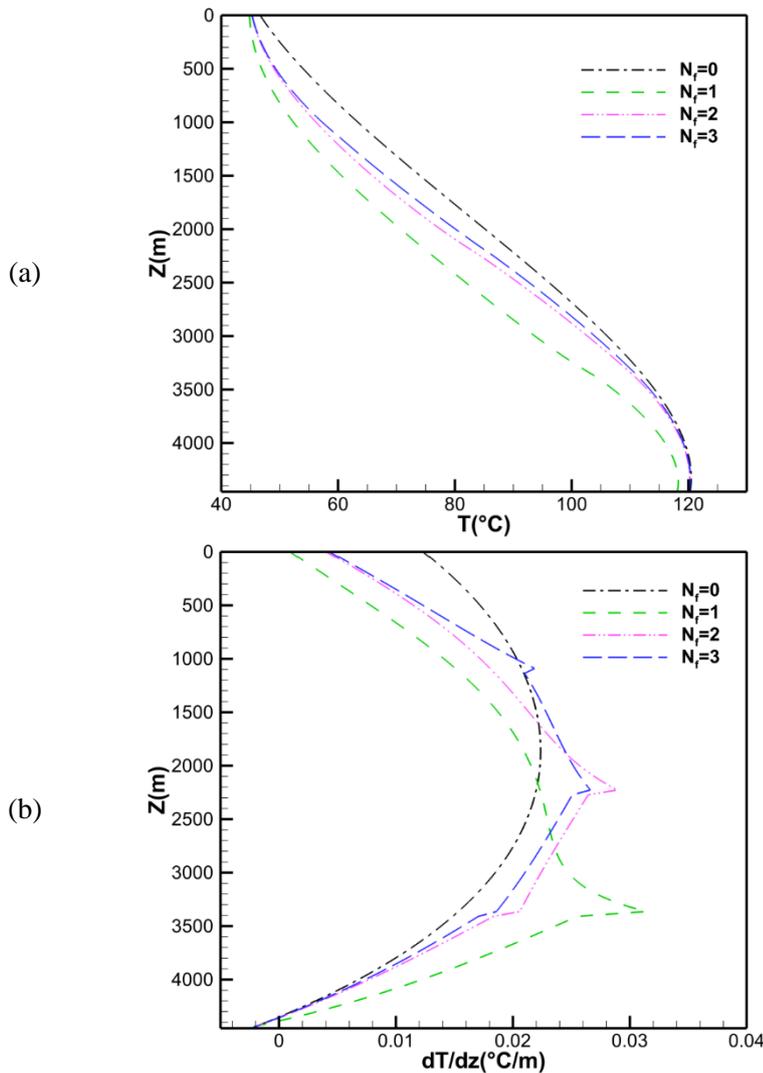


Figura 6.24 – Efeito do número de fraturas sobre o perfil: (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular, considerando $t_c=1h$ para o fluido f1

A Figura 6.25 mostra o efeito da variação do número de fraturas sobre o perfil de temperatura (a) e do gradiente de temperatura (b) da região anular para o fluido f5. Nota-se que embora o efeito da variação de N_f do perfil de temperatura da região anular do fluido f5 (Figura 6.25.a) seja semelhante ao do fluido f1 (Figura 6.24.a), o comportamento observado no gradiente de temperaturas do fluido f5 (Figura 6.25.b) é diferente. É possível observar que, embora as discontinuidades máximas ainda ocorra para $N_f=1$, o ponto de gradiente máximo ocorre na fratura localizada em $z_f = 0,50$, para $N_f=2$, mesmo com metade da perda de circulação por fratura ($Q_\alpha = 0,10$). Desta forma, é possível inferir que existe uma relação entre Q e a descontinuidade no ponto de fratura, mas que maiores valores de invasão não apresentam gradientes maiores, caso estejam em posições de fratura z_f diferentes.

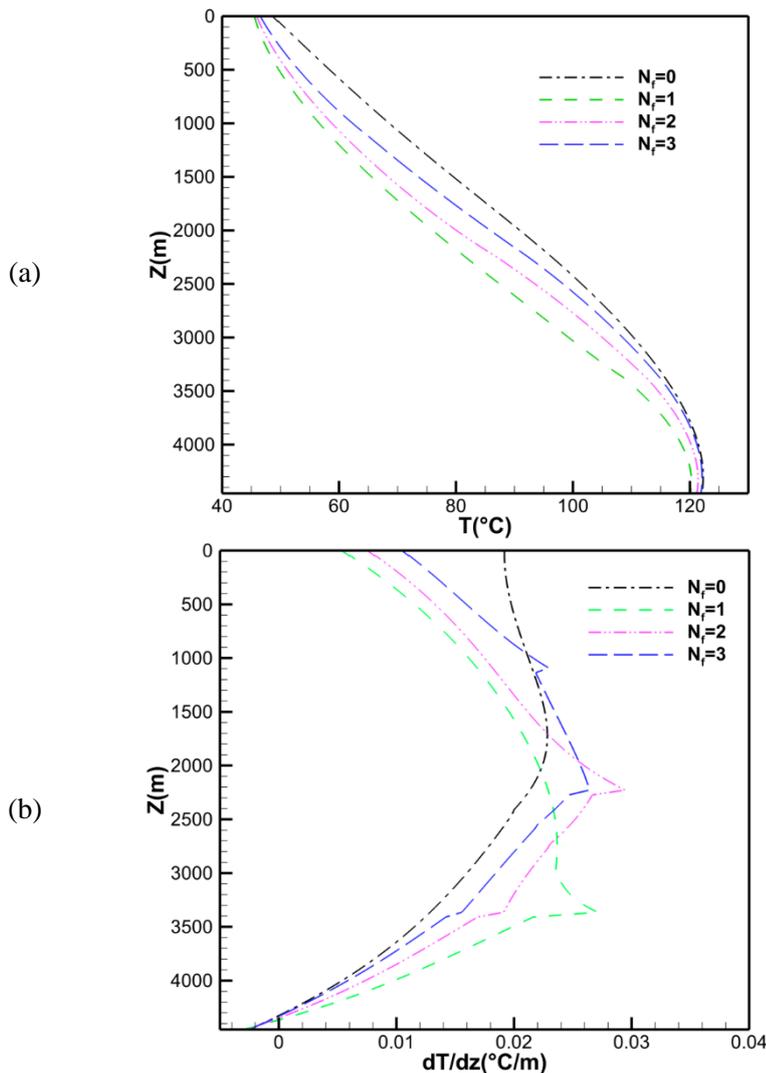


Figura 6.25 – Efeito do número de fraturas sobre o perfil: (a) de temperatura e (b) do gradiente de temperatura da região anular, considerando $t_c=1h$ para o fluido f5

6.10 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA RELATIVA ENTRE FRATURAS

O efeito da variação da proximidade entre duas fraturas no perfil de temperatura da região anular para as condições $d_f=0, 2,5\%, 5\%, 10\%, 15\%$ e 20% , $z_f=0,75$, $t_c=1h$ e $Q = 0,20$ para o fluido 1 está apresentado na Figura 6.26. Percebe-se que, para a configuração utilizada, não há variação significativa na temperatura da região anular (Figura 6.26.a). Pela vista ampliada (Figura 6.26.b) nota-se que a diminuição de d_f aproxima o perfil térmico para o caso de uma única fratura. Ressalta-se que para o processo de tomadas de decisão em uma operação de perfuração é de significativa importância diferenciar se a formação possui uma fratura com $Q = 0,20$ ou duas com $Q_\alpha = 0,10$ cada.

Em contrapartida, na Figura 6.27, que mostra o efeito da distância relativa entre fraturas no perfil do gradiente de temperatura da região anular, considerando as mesmas condições, é possível observar a distinção entre as descontinuidades das duas configurações de fraturas. Desta forma, ressalta-se a importância do perfil do gradiente de temperatura, necessário para identificação das fraturas.

No entanto, o perfil do gradiente de duas fraturas se aproxima do gradiente de uma única fratura conforme a distância d_f é diminuída, assim como ocorreu para o perfil de temperaturas da região anular. Com isso, a análise da interferência, da proximidade das fraturas, sobre o gradiente de temperaturas não pode ser ignorada.

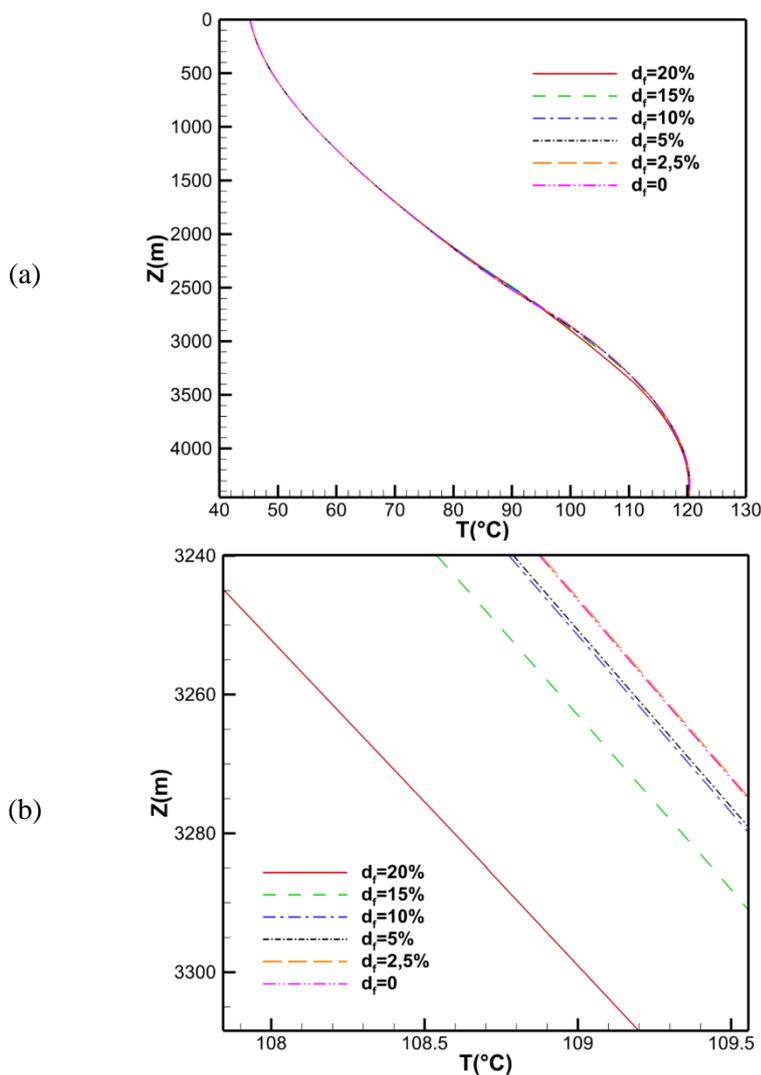


Figura 6.26 – Perfil de temperatura da região anular: (a) efeito da variação da distância relativa entre fraturas e (b) vista em detalhe, considerando $z_f=0,75$, $Q=0,20$ e $t_c=1h$ para o fluido f1

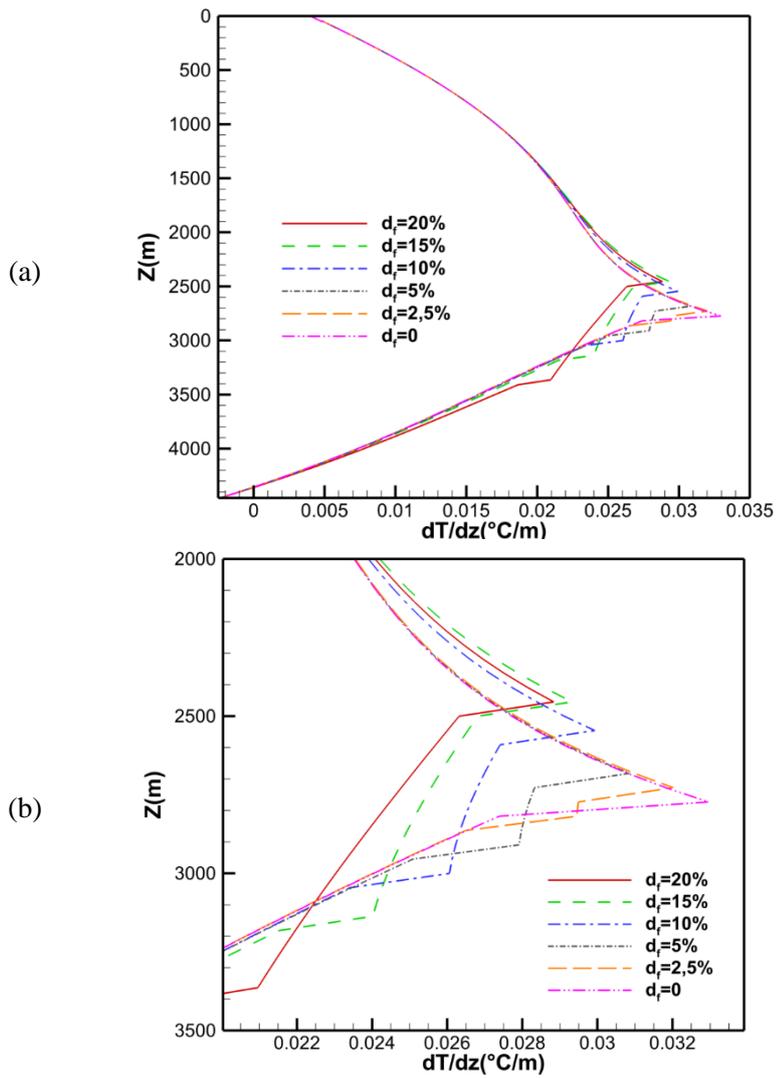


Figura 6.27 – Perfil do gradiente de temperatura da região anular:
(a) efeito da variação da distância relativa entre fraturas e (b) vista em detalhe,
considerando $z_f=0,75$, $Q=0,20$ e $t_c=1h$ para o fluido f1

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi investigado o problema de transferência de calor em regime transitório do escoamento de fluido de perfuração em poços fraturados com perda de circulação de fluido.

Para a solução numérica do problema foi desenvolvido um código próprio, com base na equação da energia. Os cálculos são divididos em 4 domínios: coluna de perfuração, região anular abaixo da fratura, região anular acima da fratura e formação rochosa, através do método dos volumes finitos, com o objetivo de determinar a evolução térmica dos perfis de temperatura ao longo do conjunto poço-formação.

Com relação aos parâmetros investigados foi constatado que o aumento na profundidade relativa de fratura diminuiu a temperatura do fundo do poço, embora não tenha ocorrido variações significativas na temperatura de saída. Por outro lado, o aumento da perda de circulação, além de diminuir a temperatura do fundo do poço, tem influência perceptível na temperatura de saída do anular. Assim, ressalta-se a importância do monitoramento não apenas do fundo do poço, mas também da temperatura de saída, para a tomada de decisão de medidas corretivas.

Para os diferentes regimes de escoamento, foram observadas as diferenças tanto na facilidade de detecção de fraturas quanto nos perfis de temperatura anular. Notou-se que os perfis se tornaram mais paralelos ao perfil linear de temperaturas da formação não perturbada para as regiões de regime laminar, devido ao menor número de Reynolds e consequentemente maior influência da condução. Além disso, de maneira geral o escoamento turbulento implicou em maior queda na temperatura do fundo do poço, devido às maiores velocidades e menor tempo para que o escoamento pudesse trocar calor com a formação rochosa.

Com relação aos casos multifaturados, foi concluído que quando ocorre o aumento do número de fraturas em um poço, mantendo-se a perda de circulação constante, existe tendência tanto no perfil de temperaturas da região anular quanto do respectivo gradiente térmico que se aproximar dos perfis de poço não fraturado. De maneira similar, o comportamento térmico do poço quando ocorre a diminuição na distância entre fraturas se aproxima do poço com uma única fratura (superposição de fraturas).

Do ponto de vista prático operacional, referente ao processo de perfuração, o presente trabalho destaca algumas evidências pertinentes, que podem auxiliar a engenharia de reservatórios de petróleo. Com relação a importância da detecção de fraturas na formação rochosa fica evidente a necessidade de buscar novas técnicas e metodologias para detectar a posição com maior precisão das fraturas na formação. Conforme exposto, a análise proposta neste trabalho, apresenta uma forma de detecção através do perfil de temperaturas obtido ao longo do poço. A metodologia de análise de solução do problema permite caracterizar, embora de forma simples, as principais diferenças para determinar a existência de uma ou mais fraturas responsáveis pela perda de circulação no poço. Esta determinação é essencial para a tomada de decisões na operação de um poço de petróleo. Com essa informação, somado ao volume perdido nos níveis dos tanque da sonda de perfuração, é possível pedir a parada total do processo (que gera custos e tempo não produtivo) no caso de existir apenas uma fratura com uma perda significativa de fluido. Por outro lado, pode-se tomar uma decisão corretiva, sem a parada do processo, se for detectado a existência de várias fraturas (de determinada espessura estimada) ao longo da formação, que permitem a perda da mesma quantidade de fluido. Neste caso o operador pode decidir entre diferentes técnicas corretivas. Como exemplo pode-se citar o processo de injeção de materiais de perda de circulação (LCM), que visam o tamponamento dessas fraturas sem a necessidade de uma parada total do processo.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi o primeiro estudo nesta frente de trabalho no grupo do Laboratório de Meios Porosos (LAMP) do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) da UTFPR, referente à detecção de zonas de perdas de circulação. Desta forma, ressalta-se a oportunidade de trabalhos futuros relacionados ao mesmo problema.

A primeira oportunidade consiste na criação de uma subrotina no código numérico para a determinação de curvas de viscosidade em função da temperatura a partir do ajuste de modelos de fluido não newtoniano a partir de reogramas como dado de entrada. Assim, o comportamento da viscosidade do fluido terá dependência das condições do escoamento e a da temperatura, produzindo melhores resultados.

Ainda com foco na complementação do código desenvolvido, trata-se da implementação da perda de circulação ao longo da formação por percolação, através da solução da equação de Darcy paralelamente à equação da energia.

Outra alteração pertinente é considerar as diferentes etapas do processo de perfuração referentes ao escalonamento dos diâmetros e revestimentos ao longo dos poços.

Como outra oportunidade, destaca-se a construção de um aparato experimental para a validação dos resultados numéricos obtidos, assim como uma investigação mais completa sobre o fenômeno de interferência entre fraturas.

REFERÊNCIAS

- AADNOY, B. S. **Modern well design**. CRC Press, 2010.
- ABBAS, R., JAROUJ, H., DOLE, S., JUNAIDI, E. H., EL-HASSAN, H., FRANCIS, L., MESSIER, E., **A safety net for controlling lost circulation**. Oilfield Review, v. 15, n. 04, p. 20-27, 2003.
- API, R. **Recommended practice for testing oil-well cements and cement additives**, Washington, DC, 1997.
- ARNOLD, F. C., **Temperature variation in a circulating wellbore fluid**, Journal of Energy Resources Technology, 112 79-83, 1990.
- BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons, 2016.
- BEJAN, A. **Convection heat transfer**. John wiley & sons, 2013.
- BEJAN, A., KRAUS, A. D. **Heat transfer handbook**. John Wiley & Sons, 2003.
- BLOCH, G., EL DEEB, M., BADAAM, H., CAILLY, F., MEUNIER, A. **Seismic facies analysis for fracture detection: a powerful technique**. Middle East Oil Show. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- CARSLAW, H. S., JAEGER, J.C., **Conduction of heat in solids**, 2nd. Edition, Clarendon Press, Oxford, UK, 1959.
- CHEN, Y., YU, M., MISKA, S., OZBAYOGLU, E., ZHOU, E., AL-KHANFERI, N. **Modeling Transient Circulating Mud Temperature in the Event of Lost Circulation and its Application in Locating Loss Zones**. ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2014
- CHEN, Y., YU, M., MISKA, S., OZBAYOGLU, E., ZHOU, E., AL-KHANFERI, N. **Fluid flow and heat transfer modeling in the event of lost circulation and its application in locating loss zones**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 148, p. 1-9, 2017.
- CHEN, Z., NOVOTNY, R. J. **Accurate prediction wellbore transient temperature profile under multiple temperature gradients: finite difference approach and case history**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2003.
- COOK, J., GROWCOCK, F., GUI, Q., HODDER, M., VAN OORT, E. **Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation**. Oilfield Review, 2012(23), 4.

DAI, H., LI, X. Y., FORD, R. YU, C., WANG, J. **Fracture detection using PS converted waves – A case study from Daqing oil field.** 2011 SEG Annual Meeting. Society of Exploration Geophysicists, 2011.

DITTUS, F. W.; BOELTER, L. M. K. **Publications on Engineering**, vol. 2. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, p. 443-461, 1930.

DUDA, L. E. **Computer simulation of wellbore cooling by circulation and injection**, Proc. Tenth Workshop on Geotherm. Res. Eng., Stanford University, USA, January 22-24, pp. 195-200 (1985).

FARRIS, R. Floyd et al. **A Practical Evaluation of Cements for Oil Wells.** Drilling and Production Practice. American Petroleum Institute, 1941.

FIRMINHAC, R. **Location of Fractures and Channel by Radioactive Methods. Drilling and Production Practice.** American Petroleum Institute, 1956.

FRIEDLEIFSSON, I. B., HUENGER, E., LUND, J. W., RAGNARSSON, A., RYBACH, L. **The Possible Role and Contribution of Geothermal Energy to the Mitigation of Climate Change.** IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources, Luebeck, Germany 21-25 January 2008.

GILL, J. A. **Well logs reveal true pressures where drilling responses fail.** Oil Gas J., (United States), v. 85, n. 11, 1987.

GNIELINSKI, V. **New equations for heat and mass-transfer in turbulent pipe and channel flow.** International chemical engineering, 16(2), 359-368, 1976

HASAN, A. R. et al. **A fluid circulating temperature model for workover operations.** SPE Journal, v. 1, n. 02, p. 133-144, 1996.

HEMPHILL, T., CAMPOS, W., PILEHVARI, A. **Yield-power law model more accurately predicts mud rheology.** Oil and Gas Journal; (United States), v. 91, n. 34, 1993.

HOLMES, C.S., SWIFT, C.S., Calculation of circulating mud temperatures, **Journal of Petroleum Technology**, June 670-674 (1970).

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentals of Mass and Heat Transfer**, 2002.

JAEGER, J. C. **The effect of the drilling fluid on temperatures measured in bore holes.** Journal of Geophysical Research, v. 66, n. 2, p. 563-569, 1961.

KARSTAD, E. AADNØY, B. S. **Analysis of temperature measurements during drilling.** SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1997.

KELLER, H. H., COUCH E. J., BERRY, P. M., **Temperature distribution in circulating mud columns**, Society of Petroleum Engineers Journal, February 23-30 (1973).

MAXWELL, S. C. **Assessing the impact of microseismic location uncertainties On interpreted hydraulic fracture geometries**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2009.

NGUYEN, D.A., YU, S. Z., SAASEN, A. **Modeling Thermal Effects on Wellbore Stability**. In: Trinidad and Tobago Energy Resources Conference. Society of Petroleum Engineers, 2010.

OUYANG, L. B., BELANGER, D. **Flow Profiling via Distributed Temperature Sensor (DTS) System-Expectation and Reality**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2004.

PATANKAR, S. **Numerical heat transfer and fluid flow**. CRC press, 1980.

RAUCH-DAVIES, M. **Fracture detection through multifocusing diffraction imaging**, Case Studies, 2014.

RAYMOND, L. R. **Temperature distribution in a circulating drilling fluid**. Journal of Petroleum Technology, 21(03), 333-341, 1969.

SANTOYO, E. **Transient numerical simulation of heat transfer processes during drilling of geothermal wells**. University of Salford, Salford351, 1997.

SANTOYO, E., GARCIA, A., ESPINOSA, G., SANTOYO-GUTIÉRREZ, S., GONZÁLEZ-PARTIDA, E. **Convective heat-transfer coefficients of non-Newtonian geothermaldrilling fluids**. Journal of Geochemical Exploration, v. 78, p. 249-255, 2003.

SEIDER, E.; TATE, E. **Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes**. Industrial & Engineering Chemistry, v. 28, n. 12, p. 1429-1435, 1936.

SELLEY, R. C.; SONNENBERG, S. A. **Elements of petroleum geology**. Academic Press, 2014.

SETH, G., REYNOLDS, A. C., MAHADEVAN, J. **Numerical model for interpretation of distributed-temperature-sensor data during hydraulic fracturing**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2010.

SUMP, G. D., WILLIAMS, B.B., **Prediction of wellbore temperatures during mud circulation and cementing operations**, Journal of Engineering for Industry, Transactions of ASME, November 1083-1092, 1973.

THOMPSON, M., BURGESS, T. M. **The prediction of interpretation of downhole mud temperature while drilling.** In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1985.

TRAGESSEER, A. F., CRAWFORD, P. B., CRAWFORD, H. R. **A method for calculating circulating temperatures.** Journal of Petroleum Technology, v. 19, n. 11, p. 1,507-1,512, 1967.

TURA, M. A. C., JOHNSON, L. R., MAJER, E. L., PETERSON, J. E. **Application of diffraction tomography to fracture detection.** Geophysics, v. 57, n. 2, p. 245-257, 1992.

VAN EVERDINGEN, A. F., HURST, W., **The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs,** Transaction, AIME, 186 305-324, 1949.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method.** Pearson Education, 2007.

WOOLEY, G. R. **Computing downhole temperatures in circulation, injection, and production wells,** Journal of Petroleum Technology, September 1509-1522,1980.

YU, M., CHEN, Y., MISKA, S. Z. OZBAYOGLU, M. E., TAKACH, N., **A Novel Approach in Locating Single Loss Zone during Deepwater Drilling with Distributed Temperature Measurement.** In: SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Society of Petroleum Engineers, 2014.

ZHOU, Q., BECKER, A., MORRISON, H F., GOLDSTEN, N. E., LEE, K.H. **Fracture Detection Using Subsurface Electromagnetic Techniques.** In: The 28th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1987.