



UNICAMP

M467c

29599/BC

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Flávio Me-
deiros Júnior e aprovada
pela comissão julgadora em 10/12/1996

ORIENTADOR

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

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

Comportamento da Temperatura do Fluido Injetado no Reservatório em Operações de Acidificação de Matriz

Autor : Flávio Medeiros Júnior

Orientador: Prof. Dr. Osvair Vidal Trevisan

Dezembro/96

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

M467c

Medeiros Júnior, Flávio

Comportamento da temperatura do fluido injetado no reservatório em operações de acidificação de matriz / Flávio Medeiros Júnior.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Osvaldo Vidal Trevisan

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

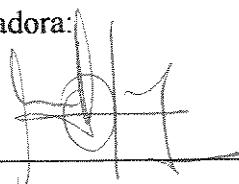
1. Temperatura. 2. Calor - Transmissão. 3. Engenharia do petróleo. 4. Poços de petróleo. 5. Escoamento. 6. Termoquímica. I. Trevisan, Osvaldo Vidal. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica III. Título.

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

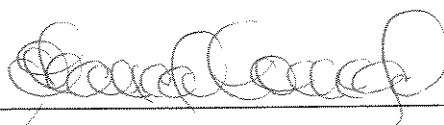
A dissertação “Comportamento da Temperatura do Fluido Injetado no Reservatório em Operações de Acidificação de Matriz”, elaborada por Flávio Medeiros Júnior e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 10 de dezembro de 1996

Banca Examinadora:



Osvair Vidal Trevisan, *Ph.D.*



Antônio Cláudio França, *Ph.D.*



Eduardo Ponce da Motta, *Ph.D.*

Dedicatória

À minha esposa Gláucia e aos meus filhos Daniel e Lucas, pelo incentivo, carinho e compreensão, fundamentais nestes dois anos de intenso trabalho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Osvaldo Vidal Trevisan, pelo comprometimento, sugestões de pesquisa, orientações e revisões, imprescindíveis à conclusão deste trabalho..

Ao Prof. Dr. Antônio Cláudio França Correa, pelas sugestões apresentadas na qualificação e participação na banca examinadora deste trabalho.

Ao Dr. Eduardo Ponce da Motta, pela proposição do tema da tese, pelas diversas informações enviadas e pela participação na banca examinadora.

À Profa. Dra. Maria Cristina Cunha, pela participação e esclarecimentos prestados na qualificação do trabalho.

Aos professores do curso de engenharia de petróleo, pelo comprometimento com o ensino, possibilitando a formação dos conceitos básicos utilizados neste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Petróleo e Centro de Estudos de Petróleo, pela presteza e cordialidade nos serviços de apoio.

Aos colegas de curso, pela excelente convivência no decorrer destes dois anos.

Aos colegas do E&P - RN/CE pela colaboração no envio de dados.

Aos Engs. Newman de Sousa e Genildo Luiz Borba pelo incentivo à realização do curso de mestrado, Eng. Victor Saboya e Samuel Bastos de Miranda, pelo pronto atendimento à minha solicitação para realização deste curso.

À PETROBRAS e à UNICAMP, que atuando em parceria, possibilitaram o meu aperfeiçoamento profissional e o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

As operações de Acidificação de Matriz são usadas com frequência para remoção do dano à formação causado por partículas sólidas de minerais que obstruem parcialmente o espaço poroso nas proximidades do poço. A cinética da reação química entre o ácido e os minerais da rocha é bastante sensível à temperatura na qual a reação se desenvolve. A temperatura do ácido na zona injetora depende dos fenômenos de transferência de calor que ocorrem no interior da coluna de injeção e no reservatório submetido à injeção do ácido. Normalmente utiliza-se pequenos volumes de ácidos bombeados com vazões médias e altas tendo como consequência pequenos períodos de injeção. O modelo proposto para o cálculo da temperatura na coluna considera os termos de acumulação de calor no interior da coluna e no anular, além da hipótese de poço com raio finito, importantes para soluções de curto tempo. No reservatório são consideradas as perdas para a formação vizinha e analisada a influência do calor gerado pela reação química no comportamento da temperatura do ácido. As hipóteses de condução de calor desprezível na direção do fluxo de fluido, equilíbrio térmico instantâneo, gradiente geotérmico linear e condução de calor unidimensional na formação também são utilizadas. A solução para temperatura do ácido na zona injetora é apresentada no espaço de Laplace considerando o acoplamento da solução para temperatura na coluna à solução para a temperatura no reservatório através do teorema da convolução. A inversão numérica das funções no espaço de Laplace é feita com o algoritmo de Stehfest. Os resultados obtidos indicam que a temperatura do ácido na zona injetora é bastante sensível à vazão do ácido injetado e aos volumes deslocados a frente do tratamento, podendo atingir valores significativamente inferiores à temperatura do reservatório no decorrer da operação.

PALAVRAS CHAVE:

Completação de Poços

Acidificação de Matriz

Geração de Calor

Injeção de Líquido

Abstract

Matrix Acidization is frequently used to remove formation damage from pore plugging caused by deposition of small mineral particles. The kinetics of the chemical reactions between acid and minerals is very sensitive to fluid temperature. The temperature of the acid at the injection zone depth depends on the heat transfer that occurs as the acid travels through the injection column and on the heat exchange with the reservoir rock and fluids. The volume of injected acid is usually small and the injection time is short, compared to other thermal injection operations. Two heat transfer models are proposed: one to calculate the temperature profile along the injection column and other to calculate the temperature distribution within the reservoir. The model proposed here for the heat transfer along the column incorporates heat accumulation (in the fluid and at the annulus) to the heat exchange between the wellbore and the semi-infinite surroundings. For the heat transfer in the reservoir, the model accounts for the conductive losses to the neighboring formation, the heat generation from the chemical reactions and heat transported by the injected fluid. The eventual temperature distribution for the acid in the reservoir is obtained after coupling of the solution for the column problem and the solution for the reservoir problem. Both problems were solved by Laplace transforms and the final solution is obtained using the convolution theorem. Stehfest's algorithm is used to invert the solution to real domain. Results for typical operational parameters show that the acid temperature is very sensitive to the injection flow rate and to the fluid volumes injected during the pre-treatment. The acid temperature can be significantly lower than the reservoir temperature along the operation.

KEYWORDS:

Well Completion

Matriz Acidization

Heat Generation

Liquid Flow

Índice

DEDICATÓRIA.....	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. TEMPERATURA NA COLUNA DE INJEÇÃO OU PRODUÇÃO	4
2.2. TEMPERATURA NA ZONA DE INJEÇÃO.....	6
2.3. ACIDIFICAÇÃO DE MATRIZ EM ARENITOS.....	7
3. TEMPERATURA DO FLUIDO NA COLUNA	9
3.1. A EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA TÉRMICA	9
3.2. O MODELO COM ACUMULAÇÃO DE CALOR NO ANULAR.....	11
3.3. SOLUÇÃO POR TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	15
3.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS DO FLUIDO E DA FORMAÇÃO	19
3.5. O COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISSÃO DE CALOR(U).....	20
3.6. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM TRABALHOS PUBLICADOS.....	21
3.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS COM A INVERSÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO ALGORITMO DE STEHFEST.....	24
4. TEMPERATURA DO FLUIDO NO RESERVATÓRIO.....	27
4.1. MODELO DE LAUWERIER EM COORDENADAS CILÍNDRICAS	27
4.2. SOLUÇÃO POR TRANSFORMADA DE LAPLACE.....	29
5. INFLUÊNCIA DO CALOR DE REAÇÃO	35

5.1. MODELOS DE ACIDIFICAÇÃO DE MATRIZ EM ARENITOS	35
5.2. DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE VELOCIDADE DA REAÇÃO - E_{FM}	38
5.3. O MODELO COM TERMO DE GERAÇÃO DE CALOR	44
5.4. SOLUÇÃO POR TRANSFORMADA DE LAPLACE	47
5.5. INVERSÃO NUMÉRICA COM O ALGORITMO DE STEHFEST	48
6. ACOPLAMENTO DOS PROBLEMAS	51
6.1. O PRINCÍPIO DA SUPERPOSIÇÃO	51
6.2. SOLUÇÃO POR TRANSFORMADA DE LAPLACE	52
7. INJEÇÃO SEQUENCIAL DE FLUIDOS	58
7.1. CORREÇÃO PARA O TERMO DE GERAÇÃO DE CALOR	59
7.2. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	64
8. CONCLUSÕES	67
NOMENCLATURA	70
BIBLIOGRAFIA	74
APÊNDICE A: DEDUÇÃO DA SOLUÇÃO PARA TEMPERATURA NA COLUNA	76
APÊNDICE B: CORRELAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMAS ROCHA-FLUIDO	81
APÊNDICE C: DADOS TÍPICOS PARA O CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE OPERAÇÕES DE ACIDIFICAÇÃO DE MATRIZ	83
APÊNDICE D: ADAPTAÇÃO DA EQUAÇÃO DE RAMEY[2]	86
APÊNDICE E: DEDUÇÃO DA SOLUÇÃO PARA TEMPERATURA NO RESERVATÓRIO	88
APÊNDICE F: DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO PARA CONCENTRAÇÃO DO MINERAL NO MEIO POROSO - MODELO SIMPLIFICADO	92
APÊNDICE G: FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DA CONSTANTE DE VELOCIDADE DA REAÇÃO DE ÁCIDOS COM MINERAIS E MOLÉCULAS -GRAMA DAS SUBSTÂNCIAS	94
APÊNDICE H: DEDUÇÃO DA SOLUÇÃO PARA TEMPERATURA NO RESERVATÓRIO COM O TERMO DE GERAÇÃO DE CALOR	96

APÊNDICE I: DADOS DE PROGRAMAS DE ACIDIFICAÇÃO DE MATRIZ EM ARENITOS	100
---	-----

Lista de Figuras

Figura 3.1: Balanço do Fluxo de Calor no Anular	13
Figura 3.2: Esquema para o Cálculo da Temperatura na Coluna.....	14
Figura 3.3: Temperatura do Fluido na Coluna x Profundidade	18
Figura 3.4: Temperatura do Fluido na Coluna em Função do Tempo	19
Figura 3.5: Comparação de Resultados (T_{fc} x z).....	22
Figura 3.6: Comparação de Resultados (T_{fc} x t).....	23
Figura 3.7: Influência do Algoritmo de Stehfest.....	25
Figura 4.1: Modelo de Lauwerier para geometria radial	28
Figura 4.2: Distribuição da Temperatura no Reservatório (T_{dfr} x r_D)	31
Figura 4.3: Posição da Frente de Fluido Base.....	32
Figura 4.4: Temperatura da Frente de Injeção do Ácido (T_{dfr} x t).....	33
Figura 5.1:Concentração do Ácido e do Mineral no Meio Poroso.....	38
Figura 5.2: Concentração Adimensional dos Minerais no Reservatório	43
Figura 5.3: Influência da Geração de Calor na Temperatura do Fluido.....	48
Figura 5.4: Temperatura do Fluido - Modelo com Geração	49
Figura 6.1: Esquema para Temperatura Variável no Poço	51
Figura 6.2: Temperatura do HCl(15%) no Reservatório - Problema Acoplado	56
Figura 6.3: Temperatura do HF(3%) no Reservatório - Problema Acoplado.....	57
Figura 7.1: Temperatura no Reservatório - Injeção Sequencial de Fluidos.....	61
Figura 7.2: Temperatura no Reservatório - Efeito das Reações.....	62
Figura 7.3: Temperatura do HF em função do Tempo	63
Figura 7.4: Temperatura em Reservatório à 640 metros.	64
Figura 7.5: Temperatura em Reservatório à 2300 metros	65

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Valores das Variáveis para Frente de Temperatura	34
Tabela 5.1: Constantes de Velocidade de Reação no Meio Poroso.....	42
Tabela 5.2: Calor de Reação para Calcita e Quartzo	44

1. Introdução

As reações químicas entre ácidos e minerais têm sido uma técnica bastante utilizada para remoção do dano à formação em arenitos. Na indústria do petróleo, esta técnica é conhecida como acidificação de matriz e consiste basicamente na injeção de pequenos volumes de ácidos, normalmente misturas de ácido clorídrico(HCl) e ácido fluorídrico(HF), com pressões inferiores à pressão de fratura da formação. O resultado obtido com esta técnica, aumento da produtividade ou injetividade do poço, depende de vários parâmetros que são projetados antecipadamente. Os volumes e concentrações dos ácidos são os principais parâmetros dimensionados previamente com base na experiência de campo ou através de simuladores matemáticos.

Os simuladores matemáticos são baseados nas relações da cinética química e no balanço de massa de ácidos e minerais. Em várias reações de ácidos com minerais, a temperatura tem uma influência significativa na velocidade destas reações. Conseqüentemente, o dimensionamento otimizado dos parâmetros de uma acidificação de matriz depende do valor da temperatura na qual a reação ocorre. A otimização dos parâmetros em uma operação de acidificação de matriz pode significar redução no custo de materiais e serviços, diminuição do período de perda de produção (no caso de poços produtores) e melhoria no resultado das operações.

O tema deste trabalho foi sugerido por técnicos do Centro de Pesquisas Leopoldo A. Miguez de Mello(CENPES), objetivando a determinação da temperatura do ácido no reservatório durante operações de acidificação de matriz em arenitos. O valor desta temperatura é utilizado como dado de entrada nos simuladores numéricos para otimização dos parâmetros da operação, como também nos experimentos de simulação física de acidificação em laboratório. Além disso, a temperatura do fluido

no reservatório é um parâmetro importante em vários outros tipos de operações tais como a injeção de polímeros e resinas durante as intervenções em poços de petróleo.

A temperatura na qual as reações ocorrem na profundidade do reservatório depende dos fenômenos de transferência de calor na coluna de produção e no reservatório, além do calor liberado ou absorvido pelas próprias reações. A determinação exata desta temperatura pode ser obtida através da resolução da equação da conservação da energia em duas dimensões, simultaneamente às equações do balanço de massa das substâncias no reservatório (ácidos e minerais), e às equações constitutivas da cinética química. Uma metodologia mais simples consiste em resolver os problemas na coluna e no reservatório separadamente, acoplando-os numa etapa posterior. Esta metodologia foi adotada neste trabalho, simplificando consideravelmente o tratamento matemático para o problema.

A determinação da temperatura do fluido na coluna durante a injeção ou produção de fluidos em poços de petróleo é um problema bastante conhecido e estudado na Engenharia de Petróleo. No entanto, poucos modelos foram desenvolvidos para operações de curta duração semelhantes à acidificação de matriz. Nestas operações, os termos de acumulação de calor nos fluidos aquosos podem contribuir significativamente no comportamento da temperatura. O modelo proposto para determinação da temperatura do fluido na coluna considera a condução de calor para as formações vizinhas, acumulação no fluido do anular e no líquido injetado, além do termo de convecção devido à vazão de injeção. Os efeitos do poço são incluídos através da hipótese de fluxo de calor permanente no material das tubulações e no anel de cimento em volta do poço. As hipóteses simplificadoras de poço vertical, fluido incompressível, coeficiente de expansão térmica desprezível, propriedades térmicas e vazão de injeção constantes complementam o modelo.

No reservatório, o problema é resolvido de forma semelhante considerando a condução de calor para as formações vizinhas, convecção devido a vazão de injeção de líquido e acumulação no sistema rocha fluido. Além de utilizar hipóteses simplificadoras semelhante às do problema na coluna, o modelo para o problema no reservatório considera o deslocamento em pistão para o fluido e o equilíbrio térmico instantâneo entre o fluido e a parte sólida da rocha.

O efeito do calor de reação na temperatura do fluido no reservatório é computado através de um modelo simplificado onde a concentração do ácido é considerada constante. O calor gerado durante a injeção é determinado em função das concentrações de ácidos e minerais, da posição da frente de injeção, da taxa de consumo dos minerais e do calor de reação. A taxa de consumo do mineral é deduzida considerando a constante de velocidade da reação independente das variações na temperatura e um meio poroso composto por partículas esféricas.

As hipóteses adotadas nos modelos possibilitam a resolução dos problemas através da transformação de Laplace, simplificando a dedução e o formato das soluções. Nos problemas onde a solução analítica no domínio do tempo não foi encontrada, o processo de inversão foi realizado através de métodos numéricos.

Conhecendo-se as soluções no espaço de Laplace para a temperatura do fluido na coluna e para temperatura do fluido no reservatório, a solução acoplada dos dois problemas é obtida através da convolução das soluções individuais. Esta solução, incorpora os efeitos e hipóteses dos modelos individuais para o caso da injeção contínua de apenas um ácido no reservatório.

Na situação real, as operações de acidificação de matriz envolvem a injeção sequencial de volumes finitos de vários ácidos. Esta característica da operação não modifica os termos relativos à condução e à convecção de calor obtidos para o caso da injeção contínua. No entanto, o termo de geração depende do tipo de ácido e da sua posição no reservatório. Conhecendo-se a sequência de injeção, a composição e o volume de cada fase que compõe o tratamento, a solução para injeção contínua pode ser adaptada ao caso prático. É importante ressaltar que vários especialistas em acidificação de matriz em arenitos consideram desprezíveis os efeitos da geração de calor. Considerando esta hipótese, a solução para injeção contínua pode ser aplicada diretamente ao caso prático.

Em termos gerais, este trabalho objetiva a resolução do problema da temperatura do ácido no reservatório em operações de acidificação de matriz, considerando os efeitos das trocas de calor na coluna e no reservatório, além do calor associado às reações químicas entre ácidos e minerais.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Temperatura na coluna de injeção ou produção

A maioria dos trabalhos publicados sobre o comportamento da temperatura do fluido na coluna de produção foi motivada visando atender dois objetivos: quantificar as perdas de calor para formação nos projetos de recuperação de petróleo através de métodos térmicos e avaliar a influência da temperatura do fluido no escoamento multifásico e nos métodos de elevação artificial utilizados para produção do poço.

Squier [1] apresenta a solução para temperatura na coluna durante a injeção de líquido na forma de integrais numéricas envolvendo funções de Bessel de primeira espécie. Esta solução assume as hipóteses de fluido incompressível, propriedades térmicas constantes, gradiente de temperatura horizontal no fluido desprezível, não considera condução de calor na direção vertical e despreza a transferência de calor por radiação. As condições do problema consideram a temperatura inicial definida por um gradiente geotérmico constante, a temperatura de injeção na superfície constante e temperatura do fluido igual à da formação no raio interno da tubulação por onde escoar o fluido. A principal limitação do modelo de Squier[1] é não considerar os efeitos do poço: espessura da coluna, fluido no anular, revestimento e cimento. Em contrapartida, não impõe restrição ao comportamento do fluxo de calor entre a formação e o fluido na coluna.

Ramey[2] apresenta uma solução analítica para a temperatura do fluido na coluna incluindo o efeito do poço. Assume as hipóteses básicas usadas por Squier[1] para simplificação da equação da conservação da energia e analisa a resposta transiente da condução de calor na formação para várias condições de contorno na fronteira poço formação. A equação proposta restringe-se ao caso de fluxo de calor

constante na fronteira poço-formação, não sendo adequada para curto tempo. A inclusão dos efeitos do poço (coluna, anular, revestimento e cimento) é baseada na hipótese de fluxo de calor em regime permanente entre o fluido na coluna e a face externa do anel de cimento. A solução proposta por Ramey[2] tem a vantagem de considerar os efeitos do poço, porém o comportamento transiente da condução de calor na formação é obtido utilizando a hipótese da fonte linear com fluxo de calor constante na fronteira poço formação e geralmente não proporciona bons resultados para tempos menores que uma semana.

Willhite[3] analisa e apresenta soluções para quantificação dos efeitos do poço (coluna, anular, revestimento e cimento), considerando a transmissão de calor por radiação, condução e convecção. O fluxo de calor é assumido em regime permanente e o efeito do poço é quantificado através do cálculo do coeficiente global de transmissão de calor entre o fluido e a formação. Após o trabalho de Ramey[2] e o detalhamento apresentado por Willhite[3], o coeficiente global de transferência de calor vem sendo utilizado na maioria dos trabalhos analíticos envolvendo a transferência de calor entre o fluido na coluna e a formação.

Alves[4] apresenta uma solução unificada para o cálculo da temperatura do fluido na coluna e na linha de surgência do poço considerando fluxo multifásico na coluna de produção e poços direcionais. A solução obtida inclui um tratamento rigoroso da equação da conservação da energia na coluna, recaindo na solução de Ramey[2] para o caso da injeção de líquido incompressível com perdas por fricção desprezíveis.

Yu-Shu-Wu[5] apresenta uma solução analítica para a temperatura do fluido na coluna de produção considerando reservatório estratificado horizontalmente. A solução é apresentada na forma de integrais numéricas envolvendo funções de Bessel de segunda espécie. Considerando o reservatório homogêneo, o modelo torna-se semelhante ao proposto por Ramey[2], porém com as hipóteses mais genéricas da fonte cilíndrica e do fluxo de calor variável na fronteira poço formação. Este modelo representa de forma genérica o efeito do fluxo de calor transiente na formação, sendo adequado para tempos longos e curtos.

Hassan[6] apresenta uma solução analítica aproximada para o comportamento da temperatura na formação, considerando o fluxo de calor constante na interface poço-formação com o modelo da fonte cilíndrica. Propõe uma função da raiz quadrada do tempo para os instantes iniciais e uma função logarítmica para tempos médios e longos. Em ambos os casos é necessário estimar o fluxo de calor constante na interface poço formação para se obter o valor dimensional da temperatura. Para o caso de fluxo de calor variável, utiliza-se o princípio da superposição.

Hassan[7] utiliza o modelo proposto em Hassan[6] para o cálculo da temperatura do fluido na coluna considerando fluxo multifásico dentro da tubulação. O tratamento dado à equação da conservação da energia é semelhante ao apresentado por Alves[4]. Para o caso de fluxo de líquido incompressível, o modelo recai na solução de Ramey para tempo longo e na solução da fonte cilíndrica com vazão constante (aproximada por uma função da raiz quadrada do tempo) nos instantes iniciais. A aplicação da equação proposta aos instantes iniciais é restringida pela hipótese do fluxo de calor constante na interface poço-formação, necessitando a aplicação do teorema da superposição para a resposta de tempo curto.

2.2. Temperatura na zona de injeção

De modo similar ao cálculo da temperatura na coluna, a maioria dos trabalhos voltados para o cálculo da temperatura do fluido injetado no reservatório foi desenvolvida buscando soluções para os métodos térmicos de recuperação de petróleo. Neste contexto, encontramos desde os modelos analíticos básicos de Lauwerier[8] e Marx[9] até modelos numéricos detalhados apresentados por Spillete[10] e Weinstein[11], que consideram fluxo multifásico no reservatório. Uma descrição sucinta dos diversos artigos relacionados com a temperatura do fluido injetado na formação é apresentada por Farouq Ali[12]

O modelo de Lauwerier[8] utiliza a forma simplificada da equação da conservação da energia térmica e condições de contorno semelhantes às utilizadas por Squier[1], considerando o escoamento linear de fluido Newtoniano incompressível em meio poroso com propriedades térmicas e permo-porosas constantes. O modelo admite ainda o equilíbrio térmico instantâneo entre fluido e rocha na zona injetora,

condução de calor apenas na direção perpendicular ao fluxo do fluido, espessura constante da zona de injeção e deslocamento tipo pistão.

Marx[9] desenvolveu seu modelo voltado para o caso de injeção de vapor no reservatório, tendo como premissa a manutenção da temperatura constante atrás da frente de injeção do fluido. A equação da conservação da energia é apresentada em termos dos fluxos de calor entre a zona injetora, formações vizinhas e o fluido injetado. Este modelo tem a versatilidade de poder ser aplicado diretamente a qualquer geometria de fluxo e ser facilmente adaptável ao caso da vazão de líquido variável pelo uso da convolução. Porém, a hipótese de temperatura constante atrás da frente de injeção restringe sua aplicação ao caso da injeção de vapor.

O modelo numérico de Spillete[10] elimina a maior parte das hipóteses simplificadoras adotadas por Lauwerier[8], incluindo os efeitos da heterogeneidade do reservatório, ação da gravidade, permeabilidade relativa, pressão capilar e variações das propriedades do fluido com a temperatura. O equilíbrio térmico instantâneo entre a rocha e o fluido e a ausência da fase gasosa são as simplificações adotadas neste modelo.

Weinstein[11] apresenta um modelo numérico semelhante ao de Spillete[10], incluindo a presença da fase gasosa e desprezando os efeitos da pressão capilar.

Van Poolen[13] compara os resultados obtidos com o modelo básico de Lauwerier[8] e os principais modelos analíticos e numéricos que o sucederam com hipóteses menos restritivas. Para todos os modelos analisados, os valores obtidos para a temperatura do fluido na zona injetora foram muito próximos, indicando que as hipóteses simplificadoras adotadas por Lauwerier[8] não influenciam de forma significativa a temperatura do fluido injetado.

2.3. Acidificação de Matriz em Arenitos

Diversos trabalhos foram publicados sobre as reações químicas que ocorrem nos arenitos em tratamentos de acidificação de matriz. Os temas cobrem desde o estudo da cinética química em laboratório até modelos matemáticos para avaliação e projeto dos tratamentos de acidificação de matriz.

Fogler[14] apresenta valores da constante de equilíbrio e da taxa de reação para reações do ácido clorídrico(HCl) e do ácido fluorídrico(HF) com minerais existentes nos arenitos. Baseado na equação da conservação da massa do ácido e dos minerais e em uma relação empírica entre as concentrações dos reagentes e a velocidade da reação, propõe um modelo macroscópico para determinação da concentração do ácido no meio poroso. Os minerais são agrupados em reagentes e não reagentes e o modelo é solucionado para a concentração de um mineral equivalente ao grupo de minerais que reage com o ácido.

Hekim[15] apresenta soluções assintóticas para o modelo macroscópico, considerando reações entre vários minerais e o ácido injetado no meio poroso..

Motta[16] utiliza o modelo macroscópico com 2 minerais para otimizar o projeto de tratamentos de acidificação de matriz em arenitos através de parâmetros obtidos com ensaios de laboratório. Neste trabalho os autores enfatizam a influência da temperatura nos resultados obtidos, recomendando a realização do experimento em uma temperatura próxima ao valor que será encontrado no campo.

Hill[17] apresenta um resumo dos trabalhos publicados sobre a cinética das reações do HF e HCl com minerais. Apresenta também a solução analítica para concentração do ácido, considerando o modelo macroscópico de 1 ácido e 2 minerais, em várias geometrias de fluxo.

Schechter[18] utiliza a composição mássica do arenito para estimar os valores das constantes que determinam a taxa de reação do ácido com os minerais.

3. Temperatura do Fluido na Coluna

O cálculo da temperatura do fluido na coluna de produção durante uma operação de acidificação de matriz deve ser feito levando-se em conta uma característica peculiar deste tipo de serviço que é o curto intervalo de tempo no qual a injeção do ácido é realizada (normalmente entre 1 e 10 horas). Para este intervalo de tempo, o fluxo de calor entre a formação e o ácido na coluna apresenta variações significativas com o tempo.

Os diversos meios físicos que separam o ácido dentro da coluna do contato direto com a formação também podem exercer uma influência significativa no cálculo da temperatura. Por exemplo, o valor da temperatura do ácido na coluna pode ser bastante diferente se usarmos uma coluna de fibra de vidro ou uma coluna de aço.

Considerando as características físicas descritas nos parágrafos anteriores, um modelo que pretenda representar adequadamente o problema da temperatura do ácido na coluna de produção deve considerar o fluxo de calor variável entre a formação e o ácido, como também permitir a inclusão dos efeitos do poço (coluna, anular, revestimento e cimento) no cálculo da temperatura.

O modelo proposto para o cálculo da temperatura do fluido na coluna utiliza as hipóteses do modelo Yu-Shu Wu[5], acrescentando o efeito da acumulação de calor no anular do poço.

3.1. A Equação da Conservação da Energia Térmica

Os modelos que representam o comportamento da temperatura em sistemas físicos são desenvolvidos a partir da equação geral da conservação da energia associada a hipóteses simplificadoras adequadas ao problema que se deseja modelar. Para a temperatura do ácido na coluna, partiremos da equação da conservação da

energia térmica para fluido Newtoniano, obtida pela subtração da equação da conservação da energia mecânica da forma geral da conservação da energia apresentada em Burger[19].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (\tilde{\mathbf{k}} \vec{\nabla} T) - P(\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \phi_{\mu} \quad (3.1)$$

Assumindo as hipóteses de fluido incompressível e perdas por fricção desprezíveis, temos, respectivamente:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (3.2)$$

$$\phi_{\mu} = 0 \quad (3.3)$$

Utilizando as relações termodinâmicas envolvendo energia interna, entalpia, entropia, pressão, volume, trabalho e considerando variações destas grandezas apenas na direção axial em coordenadas cilíndricas obtemos:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \beta T \left[\frac{\partial P}{\partial t} + v_z \frac{\partial P}{\partial z} \right] = \vec{\nabla} \cdot (\tilde{\mathbf{k}} \vec{\nabla} T) \quad (3.4)$$

Considerando as hipóteses de pequeno coeficiente de dilatação volumétrica e equilíbrio instantâneo da temperatura no elemento do fluido obtemos a forma simplificada da equação da conservação da energia térmica para fluido Newtoniano, incompressível com perdas por fricção desprezíveis:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (3.5)$$

Na equação (3.5), o termo mais a esquerda corresponde à acumulação de calor, enquanto o termo central representa o termo de convecção no elemento infinitesimal do fluido dz . Esta equação reflete apenas o balanço de calor no elemento do fluido, não considerando o fluxo de calor para a sua vizinhança. No caso do ácido na coluna de produção, este fluxo de calor pode ser quantificado pela Lei de Fourier aplicada a interface do ácido com a coluna.

$$q_H = -2\pi k_s r \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=r_H} \quad (3.6)$$

Acrescentando o termo do fluxo de calor para formação em volta do poço e escrevendo a equação (3.5) em termos do fluxo de calor por unidade de comprimento na direção z, obtemos a equação diferencial usada por Squier[1] para o cálculo da temperatura da água em poços de injeção.

$$\pi r_{it}^2 \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \pi r_{it}^2 \rho C_p v_z \frac{\partial T}{\partial z} - 2\pi k_s r_{it} \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_{it}} = 0 \quad (3.7)$$

A equação (3.7) considera o contato direto entre o ácido na coluna e a formação em volta do poço. Esta hipótese significa dizer que todos os meios físicos entre o interior da coluna e a formação, possuem as mesmas propriedades térmicas da própria formação, ou seja, não considera os efeitos do poço. Esta hipótese é bastante inadequada pois os materiais que separam fisicamente o fluido da formação, normalmente possuem propriedades térmicas distintas.

A inclusão do efeito do poço no cálculo da temperatura do fluido na coluna foi proposta por Ramey[2], baseada na hipótese de fluxo de calor em regime permanente nos meios físicos compreendidos entre o fluido e a formação. Este efeito é quantificado pelo coeficiente global de transferência de calor (U) e tem sido utilizado na maioria dos modelos subsequentes ao trabalho de Ramey[2].

3.2. O modelo com Acumulação de Calor no Anular

O modelo com acumulação de calor no anular utiliza a equação simplificada para a conservação da energia térmica (equação (3.7)), incluindo os efeitos do poço através da hipótese de fluxo de calor permanente entre o fluido na coluna e o fluido no anular, e entre o fluido do anular e a formação em volta do poço.

A condição inicial é aplicada em todo o espaço, sendo dada pela soma da temperatura na superfície com um gradiente geotérmico linear com a profundidade.

As condições de contorno radiais são obtidas considerando o meio não perturbado para raios muito grandes e o fluxo de calor em regime permanente no espaço entre a formação e o fluido no anular e entre o fluido no anular e o fluido na coluna.

Considerando a hipótese de fluxo de calor permanente nos meios físicos entre o ácido e o anular, a equação (3.7), incluindo os efeitos do poço, pode ser escrita como:

$$\pi r_{it}^2 (\rho C_p)_{fc} \frac{\partial T_{fc}}{\partial t} + q_l (\rho C_p)_{fc} \frac{\partial T_{fc}}{\partial z} + 2\pi r_{it} U_{rit} (T_{fc} - T_{fa}) = 0 \quad (3.8)$$

A diferença entre as equações (3.7) e (3.8) está no termo correspondente ao fluxo de calor para a vizinhança que na equação (3.8) considera o fluxo de calor permanente entre o fluido na coluna e o fluido no anular; na equação (3.7) este termo é definido pela lei de Fourier aplicada à temperatura da formação.

A condição inicial é dada pela soma da temperatura ambiente na superfície com o gradiente geotérmico.

$$T_{fc}(0, z) = T_a + gg(z) \quad (3.9)$$

A condição de contorno na variável z é obtida assumindo a temperatura de injeção constante.

$$T_{fc}(t, 0) = T_{inj} \quad (3.10)$$

Para solução da temperatura do fluido através da equação (3.8) é necessário o conhecimento da temperatura no espaço anular entre a coluna e a formação. Utilizando a hipótese de fluxo de calor permanente entre o anular e a formação obtemos uma relação entre a temperatura do fluido no anular e a temperatura da formação. A temperatura da formação é obtida pela solução da equação da difusividade térmica no meio poroso dada por:

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} = \frac{(\rho C_p)_{se}}{k_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (3.11)$$

Com a condição inicial

$$T_s(0, r) = T_a + gg(z) \quad (3.12)$$

A condição de contorno para r muito grande assume o meio não perturbado:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T_s(0, r) = T_a + gg(z) \quad (3.13)$$

Na fronteira poço-formação, a condição de contorno é obtida pela hipótese de fluxo de calor permanente entre a formação e o anular:

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_c} = -\frac{U_{rc}}{k_s} (T_{fa} - T_s|_{r=r_c}) \quad (3.14)$$

Uma vez que o fluxo de calor entre o fluido no anular e a formação é, por hipótese, em regime permanente, o fluxo de calor na interface entre o fluido no anular e o revestimento tem o mesmo valor do fluxo de calor na interface entre o raio externo do poço e a formação, podendo ser quantificado aplicando-se a Lei de Fourier à temperatura da formação.

A resolução da equação (3.11) com as condições (3.12) a (3.14) permite explicitar a temperatura do anular T_{fa} em função da temperatura da formação T_s . A temperatura do fluido na coluna T_{fc} é relacionada com a temperatura do fluido no anular e com a temperatura da formação através do balanço dos fluxos de calor no anular. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o balanço dos fluxos de calor no espaço anular.

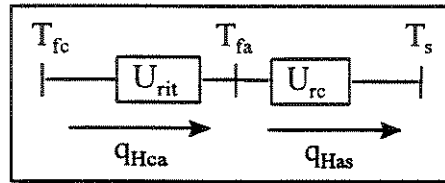


Figura 3.1: Balanço do Fluxo de Calor no Anular

Pelo balanço de calor no anular:

$$q_{Hca} - q_{Has} = q_{Haca} \quad (3.15)$$

Considerando o fluxo de calor em regime permanente entre a coluna e o anular e entre o anular e a formação temos:

$$q_{Hca} = 2\pi r_{it} U_{rit} (T_{fc} - T_{fa}) \quad (3.16)$$

$$q_{Has} = -2\pi k_s r_c \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_c} \quad (3.17)$$

O calor acumulado no anular é dado por:

$$q_{Haca} = \pi (r_{ir}^2 - r_{ot}^2) (\rho C_p)_{fa} \frac{\partial T_{fa}}{\partial t} \quad (3.18)$$

Substituindo o valor de q_{Hca} , q_{Has} e q_{Haca} , na equação (3.15) obtemos:

$$2\pi r_{it} U_{rit} (T_{fc} - T_{fa}) + 2\pi k_s r_c \left. \frac{\partial T_s}{\partial r} \right|_{r=r_c} = \pi (r_{ir}^2 - r_{ot}^2) (\rho C_p)_{fa} \frac{\partial T_{fa}}{\partial t} \quad (3.19)$$

A equação (3.19) relaciona diretamente as temperaturas do fluido na coluna, no anular e na formação.

O conjunto de equações diferenciais e condições de contorno apresentadas mais a hipótese de propriedades térmicas constantes representam o equacionamento proposto para o modelo com acumulação no anular e formação homogênea. A Figura 3.2. mostra esquematicamente o modelo proposto para o cálculo da temperatura na coluna.

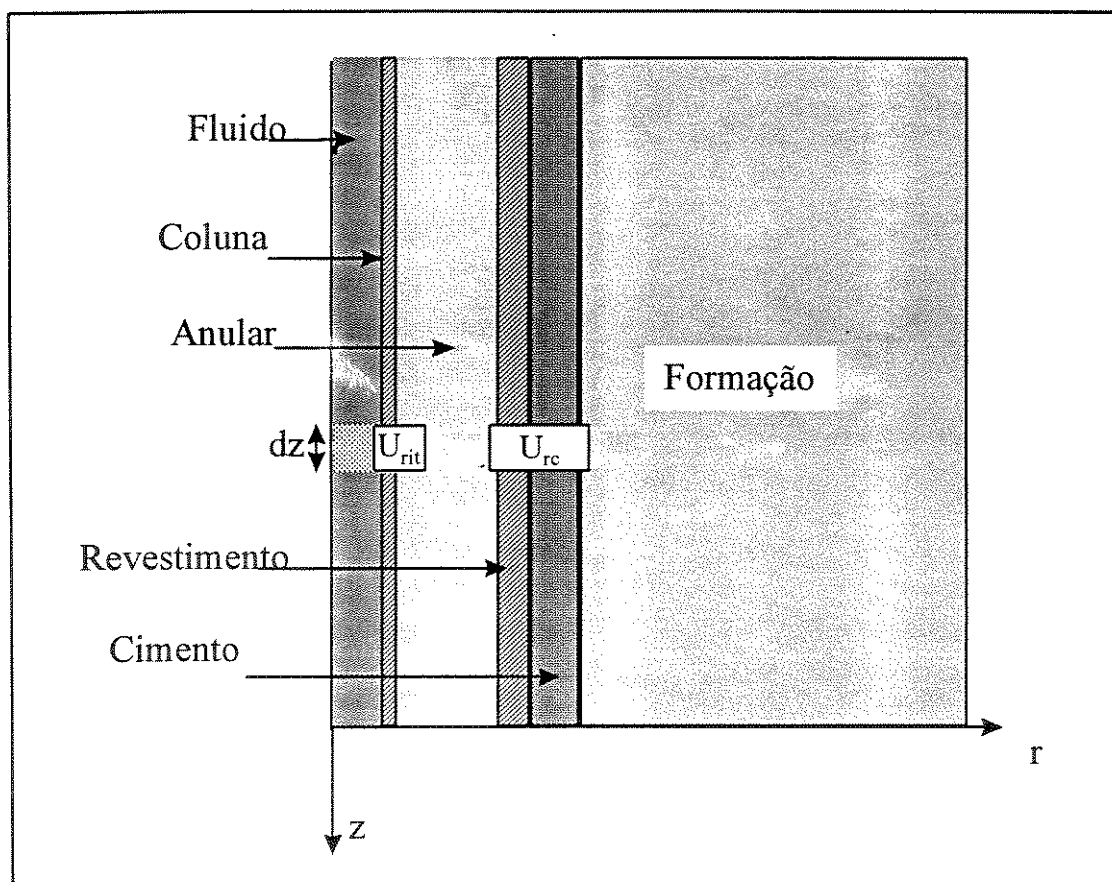


Figura 3.2: Esquema para o Cálculo da Temperatura na Coluna

No elemento dz do ácido na coluna é aplicada a forma simplificada da equação da conservação da energia térmica com o termo de acumulação no tempo, convecção na variável z e fluxo de calor para a vizinhança na variável r . Os efeitos do poço são

computados pelos coeficientes globais de transferência de calor (U_{rc} e U_{rit}), através da hipótese de fluxo permanente entre r_{it} (raio interno da tubulação de produção) e r_{ot} (raio externo da tubulação de produção), entre r_{ir} (raio interno do revestimento de produção) e r_c (raio externo do anel de cimento), e da acumulação de calor no fluido do anular. O comportamento da temperatura na formação é obtido com a equação da difusividade térmica unidimensional na variável r .

3.3. Solução por Transformada de Laplace

A aplicação da transformação de Laplace às equações diferenciais e condições de contorno apresentadas em 3.2, com o uso de variáveis adimensionais convenientes, torna bastante simples a obtenção de uma solução analítica no domínio de Laplace para a temperatura do fluido na coluna.

Utilizando a variável adimensional para temperatura:

$$T_{Dj} = [T_j - (T_a + wz)] / wL \quad (3.20)$$

Para o tempo:

$$t_D = \frac{\alpha_s}{r_c^2} t \quad (3.21)$$

Para o raio:

$$r_D = \frac{r}{r_c} \quad (3.22)$$

Para profundidade:

$$z_D = \frac{z}{L} \quad (3.23)$$

Considerando o gradiente geotérmico linear dado por:

$$gg(z) = wz \quad (3.24)$$

Aplicando a transformada de Laplace ao problema da temperatura na formação proposto em 3.2 com as variáveis adimensionais definidas pelas equações (3.20) a (3.23), obtemos a solução no domínio de Laplace :

$$\bar{T}_{Ds} = \frac{\bar{T}_{Dfa}(s, z_D) \mathbf{K}_0(r_D \sqrt{s})}{\left[\mathbf{K}_0(\sqrt{s}) + \phi \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s}) \right]} \quad (3.25)$$

De modo semelhante, aplicando a transformação de Laplace às equações (3.8) , (3.9), (3.10), utilizando as variáveis adimensionais e substituindo o valor de $\bar{T}_{Ds}$ dado pela equação (3.25), obtemos a solução para temperatura do fluido na coluna dada por:

$$\bar{T}_{Dfc} = \frac{\exp(-A(s)z_D)}{sA(s)} + T_{Dinj} \frac{\exp(-A(s)z_D)}{s} - \frac{1}{sA(s)} \quad (3.26)$$

$$\text{com } A(s) = s\theta_{acc} + \frac{1}{\gamma(s)} \left[\frac{\theta_{cc}}{\lambda(s)} + s\theta_{aca} \right] \quad (3.27)$$

onde T_{Dinj} , θ_{acc} , θ_{cc} e θ_{aca} , são constantes adimensionais dadas por:

$$T_{Dinj} = [T_{inj} - T_a] / wL \quad (3.28)$$

$$\theta_{acc} = \frac{\alpha_s}{r_c^2} \frac{\pi r_{it}^2 L}{q_l} \quad (3.29)$$

$$\theta_{cc} = \frac{2\pi k_s L}{q_l (\rho C_p)_{fc}} \quad (3.30)$$

$$\theta_{aca} = \frac{\alpha_s}{r_c^2} \frac{\pi(r_{ir}^2 - r_{ot}^2) L}{q_l} \frac{(\rho C_p)_{fa}}{(\rho C_p)_{fc}} \quad (3.31)$$

T_{dinj} é o valor adimensional correspondente a temperatura de injeção na superfície; θ_{acc} e θ_{aca} representam a contribuição dos termos de acumulação na coluna e anular, respectivamente; θ_{cc} representa a contribuição do termo de perdas para formação em volta do poço. Os valores das constantes θ_{acc} , θ_{aca} e θ_{cc} estão normalizados em relação ao termo de convecção de calor na direção do fluxo de fluido. $\lambda(s)$ e $\gamma(s)$ são funções adimensionais da variável s :

$$\lambda(s) = \frac{\sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s})}{\left[\mathbf{K}_0(\sqrt{s}) + \phi \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s}) \right]} \quad (3.32)$$

$$\gamma(s) = 1 + \frac{k_s}{r_{it} U_{rit} \lambda(s)} + s \left(\frac{\alpha_s}{r_c^2} \frac{(r_{ir}^2 - r_{ot}^2)(\rho C_p)_{fa}}{2r_{it} U_{rit}} \right) \quad (3.33)$$

onde φ é uma constante adimensional definida por:

$$\varphi = \frac{k_s}{r_c U_{rc}} \quad (3.34)$$

A dedução detalhada das equações (3.25) a (3.34) encontra-se no Apêndice A.

A solução no espaço de Laplace dada pela equação (3.26) não possui uma transformada inversa conhecida, neste caso, o cálculo da temperatura do ácido na coluna no domínio do tempo pode ser realizado através da integral complexa para inversão da função no espaço de Laplace, aplicando-se a deconvolução no tempo ou pelo uso de algoritmos numéricos. A aplicação da fórmula da integração complexa ou a deconvolução conduz a soluções no domínio do tempo na forma de integrais envolvendo funções de Bessel (Squier[1], Yu-Shu-Wu[5], Carslaw[20]), cujos valores só podem ser calculados numericamente.

O algoritmo de Stehfest[24] para inversão numérica de funções no espaço de Laplace é uma ferramenta de uso consagrado na Engenharia do Petróleo, com as características de facilidade de programação e rápido tempo de resposta, sendo utilizado neste texto para o cálculo do valor da temperatura no domínio do tempo.

A Figura 3.3 apresenta os resultados obtidos para temperatura do ácido na coluna, usando os dados do Apêndice C, considerando uma vazão de injeção de líquido de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm).

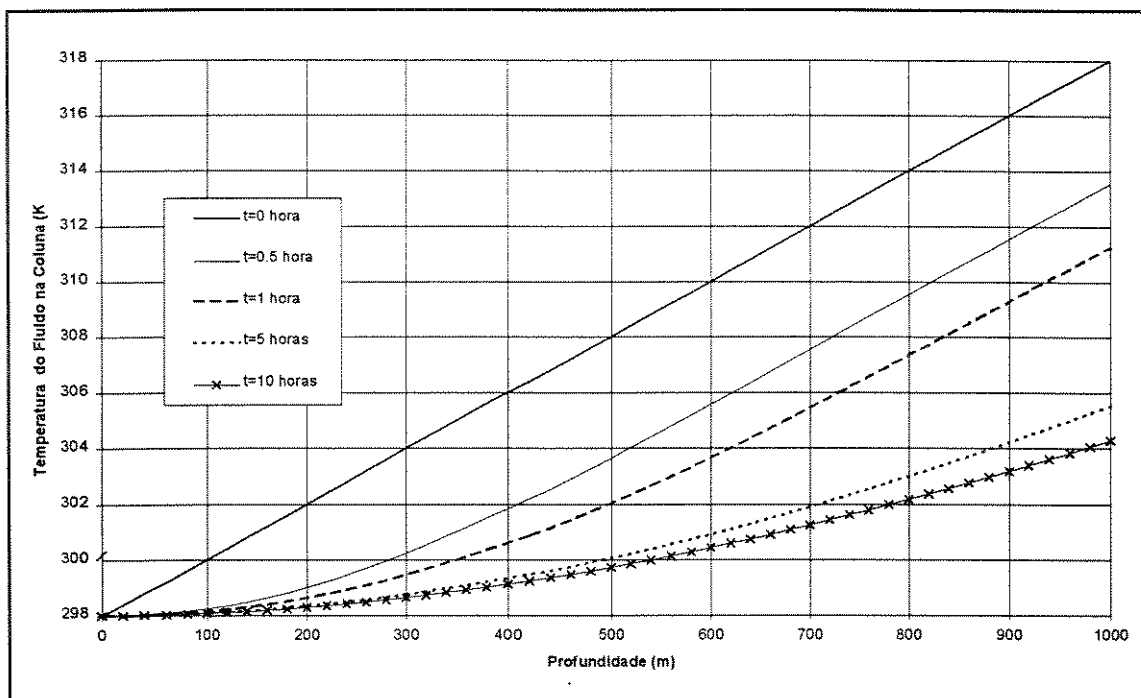


Figura 3.3: Temperatura do Fluido na Coluna x Profundidade

O gráfico na Figura 3.3 indica claramente uma maior variação da temperatura no período entre 0 e 5 horas em relação ao período entre 5 e 10 horas. Este comportamento indica que a transferência de calor no primeiro período é significativamente maior que no segundo, confirmando a hipótese da importância de se considerar o fluxo de calor variável no curto tempo. As variações menores da temperatura nas proximidades da superfície são explicadas pela injeção do ácido a temperatura ambiente.

Uma das variáveis de controle nas operações de acidificação de matriz é a vazão no qual o ácido é injetado, apresentando variações entre 0,1 e 10 bpm, além disso a nossa preocupação é determinar a temperatura do ácido quando o mesmo está reagindo com os sólidos na profundidade do reservatório. O gráfico na Figura 3.4 apresenta o comportamento da temperatura na profundidade de 1000 metros em função do tempo para valores típicos de vazões de injeção usadas nas operações de acidificação de matriz. Para obtenção das curvas foi utilizado o conjunto de dados do Apêndice C.

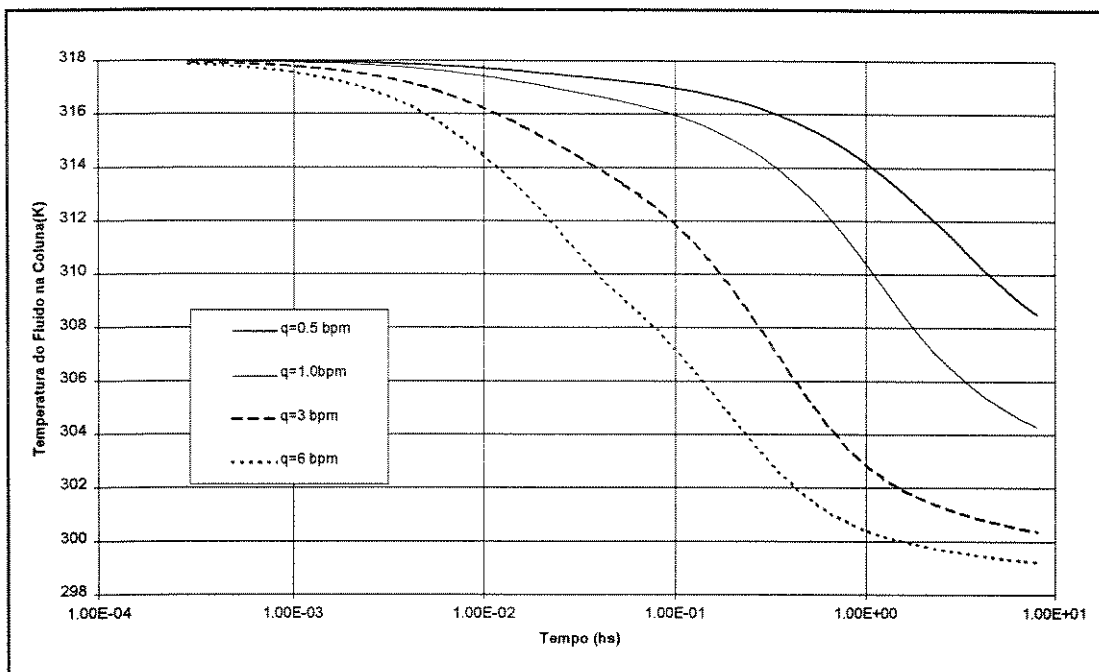


Figura 3.4: Temperatura do Fluido na Coluna em Função do Tempo

Neste gráfico, o valor inferior da escala do eixo das ordenadas indica a temperatura de injeção do ácido na superfície, enquanto o valor superior corresponde a temperatura inicial do fluido na profundidade de 1000 metros. A Figura 3.4 demonstra que mesmo para intervalos de tempo inferiores a 10 horas, a temperatura do fluido na coluna pode estar muito próxima da temperatura de injeção na superfície. A sensibilidade da temperatura ao valor da vazão injetada também é bastante evidenciada..

3.4. Propriedades Térmicas do Fluido e da Formação

A solução para temperatura do fluido na coluna através das equações e condições de contorno apresentadas em 3.3 tem como parâmetros as propriedades térmicas da formação e do fluido na coluna. Pratts[21], apresenta uma grande quantidade de dados, tabelas e gráficos com valores típicos das propriedades térmicas de fluido e rocha para aplicações na Engenharia de Petróleo. Somerton[22], apresenta um estudo detalhado para obtenção das propriedades térmicas de sistemas rocha-fluido, incluindo experimentos de laboratório, correlações empíricas e modelos teóricos.

Em função da grande variabilidade existente na composição e estrutura dos meios porosos, os dados obtidos em laboratório representam os valores mais aproximados para as propriedades térmicas dos sistemas rocha-fluido. No entanto, a realização destes ensaios para os diversos sistemas torna-se impraticável. Neste trabalho, os valores das propriedades térmicas dos sistemas rocha-fluido (quando não disponíveis como dados de entrada), são obtidos de acordo com as recomendações propostas por Somerton[22]. O Apêndice B apresenta as equações utilizadas para o cálculo das propriedades térmicas dos sistemas rocha-fluido.

3.5. O Coeficiente Global de Transmissão de Calor(U)

A hipótese de fluxo permanente nos meios compreendidos entre a formação e o fluido no anular e entre o fluido no anular e o fluido na coluna possibilita a quantificação deste fluxo através de um parâmetro chamado coeficiente global de transmissão de calor. Este coeficiente é calculado a partir das resistências térmicas dos meios envolvidos e de uma área de referência perpendicular ao fluxo de calor. Incropera[23], apresenta em detalhes o cálculo do coeficiente global de transferência de calor em geometria linear e radial.

Willhite[5] apresenta um método para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor em aplicações da Engenharia de Petróleo. A equação geral proposta por Willhite[5] leva em conta o fluxo condutivo de calor no cimento, revestimento e coluna, fluxo de calor por condução, radiação e convecção natural no espaço anular e transferência de calor convectiva entre o fluido na coluna e a superfície interna da tubulação.

Considerando que a maior diferença de temperatura no espaço anular é igual ao produto do gradiente geotérmico pela profundidade, podemos considerar desprezível a parcela da transmissão de calor por radiação no anular. Desta forma, o fluxo de calor permanente entre a formação e o fluido no anular pode ser quantificado por um coeficiente global que considere a condução de calor no revestimento e no cimento, além da convecção natural entre o fluido no anular e a parede do revestimento.

$$U_{rc} = \left[\frac{r_c}{k_r} \ln \frac{r_{or}}{r_{ir}} + \frac{r_c}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_{or}} + \frac{r_c}{r_{ir}} \frac{1}{h_{car}} \right]^{-1} \quad (3.35)$$

De modo semelhante, o coeficiente global para o fluxo de calor permanente entre o fluido no anular e o fluido na coluna leva em conta a convecção natural entre o fluido no anular e a coluna, condução na parede da coluna e convecção forçada entre a face interna da coluna e o fluido no seu interior.

$$U_{rit} = \left[\frac{1}{h_{fi}} + \frac{r_{it}}{k_t} \ln \frac{r_{ot}}{r_{it}} + \frac{r_{it}}{r_{ot}} \frac{1}{h_{cat}} \right]^{-1} \quad (3.36)$$

As equações 3.35 e 3.36 são ambas dependentes do valor da temperatura, conseqüentemente no caso de temperatura variável, o cálculo simultâneo da temperatura e do coeficiente global de transmissão de calor torna-se um processo iterativo para cada variação da temperatura.

Neste trabalho sugerimos o cálculo do coeficiente global de troca de calor à temperatura média entre a temperatura de injeção na superfície e a temperatura do reservatório na profundidade onde o fluido será injetado.

3.6. Comparação de Resultados com Trabalhos Publicados

A maioria dos trabalhos publicados objetivando o cálculo da temperatura do fluido na coluna durante a injeção ou produção de fluidos foi desenvolvida para aplicações de longo tempo, tais como injeção de água aquecida, injeção de vapor e a produção do reservatório. Para estas situações onde o fluxo de calor entre o fluido na coluna e a formação é praticamente constante, a equação apresentada por Ramey[2] proporciona excelentes resultados no cálculo da temperatura do líquido na coluna. Além disso, a facilidade de cálculo apresentada por esta equação permite que ela seja utilizada para comparação de resultados em várias situações. O Apêndice D contém a adaptação da forma original da equação de Ramey[2] às variáveis adimensionais definidas na seção 3.2. O modelo de Yu-Shu-Wu[5] considera a acumulação de calor no fluido dentro da coluna apresentando bons resultados para curto tempo.

As Figuras 3.5 e 3.6 apresentam curvas comparativas entre o modelo com acumulação de calor no anular, a equação de Ramey[2] e o modelo de Yu-Shu-Wu[5]. Os gráficos foram traçados com dados típicos de um poço com revestimento de 7 polegadas, anular preenchido com água, tubulação de produção de 2 7/8

polegadas e formação do tipo arenito com saturação de água e óleo. O Apêndice C apresenta os valores dos dados utilizados.

Na Figura 3.5 os perfis da temperatura do fluido em função da profundidade obtidos com a equação proposta por Ramey[2] , com o modelo de Yu-Shu-Wu[5] e com o modelo proposto neste trabalho são comparados. As curvas foram traçadas para uma vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm).

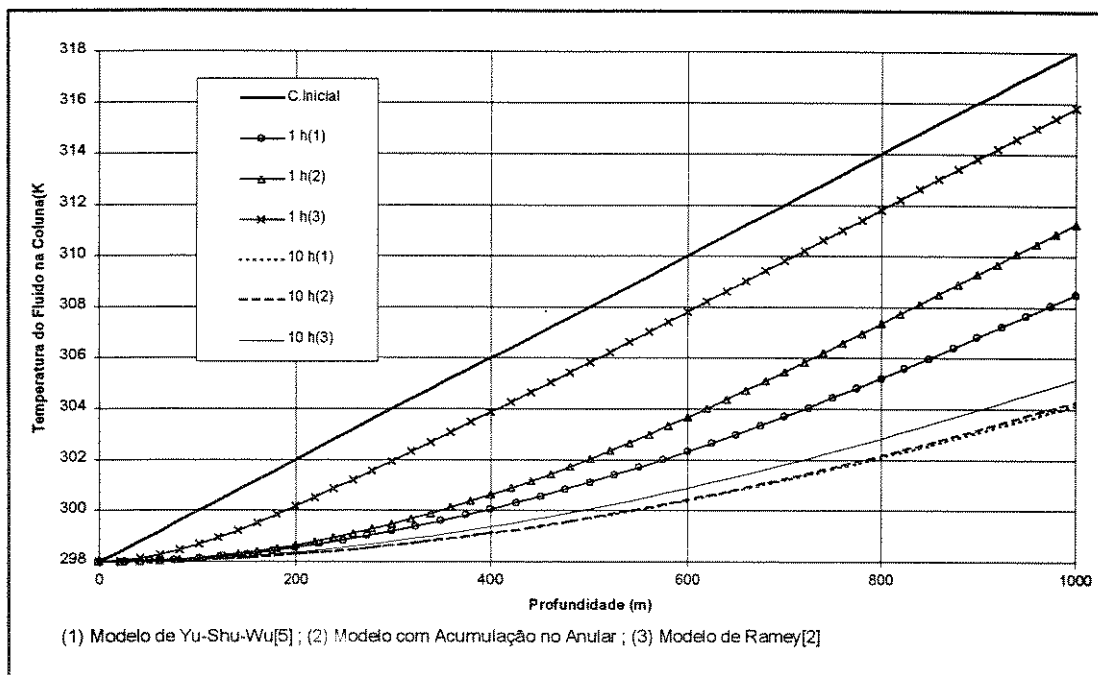


Figura 3.5: Comparação de Resultados ($T_{fc} \times z$)

Neste gráfico a linha cheia mais espessa representa a distribuição da temperatura na coluna no instante inicial. A comparação das curvas para os tempos de injeção de 1 e 10 horas mostra claramente a aproximação dos resultados no longo tempo e a divergência no curto tempo. Para o tempo de injeção de 1 hora, a temperatura do fluido é bastante influenciada pela acumulação de calor no anular e na coluna; para 10 horas, a concordância das curvas do modelo de Yu-Shu-Wu[5] com o modelo proposto indica que o termo de acumulação no anular tornou-se desprezível; por desprezar a influência da acumulação de calor no poço, a equação de Ramey[2] conduz a valores sobrestimados para curto tempo.

Nas operações de acidificação de matriz estamos interessados em determinar a temperatura do fluido à profundidade do intervalo canhoneado. Este valor de

temperatura é a condição de contorno interna para determinação da temperatura do ácido durante a injeção no reservatório. A Figura 3.6 apresenta o comportamento no tempo da temperatura do fluido na profundidade de 1000 metros, obtido com a equação de Ramey[2] , com o modelo de Yu-Shu-Wu[5] e com o modelo proposto no presente trabalho para vazão de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm).

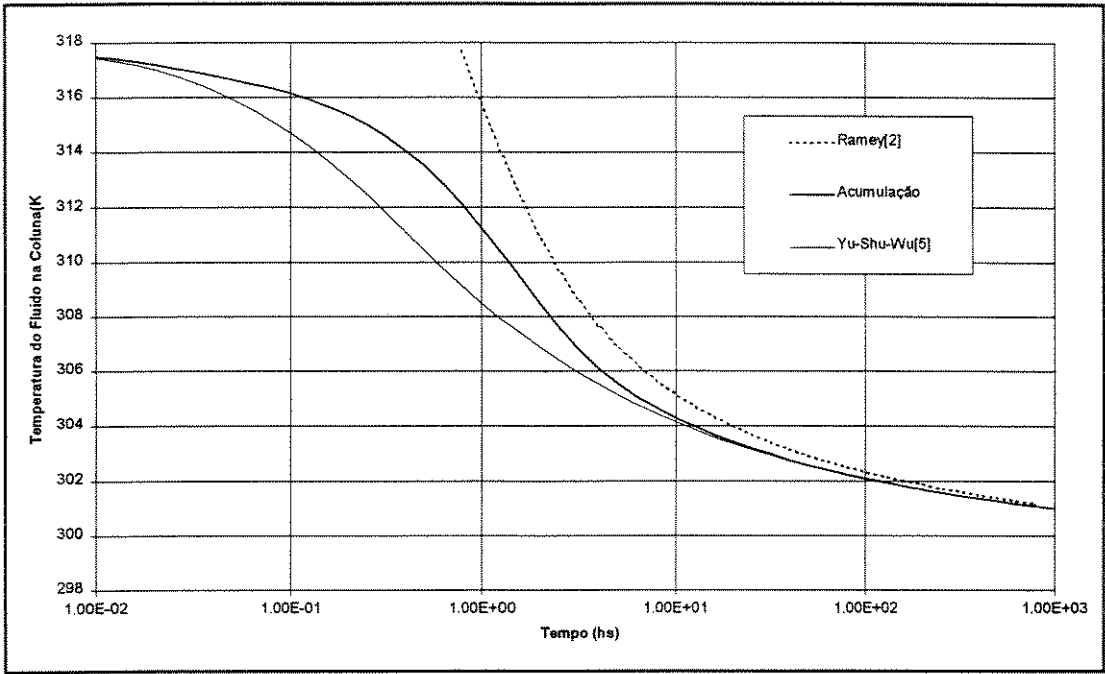


Figura 3.6: Comparação de Resultados (T_{fc} x t)

O gráfico na Figura 3.6 mostra a influência da acumulação de calor no anular no período entre 6 minutos e 1 hora e a inadequação da equação proposta por Ramey[2] para tempos inferiores a 100 horas. A medida que o tempo diminui, a curva correspondente a equação de Ramey[2] afasta-se dos outros modelos chegando a atingir valores inferiores a temperatura do ácido na superfície. Este resultado não obedece o princípio do equilíbrio térmico entre a formação e o fluido na coluna sendo fisicamente inconsistente. Matematicamente, esta situação ocorre quando o período de injeção é suficientemente curto para provocar a inversão do sinal do expoente da função exponencial na equação de Ramey[2] (Apêndice D, equação (D-20)).

Desta forma, este trabalho confirma as afirmações de outros autores (Yu-Shu Wu[5], Hasan[7]), recomendando a aplicação da equação de Ramey[2] para tempos maiores que 1 semana, onde o modelo da fonte linear com fluxo de calor constante

apresenta resultados bem próximos do modelo da fonte cilíndrica com fluxo de calor variável. Verifica-se também que o termo de acumulação de calor do anular pode modificar significativamente o valor da temperatura do fluido na coluna para tempos de injeção inferiores a 10 horas.

3.7. Considerações sobre os resultados Obtidos com a Inversão Numérica através do Algoritmo de Stehfest

O algoritmo de Stehfest[24] é uma ferramenta bastante utilizada para inversão numérica de funções do espaço de Laplace para o domínio do tempo, principalmente devido às características de facilidade de programação do algoritmo, tempo de respostas rápido (mesmo em microcomputadores pessoais), além de ser largamente utilizado nos problemas relacionados ao escoamento de fluido em meios porosos na Engenharia de Petróleo. No entanto, o algoritmo de Stehfest[24] não apresenta bons resultados para inversão de funções com variações rápidas na variável tempo. Uma análise detalhada deste problema pode ser encontrada em Junqueira[25].

O modelo proposto na seção 3.2 para o cálculo da temperatura na coluna não considera o efeito da condução de calor na direção do fluxo de fluido. Esta hipótese significa dizer que o fluido injetado terá uma frente de temperatura que avança com o tempo, desta forma, na posição da frente, podemos ter uma variação brusca de temperatura onde os resultados obtidos com o algoritmo de Stehfest[24] podem não ser satisfatórios. Yu-Shu Wu[5], afirma que o uso do algoritmo de Stehfest[24] para intervalos de tempo inferiores ao necessário para que a frente de temperatura chegue ao fundo do poço, conduz a resultados "pobres" para o valor da temperatura do fluido na coluna. Este problema pode ser contornado retirando-se do processo de inversão numérica com o algoritmo de Stehfest, a parcela da solução no domínio de Laplace correspondente a frente de injeção.

O procedimento matemático consiste em isolar na função transformada os termos exponenciais na variável "s" que são responsáveis pelas variações em degrau no domínio do tempo. Em termos matemáticos:

$$F(s) = \exp[-as]G(s) \quad (3.37)$$

Em seguida aplica-se o teorema do deslocamento no tempo:

$$\mathfrak{I}^{-1}[\mathbf{F}(s)] = \mathfrak{I}^{-1}[\exp[-as]\mathbf{G}(s)] \quad (3.38)$$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{H}(t-a)\mathbf{g}(t-a) \quad (3.39)$$

Desta forma, aplicamos a inversão numérica à função $G(s)$ com o tempo corrigido $(t-a)$ e o termo correspondente a frente de injeção é aplicado após o processo de inversão. Com este procedimento, o algoritmo de Stehfest[24] atuará sobre uma função que não possui termos correspondentes a degraus no domínio do tempo contornando o problema descrito anteriormente.

A Figura 3.7 apresenta a distribuição da temperatura do fluido na coluna para tempos inferiores à chegada da frente de temperatura ao fundo do poço para dados típicos de uma operação de acidificação de matriz de curta duração (Apêndice C). Os resultados são apresentados para vazão de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm) e tempos de 2.5, 5, 7.5 e 10 minutos, considerando a inversão numérica direta e com correção pelo teorema do deslocamento no tempo.

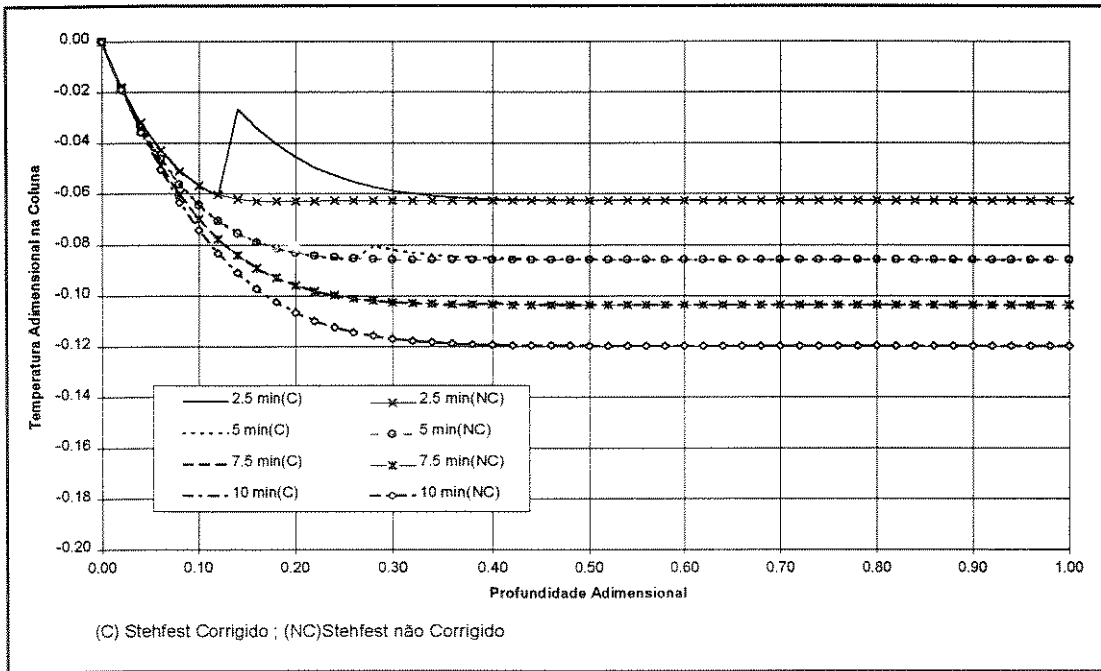


Figura 3.7: Influência do Algoritmo de Stehfest

Os resultados apresentados no gráfico indicam que para o caso de injeção de ácido à temperatura ambiente a frente de calor só tem efeito significativo para tempos de injeção menores que 5 minutos. No entanto, este efeito torna-se maior com o

aumento da diferença entre a temperatura de injeção e a condição inicial do fluido no poço e com a diminuição do fluxo de calor entre o anular e a coluna.

Desta forma é recomendável a utilização do algoritmo de Stehfest[24] com a correção pelo teorema do deslocamento no tempo na função transformada, proporcionando melhores resultados em todas as situações.

4. Temperatura do Fluido no Reservatório

Após atingir a profundidade dos canhoneados, o ácido penetra no reservatório e realiza trocas de calor com os componentes da zona de injeção e com as formações vizinhas. Para determinar a temperatura na qual o ácido avança dentro do meio poroso, são consideradas duas hipóteses básicas: gradiente de temperatura desprezível na direção perpendicular ao escoamento do ácido dentro do reservatório e o equilíbrio térmico instantâneo entre os fluidos e os sólidos que compõem a rocha. As vazões de líquido utilizadas apresentam valores típicos entre $2,65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,1 bpm) e $2,65 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (10 bpm), com volumes injetados da ordem de 20 m^3 (120 bbl). Nesta situação, o termo de condução na direção radial pode ser desprezado sem alterar significativamente a resposta de temperatura. O fluxo de calor para as formações vizinhas ao reservatório é computado considerando a condução de calor linear na direção perpendicular ao escoamento do fluido, considerando o coeficiente de expansão volumétrica do líquido e as perdas por fricção desprezíveis. Escoamento com deslocamento tipo pistão, fluido incompressível, temperatura de injeção, vazão de líquido e propriedades térmicas constantes complementam as hipótese do modelo para o cálculo da temperatura do fluido no reservatório.

4.1. Modelo de Lauwerier em Coordenadas Cilíndricas

As hipóteses descritas no parágrafo anterior foram utilizadas por Lauwerier[8] para o cálculo da temperatura em reservatório lineares submetidos à injeção de água aquecida. Para o caso de fluxo radial no meio poroso, a forma simplificada da equação da conservação da energia térmica aplicada ao volume de controle dr mostrado na Figura 4.1 em coordenadas cilíndricas é dada por:

$$h(\rho C_p)_{er} \frac{\partial T_{fr}}{\partial t} + \frac{\dot{m} C_{pfr}}{2\pi r} \frac{\partial T_{fr}}{\partial r} - k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad (4.1)$$

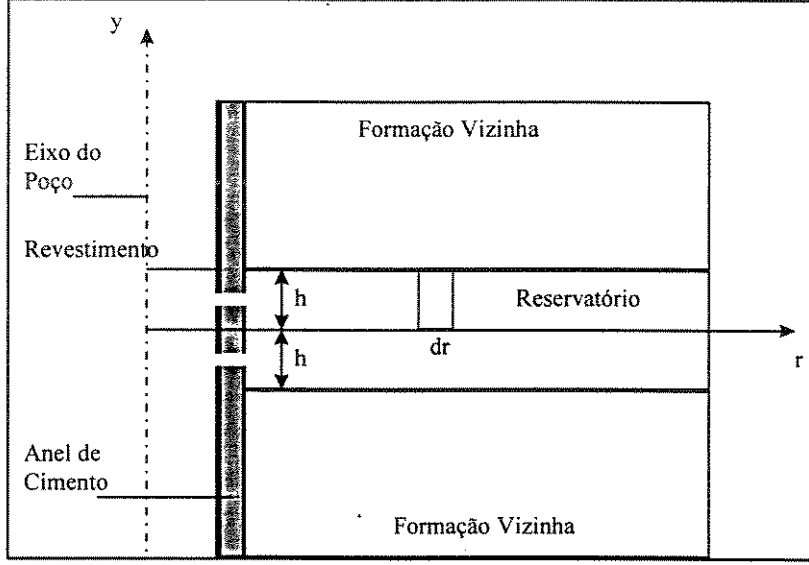


Figura 4.1: Modelo de Lauwerier para geometria radial

A condição inicial considera o reservatório não perturbado:

$$T_{fr}(0, r) = T_{res} \quad r > r_c \quad (4.2)$$

A condição de contorno interna considera temperatura de injeção constante no poço.

$$T_{fr}(t, r_c) = T_{il} \quad t > 0 \quad (4.3)$$

O acoplamento com as zonas vizinhas é estabelecido pela hipótese de continuidade do perfil de temperatura na interface da zona injetora com a formação vizinha.

$$T_{fr}(t, r) = T_s(t, y) \Big|_{y=h} \quad (4.4)$$

O comportamento da temperatura na formação vizinha é obtido através da equação da difusividade térmica para fluxo de calor linear na direção perpendicular ao fluxo de fluido no reservatório.

$$k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} = (\rho C_p)_{es} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (4.5)$$

Assumindo as condições de meio não perturbado no instante inicial, continuidade da temperatura na fronteira com o reservatório e temperatura inicial para pontos distantes da zona injetora, podemos obter a temperatura na formação vizinha em função da temperatura da zona submetida à injeção do ácido. As equações (4.6), (4.7) e (4.8) representam matematicamente a condição inicial e as condições de contorno para a equação diferencial da temperatura na formação vizinha.

$$T_s(0, y) = T_{res} \quad (4.6)$$

$$T_s(t, y)|_{y=h} = T_{fr}(t, r) \quad (4.7)$$

$$\lim_{y \rightarrow \infty} T_s(t, y) = T_{res} \quad (4.8)$$

O problema acoplado definido pelas equações 4.1 a 4.8 com as hipóteses de deslocamento em pistão no reservatório, vazão de líquido e propriedades térmicas constantes, representam a adaptação do modelo de Lauwerier[8] para o caso de fluxo radial na zona submetida à injeção do fluido. A Figura 4.1 apresenta esquematicamente a geometria para o modelo em coordenadas cilíndricas.

Conforme mostrado na Figura 4.1, o modelo também pressupõe a simetria da temperatura em relação às zonas inferior e superior. Esta hipótese não é verdadeira uma vez que a temperatura na formação vizinha inferior é normalmente maior que na formação vizinha superior. No entanto, devido aos pequenos valores dos gradientes geotérmicos e intervalos não muito espessos, a diferença da temperatura entre os extremos do intervalo é pequena e a hipótese da simetria não introduz erros significativos no cálculo da temperatura do fluido injetado.

4.2. Solução por Transformada de Laplace

De modo similar ao problema na coluna de produção, o uso da transformação de Laplace associada a variáveis adimensionais convenientes, facilita a resolução do problema apresentado no item precedente.

As variáveis adimensionais são definidas por:

$$T_{Df} = (T_f - T_{res}) / wL \quad (4.9)$$

para temperatura,

$$t_D = \frac{\alpha_s}{h^2} t \quad (4.10)$$

para o tempo,

$$r_D = \frac{r}{r_c} \quad (4.11)$$

para o raio, e

$$y_D = \frac{y}{h} \quad (4.12)$$

para distancia na direção perpendicular ao escoamento do fluido no reservatório.

Utilizando as variáveis adimensionais e aplicando a transformação de Laplace ao problema da temperatura na formação vizinha, obtemos a solução no domínio de Laplace:

$$\bar{T}_{Ds}(y_D, s) = \bar{T}_{Dfr}(r_D, s) \exp[(1 - y_D)\sqrt{s}] \quad (4.13)$$

Substituindo a solução para a temperatura na formação vizinha dada pela equação 4.13 na equação diferencial transformada para o problema da temperatura no reservatório e aplicando as condições de contorno, obtemos a solução no espaço de Laplace para temperatura do fluido no reservatório.

$$\bar{T}_{Dfr}(r_D, s) = \frac{T_{DiL}}{s} \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \quad (4.14)$$

com

$$W(s) = (\theta_{acr}s + \theta_{cr}\sqrt{s}) / 2 \quad (4.15)$$

onde T_{DiL} , θ_{acr} e θ_{cr} são constantes adimensionais dadas por:

$$T_{DiL} = (T_{iL} - T_{res}) / wL \quad (4.16)$$

$$\theta_{acr} = \frac{2\pi r_c^2 \alpha_s (\rho C_p)_{er}}{q_i h (\rho C_p)_{fr}} \quad (4.17)$$

$$\theta_{cr} = \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l h(\rho C_p)_{fr}} \quad (4.18)$$

A constante T_{DiL} representa a condição de contorno no poço, θ_{acr} representa o termo de acumulação de calor e θ_{cr} representa o termo de condução para formação vizinha; θ_{acr} e θ_{cr} estão normalizados em relação ao termo de convecção.

O desenvolvimento matemático das equações 4.13 e 4.14 é apresentado no Apêndice E. A solução no domínio do tempo para a temperatura do fluido no reservatório é obtida pela transformada de Laplace inversa da equação 4.14, sendo facilmente encontrada em Spiegel[26].

$$T_{Dfr}(t_D, r_D) = T_{DiL} \mathbf{H} \left[t_D - \frac{\theta_{acr}(r_D^2 - 1)}{2} \right] \operatorname{erfc} \left[\frac{\theta_{cr}(r_D^2 - 1)}{4\sqrt{t_D - \frac{\theta_{acr}(r_D^2 - 1)}{2}}} \right] \quad (4.19)$$

O gráfico da Figura 4.2 apresenta o perfil da temperatura do fluido em função da distância radial no reservatório para vários instantes de tempo, considerando uma vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,1 bpm). Os valores das constantes foram calculados a partir do conjunto de dados do Apêndice C.

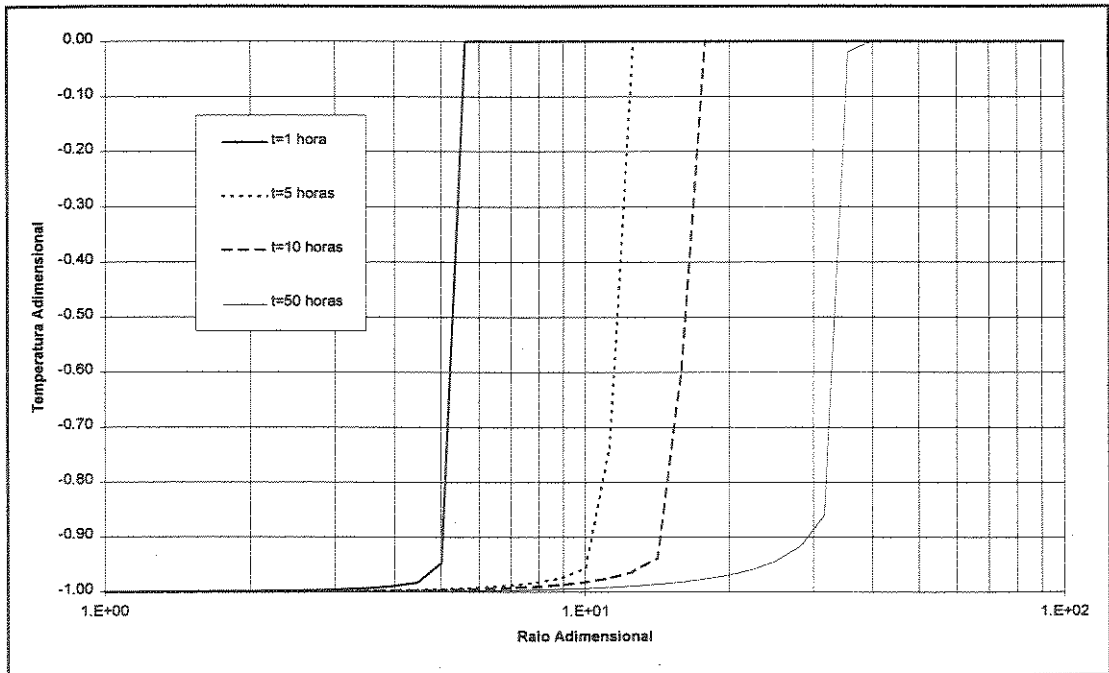


Figura 4.2: Distribuição da Temperatura no Reservatório ($T_{dfr} \times r_D$)

No gráfico da Figura 4.2 observamos a forma característica de uma frente de temperatura que avança com o tempo. Esta forma indica que nos pontos próximos ao poço, o comportamento da temperatura é pouco influenciado pela condução de calor para formação vizinha. O fenômeno predominante é o da convecção de calor associada ao fluxo de líquido injetado no reservatório, desta forma, quanto maior o valor da vazão menor a influência da troca de calor por condução nos pontos próximos ao poço.

Nos tratamentos de acidificação de matriz em arenitos, vários tipos de fluidos são injetados no reservatório, alguns na frente e outros atrás do ácido que irá promover a remoção do dano. Para avaliarmos a temperatura na qual as reações do ácido com os minerais irão ocorrer, precisamos conhecer a posição do volume do fluido base que contém o ácido à medida que ele avança dentro do reservatório. Esta posição pode ser determinada aplicando-se o balanço de massa ao líquido injetado no meio poroso. No caso de escoamento incompressível, a posição do volume do fluido base contendo o ácido é igual a posição da frente de injeção de líquido subtraída da distância radial correspondente aos fluidos injetados à sua frente. A Figura 4.3 mostra esquematicamente a posição do fluido base contendo ácido.

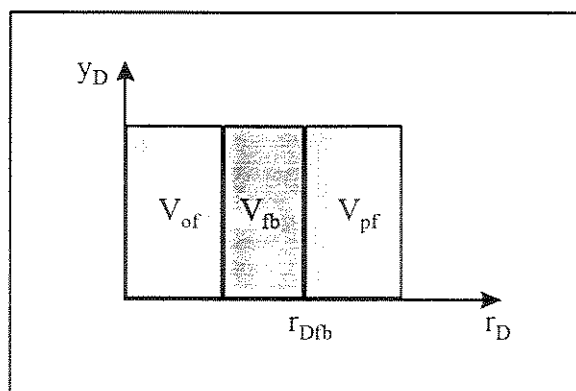


Figura 4.3: Posição da Frente de Fluido Base

A soma dos volumes dos fluidos à frente ("*preflush*"), dos fluidos atrás ("*overflush*") e do fluido base contendo o ácido é igual ao volume total injetado.

$$V_i = V_{pf} + V_{ac} + V_{of} \quad (4.20)$$

A partir do balanço de volume definido na equação 4.20, podemos calcular a posição da frente do fluido base contendo ácido.

$$r_{Dfb} = \left[\frac{(V_i - V_{pf})}{\pi h \phi (1 - s_{or}) r_c^2} + 1 \right]^{1/2} \quad (4.21)$$

Conhecendo-se o volume de cada tipo de fluido injetado no reservatório, podemos determinar a sua posição através de um procedimento semelhante ao aplicado para a frente do fluido base contendo o ácido.

O gráfico da Figura 4.4 apresenta o perfil da temperatura da frente de injeção do fluido base contendo ácido em função do tempo, considerando os dados típicos do Apêndice C para vários valores de vazão de injeção.

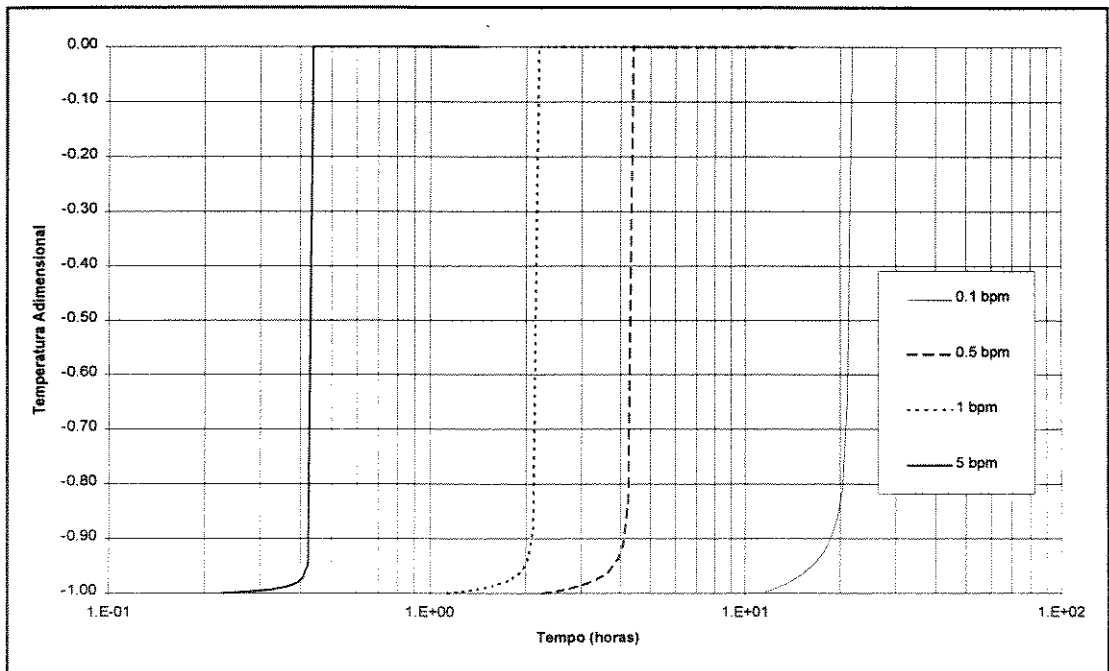


Figura 4.4: Temperatura da Frente de Injeção do Ácido ($T_{dfr} \times t$)

No gráfico, o ponto inicial de cada curva indica a entrada da frente de injeção do ácido no reservatório; o último ponto indica que a frente do fluido base atingiu a distância radial de 5 metros. Para todas as vazões de injeção verifica-se que existe um intervalo de tempo no qual a temperatura permanece muito próxima da temperatura de injeção. Verifica-se também que mesmo para vazão de $2,65 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,1 bpm) a influência da condução de calor é pequena para um raio de injeção de 5 metros. Fisicamente, isto significa dizer que a área de contato entre o reservatório e a

formação vizinha não possibilita uma contribuição significativa da condução de calor para raios menores que 5 metros.

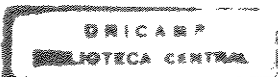
Outra característica importante é a profundidade na qual a frente de injeção do ácido sofre a mudança brusca de temperatura, passando da temperatura de injeção para temperatura do reservatório. A Tabela 4.1 mostra a posição e o tempo de injeção para o ácido atingir a temperatura do reservatório.

Tabela 4.1: Valores das Variáveis para Frente de Temperatura

Vazão de Injeção(bpm)	Espessura da Zona de Injeção(m)	Raio de Penetração(m)	Tempo de Injeção (hs)
0,1	3	2,11	21,87
0,5	3	2,11	4,39
1,00	3	2,11	2,187
5,0	3	2,11	0,439

O s dados da Tabela 4.1 indicam que a profundidade de injeção onde ocorre a frente de temperatura não depende da vazão de injeção, apenas do volume injetado, desta forma podemos concluir que quanto maior o volume de "*preflush*", maior será a profundidade onde ocorrerá a mudança brusca na temperatura da frente de injeção.

Os resultados apresentados indicam que para pequenos raios de injeção, a temperatura do fluido injetado é determinada predominantemente pelo termo de convecção. Considerando uma frente de fluido que penetra no reservatório com uma vazão constante, a posição da frente de temperatura depende apenas do volume de fluido injetado a sua frente.



5. Influência do Calor de Reação

O cálculo da temperatura do fluido no reservatório, através do modelo apresentado no Capítulo anterior, considera os termos de acumulação, convecção e perdas de calor para formação vizinha. No caso da injeção de ácido, a maioria das reações químicas com os minerais libera calor. Por sua vez, este calor gerado pode influenciar a temperatura do ácido injetado e, em seqüência, as próprias reações. Para quantificação precisa do calor gerado pelas reações químicas é necessária a resolução simultânea das equações do balanço da massa do ácido e dos minerais, além da equação da conservação da energia térmica no reservatório. Este acoplamento conduz a equações não lineares, cuja solução só pode ser obtida numericamente.

A proposta deste capítulo é avaliar a influência das reações químicas na temperatura do ácido injetado no meio poroso, utilizando hipóteses simplificadoras que conduzem a valores sobrestimados do calor gerado pela reação.

5.1. Modelos de Acidificação de Matriz em Arenitos

A determinação das concentrações dos ácidos e dos minerais em acidificações de matriz pode ser obtida através de modelos capilares que utilizam a descrição microscópica do meio poroso, ou por modelos macroscópicos que usam relações empíricas baseadas em experimentos de laboratório.

Atualmente, um dos modelos mais utilizados é o modelo macroscópico que considera a reação de um ácido e dois minerais no meio poroso. Neste modelo, os minerais existentes são agrupados em função da velocidade da reação com o ácido, formando um grupo de minerais equivalente para reações rápidas e outro para reações lentas. Hekim[15] utiliza o modelo macroscópico considerando vários ácidos e vários minerais no reservatório.

Basicamente, o modelo macroscópico consiste de dois conjuntos de equações: o primeiro conjunto relaciona as variações da concentração de cada ácido no meio poroso com a cinética da reação entre o ácido e os minerais; o segundo relaciona a variação no tempo da concentração de cada mineral com a cinética da reação do mineral com cada um dos ácidos presentes.

Neste estudo, consideraremos individualmente a reação de um ácido com um mineral no meio poroso utilizando a hipótese simplificadora da concentração do ácido constante atrás da frente de injeção de fluido. Fisicamente, esta hipótese significa dizer que o consumo de ácido pela reação química com o mineral é muito pequeno em relação à massa de ácido disponível no meio poroso. Em termos matemáticos, a concentração do ácido pode ser descrita por uma função de Heaviside multiplicada por uma constante.

$$C_A(r, t) = C_A \mathbf{H}[t - t_r] \quad (5.1)$$

onde t_r representa o tempo necessário para a concentração do ácido atingir a profundidade r dentro do reservatório. O valor de t_r é obtido aplicando-se o balanço de volume ao ácido injetado até a distância radial r no reservatório:

$$t_r = \frac{\phi(1 - s_{or})\pi h(r^2 - r_c^2)}{q_i} \quad (5.2)$$

A hipótese da concentração de ácido constante atrás da frente possibilita determinar a variação da concentração do mineral com o tempo, utilizando apenas o segundo tipo de equação do modelo macroscópico. Considerando apenas um ácido e um mineral, a equação para variação da concentração do mineral com o tempo é apresentada em Hekim[15]:

$$(1 - \phi) \frac{\partial(C_m - C_{mr})}{\partial(t - t_r)} = -R_{mb} \quad (5.3)$$

onde R_{mb} representa a velocidade de consumo do mineral e C_{mr} representa a concentração do mineral que não participa da reação por não entrar em contato com o ácido. A derivada em relação a $t - t_r$ indica que o mineral só é consumido após a chegada da frente de injeção de ácido.

A velocidade de consumo é relacionada à concentração do ácido e do próprio mineral através de uma relação empírica baseada em dados experimentais:

$$R_{mb} = e_{fm} C_A^\sigma (C_m - C_{mr}) \quad (5.4)$$

onde e_{fm} representa um parâmetro da cinética da reação que depende da área da superfície do mineral, da temperatura e da presença de outras espécies químicas no meio poroso. σ é a ordem da reação entre o ácido e o mineral, normalmente tem valores próximos a 1 para as reações dos ácidos no meio poroso. Obviamente, por se tratar de uma lei experimental, os valores de e_{fm} devem ser obtidos através de medidas em laboratório.

Considerando um meio poroso com concentração inicial de mineral igual a C_{mi} e substituindo as equações (5.4) e (5.1) na equação (5.3), obtemos o equacionamento matemático para concentração do mineral no meio poroso:

$$(1 - \phi) \frac{\partial(C_m - C_{mr})}{\partial(t - t_r)} = -e_{fm} C_A^\sigma \mathbf{H}[t - t_r](C_m - C_{mr}) \quad (5.5)$$

com:

$$C_m(r, t = 0) = C_{mi} \quad (5.6)$$

O problema de valor inicial especificado nas equações (5.5) e (5.6) é facilmente resolvido por separação de variáveis e podemos obter a solução para concentração do mineral no meio poroso durante a injeção do ácido.

$$C_m(r, t) = C_{mr} + (C_{mi} - C_{mr}) \exp \left[- \frac{e_{fm} C_A^\sigma \mathbf{H}t - t_r}{(1 - \phi)} \right] \quad (5.7)$$

A dedução detalhada da equação (5.7) é apresentada no Apêndice F.

A Figura 5.1 mostra os perfis das concentrações do ácido e do mineral no meio poroso para o modelo simplificado, considerando dois períodos de injeção t_1 e t_2 , com $t_2 > t_1$.

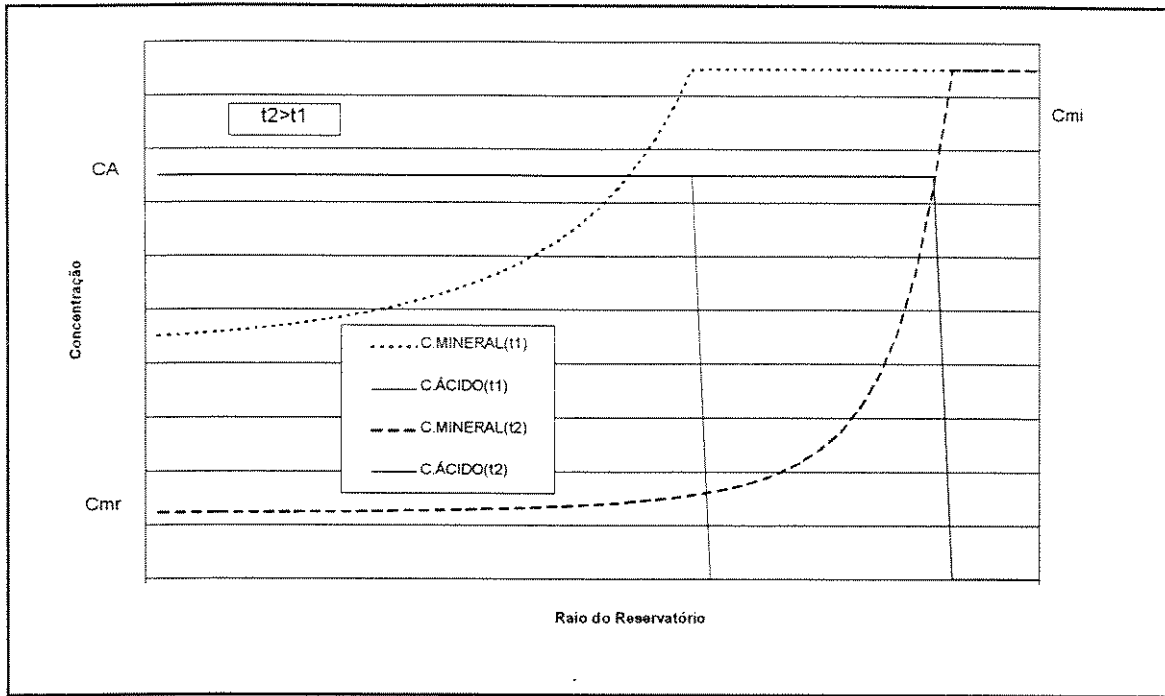


Figura 5.1: Concentração do Ácido e do Mineral no Meio Poroso

O perfil apresentado na Figura 5.1 indica que o consumo do mineral tem início após a chegada da frente de ácido e permanece até que a concentração do mineral atinja o valor residual C_{mr} .

5.2. Determinação da Constante de Velocidade da Reação - e_{fm}

Para utilizarmos a equação (5.7) na determinação da concentração do mineral, precisamos conhecer a constante de velocidade da reação. Esta constante depende da cinética da reação química entre o ácido e o mineral. As reações entre ácidos e minerais nos arenitos ocorrem na interface entre a fase fluida (ácido) e a fase sólida (mineral). A taxa de consumo do mineral depende da velocidade de transporte do ácido até a superfície do mineral e das características intrínsecas à reação química que ocorre na superfície sólida em contato com o ácido. A hipótese de concentração do ácido constante transfere o controle da velocidade da reação para os fenômenos físico-químicos na superfície do mineral.

Utilizando um aparato experimental constituído por um disco de mineral girando em alta velocidade dentro de um fluido com concentração de ácido conhecida, foram determinadas constantes que caracterizam as taxas de reação do ácido fluorídrico (HF) e ácido clorídrico (HCl) com vários minerais. Hill[17]

apresenta um resumo das equações para o cálculo da constante de velocidade de reação por unidade de área superficial do mineral, para reações de HF e HCl com vários minerais. O Apêndice G contém as fórmulas apresentadas em Hill[17], para a constante da velocidade de reação por unidade de área superficial do mineral.

Para o caso do meio poroso, a determinação da área do mineral em contato com o ácido é bastante difícil devido à grande variabilidade na forma, tamanho e interligação das partículas dos minerais que compõem a rocha. Motta[16] apresenta uma metodologia (baseada no modelo macroscópico de um ácido e dois minerais), para determinação dos parâmetros da reação entre o ácido e um mineral equivalente ao agrupamento de minerais do meio poroso cujas reações são consideradas rápidas. A metodologia consiste na injeção do ácido em uma das faces da amostra do meio poroso, conhecendo-se o valor da vazão de injeção. Ao mesmo tempo, faz-se a medição da concentração de ácido no fluido que sai na face oposta da amostra. Utilizando dados da geometria e das características petrofísicas da amostra pode-se determinar a constante de velocidade para o grupo de minerais rápidos.

Uma estimativa para a constante de velocidade de reação para cada mineral no meio poroso pode ser feita convertendo os valores obtidos nos experimentos com disco giratório para valores compatíveis com a equação (5.7). Nos experimentos com disco giratório a velocidade de consumo do mineral é calculada por Hill[17]:

$$R_m = E_{fm} A_{sm} C_A^\sigma \quad (5.8)$$

Para compatibilizar dimensionalmente os valores das taxas de consumo do mineral dados pelas equações (5.4) e (5.8), basta dividir o valor de R_m pelo volume da amostra no disco giratório:

$$R_{mb} = E_{fm} C_A^\sigma \frac{A_{sm}}{V_b} \quad (5.9)$$

Considerando a amostra no disco giratório como um meio poroso, e aplicando a definição de porosidade à equação (5.9), temos:

$$R_{mb} = (1 - \phi) E_{fm} C_A^\sigma \frac{A_{sm}}{V_{sr}} \quad (5.10)$$

Considerando a área superficial do mineral proporcional à massa do mineral existente na parte sólida do meio poroso:

$$R_{mb} = (1 - \phi) E_{fm} C_A^\sigma \frac{A_{sr}}{V_{sr}} \frac{m_m}{m_{sr}} \quad (5.11)$$

Multiplicando a equação (5.11) pelo peso molecular do mineral em kg, obtemos:

$$R_{mb} = (1 - \phi) E_{fm} C_A^\sigma \frac{A_{sr}}{V_{sr}} \frac{m_m}{m_{sr}} \frac{PM_m}{PM_m} \quad (5.12)$$

Substituindo a definição do valor da concentração do mineral (em kg-mol do mineral por metro cúbico de sólido), temos:

$$R_{mb} = (1 - \phi) PM_m E_{fm} C_m C_A^\sigma \frac{A_{sr}}{m_{sr}} \quad (5.13)$$

Substituindo o valor da massa do sólido pelo produto da massa específica pelo volume:

$$R_{mb} = (1 - \phi) PM_m E_{fm} \frac{A_{sr}}{\rho_{sr} V_{sr}} C_m C_A^\sigma \quad (5.14)$$

Considerando que na amostra do meio poroso do disco giratório, o ácido pode atingir toda a superfície do mineral ($C_{mr}=0$), a comparação da equação (5.14) com a equação (5.7) permite explicitar o valor da constante e_{fm} :

$$e_{fm} = \frac{(1 - \phi) PM_m E_{fm}}{\rho_{sr}} \frac{A_{sr}}{V_{sr}} \quad (5.15)$$

O termo A_{sr}/V_{sr} na equação (5.15) representa a relação entre a área e o volume de sólidos na amostra do meio poroso. A determinação desta relação é bastante complicada. No entanto, utilizando hipóteses simplificadoras para geometria do meio poroso é possível obter uma estimativa desta relação.

Considerando uma forma esférica para as partículas dos minerais e permitindo o contato do ácido com toda a sua área superficial, podemos escrever a área superficial do sólido em função das áreas dos 'n' minerais componentes do meio poroso.

$$A_{sr} = \sum_{j=1}^n \frac{3}{r_{mj}} \frac{\%W_{mj} m_{sr}}{\rho_{mj}} \quad (5.16)$$

Com as mesmas hipóteses podemos obter o volume total da parte sólida do meio poroso:

$$V_{sr} = \sum_{j=1}^n m_{sr} \frac{\%W_{mj}}{\rho_{mj}} \quad (5.17)$$

Considerando que a massa específica dos minerais no meio poroso é aproximadamente constante, a forma simplificada para a relação entre a área e o volume de sólidos no meio poroso é dada por:

$$\frac{A_{sr}}{V_{sr}} = 3 \sum_{j=1}^n \frac{\%W_{mj}}{r_{mj}} \quad (5.18)$$

Substituindo o termo do lado esquerdo da equação (5.18) na equação (5.15), podemos calcular o valor da constante e_{fm} com parâmetros previamente conhecidos:

$$e_{fm} = 3(1 - \phi) E_{fm} \frac{PM_m}{\rho_{sr}} \sum_{j=1}^n \frac{\%W_{mj}}{r_{mj}} \quad (5.19)$$

As hipóteses utilizadas sobrestimam o valor de e_{fm} para a reação no meio poroso, considerando que apenas uma parcela da área superficial do mineral entrará em contato com o ácido. No entanto, podemos ter uma avaliação significativa, em termos comparativos, da variação da concentração de cada mineral durante a injeção do ácido. Na equação (5.19), as percentagens em massa dos minerais devem ser avaliadas na condição inicial da amostra, uma vez que nos experimentos usados para determinar o valor de E_{fm} a concentração do mineral é mantida constante. Schechter[18], apresenta um procedimento semelhante para avaliar a fração da área superficial do sólido que é ocupada pelo mineral.

Utilizando as equações para E_{fm} e os valores dos pesos moleculares dos minerais apresentadas no Apêndice G, calculamos os valores de e_{fm} para os minerais do reservatório descrito no Apêndice C. A Tabela 5.1 apresenta os valores calculados.

Tabela 5.1: Constantes de Velocidade de Reação no Meio Poroso

Mineral	Ácido	$e_{fm} \left(\frac{m_{solido}^3}{m_{total}^3} \frac{1}{s(kgmol_{acido} / m_{acido}^3)} \right)$
Calcita	HCl	$3,89 \times 10^{-2}$
Feldspato de Potássio	HF	$9,03 \times 10^{-6}$
Caulinita	HF	$4,33 \times 10^{-8}$
Quartzo	HF	$3,15 \times 10^{-9}$

A Tabela 5.1 mostra os valores das constantes de velocidade de reação dos minerais para o meio poroso com composição mineralógica dada no Apêndice C à profundidade de 1000 metros. O valor da constante para a reação da calcita com o HCl indica que esta reação ocorre muito mais rápido que as demais. Verifica-se também que o feldspato de potássio reage muito mais rapidamente que o quartzo e a caulinita.

É importante frisar que quanto maior o valor de e_{fm} , maior será a velocidade de consumo do mineral no modelo com concentração de ácido constante. Conseqüentemente, os valores do calor gerado em função da variação da concentração do mineral estarão mais sobrestimados. Na situação real, a diminuição da concentração do ácido provoca uma redução na velocidade da reação, e por consequência, no calor gerado.

Definindo um valor adimensional para a concentração do mineral no meio poroso, dado por:

$$C_{Dm} = \frac{(C_m - C_{mr})}{(C_{mi} - C_{mr})} \quad (5.20)$$

Podemos utilizar os valores de e_{fm} dados na Tabela 5.1 para calcular a concentração de cada mineral durante a injeção de ácido no meio poroso descrito no Apêndice C. O gráfico da Figura 5.2 mostra a distribuição da concentração destes minerais em função do raio do reservatório para períodos de injeção de 3600 segundos(1 hora) e 36000 segundos(10 horas), com vazão de injeção de

$1,32 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (0,5 bpm). A curva relativa à calcita foi obtida para a reação com HCl a 15%; as demais curvas para a reação do mineral com HF a 3 %.

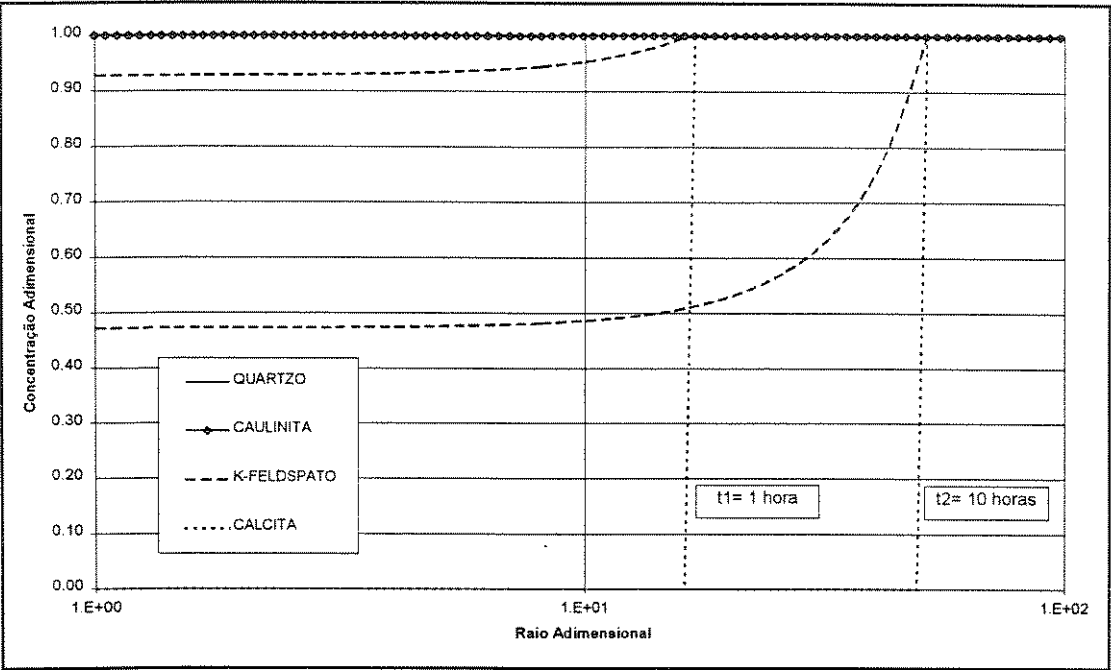


Figura 5.2: Concentração Adimensional dos Minerais no Reservatório

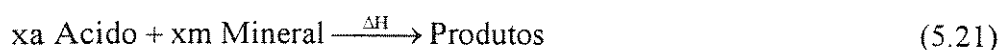
O formato das curvas para a calcita indica que a reação deste mineral com o HCl é quase instantânea; para o feldspato de potássio verifica-se também uma variação significativa na concentração do mineral após a chegada da frente de ácido. Em contrapartida, as concentrações de quartzo e de caulinita praticamente não sofreram variação para os intervalos de tempo considerados.

Para o caso real da concentração do ácido variável, podemos esperar um formato mais suave para as curvas do feldspato e da calcita.

Particularmente, a curva para a concentração da calcita indica que imediatamente após a chegada da frente do ácido toda massa de calcita é consumida. Este resultado é consequência da hipótese de concentração do ácido constante que superestima o consumo do mineral para as reações rápidas. Isto significa dizer que o controle da velocidade da reação é determinado pelas variações da concentração do ácido no meio poroso. Como o modelo simplificado não considera variações na concentração do ácido, podemos concluir que quanto mais rápida a velocidade da reação na superfície do mineral, mais superestimados estarão os resultados obtidos com o modelo simplificado em relação ao caso real.

5.3. O Modelo com Termo de Geração de Calor

A quantidade de calor liberada ou absorvida em uma reação química pode ser determinada através de experimentos de laboratório ou conhecendo-se a estequiometria e os dados termoquímicos dos elementos que participam da reação. Normalmente este calor é expresso em unidades de energia por unidade de massa das substâncias que participam da reação. Considerando a reação química balanceada:



podemos obter o calor associado a cada molécula-grama do mineral que participa da reação, dividindo o calor total liberado na reação pelo valor do coeficiente do mineral (x_m) na equação química balanceada.

$$\Delta H_m = \frac{\Delta H}{x_m} \quad (5.22)$$

Conhecendo-se o calor de formação de cada espécie química que participa da reação, é possível calcular o calor liberado ou absorvido na reação entre um ácido e um mineral existente no meio poroso. A Tabela 5.3.1 apresenta os valores do calor de reação para a calcita e quartzo em reações com o HCl e HF, respectivamente.

Tabela 5.2: Calor de Reação para Calcita e Quartzo

Reações		ΔH_m (J/kg-mol _{mineral}) ¹
A	$2 \text{ HCl}_{(aq)} + \text{CaCO}_{3(s)} \rightarrow \text{CaCl}_{2(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{CO}_{2(g)}$	$-9,71 \times 10^6$
B	$4 \text{ HF}_{(aq)} + \text{SiO}_{2(s)} \rightarrow \text{SiF}_{4(aq)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(l)}$	$-1,49 \times 10^8$
C	$6 \text{ HF}_{(aq)} + \text{SiO}_{2(s)} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_{6(aq)} + 2 \text{ H}_2\text{O}_{(l)}$	$-1,35 \times 10^8$

¹ Valor calculado utilizando dados termoquímicos obtidos em Perry[27], Hekim[28], Yshar[29]

É importante ressaltar que o calor de reação apresentado na Tabela 5.2 é bastante sensível ao estado de agregação das espécies químicas que participam da reação, especialmente à dissolução do ácido em solução aquosa.

Comparando as reações B e C percebe-se que a formação do ácido fluossilícico praticamente não modifica o calor da reação do ácido fluorídrico com o quartzo. Os

valores do calor de reação desta reações foram calculados com base no calor de formação a 298 K, sendo bem próximos dos valores medidos em laboratório e apresentados em Jonhson[30]

Os dados termoquímicos necessários ao cálculo do calor de reação para os demais minerais característicos da composição de arenitos não foram encontrados. Para estes minerais assumimos um valor próximo ao calor de reação do quartzo com o HF.

Conhecendo-se o valor da quantidade de calor por unidade de massa do mineral consumido na reação, podemos aplicar a equação da conservação da energia térmica ao volume do meio poroso de espessura Δr no reservatório (Figura 4.1). Utilizando as hipóteses simplificadoras do capítulo anterior, temos:

$$Q_{in} = q_l (\rho C_p)_{fr} (T_{fr} - T_{ref})_r \Delta t \quad (5.23)$$

correspondente à quantidade de calor que entra no volume de controle no intervalo de tempo Δt ;

$$Q_{out} = q_l (\rho C_p)_{fr} (T_{fr} - T_{ref})_{r+\Delta r} \Delta t - 2\pi r k_s \Delta r \Delta t \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{y=h} \quad (5.24)$$

representando a quantidade de calor que sai do volume de controle no intervalo de tempo Δt ;

$$Q_{ger} = 2\pi r h \Delta r (1 - \phi) \Delta H_m [(C_m - C_{mi})_{t+\Delta t} - (C_m - C_{mi})_t] \quad (5.25)$$

correspondente ao calor gerado pela reação no intervalo de tempo Δt e

$$Q_{ac} = 2\pi r h \Delta r (\rho C_p)_{er} [(T_{fr} - T_{ref})_{t+\Delta t} - (T_{fr} - T_{ref})_t] \quad (5.26)$$

representando a acumulação de calor no volume de controle.

Aplicando a equação do balanço da energia térmica ao volume de controle:

$$Q_{in} - Q_{out} + Q_{ger} = Q_{ac} \quad (5.27)$$

Substituindo os valores dos termos dados pelas equações (5.23) a (5.26) na equação (5.27) e aplicando o limite para Δt e Δr tendendo a zero, obtemos a equação diferencial para o modelo com geração de calor.

$$h(\rho C_p)_{er} \frac{\partial T_{fr}}{\partial t} + \frac{\dot{m} C_{pfr}}{2\pi r} \frac{\partial T_{fr}}{\partial r} - k_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{y=h} + (1-\phi) h \Delta H_m \frac{\partial C_m}{\partial t} = 0 \quad (5.28)$$

Na equação (5.28) é importante ressaltar que o valor de ΔH_m deve ser computado negativamente uma vez que o valor da derivada da concentração do mineral em relação ao tempo também é negativa.

Na seção 5.1 determinamos a concentração do mineral para o modelo simplificado de acidificação de matriz em arenitos (Equação (5.7)). Derivando esta equação em relação ao tempo, temos:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = - \frac{e_{fm} C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr})}{(1-\phi)} \exp \left[- \frac{e_{fm} C_A^\sigma (t - t_r)}{(1-\phi)} \right] \mathbf{H}[t - t_r] \quad (5.29)$$

Substituindo o valor de $\frac{\partial C_m}{\partial t}$ dado pela equação (5.29) na equação (5.28):

$$h(\rho C_p)_{er} \frac{\partial T_{fr}}{\partial t} + \frac{\dot{m} C_{pfr}}{2\pi r} \frac{\partial T_{fr}}{\partial r} - k_s \left. \frac{\partial T_s}{\partial y} \right|_{y=h} + \quad (5.30)$$

$$- e_{fm} C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr}) h \Delta H_m \exp \left[- \frac{e_{fm} C_A^\sigma (t - t_r)}{(1-\phi)} \right] \mathbf{H}[t - t_r] = 0$$

Comparando as equações para o balanço de energia nos modelos com e sem geração de calor (equações (5.30) e (4.1), respectivamente), podemos pensar que o termo de geração é independente da temperatura do ácido no reservatório. Este raciocínio não é correto, uma vez que a constante de velocidade da reação e_{fm} é bastante sensível à temperatura na qual a reação química ocorre. No entanto, a resolução do modelo com geração considerando e_{fm} uma função da temperatura é uma tarefa bastante complicada. Para contornar este problema, sugerimos o cálculo do valor da constante de velocidade na temperatura inicial do reservatório. Este procedimento conduz a um valor sobrestimado para o termo de geração de calor considerando que a temperatura varia entre um valor máximo, igual à temperatura do reservatório, e um valor mínimo, igual à temperatura de injeção do fluido.

5.4. Solução por Transformada de Laplace

Considerando o equacionamento para o modelo sem geração descrito no Capítulo IV, a inclusão do termo de geração de calor modifica apenas a equação diferencial do balanço de calor no reservatório. Desta forma, podemos usar um processo semelhante ao aplicado para resolução do modelo sem geração. Utilizando as variáveis adimensionais definidas na Seção 4.2 e aplicando a transformação de Laplace, obtemos a solução transformada para o problema da temperatura do fluido no reservatório considerando o termo de geração de calor.

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfr}(r_D, s) = & \frac{T_{DIL}}{s} \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \\ & + \frac{\theta_g}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \{ \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \} \end{aligned} \quad (5.31)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (5.31) é a solução para o modelo sem geração de calor apresentada na Seção 4.2; o segundo termo representa a influência do calor gerado pela reação química entre o ácido e o mineral. As constantes adimensionais na equação (5.31) são dadas por:

$$\theta_g = \frac{2\pi r_c^2 h}{q_l(\rho C_p)_{fr}} \frac{e_{fm} C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr}) \Delta H_m}{wL} \quad (5.32)$$

$$\theta_p = \frac{e_{fm} C_A^\sigma h^2}{(1 - \phi) \alpha_s} \quad (5.33)$$

$$\theta_r = \frac{\phi(1 - s_{or}) \pi r_c^2 \alpha_s}{q_l h} \quad (5.34)$$

A constante θ_g representa a relação entre o calor gerado na reação e o calor transportado por convecção devido à injeção do ácido. θ_p representa a velocidade de consumo do mineral e θ_r representa o tempo adimensional necessário para se injetar o volume do cilindro de raio r_c e altura h dentro do reservatório. A função $W(s)$ é a mesma definida na seção 4.2. A dedução detalhada da solução para o modelo com geração de calor encontra-se no Apêndice H.

5.5. Inversão Numérica com o Algoritmo de Stehfest

Considerando que os valores absolutos da temperatura adimensional variam entre 0 e 1 podemos quantificar a influência do termo de geração invertendo numericamente apenas a parcela da solução correspondente ao calor gerado.

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfrg}(r_D, s) &= \frac{\theta_g}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \\ &\times \{ \exp[(1 - r_D^2)W(s)] - \exp[s(1 - r_D^2)\theta_r] \} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Na equação(5.35), os termos exponenciais na variável s significam frentes de temperatura que avançam com o passar do tempo. Conforme analisado no Capítulo III, para obtermos bons resultados com o algoritmo de Stehfest[24] nestes tipos de funções, precisamos retirar da equação transformada os termos exponenciais em s . Utilizando o procedimento descrito na Seção 3.3, aplicamos a inversão numérica à equação sem os termos exponenciais em s .

O gráfico da Figura 5.3 apresenta as variações na temperatura do fluido no reservatório devido à reação do ácido com os minerais para o reservatório descrito no Apêndice C. Para a calcita, foi considerada a reação com o HCl a 15%; para os outros minerais foi considerada a reação com HF a 3%. Em todos os casos a vazão de injeção foi de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm).

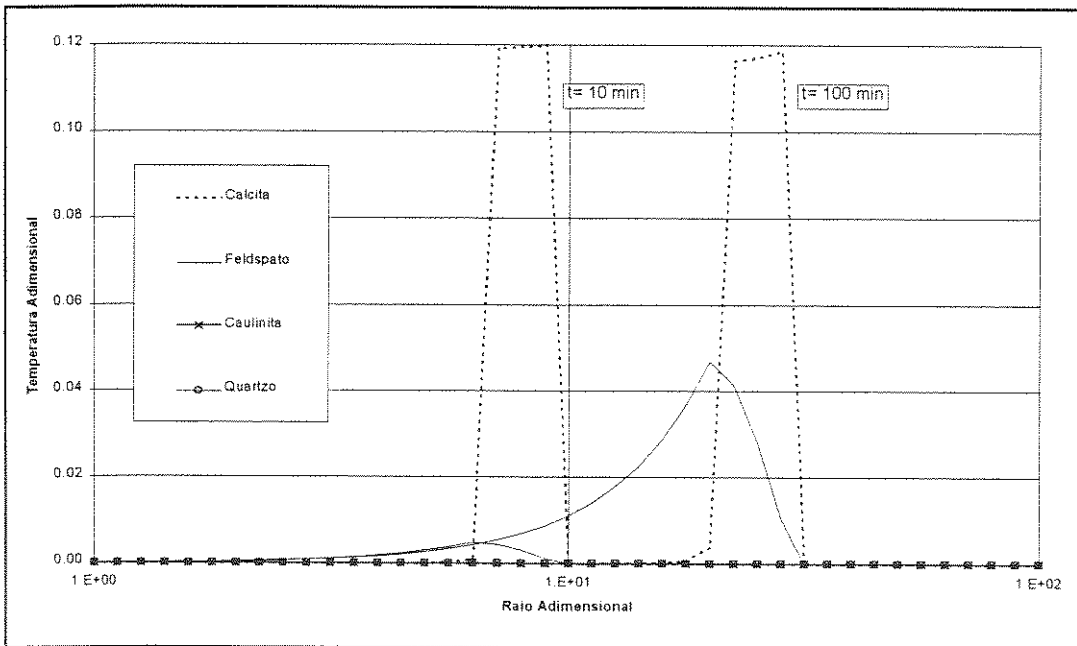


Figura 5.3: Influência da Geração de Calor na Temperatura do Fluido

Lembrando que o módulo da temperatura adimensional para o caso sem geração varia entre zero e um, a observação do gráfico indica que a contribuição dos minerais que reagem com o HF (feldspato, caulinita e quartzo) é praticamente desprezível. Para a calcita, o gráfico indica uma contribuição de aproximadamente 12% no valor da temperatura adimensional; este resultado é um valor bastante superestimado em consequência da utilização do modelo simplificado para o caso de reações tão rápidas quanto as da calcita.

Nas curvas apresentadas na Figura 5.3, o valor do calor de reação para a caulinita e o feldspato foi considerado igual ao calor de reação de HF com quartzo. Obviamente, se os valores reais para o calor de reação destes minerais forem maiores, as suas contribuições serão proporcionalmente maiores. Para visualizar a influência da incerteza neste parâmetro, o gráfico da Figura 5.4 apresenta o perfil da temperatura do fluido no reservatório considerando um aumento de dez vezes no calor de reação para os minerais que reagem com o HF (quartzo, caulinita e feldspato). No gráfico são apresentados os perfis de temperatura para os tempos de injeção de 600s (10 minutos) e 6000s (100 minutos), para vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm) e para o reservatório caracterizado no Apêndice C.

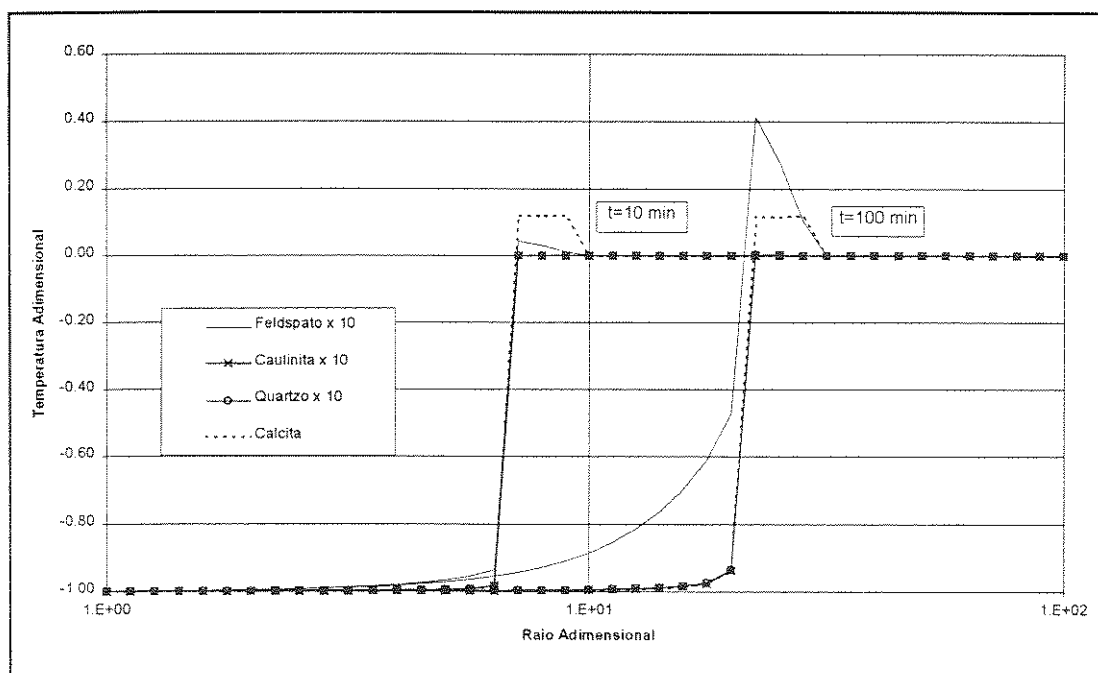


Figura 5.4: Temperatura do Fluido - Modelo com Geração

Os perfis apresentados indicam que mesmo para um calor de reação uma ordem de grandeza maior, o quartzo e a caulinita não afetam a temperatura do fluido; para o feldspato verifica-se uma influência máxima próxima de 40%. Comparando os resultados dos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4, verificamos que a diferença na contribuição do feldspato é proporcional ao aumento dado ao valor do calor da reação. Este resultado poderia ser previsto pela análise da expressão da constante que caracteriza a geração de calor θ_g . Em termos reais, podemos esperar valores do calor de reação para a caulinita e o feldspato próximos ao do quartzo, porém na hipótese deste valor ser 100 % maior, a contribuição do feldspato seria de apenas 8% no valor da temperatura do ácido injetado.

Considerando que as diversas hipóteses simplificadoras utilizadas neste modelo tendem a superestimar a contribuição do termo de geração, é razoável esperarmos uma contribuição significativamente menor para o caso real. Com base neste raciocínio, o calor gerado pelas reações dos minerais com HF não deve provocar efeito significativo na temperatura do fluido. Para avaliar a influência da reação de HCl com a calcita é recomendável a utilização de um modelo que considere o consumo do ácido pela reação.

6. Acoplamento dos Problemas

Os modelos propostos nos Capítulos IV e V possibilitam a resolução do problema da temperatura do ácido no reservatório utilizando um valor constante para temperatura do ácido no poço. Conforme mostrado no Capítulo III, a temperatura do ácido no poço à profundidade do reservatório sofre variações significativas com o tempo. Evidentemente, para obtermos melhores resultados para a temperatura do ácido no reservatório devemos resolver o problema considerando estas variações.

6.1. O Princípio da Superposição

No problema da temperatura do ácido no reservatório, a temperatura do ácido no poço corresponde à condição de contorno interna ($r_D=1$), necessária à resolução da equação diferencial para o problema. Levando-se em conta a característica linear das equações diferenciais e das condições de contorno apresentadas nos Capítulos IV e V, podemos aplicar o princípio da superposição (Bear [31]) e obter a solução para o caso da temperatura do poço variando com o tempo.

Supondo que a temperatura do ácido no poço seja um função do tempo representada pela Figura 6.1.

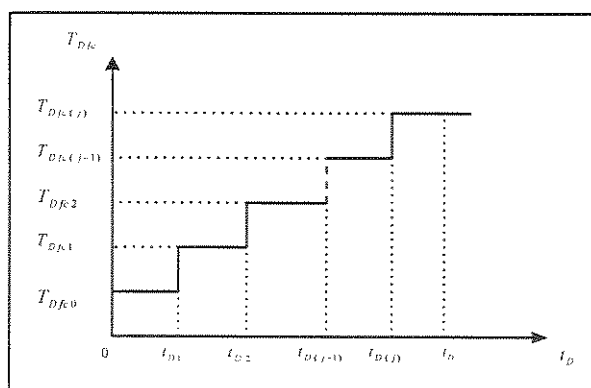


Figura 6.1: Esquema para Temperatura Variável no Poço

Aplicando o princípio da superposição no tempo ao problema da temperatura no reservatório com a condição de contorno interna ($r_D=1$) dada pela curva na Figura 6.1, obtemos para o tempo genérico t_D :

$$T_{Dfrv} = T_{Dfc0} T_{Dfru}(t_D, r_D) + \left[\sum_{j=1}^n (T_{Dfc(j)} - T_{Dfc(j-1)}) T_{Dfru}(t_D - t_{D(j)}, r_D) \right] + T_{Dfrg} \quad (6.1)$$

Na equação (6.1), T_{Dfrv} é a solução do problema para temperatura no reservatório considerando a condição de contorno interna dada pela curva na Figura 6.1; $T_{Dfc(j)}$ são os valores discretos da temperatura do fluido na coluna, T_{Dfru} representa a solução do problema no reservatório para temperatura do fluido na coluna constante e com valor unitário ($T_{DiL}=1$ na equação(4.19)) e T_{Dfrg} representa a contribuição do termo de geração de calor (independente da condição de contorno interna).

Para uma variação contínua na temperatura do fluido na coluna, podemos aplicar a equação (6.1) considerando intervalos de tempo infinitesimais. Neste caso, a somatória na equação (6.1) transforma-se numa integral de convolução:

$$T_{Dfrv} = T_{Dfc0} T_{Dfru}(t_D, r_D) + \int_0^{t_D} \frac{dT_{Dfc}(\tau_D, r_D)}{d\tau_D} T_{Dfru}(t_D - \tau_D, r_D) d\tau_D + T_{Dfrg} \quad (6.2)$$

As soluções para o domínio do tempo apresentadas nas equações (6.1) e (6.2) pressupõem o conhecimento de todas as funções envolvidas. No Capítulo III verificamos que o comportamento da temperatura do fluido na coluna tem solução conhecida apenas no espaço de Laplace. Da mesma forma, no Capítulo V, não conseguimos encontrar a solução analítica para a contribuição do termo de geração no domínio do tempo. Considerando estas limitações, aplicaremos a mesma metodologia dos Capítulos anteriores para obtermos a solução para o problema acoplado.

6.2. Solução por Transformada de Laplace

No Capítulo III, determinamos a temperatura do fluido na coluna como uma função contínua do tempo, desta forma, aplicando a transformação de Laplace à equação (6.2), obtemos:

$$\bar{T}_{Dfrv} = T_{Dfc0} \bar{T}_{Dfru} + [s\bar{T}_{Dfc} - T_{Dfc0}] \bar{T}_{Dfru} + \bar{T}_{Dfrg} \quad (6.3)$$

Considerando a definição da variável adimensional para temperatura, temos:

$$T_{Dfc0} = 0 \quad (6.4)$$

Substituindo na equação (6.3):

$$\bar{T}_{Dfrv} = s\bar{T}_{Dfc}\bar{T}_{Dfru} + \bar{T}_{Dfrg} \quad (6.5)$$

A equação (6.5) é a solução transformada para o problema da temperatura do ácido no reservatório, considerando a temperatura do ácido na coluna uma função contínua do tempo.

As equações para $\bar{T}_{Dfc}$, $\bar{T}_{Dfru}$ e $\bar{T}_{Dfrg}$ foram deduzidas nos Capítulos III, IV e V respectivamente, no entanto, objetivando simplificar a resolução de cada problema particular foram utilizadas variáveis adimensionais diferentes para o tempo. Na solução do problema acoplado através da equação (6.5), devemos utilizar uma variável adimensional única para a variável tempo. Considerando a adimensionalização por um tempo genérico t_{adm} , temos:

$$t_D = t / t_{adm} \quad (6.6)$$

Para esta nova adimensionalização do tempo, a solução transformada e as constantes para o problema da temperatura do ácido na coluna passam a ser:

$$\bar{T}_{Dfc}(s, r_D) = \frac{T_{Dimj}}{s} e^{-A(s)z_D} + \frac{e^{-A(s)z_D}}{sA(s)} - \frac{1}{sA(s)} \quad (6.7)$$

$$A(s) = \left[s\theta_{acc} + \frac{1}{\gamma(s)} \left(\frac{\theta_{cc}}{\lambda(s)} + s\theta_{aca} \right) \right] \quad (6.8)$$

$$\lambda(s) = \frac{\sqrt{\alpha_D s} \mathbf{K}_1(\sqrt{\alpha_D s})}{[\mathbf{K}_0(\sqrt{\alpha_D s}) + \phi \sqrt{\alpha_D s} \mathbf{K}_1(\sqrt{\alpha_D s})]} \quad (6.9)$$

$$\alpha_D = \frac{r_c^2}{\alpha_{es} t_{adm}} \quad (6.10)$$

$$\gamma(s) = 1 + \frac{k_s}{r_{it} U_{rit} \lambda(s)} + s \frac{(r_{ir}^2 - r_{et}^2)(\rho C_p)_{fa}}{2r_{it} U_{rit} \lambda(s)} \frac{1}{t_{adm}} \quad (6.11)$$

$$\theta_{acc} = \frac{1}{t_{adm}} \frac{\pi r_{it}^2 L}{q_l} \quad (6.12)$$

$$\theta_{aca} = \frac{1}{t_{adm}} \frac{\pi(r_{ir}^2 - r_{et}^2) L}{q_l} \frac{(\rho C_p)_{fa}}{(\rho C_p)_{fcc}} \quad (6.13)$$

Da mesma forma, obtemos a solução transformada para o problema no reservatório e para o termo de geração de calor:

$$\bar{T}_{Dfru}(r_D, s) = \frac{1}{s} \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfrg}(r_D, s) &= \frac{\theta_g}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \times \\ &\{\exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)]\} \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$W(s) = (s\theta_{acr} + \theta_{cr}\sqrt{s}) / 2 \quad (6.16)$$

$$\theta_{acr} = \frac{2\pi h r_c^2}{q_l t_{adm}} \frac{(\rho C_p)_{er}}{(\rho C_p)_{fr}} \quad (6.17)$$

$$\theta_{cr} = \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l (\rho C_p)_{fr} h} \sqrt{\alpha_{Dr}} \quad (6.18)$$

$$\alpha_{Dr} = \frac{h^2}{\alpha_{es} t_{adm}} \quad (6.19)$$

$$\theta_g = \frac{2\pi h r_c^2}{q_l (\rho C_p)_{fr}} \frac{e_{fm} \Delta H_m C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr})}{wL} \quad (6.20)$$

$$\theta_p = \frac{e_{fm} C_A^\sigma t_{adm}}{(1 - \phi)} \quad (6.21)$$

$$\theta_r = \frac{(1 - s_{or}) \phi h \pi r_c^2}{q_l t_{adm}} \quad (6.22)$$

$$\theta_r = \frac{(1 - s_{or})\phi h \pi r_c^2}{q_l t_{adm}} \quad (6.22)$$

Os detalhes da obtenção das equações (6.7) a (6.13), para temperatura do fluido na coluna, (6.14) a (6.19), para temperatura do fluido no reservatório, e (6.20) a (6.22), para o termo de geração de calor, estão descritos nos Apêndices A, E e H respectivamente.

É importante ressaltar que a mudança na variável adimensional altera apenas os valores das constantes que fazem parte da solução de cada problema, no entanto a expressão final de cada solução permanece inalterada.

Substituindo os valores de $\bar{T}_{Dfc}$, $\bar{T}_{Dfu}$ e $\bar{T}_{Dfg}$ dados respectivamente pelas equações (6.7), (6.14) e (6.15) na equação (6.5) temos:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfv}(r_D, s) = & \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \times \\ & \left[\left(\frac{T_{Dinj}}{s} + \frac{1}{sA(s)} \right) \exp(-A(s)z_D) - \frac{1}{sA(s)} \right] + \\ & \frac{\theta_s}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \{ \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \} \end{aligned} \quad (6.23)$$

A equação (6.23) é a solução transformada para o problema da temperatura do ácido no reservatório considerando a geração de calor e as variações no tempo da temperatura do fluido na coluna.

Aplicando a inversão numérica com o algoritmo de Stehfest[24] à equação 6.23, podemos obter a solução no domínio do tempo.

A inspeção da equação (6.23) revela a existência de termos exponenciais na variável de Laplace. Neste caso (conforme apresentado na Seção 3.7), devemos aplicar o teorema do deslocamento no tempo da transformação de Laplace e retirar os termos exponenciais do processo de inversão numérica com o algoritmo de Stehfest[24].

O gráfico da Figura 6.2 apresenta o perfil da temperatura para injeção de HCl a 15%, com vazão de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm), considerando os dados típicos do Apêndice C.

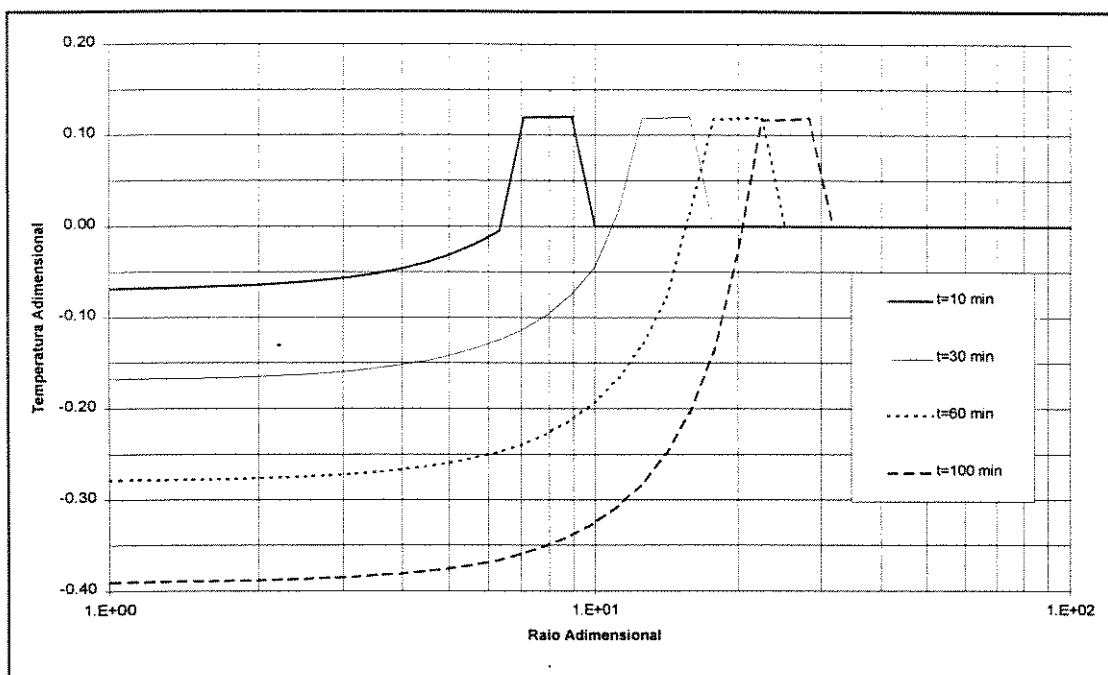


Figura 6.2: Temperatura do HCl(15%) no Reservatório - Problema Acoplado

No gráfico o termo de geração leva em conta a reação do HCl com a calcita. Neste gráfico podemos observar que, próximo à frente de injeção de líquido, o comportamento da temperatura é dominado pelo efeito da geração de calor. Relembramos que este efeito está superestimado pelas hipóteses simplificadoras adotadas no Capítulo V. Para $r_D < 10$ ($r < 0,9$ m), quase não existe diferença entre a temperatura do fluido na coluna e a temperatura do ácido no reservatório.

No Capítulo V, verificamos que as reações do HF a 3% com os minerais quartzo, feldspato de potássio e caulinita não têm efeito significativo sobre a temperatura do ácido no reservatório. Em termos relativos, o feldspato apresenta uma contribuição significativamente maior que os demais. O gráfico da Figura 6.3 apresenta o perfil da temperatura do HF a 3% no reservatório, considerando a reação com o feldspato de potássio e uma vazão de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm); os demais dados foram obtidos do Apêndice C.

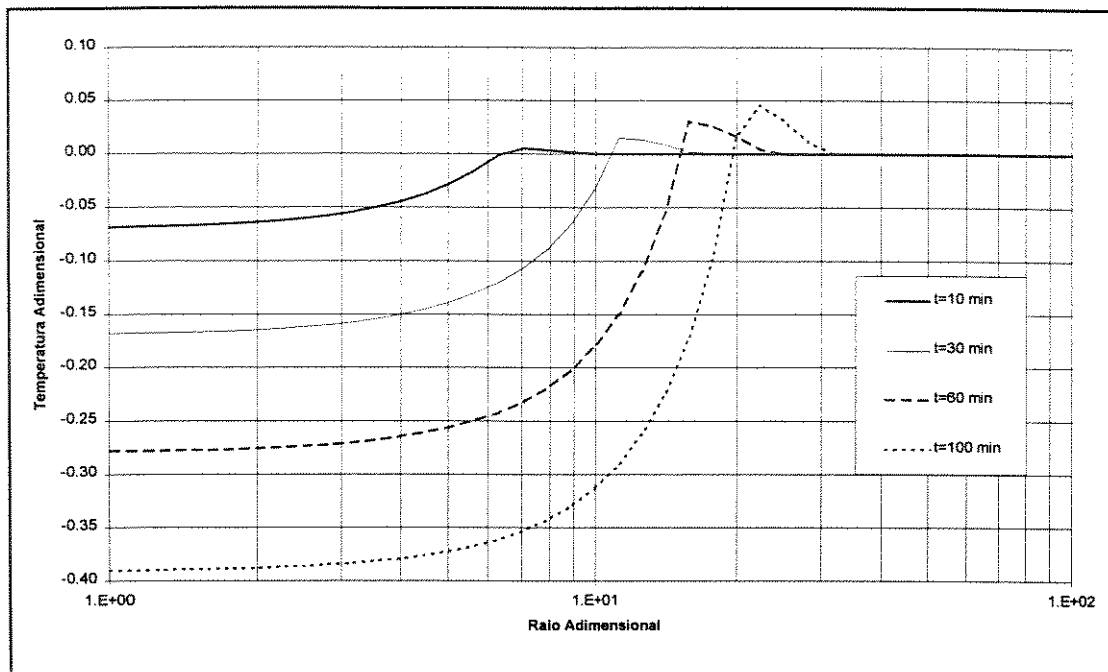


Figura 6.3: Temperatura do HF(3%) no Reservatório - Problema Acoplado

O gráfico da Figura 6.3 apresenta o mesmo comportamento do gráfico da Figura 6.2 para $r_D < 10$. Nos pontos próximos à frente de injeção de líquido, verificamos que o termo de geração é praticamente desprezível.

A comparação dos gráficos indica que para avaliarmos a temperatura durante a injeção simultânea de HF e HCl podemos considerar apenas a geração de calor da reação do HCl com a calcita.

Outro fato importante é a verificação de que a maior parte do ácido injetado está a uma temperatura de valor próximo ao da temperatura do fluido na coluna na profundidade do reservatório. Além disso, nos gráficos das Figuras 6.2 e 6.3, não existe nenhum tipo de fluido injetado à frente dos ácidos, ou seja, o ácido penetra no reservatório no momento em que se inicia a injeção na superfície. Na prática, podemos ter um volume considerável de fluido à frente do ácido, modificando o posicionamento do termo de geração de calor e conseqüentemente o perfil da temperatura do ácido no reservatório.

7. Injeção Sequencial de Fluidos

No Capítulo VI obtivemos uma equação para o cálculo da temperatura do ácido no reservatório considerando os efeitos da convecção, acumulação, trocas de calor com a formação vizinha, geração de calor e variações na temperatura do fluido na coluna. É importante observar que a equação (6.23) foi obtida para injeção de um único fluido submetido à condição inicial dada pelo gradiente geotérmico.

Na situação real, as operações de acidificação de matriz em arenitos envolvem a injeção de vários tipos de fluido. Um exemplo típico é o tratamento dado pela seguinte seqüência de fluidos: injeção do fluido existente na coluna de produção, solventes orgânicos, HCl a 5 % em massa, HCl a 15 % em massa, o tratamento principal (normalmente uma mistura de HF e HCl) e HCl a 5% em massa.

Para aplicarmos a equação (6.23) ao caso real da injeção seqüencial de vários fluidos, precisamos analisar a influência de cada fluido nos processos de transmissão de calor incluídos nesta equação.

Levando em conta que o produto ρC_p dos fluidos utilizados apresenta pouca variação de um fluido para outro, os termos de acumulação, convecção e variação da temperatura do fluido na coluna tornam-se independentes do tipo de fluido injetado. Evidentemente, o termo devido à troca de calor com a formação vizinha também independe do tipo de fluido injetado no reservatório. No entanto, o termo de geração de calor depende do tipo de ácido que está sendo injetado. Considerando estes argumentos, se não existisse a geração de calor, poderíamos anular o valor da constante do termo de geração e aplicar diretamente a equação (6.23) para injeção seqüencial de vários fluidos.

Considerando a linearidade da equação diferencial que governa o problema (equação (5.30)), podemos adaptar a equação (6.23) para ser aplicada no caso da

injeção seqüencial de vários fluidos. Para isso, precisamos corrigir o termo de geração de calor levando em conta o efeito do volume de fluido deslocado à frente do ácido, a injeção de volumes finitos de cada fluido e o calor gerado em cada reação do ácido com minerais.

7.1. Correção para o Termo de Geração de Calor.

O termo de geração de calor incluído na equação (6.23) foi deduzido considerando a injeção contínua do ácido a partir do instante inicial ($t=0$). No caso real, o ácido só entra no reservatório após a injeção dos fluidos que estão à sua frente. Além disso, injeta-se apenas um volume finito, seguido de um fluido de deslocamento.

As reações que podem contribuir significativamente na temperatura do fluido são as reações rápidas (reações com calcita e feldspato). Para estas reações, a concentração do mineral atinge o valor residual em um curto intervalo de tempo após o contato com o ácido. Isto significa dizer que, mesmo considerando a injeção contínua do ácido, a geração de calor atrás do volume de fluido contendo ácido é pequena. Em outras palavras, o modelo de injeção contínua pode ser usado para representar a injeção de pequenos volumes de ácidos que reajam rapidamente com os minerais do meio poroso..

O efeito do volume injetado a frente do ácido (V_{ff}) pode ser incluído na equação (6.23), corrigindo-se o tempo de chegada da frente de ácido à profundidade r dentro do reservatório:

$$t_{rc} = \frac{\phi(1-s_{or})\pi h(r^2 - r_c^2)}{q_l} + \frac{V_{ff}}{q_l} \quad (7.1)$$

Utilizando as variáveis adimensionais da equação (6.23), temos:

$$t_{Drc} = \frac{\phi(1-s_{or})\pi h r_c^2 (r_D^2 - 1)}{q_l t_{adm}} + \frac{V_{ff}}{q_l t_{adm}} \quad (7.2)$$

Substituindo o valor da constante θ_r e definido a constante θ_v :

$$\theta_v = \frac{V_{ff}}{q_l t_{adm}} \quad (7.3)$$

temos:

$$t_{Drc} = \theta_r (r_D^2 - 1) + \theta_v \quad (7.4)$$

A constante θ_v representa o tempo adimensional necessário à injeção dos fluidos posicionados à frente do ácido na sequência de injeção.

Substituindo o valor de t_{Dr} da equação (H-2) pelo valor de t_{Drc} dado pela equação (7.4) e utilizando um procedimento semelhante ao descrito no Apêndice H, obtemos a solução para o caso da injeção de ácido com volume à frente:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfrv}(r_D, s) = & \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \times \\ & \left[\left(\frac{T_{Dinj}}{s} + \frac{1}{sA(s)} \right) \exp(-A(s)z_D) - \frac{1}{sA(s)} \right] + \\ & \frac{\theta_g \exp(-s\theta_v)}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \{ \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \} \end{aligned} \quad (7.5)$$

A equação (7.5) pode ser aplicada para o caso de acidificação de matriz em arenitos com vários fluidos e ácidos, levando em conta a geração de calor de apenas uma reação. É importante ressaltar que o valor de θ_v deve considerar apenas os volumes dos fluidos à frente do ácido que participará da reação.

Para o caso de várias reações, a linearidade das equações que governam o modelo possibilita rescrever a equação (7.5):

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfrv}(r_D, s) = & \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \times \\ & \left[\left(\frac{T_{Dinj}}{s} + \frac{1}{sA(s)} \right) \exp(-A(s)z_D) - \frac{1}{sA(s)} \right] + \\ & \sum_{j=1}^n \frac{\theta_{g(j)} \exp(-s\theta_{v(j)})}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_{p(j)})} \{ \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \} \end{aligned} \quad (7.6)$$

O índice 'j' na equação (7.6) refere-se a cada uma das reações que ocorrem durante a injeção dos fluidos.

Considerando a injeção de volumes finitos de cada fluido, o termo de geração de calor apresentado na equação (7.6) pode ser aplicado apenas às reações rápidas. Felizmente, conforme apresentado no Capítulo 5, o calor gerado pelas reações lentas é

desprezível. Na prática, podemos incluir no somatório da equação (7.6) apenas as reações de HF com feldspatos e de HCl com calcita.

A Figura 7.1 apresenta a distribuição da temperatura no reservatório para injeção seqüencial de fluidos considerando as reações com a calcita e feldspato de potássio. As curvas foram traçadas com os dados do Apêndice C e vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm).

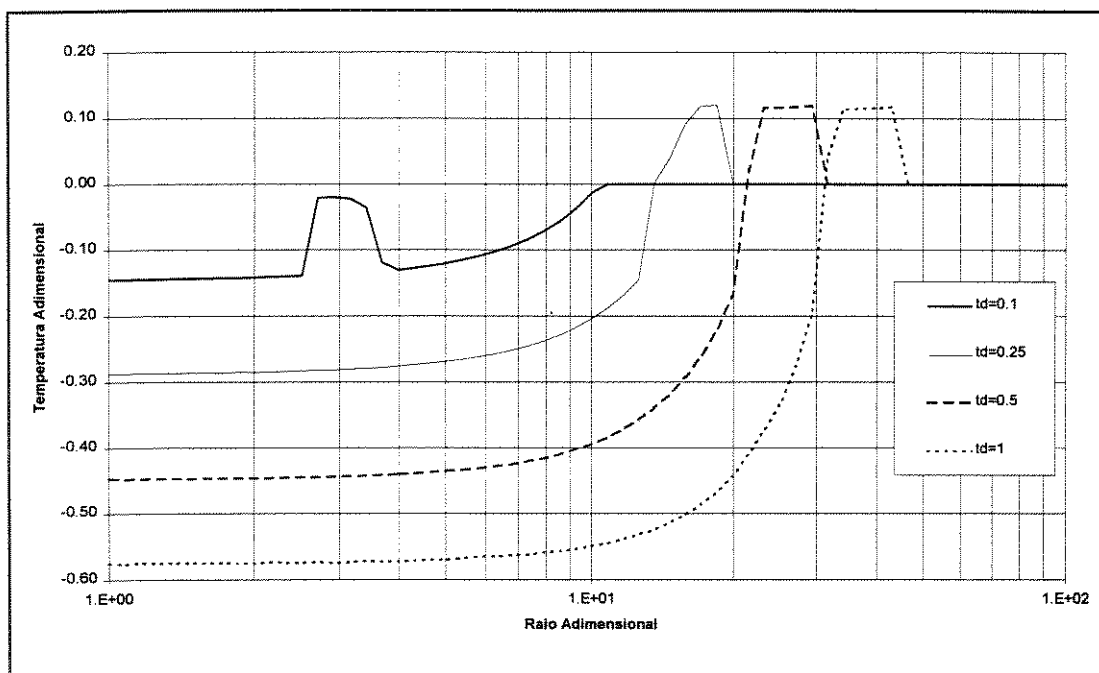


Figura 7.1: Temperatura no Reservatório - Injeção Seqüencial de Fluidos

O perfil de temperatura na Figura 7.1 indica que a reação da calcita com o HCl apresenta uma contribuição fixa em torno de 13 % para todos os tempos. É importante notar que mesmo considerando a injeção contínua de HCl, o efeito na temperatura ocorre em um volume pequeno do reservatório. Devido à menor velocidade da reação de HF com feldspato de potássio, o seu efeito nas curvas da Figura 7.1 apresenta-se distribuído, o que dificulta a sua identificação. Para evidenciar os efeitos das duas reações, a Figura 7.2 apresenta curvas considerando o perfil da temperatura com e sem geração de calor. A faixa do reservatório preenchida por cada tipo de ácido também é evidenciada na Figura 7.2. Os dados de entrada são os mesmos utilizados na obtenção das curvas na Figura 7.1

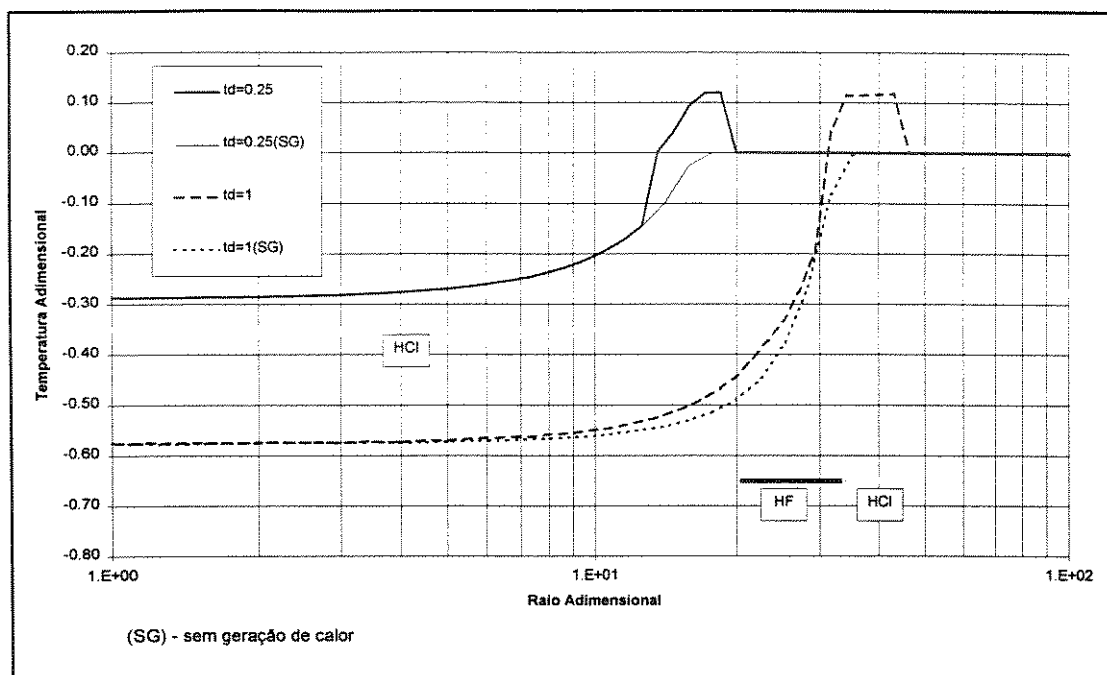


Figura 7.2: Temperatura no Reservatório - Efeito das Reações

Para $t_D = 0,25$ o HF ainda não penetrou no reservatório e a diferença entre as duas curvas é devida apenas ao efeito da reação com o HCl. Para $t_D = 1,0$, os volumes totais de HCl e HF já foram injetados no reservatório, nestas curvas pode-se identificar a contribuição da reação de HF com feldspato. É possível perceber que atrás do volume de HF ainda existe um acréscimo na temperatura, causado por essa reação. Este fato é explicado pela hipótese da injeção contínua utilizada no modelo matemático, que torna-se bastante inadequada à medida que a velocidade da reação química diminui. Para o caso mostrado na Figura 7.2 a contribuição do HF pode ser considerada desprezível.

As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam a distribuição da temperatura do fluido no reservatório para intervalos fixos de tempo. Para avaliarmos o comportamento da temperatura durante todo o período de injeção precisamos conhecer a posição do fluido a cada instante. Conhecendo-se o volume deslocado à frente de um fluido específico, podemos determinar a sua posição através da equação (4.21). Em operações de acidificação de matriz em arenitos, estamos interessados em saber como se comporta a temperatura do tratamento principal, a mistura de HF e HCl, responsável pela remoção do dano à formação.

Utilizando os dados do Apêndice C e vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm), obtivemos o gráfico da Figura 7.3, onde estão apresentadas curvas da temperatura do HF no reservatório em função do tempo. As curvas referem-se à posição da frente do fluido base contendo HF, ao ponto médio e à posição final deste volume no reservatório.

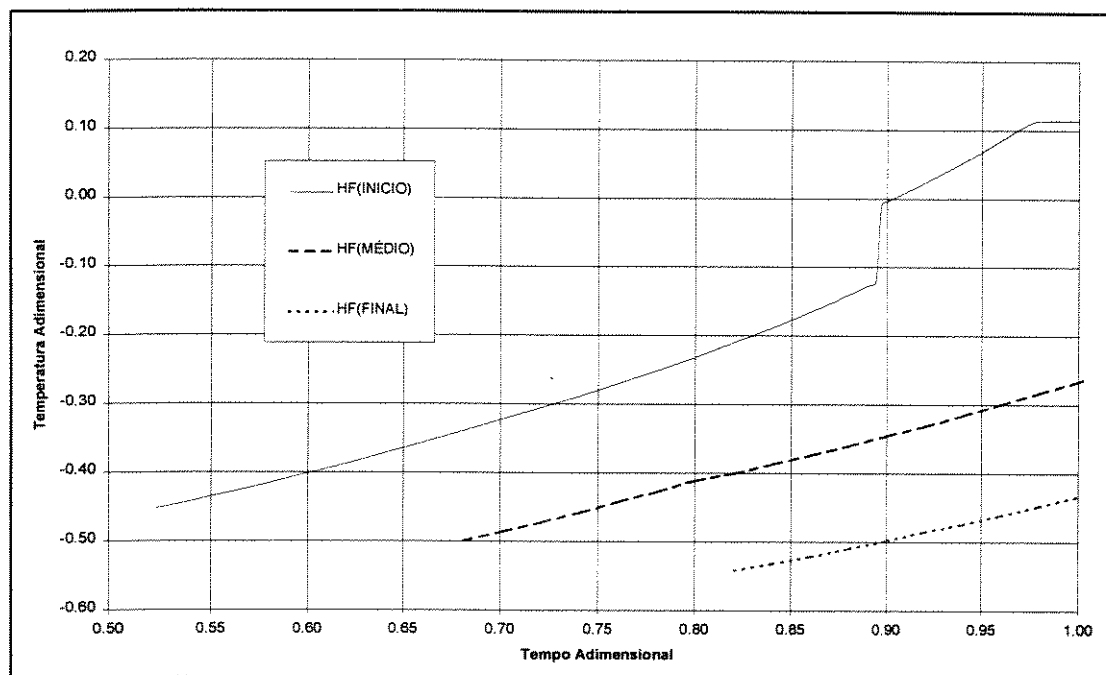


Figura 7.3: Temperatura do HF em função do Tempo

Nesta Figura, o ponto inicial de cada curva indica a entrada do fluido no reservatório e o último ponto representa o final da injeção. Na curva que representa a posição da frente de injeção, HF início, podemos observar a influência do calor gerado pela reação do HCl para t_D maior que 0,9. Para os elementos de fluido posicionados no meio e no final do volume de HF, a temperatura é influenciada apenas pela reação do próprio HF, apresentando um comportamento mais suave.

Utilizando curvas semelhantes para várias posições dentro de um volume de fluido específico, podemos caracterizar o comportamento da temperatura durante todo o período de injeção. Esta informação possibilita projetar as operações com o conhecimento prévio da temperatura, conduzindo a melhores resultados nos casos onde o desempenho funcional do fluido seja sensível à temperatura.

7.2. Exemplos de Aplicação

Os resultados da seção 7.2 foram obtidos com os dados do Apêndice C que caracterizam um tratamento típico com HF e HCl. Na prática, vários parâmetros podem variar significativamente de uma operação para outra. O diâmetro da coluna de injeção, a profundidade do reservatório, a espessura do intervalo canhoneado, as concentrações e volumes utilizados são exemplos de parâmetros que podem ser bastante diferentes nas operações de acidificação de matriz.

Os exemplos apresentados a seguir utilizam dados de tratamentos realizados pela PETROBRAS em poços da Bacia Potiguar. O Apêndice I apresenta os dados específicos de cada operação. Os parâmetros não especificados no Apêndice I foram considerados iguais aos apresentados no Apêndice C. As curvas apresentadas foram obtidas considerando uma vazão de injeção de $2,65 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (1 bpm) e a variável do tempo está adimensionalizada pelo período total previsto para o tratamento.

A Figura 7.4 apresenta a distribuição da temperatura em um poço de injeção de água, onde a zona de injeção se encontra a uma profundidade de 640 metros.

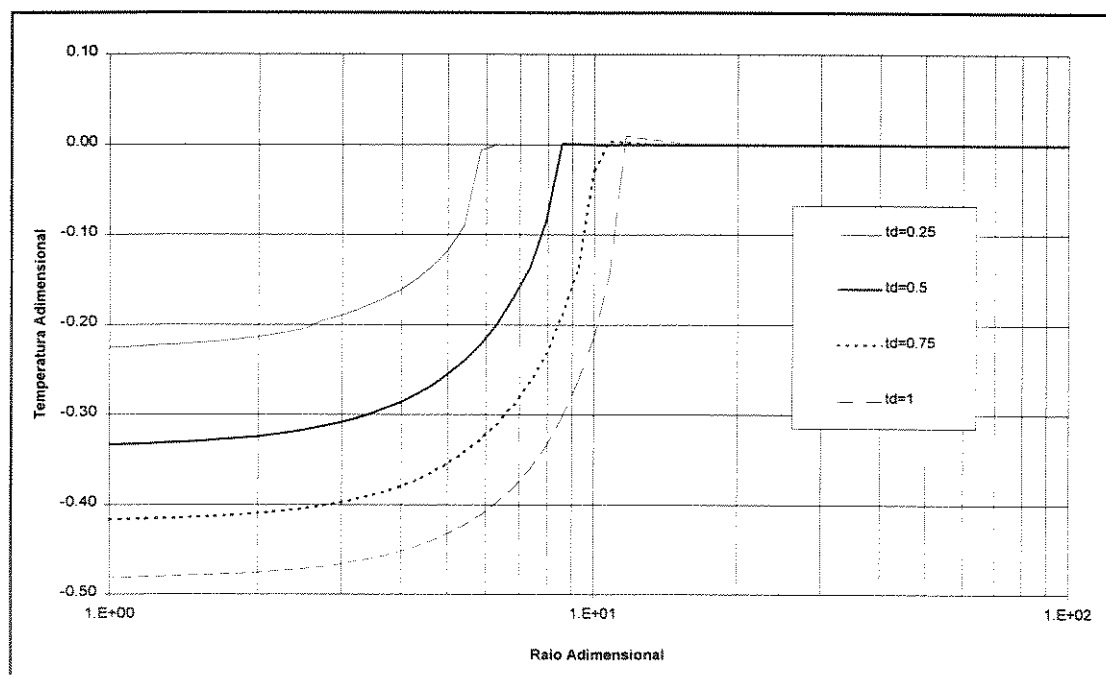


Figura 7.4: Temperatura em Reservatório à 640 metros.

Na Figura 7.4, o tempo total de injeção é de aproximadamente 1 hora com volume total injetado de $9,7 \text{ m}^3$. Neste caso, as variações significativas em $r_D=1$

indicam uma pequena contribuição das trocas de calor na coluna. Dentro do reservatório observa-se apenas a contribuição dos termos de acumulação, convecção e condução de calor. É importante ressaltar que neste exemplo, o tratamento principal entra no reservatório com $t_D > 0,5$ mostrando que as reações do tratamento principal nas regiões próximas ao poço $r_D < 1$ ($r < 0,9$ m) ocorrem em temperaturas significativamente inferiores à temperatura do reservatório.

Na Figura 7.5 são apresentadas as curvas para a temperatura durante um tratamento matricial em um poço profundo (reservatório a 2300 metros).

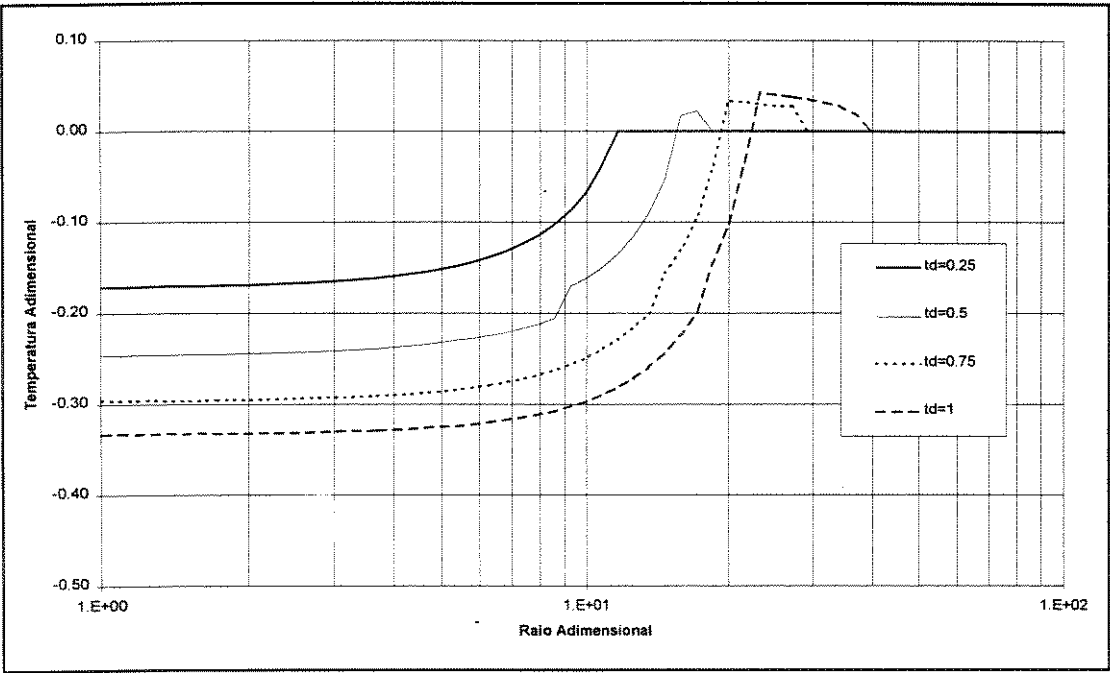


Figura 7.5: Temperatura em Reservatório à 2300 metros

Neste caso, verifica-se uma maior contribuição das trocas de calor durante a permanência do fluido na coluna de injeção, reduzindo as variações da temperatura em $r_D = 1$. No reservatório, é evidente a contribuição da geração de calor após a entrada do ácido na zona de injeção. Devido à maior quantidade de fluido deslocado à frente do tratamento, observa-se que a influência das trocas e da geração de calor no reservatório torna-se significativa apenas para $r_D > 10$. Para $r_D < 10$, a temperatura é muito próxima do valor da temperatura de injeção.

O objetivo da apresentação dos exemplos práticos é chamar atenção para o fato de que a resposta do modelo depende de vários parâmetros, alguns relacionados com

apenas um tipo de transferência de calor na coluna ou no reservatório, outros com influência mais abrangente. Nos exemplos, a alteração nos volumes de fluido deslocados à frente do tratamento tem influência significativa apenas sobre a posição da frente de convecção-acumulação no reservatório, enquanto o aumento da profundidade favorece ao aumento da influencia da condução de calor na coluna e do termo de geração de calor no reservatório.

Naturalmente, este raciocínio sugere o levantamento das curvas para cada operação específica, evitando erros na extrapolação de resultados de um caso para outro, com base apenas na avaliação qualitativa dos fenômenos individuais

8. Conclusões

O presente trabalho mostra que o comportamento da temperatura do ácido, injetado no reservatório em operações de acidificação de matriz, depende de vários parâmetros associados à transferência de calor na coluna de injeção e no reservatório.

Para o problema da coluna, os termos de acumulação de calor no interior da coluna e do anular tornam-se importantes para tempos de injeção inferiores a 10 horas. Verifica-se também que as variações na temperatura do fluido são maiores nos instantes iniciais e que valores elevados da vazão de injeção podem reduzir a temperatura em profundidade à valores próximos aos da superfície.

Na coluna, o modelo proposto apresenta resultados concordantes com a equação de Ramey[2] para tempos superiores a 100 horas. Para tempos curtos, os resultados são iguais aos do modelo de Yu-Shu-Wu[5], exceto para tempos inferiores a 10 horas, onde o termo de acumulação no anular torna-se significativo. Na realidade, o modelo proposto acrescenta os efeitos da acumulação de calor no anular, incorporando as soluções de Yu-Shu-Wu[5] e Ramey[2].

No reservatório, o comportamento da temperatura é determinado principalmente pela temperatura do fluido no poço à profundidade da zona de injeção e pelos termos de acumulação e convecção de calor no reservatório. A pequena penetração dos fluidos neste tipo de operação, reduz significativamente a contribuição do termo de condução de calor para as formações vizinhas, podendo ser considerado desprezível nos pontos próximos ao poço ($r < 1,0$ metro).

A contribuição do calor associado às reações químicas entre ácidos e minerais depende da velocidade das reações na superfície do mineral, da quantidade de ácido disponível para reagir e do calor liberado ou absorvido por unidade de massa dos minerais. A velocidade das reações é dependente da temperatura, conduzindo a um

problema não linear cuja solução só pode ser obtida com métodos numéricos. O modelo simplificado adotado neste trabalho tem a característica de sobrestimar o valor da geração de calor por não considerar o consumo do ácido pelas reações que geram calor. Os valores obtidos indicam que as reações lentas com o quartzo e argilo-minerais são desprezíveis, enquanto o calor gerado nas reações rápidas com calcita e feldspatos pode vir a alterar significativamente o perfil de temperatura.

O calor de reação dos ácidos com os minerais é um parâmetro importante para quantificação do termo de geração. No entanto, os dados termoquímicos de minerais são bastante escassos, dificultando a obtenção de valores confiáveis para este parâmetro.

Considerando as diversas hipóteses adotadas no modelo simplificado para quantificação do termo de geração de calor, a contribuição deste termo deve ser vista como uma aproximação sobrestimada do valor real. Evidentemente, nos casos onde o valor calculado com o modelo é desprezível, o mesmo acontece com o valor real.

A solução do modelo acoplado, deduzida para injeção contínua de um único fluido, pode ser utilizada para o caso da injeção seqüencial de soluções salinas onde o produto ρC_p é aproximadamente constante e a geração é desprezível. Conhecendo-se os volumes deslocados à frente de cada ácido, o termo de geração devido às reações rápidas entre ácidos e minerais é facilmente incluído nesta solução.

Os exemplos apresentados mostram que nos pontos próximos ao poço ($r < 1,0$ metro), a temperatura do ácido é sempre inferior à temperatura inicial do reservatório, apresentando valores mais próximos à temperatura de injeção no poço. A posição do ácido em relação à frente de temperatura é definida pelo volume de fluido injetado à sua frente. Quanto maior o volume, maior será a profundidade na qual a temperatura do ácido atinge o valor da temperatura inicial do reservatório. Nos exemplos, torna-se evidente a influência da temperatura sobre a velocidade das reações e, conseqüentemente, no termo de geração de calor.

A aplicação do Algoritmo de Stehfest[24] em conjunto com o teorema do deslocamento no tempo da transformação de Laplace, proporciona bons resultados na inversão numérica de funções onde as variações rápidas no domínio do tempo são representadas por termos exponenciais no espaço de Laplace.

As soluções individuais para cada problema e a solução acoplada apresentadas neste trabalho podem ser aplicadas às diversas operações que envolvam a injeção de líquido incompressível no reservatório.

Em termos gerais, este trabalho propõe uma metodologia rápida, de fácil utilização, com técnicas matemáticas bem conhecidas, para determinação da temperatura do ácido no reservatório, considerando os fenômenos de transferência de calor na coluna e no reservatório, além da estimativa da geração de calor devido as reações químicas entre ácidos e minerais.

Uma extensão natural deste trabalho é a obtenção das soluções do modelo considerando as variações na vazão de injeção, que ocorrem à medida que o dano à formação é removido. Neste mesmo contexto, a vazão de líquido poderia ser obtida através da pressão de injeção e das equações do escoamento de fluidos em meios porosos, utilizando valores do dano à formação obtidos de simuladores de acidificação de matriz.

A ausência de dados termoquímicos relativos às reações também sugere a necessidade de trabalhos de laboratório para determinação destes valores, particularmente o calor de reação entre ácidos e minerais.

Uma análise mais precisa da contribuição do termo de geração de calor pode ser obtida através de modelos de acidificação de matriz que considerem o consumo de ácidos e minerais pela reações químicas. O modelo macroscópico de um ácido e dois minerais pode ser utilizado para inclusão do termo de geração de calor na equação da conservação da energia no reservatório. A resolução deste modelo deve proporcionar resultados mais aproximados para contribuição do termo de geração de calor devido às reações químicas.

Nomenclatura

Letras Latinas

$\%W_m$	Percentagem Mássica do Mineral
a	Constante Genérica
A_{sb}	Área Superficial dos Sólidos no Meio Poroso (m^2)
A_{sm}	Área Superficial do Mineral (m^2)
C_A	Concentração de Ácido ($kg\text{-}mol/m^3$)
C_{Ai}	Concentração Inicial de Ácido ($kg\text{-}mol/m^3$)
C_m	Concentração de Mineral ($kg\text{-}mol/m^3$ sólido)
C_{mi}	Concentração Inicial de Mineral ($kg\text{-}mol/m^3$ sólido)
C_{mr}	Concentração Residual de Mineral ($kg\text{-}mol/m^3$ sólido)
C_p	Calor Específico ($J/kg\text{K}$)
efm	Constante de Velocidade da reação ($m^3_{\text{sólido}}/s.m^3_{\text{total}} \cdot [kg\text{-}mol_{\text{ácido}}/m^3]$)
Efm	Constante de Velocidade da reação ($kg\text{-}mol_{\text{mineral}}/s.m^2 \cdot [kg\text{-}mol_{\text{ácido}}/m^3]$)
$gg(z)$	Gradiente Geotérmico Genérico
h	Espessura do Intervalo Submetido a Injeção (m)
h_{car}	Coefficiente de Convecção Natural Anular-Revestimento ($W/m^2\text{K}$)
h_{cat}	Coefficiente de Convecção Natural Anular-Coluna ($W/m^2\text{K}$)
h_{ft}	Coefficiente de Convecção Forçada Fluido-Coluna ($W/m^2\text{K}$)
k	Condutividade Térmica ($W/m\text{K}$)
k_c	Condutividade Térmica do Cimento ($W/m\text{K}$)
k_r	Condutividade Térmica do Revestimento ($W/m\text{K}$)
k_t	Condutividade Térmica da Coluna ($W/m\text{K}$)
L	Profundidade do Reservatório (m)
$\dot{m}$	Vazão Mássica (kg/s)
m_m	Massa do Mineral (kg)
m_{sb}	Massa dos Sólidos no Meio Poroso (kg)
P	Pressão (Pa)
PM_m	Peso Molecular do Mineral (kg)
q_H	Fluxo de Calor (W/m)
q_{Haca}	Acumulação de Calor no Anular (W/m)
q_{Has}	Fluxo de Calor Anular-Formação (W/m)
q_{Hca}	Fluxo de Calor Coluna-Anular (W/m)
q_l	Vazão de Injeção de Líquido (m^3/s)
Q_{ac}	Calor Acumulado no Volume de Controle (J)
Q_{ger}	Calor Gerado no Volume de Controle (J)
Q_{in}	Calor que Entra no Volume de Controle (J)

Letras Latinas(continuação)

Q_{out}	Calor que Sai do Volume de Controle (J)
r	Raio em Coordenadas Cilíndricas (m)
r_c	Raio do Anel de Cimento (m)
r_{fb}	Raio da Frente de Injeção de Fluido Base (m)
r_{ir}	Raio Interno do Revestimento (m)
r_{it}	Raio Interno da Coluna (m)
r_m	Raio Médio das Partículas do Mineral no Meio Poroso (m)
r_{or}	Raio Externo do Revestimento (m)
r_{ot}	Raio Externo da Coluna (m)
R_m	Taxa de Consumo de Mineral (kg-mol/s)
R_{mb}	Taxa de Consumo de Mineral por Unidade de Volume (kg-mol/s.m ³ total)
s	Variável de Laplace
$spgr$	Densidade Relativa em Relação a Água
S_{or}	Saturação de Óleo Residual
S_w	Saturação de Água
t	Tempo (s)
t_{adm}	Tempo Genérico para Adimensionalização (s)
t_r	Tempo para Frente de Injeção Atingir a Posição r no Reservatório(s)
T	Temperatura (K)
T_a	Temperatura Ambiente (K)
T_{iL}	Temperatura do Fluido na Profundidade do Reservatório em $rD=1$ (K)
T_{inj}	Temperatura de Injeção na Superfície (K)
T_{ref}	Temperatura Genérica de Referência (K)
T_{res}	Temperatura Inicial do Reservatório (K)
u	Energia Interna Específica(J/kg)
U_{rc}	Coefficiente Global de Transmissão de Calor com raio base r_c (W/m ² *K)
U_{rit}	Coefficiente Global de Transmissão de Calor com raio base r_{it} (W/m ² *K)
v	Velocidade de Injeção do Fluido (m/s)
V_{ac}	Volume de Fluido Base Contendo Ácido (m ³)
V_b	Volume Total do Meio Poroso (m ³)
V_{ff}	Volume Deslocado a Frente de um Fluido de Referência (m ³)
V_i	Volume Total Injetado no Reservatório (m ³)
V_{of}	Volume Deslocado Atrás do Ácido (m ³)
V_{pf}	Volume Deslocado a Frente do Ácido (m ³)
V_{sb}	Volume dos Sólidos no Meio Poroso (m ³)
w	Gradiente Geotérmico Linear (K/m)
x_a	Coefficiente Estequiométrico do Ácido na Equação Química Balanceada
x_m	Coefficiente Estequiométrico do Mineral na Equação Química Balanceada
y,z	Direção Axial em Coordenadas Cilíndricas (m)

Letras Gregas

α	Difusividade Térmica (m^2/s)
ΔH_m	Calor de Reação por Unidade de Massa do Mineral (J/kg-mol)
σ	Ordem da Reação Química
ϕ	Porosidade
ϕ_m	Perdas por Fricção (J)
φ	Constante Adimensional Relativa ao Fluxo de Calor Formação-Anular
β	Coefficiente de Dilatação Volumétrica do Fluido (m^3/K)
θ_{aca}	Constante Adimensional Relacionada à Acumulação de Calor no Anular
θ_{acc}	Constante Adimensional Relacionada à Acumulação de Calor na Coluna
θ_{cc}	Constante Adimensional Relacionada à Condução de Calor entre a Formação Vizinha e a Coluna
θ_{acr}	Constante Adimensional Relacionada à Acumulação de Calor no Reservatório
θ_{cr}	Constante Adimensional Relacionada à Condução de Calor entre a Formação Vizinha e o Reservatório
θ_g	Constante Adimensional Relacionada à Geração de Calor
θ_p	Constante Adimensional Relacionada à Velocidade da Reação
θ_r	Constante Adimensional Relacionada à Posição da Frente de Ácido
θ_v	Constante Adimensional Relacionada ao Volume de Fluido Deslocado à Frente do Ácido.
ρ	Massa Específica (kg/m^3)

Subscritos

0	Condição Inicial
293	Valor da Propriedade a 293 Kelvin
c	Cimento
D	Valor Adimensional
er	Valor Equivalente para o Reservatório
es	Valor Equivalente para Formações Vizinhas
fa	Fluido no Anular
fc	Fluido na Coluna
fr	Fluido no Reservatório
g	Termo de Geração
j	Índice genérico
o	Óleo
rc	Valor Corrigido do Raio
s	Formações Vizinhas ao Poço e à Zona de Injeção
sr	Parte Sólida do Reservatório
ss	Parte Sólida das Formações Vizinhas
u	Unitário

ss	Parte Sólida das Formações Vizinhas
u	Unitário
Subscritos(continuação)	
v	Condição de Contorno Variável
w	Água
z	Direção Axial em Coordenadas Cilíndricas

Funções

$A(s), \lambda(s), \gamma(s)$ $, W(s), Wp(s)$	Funções Auxiliares Adimensionais no Espaço de Laplace
$\exp(x)$	Função Exponencial
$F(s), G(s)$	Funções Genéricas no Espaço de Laplace
$f(t), g(t-a)$	Funções Genéricas no Domínio do Tempo
$H(x)$	Função de Heaviside
$K_0(x)$	Função de Bessel Modificada de Ordem 0
$K_1(x)$	Função de Bessel Modificada de Ordem 1

Abreviaturas

API	American Petroleum Institute
bpm	Barril por minuto

Bibliografia

1. Squier,D.P.,Smith,D.D. & Dougherty,E.L.: " Calculated Temperature Behavior of Hot Water Injection Wells", JPT(Abril/1962)436-40; Trans.,AIME,225.
2. Ramey,H.J. Jr.: "Wellbore Heat Transmission", JPT(Abril/1962)427-35; Trans.,AIME,225.
3. Willhite,G.P.: "Over-All Heat Transfer Coefficients in Steam and Hot Water Injection", JPT(Maio/1967)607-15.
4. Alves,I.N.,Alhanati,F.J.S. & Shoham,:"A Unified Model for Predicting Flowing Temperature Distribution in Wellbore and Pipelines", SPE 20632, apresentado no 65o. encontro anual da SPE em New Orleans, LA, Setembro de 1990.
5. Yu-Shu Wu & Karsten Pruess,:"An Analytical Solution for Wellbore Heat Transmission in Layered Formations", SPE 17497, publicado na SPERE(Novembro de 1990),pp.531-538.
6. Hasan,A.R. & Kabir,C.S.: "Heat Transfer During Two-Phase Flow in Wellbores: Part I- Formation Temperature", SPE 22866 apresentado no 66o. encontro anual da SPE em Dallas, TX, Outubro de 1991.
7. Hasan,A..R. & Kabir,C.S.: "Heat Transfer During Two-Phase Flow in Wellbores: Part I- Wellbore Fluid Temperature", SPE 22866 apresentado no 66o. encontro anual da SPE em Dallas, TX, Outubro de 1991.
8. Lauwerier,H.A., "The Transport of Heat in an Oil Layer Caused by the Injection of Hot Fluid", Appl. Sci. Res.(1955),Vol.5,Sec.A, 145.
9. Marx,J.W. & Langenheim,R.N.: "Reservoir Heating by Hot Fluid Injection", Trans. AIME(1959) 216,312.
10. Spillette,A.G. & Nielsen,R.L.: "Two-Dimensional Method For Predicting Hot Waterflood Recovery Behavior", SPE 1985, publicado no JPT(Junho de 1968), pp. 627-638.
11. Weinstein,H.G. & Wheeler,J.A.: "Numerical Model for Thermal Processes", SPE 4759, publicado no SPEJ(Fevereiro de 1977), pp. 65-78.
12. Farouq Ali,S.M. & Ferrer,J.: "State-of-the-Art of Thermal Recovery Models", Trans.ASME(1981) 103,296.
13. van Poolen,H.K. & Associates(1980), "Fundamentals of Enhanced Oil Recovery", Tulsa: PennWell Publishing Company
14. Fogler,H.S.,Lund,K. & Mc.Cune,C.C.: "Predicting the Flow and Reactions of HCl/HF Mixtures in Porous Sandstone Cores", SPEJ(Outubro de 1976) 248-60; TRANS.,AIME,261.
15. Hekim,Y & Fogler,H.S.: "On the Movement of Multiple Reaction Zones in Porous Media", AIChEJ.(Maio de 1980), 403-11.

16. Motta, E.P., Plavnik, B. & Schechter, R.S.: "Optimizing Sandstone Acidization", SPE 19426, publicado no SPERE (Fevereiro de 1992),
17. Hill, A.D., Economides, M.J. & Economides, C.E. (1994): "Petroleum Production Systems", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall
18. Schechter, R.S. (1992): "Oil Well Stimulation", Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall
19. Burger, J., Sourieau, P. & Combarnous, M. (1985): "Thermal Methods of Oil Recovery", Paris: Éditions Technip.
20. Carslaw, H.S. & Jaeger, J.C. (1959): "Conduction of Heat in Solids", Londres: Oxford University Press.
21. Prats, M. (1982): "Thermal Recovery", Dallas: SPE (Monograph Volume 7).
22. Somerton, W.H. (1992): "Thermal Properties and Temperature-Related Behavior of Rock/Fluid Systems", Amsterdam: ELSEVIER.
23. Incropera, F.P. & De Witt, D.P. (1990): "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 3ª. edição, Cingapura: John Willey & Sons.
24. Stehfest, H.: "Numerical Inversion of Laplace Transforms", Communications of the ACM, 13, Janeiro de 1970, No. 1, Algoritmo 368.
25. Junqueira, S.L.M. (1990): "Aplicação da Transformada de Laplace ao Problema Inverso da Condução de Calor". Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.
26. Spiegel, M.R. (1992): "Manual de Fórmulas, Métodos e Tabelas de Matemática"; (Chioccarello, R., tradutor); (Silva, J.L.M., revisor), São Paulo: Makron Books; (trabalho original publicado em 1968).
27. Perry, R.H. & Green, D. (1984): "Chemical Engineers Handbook (International Student Edition)", 6a. ed., Cingapura: McGraw Hill.
28. Hekim, Y. & Fogler, H.S.: "Acidization VI- On the Equilibrium Relationships and Stoichiometry of Reactions in Mud Acid", Ch. Eng. Sci., 1977, V.32, pp.1-9.
29. Barin, I. (1993): "Thermochemical Data of Pure Substances", 2a. ed., Weinheim-RFA: UCH-Verlagsgesellschaft.
30. Jonhson, G.K., Tasker, I.R., Howell, D.A & Smith, J.K.: "Thermodynamics Properties of Silicalite", J. Chem. Thermod., 1987, V.19(6), 617-32.
31. Bear, J. (1972): "Dynamics of Fluids in Porous Media", New York: American Elsevier.

Apêndice A: Dedução da Solução para Temperatura na Coluna

Partindo das equações diferenciais e condições de contorno apresentadas na Seção 3.2 e utilizando as variáveis adimensionais definidas na Seção 3.3, obtemos o problema na forma adimensional na formação em volta do poço:

$$\frac{\partial^2 T_{Ds}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial r_D} = \frac{\partial T_{Ds}}{\partial t_D} \quad (\text{A-1})$$

$$T_{Ds}(0, r_D) = 0 \quad (\text{A-2})$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} T_{Ds}(t_D, r_D) = 0 \quad (\text{A-3})$$

$$\varphi \left. \frac{\partial T_{Ds}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = T_{Ds}|_{r_D=1} - T_{Dfa} \quad (\text{A-4})$$

onde:

$$\varphi = \frac{K_s}{r_c U_{rc}} \quad (\text{A-5})$$

Da mesma forma, obtemos o problema adimensional na coluna:

$$\frac{\partial T_{Dfc}}{\partial z_D} + \frac{\alpha_s}{r_c^2} \frac{\pi r_{it}^2 L}{q_l} \frac{\partial T_{Dfc}}{\partial t_D} + \frac{2\pi r_{it} U_{rit} L}{q_l (\rho C_p)_{fc}} (T_{Dfc} - T_{Dfa}) = -1 \quad (\text{A-6})$$

$$T_{Dfc}(0, z_D) = 0 \quad (\text{A-7})$$

$$T_{Dfc}(t_D, 0) = T_{Dimj} \quad (\text{A-8})$$

e a equação do balanço do fluxo de calor no espaço anular:

$$2r_{it} U_{rit} (T_{Dfc} - T_{Dfa}) + 2k_s \left. \frac{\partial T_{Ds}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = \frac{\alpha_s}{r_c^2} (r_{ir}^2 - r_{et}^2) (\rho C_p)_{fa} \frac{\partial T_{Dfa}}{\partial t_D} \quad (\text{A-9})$$

Aplicando a transformação de Laplace e a condição inicial ao problema na formação, obtemos:

$$r_D^2 \frac{\partial^2 \bar{T}_{Ds}}{\partial r_D^2} + r_D \frac{\partial \bar{T}_{Ds}}{\partial r_D} - r_D^2 s \bar{T}_{Ds} = 0 \quad (\text{A-10})$$

A equação (A-8) é a equação de Bessel modificada de ordem 0 cuja solução geral é dada por:

$$\bar{T}_{Ds}(r_D, s) = C_1 \mathbf{I}_0(r_D \sqrt{s}) + C_2 \mathbf{K}_0(r_D \sqrt{s}) \quad (\text{A-11})$$

A condição de contorno externa impõe o valor nulo para a constante C_1 . Aplicando a condição de contorno interna transformada, obtemos o valor da constante C_2 :

$$C_2 = \frac{\bar{T}_{Dfa}}{\varphi \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s}) + \mathbf{K}_0(\sqrt{s})} \quad (\text{A-12})$$

Substituindo o valor de C_2 na equação (A-9), chegamos a solução no espaço de Laplace para o problema na formação em função da temperatura do fluido no anular:

$$\bar{T}_{Ds}(r_D, s) = \frac{\bar{T}_{Dfa} \mathbf{K}_0(r_D \sqrt{s})}{[\mathbf{K}_0(\sqrt{s}) + \varphi \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s})]} \quad (\text{A-13})$$

Aplicando a transformação de Laplace à equação do balanço do fluxo de calor no espaço anular,

$$2r_{it} U_{rit} (\bar{T}_{Dfc} - \bar{T}_{Dfa}) + 2k_s \left. \frac{\partial \bar{T}_{Ds}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = s \frac{\alpha_s}{r_c^2} (r_{ir}^2 - r_{ei}^2) (\rho C_p)_{fa} \bar{T}_{Dfa} \quad (\text{A-14})$$

e substituindo o valor da derivada de $\bar{T}_{Ds}$ em relação a r_D , obtida a partir da equação (A-13),

$$\left. \frac{\partial \bar{T}_{Ds}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = - \frac{\bar{T}_{Dfa} \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s})}{[\mathbf{K}_0(\sqrt{s}) + \varphi \sqrt{s} \mathbf{K}_1(\sqrt{s})]} \quad (\text{A-15})$$

definindo:

$$\lambda(s) = \frac{\sqrt{s} K_1(\sqrt{s})}{[K_0(\sqrt{s}) + \varphi \sqrt{s} K_1(\sqrt{s})]} \quad (A-16)$$

obtemos a relação entre a temperatura do fluido no anular e a temperatura do fluido na coluna:

$$\bar{T}_{Dfa} = \frac{\bar{T}_{Dfc}}{\gamma(s)} \quad (A-17)$$

onde:

$$\gamma(s) = 1 + \frac{k_s}{r_{it} U_{rit} \lambda(s)} + s \frac{(r_{ir}^2 - r_{et}^2)(\rho C_p)_{fa} \alpha_s}{2 r_{it} U_{rit} \lambda(s) r_c^2} \quad (A-18)$$

Utilizando as hipótese de vazão constante, fluido incompressível e propriedades térmicas constantes, definimos as constantes adimensionais relativas aos termos de acumulação e condução de calor para o fluido dentro da coluna e acumulação no anular:

$$\theta_{acc} = \frac{\alpha_s \pi r_{it}^2 L}{r_c^2 q_l} \quad (A-19)$$

$$\theta_{cc} = \frac{2\pi k_s L}{q_l (\rho C_p)_{fc}} \quad (A-20)$$

$$\theta_{aca} = \frac{\alpha_s \pi (r_{ir}^2 - r_{et}^2) L (\rho C_p)_{fa}}{r_c^2 q_l (\rho C_p)_{fcc}} \quad (A-21)$$

Aplicando a transformação de Laplace com a condição inicial na equação (A-6), utilizando as constantes definidas em (A-19), (A-20) e (A-21) e substituindo o valor da temperatura no anular dado pela equação (A-13) na equação (A-6), obtemos a equação transformada para o problema da temperatura do fluido na coluna:

$$\frac{\partial \bar{T}_{Dfc}}{\partial z_D} + \bar{T}_{Dfc} \left[s\theta_{acc} + \frac{1}{\gamma(s)} \left(\frac{\theta_{cc}}{\lambda(s)} + s\theta_{aca} \right) \right] = -\frac{1}{s} \quad (A-22)$$

Definindo a função auxiliar A(s):

$$A(s) = \left[s\theta_{acc} + \frac{1}{\gamma(s)} \left(\frac{\theta_{cc}}{\lambda(s)} + s\theta_{aca} \right) \right] \quad (A-23)$$

e aplicando a condição de contorno na superfície ($z_d=0$), obtemos um problema de valor inicial linear não homogêneo de primeira ordem dado pela equação diferencial ordinária no espaço de Laplace:

$$\frac{\partial \bar{T}_{Dfc}}{\partial z_D} + A(s)\bar{T}_{Dfc} = -\frac{1}{s} \quad (A-24)$$

mais a condição de contorno transformada:

$$\bar{T}_{Dfc}(s,0) = \frac{T_{Dinj}}{s} \quad (A-25)$$

A solução para o problema apresentado pelas equações (A-24) e (A-25) é bastante conhecida, podendo ser encontrada em vários textos de matemática aplicada.

$$\bar{T}_{Dfc}(s, r_D) = \frac{T_{Dinj}}{s} e^{-A(s)z_D} + \frac{e^{-A(s)z_D}}{sA(s)} - \frac{1}{sA(s)} \quad (A-26)$$

A equação (A-26) é a solução para temperatura do fluido no domínio de Laplace em função da profundidade da coluna. Infelizmente a inversão desta solução para o domínio do tempo não é obtida diretamente, necessitando a utilização de procedimentos numéricos para sua obtenção.

A variável adimensional do tempo utilizada para dedução da equação (A-26) dificulta a interpretação direta do valor real do tempo com base em seus valores adimensionais. Uma alternativa para esta situação é definir a variável adimensional do tempo em função de um valor que possibilite a interpretação dos resultados na forma adimensional. Escolhendo um tempo de adimensionalização genérico, a variável adimensional para o tempo passa a ser:

$$t_D = t / t_{adm} \quad (A-27)$$

As equações diferenciais na forma adimensional passam a ser:

$$\frac{\partial^2 T_{Ds}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial r_D} = \frac{r_c^2}{\alpha_s t_{adm}} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial t_D} \quad (A-28)$$

$$\frac{\partial T_{Dfc}}{\partial z_D} + \frac{1}{t_{adm}} \frac{\pi r_{it}^2 L}{q_l} \frac{\partial T_{Dfc}}{\partial t_D} + \frac{2\pi r_{it} U_{rit} L}{q_l (\rho C_p)_{fc}} (T_{Dfc} - T_{Dfa}) = -1 \quad (A-29)$$

$$2r_{it} U_{rit} (T_{Dfc} - T_{Dfa}) + 2k_s \left. \frac{\partial T_{Ds}}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} = \frac{1}{t_{adm}} (r_{ir}^2 - r_{et}^2) (\rho C_p)_{fa} \frac{\partial T_{Dfa}}{\partial t_D} \quad (A-30)$$

Como as demais condições para o problema permanecem inalteradas, com um processo semelhante ao utilizado para obtenção da equação (A-26), verificamos que a solução obtida é a própria equação (A-26), modificando apenas os valores das funções $\lambda(s)$ e $\gamma(s)$ e das constantes θ_{acc} e θ_{aca} :

$$\lambda(s) = \frac{\sqrt{\alpha_D s} \mathbf{K}_1(\sqrt{\alpha_D s})}{[\mathbf{K}_0(\sqrt{\alpha_D s}) + \varphi \sqrt{\alpha_D s} \mathbf{K}_1(\sqrt{\alpha_D s})]} \quad (A-31)$$

$$\gamma(s) = 1 + \frac{k_s}{r_{it} U_{rit} \lambda(s)} + s \frac{(r_{ir}^2 - r_{et}^2) (\rho C_p)_{fa}}{2r_{it} U_{rit} \lambda(s)} \frac{1}{t_{adm}} \quad (A-32)$$

$$\theta_{acc} = \frac{1}{t_{adm}} \frac{\pi r_{it}^2 L}{q_l} \quad (A-33)$$

$$\theta_{aca} = \frac{1}{t_{adm}} \frac{\pi (r_{ir}^2 - r_{et}^2) L}{q_l} \frac{(\rho C_p)_{fa}}{(\rho C_p)_{fcc}} \quad (A-34)$$

onde:

$$\alpha_D = \frac{r_c^2}{\alpha_{es} t_{adm}} \quad (A-35)$$

Um valor adequado para o tempo de adimensionalização é o tempo total previsto para operação, neste caso os valores do tempo adimensional ficam restritos ao intervalo entre 0 e 1, correspondentes ao início e ao final da injeção do fluido respectivamente.

Apêndice B: Correlações para Determinação das Propriedades Térmicas de Sistemas Rocha-Fluido

As equações apresentadas foram compiladas de Somerton[16])

A) Condutividade Térmica

Rochas Consolidadas

$$k_s = 0,525k_{ss} - 2,08\phi + 0,325k_{ss}S_w^{1/3} \quad (B-1)$$

Rochas não Consolidadas

$$k_s = 1,27 - 2,25\phi + 0,395k_{ss}S_w^{1/2} \quad (B-2)$$

Correção para Temperatura

$$k_s(T) = k_{293} - 10^{-3}(T - 293)(k_{293} - 1,38)[k_{293}(1,8 \times 10^{-3}T)^{-0,25k_{293}} + 0,74]k_{293}^{-0,64} \quad (B-3)$$

B) Calor Específico

Calor Específico do Grão da Rocha.

$$Cp_{ss} = 4518,7(T - 273)^{0,155} \quad (B-4)$$

Calor Específico do Óleo.

$$Cp_o = 4184[0,389 + 8,1 \times 10^{-4}(T - 273) / spgr_0^{0,5}] \quad (B-5)$$

C) Massa Específica

Massa Específica do Grão da Rocha.

$$\rho_{ss} = \rho_{293} / [1 + (T - 293)\beta_{ss}] \quad (B-6)$$

$$\beta_{ss} = 5 \times 10^{-5} / (T - 273) \quad (B-7)$$

Massa Específica do Óleo

$$\rho_o = \rho_{o293} / [1 + (T - 293)\beta_o] \quad (B-8)$$

$$\beta_o = 4,42 \times 10^{-4} + 1,03 \times 10^{-5} API \quad (B-9)$$

D) Produto ρC_p para Água

Para $298 \text{ K} < T < 563 \text{ K}$

$$\rho_w C_{p_w} = 4,184 \times 10^6 [1,0145 - 4,4 \times 10^{-4} (T - 273)] \quad (B-10)$$

Para $T > 563 \text{ K}$

$$\rho_w C_{p_w} = 3,70 \times 10^6 \exp[-4,81 \times 10^{-3} (T - 563) + 2,34 \times 10^{-4} (T - 563)^2] \quad (B-11)$$

E) Produto ρC_p Equivalente Para a Rocha Saturada com Fluido

$$\rho C_p = (1 - \phi) \rho_{ss} C_{p_{ss}} + \phi (s_w \rho_w C_{p_w} + s_o \rho_o C_{p_o}) \quad (B-12)$$

Apêndice C: Dados Típicos para o Cálculo da Distribuição de Temperatura durante Operações de Acidificação de Matriz

DADOS GERAIS	Símbolo	Unidade	Valor
Temperatura ambiente	T_a	(K)	2.98E+02
Gradiente geotérmico	w	(K/m)	2.00E-02

DADOS DO POÇO	Símbolo	Unidade	Valor
Raio do anel de cimento	rc	(m)	8.89E-02
Condutividade termica do cimento	kc	(W/mK)	9.00E-01
Raio externo do revestimento	rer	(m)	8.89E-02
Raio interno do revestimento	rir	(m)	8.08E-02
Condutividade termica do revestimento	kr	(W/mK)	4.32E+01
Raio externo da coluna	ret	(m)	3.65E-02
Raio interno da coluna	rit	(m)	3.10E-02
Condutividade termica da coluna	kt	(W/mK)	4.32E+01

DADOS DO FLUIDO NO ANULAR	Símbolo	Unidade	Valor
Massa específica do fluido	rfa	(kg/m ³)	1.00E+03
Calor específico do fluido	Cpfa	(J/Kg*K)	4.18E+03
Coeficiente de convecção anular-coluna	hac	(W/m ² *K)	1.00E+03
Coeficiente de convecção anular-revestimento.	har	(W/m ² *K)	1.00E+03

DADOS DO FLUIDO NA COLUNA	Símbolo	Unidade	Valor
Massa específica do fluido	rfc	(kg/m ³)	1.08E+03
Calor específico do fluido	Cpfc	(J/Kg*K)	4.18E+03
Temperatura de injeção na superfície	Tisup	(K)	2.98E+02
Coeficiente de convecção fluido-coluna	hc	(W/m ² *K)	1.00E+04

DADOS DA FORMAÇÃO	Símbolo	Unidade	Valor
Porosidade	fs		3.00E-01
Saturação de água	sws		9.00E-01
Massa específica da matriz da rocha	rss	(kg/m ³)	2.15E+03
Grau API do óleo na rocha	API _{os}		2.50E+01
Condutividade térmica	kss	(W/mK)	3.60E+00

DADOS DO RESERVATÓRIO	Símbolo	Unidade	Valor
Profundidade média	L	(m)	1.00E+03
Espessura da zona de injeção	h		3.00E00
Porosidade	fr		3.00E-01
Saturacao de óleo residual	sor		2.00E-01
Massa específica da matriz da rocha	rsr	(kg/m ³)	2.15E+03
Grau API do óleo na rocha	API _{or}		3.50E+01
Condutividade térmica	ksr	(W/mK)	3.60E+00

DADOS DA COMPOSIÇÃO DA ROCHA	Símbolo	Unidade	Valor
Porcentagem mássica em relação a massa de sólido	%W _{mj}	-	-
Quartzo		-	0,7
Calcita		-	0,1
Caulinita		-	0,08
Feldspato potássico		-	0,12

Raio médio das partículas dos minerais	r _{mj}	(m)	
Quartzo			1,0xE-05
Calcita			8,0xE-06
Caulinita			8,0xE-07
Feldspato potássico			3,0xE-06

CONCENTRAÇÃO INICIAL DOS MINERAIS	C _{mi}	kg- mol/m ³	-
Quartzo			2,50E01
Calcita			2,15E00

CONCENTRAÇÃO MINERAIS	RESIDUAL	DOS	C_{mr}	kg-mol/m ³	-
Quartzo				2,00E01	
Calcita				1,72E00	
Caulinita				3,33E-02	
Feldspato potássico				7,41E-01	

DADOS DO TRATAMENTO	Símbolo	Unidade	Valor
Concentração dos ácidos	CA	kg- mol/m ³	-
1a Fase - HCl (5%)			1,42
2a Fase - HCl(15%)			5,29
3a Fase - HCl(12%)			3,53
3a Fase - HF(3%)			1,61
4a Fase - HCl(5%)			1,42
Volumes de fluido	V_f	(m ³)	
Fluido na Tubulação e Produção			3,8
1a Fase			7,5
2a Fase			9,5
3a Fase			12
4a Fase			7,5
Deslocamento			3,8

Apêndice D: Adaptação da Equação de Ramey[2]

A equação original proposta em Ramey[2] é dada por:

$$T(t, z) = wz + T_a - wA + (T_{inj} + wA - T_a) \exp(-z / A) \quad (D-1)$$

com

$$A = \dot{m}C_{pf} \left[k_s + r_{it} U_{rit} f(t) \right] / 2\pi r_{it} U_{rit} k_s \quad (D-2)$$

onde a função $f(t)$ é obtida com a consideração de fluxo de calor constante e poço com raio infinitesimal:

$$f(t) = -\ln\left(\frac{r_c}{2\sqrt{\alpha_s t}}\right) - 0,290 \quad (D-3)$$

Utilizando a variável adimensional para o tempo definida pela equação (3.21), temos:

$$f(t_D) = -\frac{1}{2} \ln(t_D) + 0,4031 \quad (D-4)$$

Com a hipótese de fluxo de calor permanente entre a formação e o fluido na coluna, a relação entre os coeficientes globais de transmissão de calor relativos a raios diferentes são relacionados por:

$$r_{it} U_{rit} = r_c U_{rc} \quad (D-5)$$

Substituindo a equação (D-5) na equação (D-2), temos:

$$A = \dot{m}C_{pf} \left[k_s + r_c U_{rc} f(t_D) \right] / 2\pi r_c U_{rc} k_s \quad (D-6)$$

Utilizando a constante ϕ definida pela equação (3.34), temos

$$A = \dot{m}C_{pf} \left[\phi + f(t_D) \right] / 2\pi k_s \quad (D-7)$$

A vazão mássica do fluido pode ser expressa em função da vazão volumétrica e da massa específica do fluido:

$$\dot{m} = \rho_{fc} q_l \quad (D-8)$$

Dividindo a equação (D-7) por L e substituindo o valor de $\dot{m}$, temos:

$$\frac{A}{L} = \frac{(\rho C_p)_{fc} q_l}{2k_s L} [\varphi + f(t_D)] \quad (D-9)$$

Usando a constante θ_{cc} definida pela equação (3.30), obtemos:

$$\frac{A}{L} = \frac{[\varphi + f(t_D)]}{\theta_{cc}} \quad (D-10)$$

Substituindo a equação (D-10) na definição da temperatura adimensional dada pela equação (3.20), temos:

$$T_{Dfc}(t_D, z) = -\frac{A}{L} + (T_{Dinj} + \frac{A}{L}) \exp(-z / A) \quad (D-11)$$

Utilizando a definição de z_D dada pela equação (3.23) e substituindo o valor de A/L na equação (D-11), obtemos a equação de Ramey[2] com as variáveis adimensionais definidas na seção 3.3.

$$T_{Dfc}(t_D, z) = T_{Dinj} \exp\left[\frac{-z_D \theta_{cc}}{[\varphi + f(t_D)]}\right] + \frac{[\varphi + f(t_D)]}{\theta_{cc}} \left[\exp\left[\frac{-z_D \theta_{cc}}{[\varphi + f(t_D)]}\right] - 1 \right] \quad (D-12)$$

A equação (D-12) foi utilizada para obtenção das curvas de temperatura correspondentes ao modelo de Ramey[2], apresentadas no Capítulo 3.

Apêndice E: Dedução da Solução para Temperatura no Reservatório

Partindo das equações diferenciais e condições de contorno apresentadas na Seção 4.1 e utilizando as variáveis adimensionais definidas na Seção 4.2, obtemos o problema na forma adimensional para formação vizinha ao reservatório:

$$\frac{\partial^2 T_{Ds}}{\partial y_D^2} = \frac{\partial T_{Ds}}{\partial t_D} \quad (\text{E-1})$$

$$T_{Ds}(0, y_D) = 0 \quad (\text{E-2})$$

$$\lim_{y_D \rightarrow \infty} T_{Ds}(t_D, y_D) = 0 \quad (\text{E-3})$$

$$T_{Ds}|_{y_D=1} = T_{Dfr} \quad (\text{E-4})$$

Da mesma forma, obtemos o problema adimensional na zona de injeção:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial r_D} + \frac{2\pi\alpha_s r_c^2}{q_l h} \frac{(\rho C_p)_{er}}{(\rho C_p)_{fr}} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial t_D} - \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l (\rho C_p)_{fr} h} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial y_D} \bigg|_{y_D=1} = 0 \quad (\text{E-5})$$

$$T_{Dfr}(0, r_D) = 0 \quad (\text{E-6})$$

$$T_{Dfr}(t_D, 1) = T_{DiL} \quad (\text{E-7})$$

Aplicando a transformação de Laplace e a condição inicial ao problema na formação obtemos:

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_{Ds}}{\partial y_D^2} - s \bar{T}_{Ds} = 0 \quad (\text{E-8})$$

A equação (E-8) é uma equação diferencial ordinária homogênea de segunda ordem, cuja solução é dada por:

$$\bar{T}_{Ds}(y_D, s) = C_1 \exp(-y_D \sqrt{s}) + C_2 \exp(y_D \sqrt{s}) \quad (\text{E-9})$$

A condição de contorno externa impõe o valor nulo para a constante C_2 . Aplicando a condição de contorno interna transformada, obtemos o valor da constante C_1 .

$$C_1 = \bar{T}_{Dfr} \exp(\sqrt{s}) \quad (E-10)$$

Substituindo o valor de C_1 na equação (E-9), chegamos a solução no espaço de Laplace para o problema na formação em função da temperatura do fluido no reservatório:

$$\bar{T}_{Ds}(y_D, s) = \bar{T}_{Dfr} \exp[(1 - y_D)\sqrt{s}] \quad (E-11)$$

Aplicando a transformação de Laplace com a condição inicial à equação (E-5) e definindo as constantes que multiplicam os termos de acumulação e condução, obtemos a equação transformada para o problema da temperatura do fluido no reservatório:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + s\theta_{acr} \bar{T}_{Dfr} - \theta_{cr} \frac{\partial \bar{T}_{Ds}}{\partial y_D} \Big|_{y_D=1} = 0 \quad (E-12)$$

θ_{acr} e θ_{cr} representam, respectivamente, as constantes adimensionais relacionadas com os termos de acumulação e condução de calor normalizadas em relação à constante de convecção.

$$\theta_{acr} = \frac{2\pi\alpha_s r_c^2 (\rho C_p)_{er}}{q_l h (\rho C_p)_{fr}} \quad (E-13)$$

$$\theta_{cr} = \frac{2\pi k_s r_c^2}{q_l h (\rho C_p)_{fr}} \quad (E-14)$$

Substituindo o valor da derivada parcial de $\bar{T}_{Ds}$ em relação a y_D na equação (E-12), obtemos:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + s\theta_{acr} \bar{T}_{Dfr} + \theta_{cr} \bar{T}_{Dfr} \sqrt{s} = 0 \quad (E-15)$$

A equação (E-15) pode ser rescrita na forma:

$$\frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + r_D W_p(s) \bar{T}_{Dfr} = 0 \quad (E-16)$$

onde:

$$W_p(s) = s\theta_{acr} + \theta_{cr}\sqrt{s} \quad (E-17)$$

Aplicando a transformação de Laplace à condição de contorno em $r_D=1$, temos:

$$\bar{T}_{Dfr}(s,1) = \frac{T_{DiL}}{s} \quad (E-18)$$

A equação (E-16) e a condição de contorno em $r_D=1$ definem um problema de valor inicial, linear, homogêneo, de primeira ordem cuja solução pode ser obtida em Spiegel[26], sendo dada por:

$$\bar{T}_{Dfr}(r_D, s) = \frac{T_{DiL}}{s} \exp[W_p(1 - r_D^2) / 2] \quad (E-19)$$

Definindo:

$$W(s) = \frac{W_p}{2} \quad (E-20)$$

Obtemos :

$$\bar{T}_{Dfr}(r_D, s) = \frac{T_{DiL}}{s} \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] \quad (E-21)$$

A equação (E-21) é a solução, no domínio de Laplace, para temperatura do fluido em função do raio do reservatório. Felizmente, a transformada inversa desta solução para o domínio do tempo encontra-se tabelada em vários textos matemáticos, sendo dada pela equação (4.19).

De modo semelhante ao problema na coluna, a adimensionalização do tempo pode ser definida com valores que facilitem a interpretação dos dados na forma adimensional. Escolhendo um tempo de adimensionalização genérico, a variável adimensional para o tempo passa a ser:

$$t_D = t / t_{adm} \quad (E-22)$$

As equações diferenciais na forma adimensional passam a ser:

$$\frac{\partial^2 T_{Ds}}{\partial y_D^2} = \frac{h^2}{\alpha_s t_{adm}} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial t_D} \quad (E-23)$$

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial r_D} + \frac{2\pi h r_c^2 (\rho C_p)_{er}}{q_l t_{adm} (\rho C_p)_{fr}} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial t_D} - \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l (\rho C_p)_{fr} h} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial y_D} \bigg|_{y_D=1} = 0 \quad (E-24)$$

Como as demais condições para o problema permanecem inalteradas, com um processo semelhante ao utilizado para obtenção da equação (E-16), verificamos que a solução obtida é a própria equação (E-16), modificando apenas os valores das constantes θ_{acr} e θ_{cr} .

$$\theta_{acr} = \frac{2\pi h r_c^2 (\rho C_p)_{er}}{q_l t_{adm} (\rho C_p)_{fr}} \quad (E-25)$$

$$\theta_{cr} = \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l (\rho C_p)_{fr} h} \sqrt{\alpha_{Dr}} \quad (E-26)$$

onde:

$$\alpha_{Dr} = \frac{h^2}{\alpha_{es} t_{adm}} \quad (E-27)$$

Um valor adequado para o tempo de adimensionalização é o tempo total previsto para operação, neste caso os valores do tempo adimensional ficam restritos ao intervalo entre 0 e 1, correspondentes ao início e ao final da injeção do fluido respectivamente.

Apêndice F: Dedução da Equação para Concentração do Mineral no Meio Poroso - Modelo Simplificado

O problema de valor inicial para a concentração do mineral apresentado na seção 5.1 possui uma equação diferencial homogênea de primeira ordem:

$$(1 - \phi) \frac{\partial(C_m - C_{mr})}{\partial(t - t_r)} = -e_{fm} C_A^\sigma \mathbf{H}[t - t_r](C_m - C_{mr}) \quad (\text{F-1})$$

e sua condição de contorno inicial:

$$C_m(r, t = 0) = C_{mi} \quad (\text{F-2})$$

Considerando as variáveis auxiliares :

$$C_m^* = C_m - C_{mr} \quad (\text{F-3})$$

$$t^* = t - t_r \quad (\text{F-4})$$

As equações (F-1) e (F-2) podem ser rescritas como:

$$(1 - \phi) \frac{\partial C_m^*}{\partial t^*} = -e_{fm} C_A^\sigma \mathbf{H}[t^*] C_m^* \quad (\text{F-5})$$

$$C_m^*(r, t = 0) = C_{mi} - C_{mr} \quad (\text{F-6})$$

Separando as variáveis na equação (F-5)

$$\frac{dC_m^*}{C_m^*} = -\frac{e_{fm} C_A^\sigma}{(1 - \phi)} \mathbf{H}[t^*] dt^* \quad (\text{F-7})$$

Utilizando a definição da função de Heaviside, a solução da equação (F-7) é facilmente obtida:

$$C_m^* = C_i \exp \left[-\frac{e_{fm} C_A^\sigma}{(1 - \phi)} t^* \mathbf{H}[t^*] \right] \quad (\text{F-8})$$

Aplicando a condição inicial obtemos o valor da constante C_1 :

$$C_1 = C_{mi} - C_{mr} \quad (F-9)$$

Substituindo o valor de C_1 na equação (F-8) e utilizando as variáveis dimensionais, obtemos a equação da concentração do mineral para o modelo de concentração do ácido constante:

$$C_m(r, t) = C_{mr} + (C_{mi} - C_{mr}) \exp \left[- \frac{e_{fm} C_A^\sigma Ht - t_r}{(1 - \phi)} \right] \quad (F-10)$$

Apêndice G: Fórmulas para o cálculo da Constante de Velocidade da Reação de Ácidos com Minerais e Moléculas-grama das Substâncias

As equações e os valores das constantes apresentados nas Tabelas G-1 e G-2 foram compilados de Hill[17].

Tabela G-1: Moléculas-grama das Substâncias

Substância	Molécula-grama (MOL)
Ácido Fluorídrico	20
Ácido Clorídrico	36,5
Calcita	100,1
Dolomita	184,4
Siderita	115,8
Quartzo	60,1
Feldspato Sódico	262,3
Feldspato Potássico	278,4
Caulinita	516,4
Montmorilonita (não hidratada)	720,8

Fórmula geral para o valor da constante E_{fm} :

$$E_{fm} = E_f^0 [1 + \xi_1 C_{HCl}^{\xi_2}] \exp(-\frac{\xi_3}{T}) \tag{G-1}$$

onde os valores das constantes E_f^0 , ξ_1 , ξ_2 , e ξ_3 são dados na Tabela G-1.

Tabela G-2: Parâmetros para Constante de Velocidade da Reação

Mineral	Ácido	σ	E_f^0	ξ_1	ξ_2	ξ_3
Calcita(C_aCO_3) ^a	HCl	0.63	$3,66 \times 10^7$	0	-	7550
Dolomita ($C_aM_g(CO_3)_2$) ^b	HCl	$\frac{6,32 \times 10^{-4} T}{(1 - 1,92 \times 10^{-3} T)}$	$1,12 \times 10^5$	0	-	7900
Quartzo (SiO_2) ^c	HF	1	$2,32 \times 10^8$	0	-	1150
Feldspatos Potássico ($KAlSi_3O_8$)	HF	1,2	$1,27 \times 10^{-1}$	$5,66 \times 10^{-2} \exp(\frac{956}{T})$	0,4	4680
Feldspatos Sódico ($NaAlSi_3O_8$)	HF	1	$9,50 \times 10^{-3}$	$6,24 \times 10^{-2} \exp(\frac{554}{T})$	1,0	3930
Caulinita ($Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$)	HF	1	0,33	0	-	6540 ^d
Montmorilonita ($Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$)	HF	1	0,88	0	-	6540 ^d
Ilita	HF	1	$2,75 \times 10^{-2}$	0	-	6540 ^d
Muscovita ($KAl_2Si_3O_{10}(OH)_2$)	HF	1	0,49	0	-	6540 ^d

^a Com base em 1 mol de C_aCO_3 para cada 2 moles de HCl

^b Com base em 1 mol de $C_aM_g(CO_3)_2$ para cada 4 moles de HCl

^c Com base em 6 moles de HF para cada mol de SiO_2

^d Valores aproximados transcritos de Schechter[18]

Apêndice H: Dedução da Solução para Temperatura no Reservatório com o Termo de Geração de Calor

Considerando que a inclusão do termo de geração não modifica o equacionamento do problema na formação vizinha, utilizando as variáveis adimensionais T_D e y_D definidas na seção 4.2 e a forma genérica da adimensionalização para o tempo dada pela equação (E-22), seguimos um procedimento semelhante ao adotado no Apêndice E para obter a solução para temperatura da formação vizinha:

$$\bar{T}_{Ds}(y_D, s) = \bar{T}_{Dfr} \exp[(1 - y_D)\sqrt{\alpha_D s}] \quad (H-1)$$

o valor de α_D está definido pela equação (E-27) do Apêndice E.

Utilizando as variáveis adimensionais e dividindo os termos da equação (5.30) pelo valor da constante que multiplica o termo de convecção, obtemos a forma adimensional da equação do balanço de energia térmica no reservatório incluindo o termo de geração de calor.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial r_D} + \frac{2\pi h r_c^2}{q_l t_{adm}} \frac{(\rho C_p)_{er}}{(\rho C_p)_{fr}} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial t_D} - \frac{2\pi r_c^2 k_s}{q_l (\rho C_p)_{fr} h} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial y_D} \bigg|_{y_D=1} + \\ & + \frac{2\pi h r_c^2}{q_l (\rho C_p)_{fr}} \frac{e_{fm} \Delta H_m C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr})}{wL} \times \\ & \exp \left[- \frac{e_{fm} C_A^\sigma t_{adm} (t_D - t_{Dr})}{(1 - \phi)} \right] \mathbf{H}[t_D - t_{Dr}] = 0 \end{aligned} \quad (H-2)$$

A condição inicial e a condição de contorno na variável r permanecem as mesmas do modelo sem geração de calor.

$$T_{Dfr}(0, r_D) = 0 \quad (H-3)$$

$$T_{Dfr}(t_D, 1) = T_{DiL} \quad (H-4)$$

Agrupando os valores das constantes que multiplicam as variáveis, a equação (H-2) pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial r_D} + \theta_{acr} \frac{\partial T_{Dfr}}{\partial t_D} - \frac{\theta_{cr}}{\sqrt{\alpha_D}} \frac{\partial T_{Ds}}{\partial y_D} \Big|_{y_D=1} + \\ & + \theta_g \exp[-\theta_p[t_D - \theta_r(r_D^2 - 1)]] \mathbf{H}[t_D - \theta_r(r_D^2 - 1)] = 0 \end{aligned} \quad (H-5)$$

Os parâmetros θ_{acr} e θ_{cr} são definidos pelas equações (E-25) e (E-26), representando as contribuições dos termos de acumulação e de condução para formação vizinha, ambos normalizados em relação ao termo de convecção. O parâmetro θ_g representa o termo de geração de calor normalizado em relação ao termo de convecção do fluido. θ_p é um indicador do consumo do mineral por unidade de tempo adimensional e θ_r corresponde à relação entre o volume de um cilindro do reservatório com raio r_c e o volume injetado por unidade de tempo adimensional. Utilizando a definição de t_r dada pela equação (5.2) e comparando as equações (H-5) e (H-2), obtemos o valor dos parâmetros θ_g , θ_p e θ_r .

$$\theta_g = \frac{2\pi h r_c^2}{q_l(\rho C_p)_{fr}} \frac{e_{fm} \Delta H_m C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr})}{wL} \quad (H-6)$$

$$\theta_p = \frac{e_{fm} C_A^\sigma t_{adm}}{(1 - \phi)} \quad (H-7)$$

$$\theta_r = \frac{(1 - s_{or}) \phi h \pi r_c^2}{q_l t_{adm}} \quad (H-8)$$

Aplicando a transformação de Laplace com a condição inicial à equação (H-5), obtemos a equação diferencial transformada para o modelo com geração de calor:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + \theta_{acr} s \bar{T}_{Dfr} - \frac{\theta_{cr}}{\sqrt{\alpha_D}} \frac{\partial \bar{T}_{Ds}}{\partial y_D} \Big|_{y_D=1} + \frac{\theta_g}{(s + \theta_p)} \exp[-s \theta_r(r_D^2 - 1)] = 0 \quad (H-9)$$

Derivando a equação (H-1) e substituindo o valor da derivada parcial de $\bar{T}_{Ds}$ em relação a y_D na equação (H-9), obtemos:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + \theta_{acr} s \bar{T}_{Dfr} + \theta_{cr} \sqrt{s} \bar{T}_{Dfr} = -\frac{\theta_g}{(s + \theta_p)} \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \quad (H-10)$$

A equação (H-10) pode ser rescrita na forma:

$$\frac{\partial \bar{T}_{Dfr}}{\partial r_D} + r_D W_p(s) \bar{T}_{Dfr} = -r_D \frac{\theta_g}{(s + \theta_p)} \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)] \quad (H-11)$$

onde:

$$W_p(s) = s\theta_{acr} + \theta_{cr} \sqrt{s} \quad (H-12)$$

Aplicando a transformação de Laplace à condição de contorno em $r_D=1$, temos:

$$\bar{T}_{Dfr}(s,1) = \frac{T_{DiL}}{s} \quad (H-13)$$

A equação (H-11) e a condição de contorno em $r_D=1$, equação (H-13), definem um problema de valor inicial, linear, não homogêneo de primeira ordem com coeficientes constantes. A solução para equação (H-11) é apresentada em Spiegel[26], sendo dada por:

$$\bar{T}_{Dfr}(r_D, s) = -\frac{\theta_g \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)]}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} + C_1 \exp[-W(s)r_D^2] \quad (H-14)$$

onde:

$$W(s) = \frac{W_p}{2} \quad (H-15)$$

Aplicando a condição de contorno dada pela equação (H-13), obtemos a solução transformada para o modelo com geração de calor:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{Dfrg}(r_D, s) &= \frac{T_{DiL}}{s} \exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] + \\ &+ \frac{\theta_g}{2(W(s) - s\theta_r)(s + \theta_p)} \{\exp[-W(s)(r_D^2 - 1)] - \exp[-s\theta_r(r_D^2 - 1)]\} \end{aligned} \quad (H-16)$$

A equação (H-16) é a solução, no domínio de Laplace, para temperatura do fluido em função do raio do reservatório. Os valores no domínio do tempo são obtidos com a inversão numérica pelo algoritmo de Stehfest[24].

Para a adimensionalização do tempo utilizada no Capítulo V, os valores das constantes adimensionais, assumem valores diferentes. Pela definição do t_D utilizada nos Capítulos IV e V, temos:

$$t_{adm} = \frac{h^2}{\alpha_s} \quad (H-17)$$

Substituindo o valor de t_{adm} dado pela equação (H-17) nas equações de θ_g , θ_p e θ_r obtemos os valores das constantes dados no Capítulo V.

$$\theta_g = \frac{2\pi r_c^2 h}{q_l (\rho C_p)_{fr}} \frac{e_{fm} \Delta H_m C_A^\sigma (C_{mi} - C_{mr})}{wL} \quad (H-18)$$

$$\theta_p = \frac{e_{fm} C_A^\sigma h^2}{(1 - \phi) \alpha_s} \quad (H-19)$$

$$\theta_r = \frac{(1 - s_{or}) \phi \alpha_s \pi r_c^2}{q_l h} \quad (H-20)$$

Apêndice I: Dados de Programas de Acidificação de Matriz em Arenitos

Tabela I-1: Dados para Poço Raso - Injetor de Água

Profundidade do Reservatório	650 m
Gradiente Geotérmico	0,034 K/m
Espessura da Zona de Injeção	5,5 m
Porosidade	22 %
Coluna de Injeção	2 7/8"-EU- 6,5 lb/pé
1 ^a . Fase (Ácido Acético a 10 %)	1,89 m ³
2 ^a . Fase (Ácido Acético a 10 %+ HF a 1%)	3,78 m ³

Tabela I-2: Dados para Poço Profundo - Produtor de Óleo

Profundidade do Reservatório	2300 m
Gradiente Geotérmico	0,034 K/m
Espessura da Zona de Injeção	9 m
Porosidade	15 %
Coluna de Injeção	3 1/2"-EU- 9,5 lb/pé
1 ^a . Fase (Óleo Diesel)	1,89 m ³
2 ^a . Fase (Ácido Acético a 10 %)	5,68 m ³
3 ^a . Fase (Ácido Acético a 10 %+ HF a 1%)	11,35 m ³
4 ^a . Fase (Ácido Acético a 10 %)	3,78 m ³