

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

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

ANÁLISE AUTOMATIZADA DE TESTES DE PRESSÃO EM POÇOS

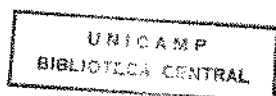
NÃO SURGENTES

*Este exemplar corresponde a versão final da Tese
defendida pelo Engº José Oliveira Vidal e aprovada
pela comissão julgadora em 20/03/89.*


Dr. Antonio Cláudio de França Corrêa
AUTOR : José Oliveira Vidal

ORIENTADOR : Antônio Cláudio de França Corrêa

Março, 1989

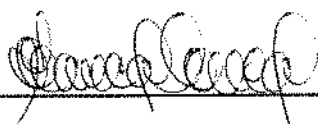


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

A dissertação "Análise Automatizada de testes de pressão em poços não surgentes", elaborada por José Oliveira Vidal e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

Campinas, 20 de março de 1989

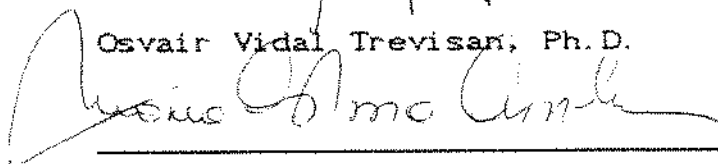
Banca Examinadora



Antônio Cláudio de França Corrêa, Ph.D.



Osvair Vidal Trevisan, Ph.D.



Maria Cristina Cunha Bezerra, Ph.D.

Para meus familiares

Para minha esposa
Roseane

Para minha filha
Cecília

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Centro de Engenharia de Petróleo da Universidade Estadual de Campinas pela disposição durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais, Oscar e Maria, pela educação recebida.

Ao meu orientador, Prof. Antônio Cláudio de F. Corrêa, pela ajuda, compreensão e determinação em todas as etapas da tese.

Aos professores José Martinez, Maria Cristina e Martin Tygel do I.M.E.C.C./UNICAMP e ao prof. Secundino da Faculdade de Engenharia Elétrica/UNICAMP pelos esclarecimentos imprescindíveis neste estudo.

A todos aqueles, inclusive aos amigos da PETROBRAS, que de alguma forma contribuíram para a realização desta tarefa.

Sumário

Agradecimentos	iii
Sumário	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	ix
Resumo	xi
Abstract	xii
1. Introdução	1
1.1 Histórico da análise de teste de formação	2
1.2 Histórico da análise automatizada de teste	5
1.3 Objetivo e metodologia	6
2. Modelo matemático do problema de DST	7
2.1 Equações dimensionais	8
2.2 Equações normalizadas	10
3. Soluções das equações para poços não surgentes ...	12
3.1 As equações governantes	12
3.1.1 Solução para o período de fluxo	13
3.1.2 Solução para o problema de DST	14
4. Estimativa dos parâmetros por regressão	17
4.1 Escolha do método de estimativa	18
4.2 Problema de quadrados mínimos não lineares	19
4.2.1 Método de <i>Newton</i>	20
4.2.2 Método de <i>Gauss</i>	20
4.2.3 Método de <i>Levenberg-Marquardt</i>	21
4.3 Justificativa teórica do método	22
5. Interpretação automatizada com dados simulados....	26
5.1 No fluxo por diferenças finitas	26
5.1.1 Discussão do método e resultados	27
5.2 No fluxo por inversão numérica	28
5.2.1 Discussão do método e resultados	30

5.3 Na estática por inversão numérica	35
5.3.1 Métodos de solução da integral	36
5.3.2 Aplicação do método	40
5.3.2.1 Discussão do método e resultado ...	42
5.4 Nos períodos de fluxo e estática	43
5.4.1 Aplicação do método	45
5.4.2 Discussão e novas propostas	47
6. Interpretação automatizada em dados reais	51
6.1 Poços de alta produtividade	51
6.1.1 Discussão dos resultados	55
6.1.2 Nova proposta	55
6.1.3 Uso de pesos diferenciados	56
6.1.4 Outros exemplos	58
6.2 Poços de baixa produtividade	63
6.2.1 Discussão dos resultados	67
6.2.2 Retirando pontos da estática	68
6.3 Análise estatística da regressão	70
7. Otimização no DST por diferenças finitas	72
7.1 Uso em dados simulados	73
7.2 Uso em dados reais	78
7.2.1 Outros exemplos	83
7.2.2 Discussão do método	84
8. Conclusão e Recomendação	86
8.1 Conclusões	86
8.2 Recomendações	88
9. Monenclatura	89
10. Referência bibliográfica	93
Apêndice A	
Solução da equação do "Slug Test" dimensionalizada ..	95
Apêndice B	
Derivação do "Slug Test" em relação aos parâmetros ..	98
Caso "skin" positivo	98

Caso "skin" negativo	100
Apêndice C	
Solução do problema do DST em forma dimensional	103
Apêndice D	
Derivação do DST em relação aos parâmetros	105
Caso "skin" positivo	105
Caso "skin" negativo	109
Apêndice E	
Alternativas de solução da integral do DST	114
Apêndice F	
Solução do problema do DST por diferenças finitas ...	122
Apêndice G	
Listagens dos programas de otimização	126
G.1 No fluxo por diferenças finitas para cálculo de k , S , p_o e C_f	127
G.2 No fluxo por inversão numérica para cálculo de k , S , e p_o	131
G.3 Na estática por inversão numérica para cálculo de k , S e p_i	134
G.4 Em um ciclo por inversão numérica para cálculo de k , S , p_i e p_o	144
Apêndice H	
Listagem do programa gerador de dados de pressão	175
Apêndice I	
Listagem do programa de otimização por diferenças finitas	183

Lista de figuras

		<u>Página</u>
Figura 3.1	Função degrau e complemento	15
Figura 4.1	Esquema de um Dst (1 ciclo)	17
Figura 5.1	Otimização no fluxo (k , S e p_o)	31
Figura 5.2	Otimização no fluxo (S , C_f e SSR)	32
Figura 5.3	Otimização no fluxo (k , S e C_f)	32
Figura 5.4	Sensibilidade de k com C_f	33
Figura 5.5	Sensibilidade de k e S com API óleo	34
Figura 5.6	Sensibilidade de S com C_f	35
Figura 5.7	Otimização na estática (k , S e p_i)	43
Figura 5.8	Dados gerados para DST (1 ciclo)	45
Figura 5.9	Otimização no fluxo e estática	46
Figura 5.10	Função objetivo durante otimização	49
Figura 5.11	Otimização no DST (k , S , p_o e p_i)	49
Figura 5.12	Sensibilidade dos parâmetros com C_f	50
Figura 5.13	Sensibilidade dos parâmetros com C_u	50
Figura 6.0	Carta do DST no poço A	53
Figura 6.1	Otimização no DST do poço A (sem peso) ..	57
Figura 6.2	Otimização no DST do poço A (com peso) ..	57
Figura 6.3	Resultados manual vs otimizado	57
Figura 6.4	Otimização sem peso no Cp115	59
Figura 6.5	Otimização com peso no Cp115	59
Figura 6.6	Otimização sem peso no Cp137	60
Figura 6.7	Otimização com peso no Cp137	60
Figura 6.8	Otimização sem peso no Cp222	61
Figura 6.9	Otimização com peso no Cp222	61
Figura 6.10	Otimização sem peso no Cp295	62
Figura 6.11	Otimização com peso no Cp295	62
Figura 6.12	Carta DST do poço CP760	63
Figura 6.13	Otimização com peso Cp760 (N=20)	66

Figura 6.14	Otimização com peso Cp760 (N=10)	67
Figura 6.15	Otimização com peso Cp760 (trecho)	69
Figura 7.1	Pressões por diferenças finitas e por inversão numérica	74
Figura 7.2	Otimização no fluxo e no DST completo ...	75
Figura 7.3	Otimização para DST por diferenças finitas	76
Figura 7.4	Otimização no fluxo	77
Figura 7.5	Função objetivo na otimização	77
Figura 7.6	Otimização por diferenças finitas no CP760 (sem peso)	78
Figura 7.7	Gráfico cartesiano do CP760	79
Figura 7.8	Otimização Por diferenças finitas no CP760 (com peso)	80
Figura 7.9	Otimização por diferenças finitas no CP760 (trecho)	81
Figura 7.10	Otimização por diferenças finitas no CP760 (trecho)	82
Figura 7.11	Otimização no DST do Fu22	83
Figura 7.12	Otimização no DST do Fu22 (com peso)	83
Figura 7.13	Otimização no DST do Fu22 (trecho)	85

Lista de tabelas

	<u>Página</u>
Tabela 2.1 Definição das variáveis adimensionais	11
Tabela 5.1 Dados de fluido e rocha	25
Tabela 5.2 Dados gerados para fluxo	25
Tabela 5.3 Cálculo de k , S , C_f e p_o no fluxo	27
Tabela 5.4 Dados de fluido e rocha	29
Tabela 5.5 Dados gerados para fluxo	29
Tabela 5.6 Cálculo de k , S , C_f e P_o no fluxo	30
Tabela 5.7 Métodos de integração	37
Tabela 5.8 Comparação da integração de $F(t)$	38
Tabela 5.9 Comparação da integração de $G(t)$	39
Tabela 5.10 Dados de fluido e mecânico do poço	40
Tabela 5.11 Dados gerados de pressão estática	41
Tabela 5.12 Cálculo de k , S , p_i e C_f na estática	42
Tabela 5.13 Dados simulados de um DST (1 ciclo)	44
Tabela 5.14 Cálculo de k , S , p_i , C_f e C_w no DST	46
Tabela 5.15 Cálculo de k , S , p_i e p_o no DST	47
Tabela 5.16 Cálculo de k , S e p_i no DST	48
Tabela 6.1 Dados poço A (do SPE 16802)	52
Tabela 6.2 Interpretação manual do poço A	53
Tabela 6.3 Interpretação automática do poço A (sem peso)	54
Tabela 6.4 Interpretação automática do poço A (com peso)	56
Tabela 6.5 Exemplos de interpretação automática	58
Tabela 6.6 Pressão no poço Cp760	64
Tabela 6.7 Dados do poço, rocha e fluido do Cp760 ...	65
Tabela 6.8 Interpretação manual do Cp760	65
Tabela 6.9 Interpretação automática do Cp760 (completo)	66

Tabela 6.10	Interpretação automática do Cp760 (trecho)	69
Tabela 6.11	Intervalo de confiança do poço A (sem peso)	71
Tabela 6.12	Intervalo de confiança do poço A (com peso)	71
Tabela 7.1	Dados simulados DST (1 ciclo)	73
Tabela 7.2	Cálculo de k, S e pi no Cp760	81
Tabela 7.3	Cálculo de k, S e pi no Cp760 (trecho) ...	82
Tabela 7.4	Resultados de interpretação no Fu22	84
Tabela 7.5	Resultados de interpretação no poço A	85
Tabela 9.1	Conversão de unidade de grupos adimensionais	92
Tabela 9.2	Constantes de transformação de unidades ..	92

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para interpretação de teste de pressão em poços não surgentes (ou DST).

O método faz um ajuste dos dados de campo com os dados gerados por modelo teórico de reservatório, usando uma técnica de regressão irrestrita, não linear sob o critério dos quadrados mínimos, acoplado a um algoritmo de inversão numérica de transformada de Laplace para os dados de pressão de fluxo e estática.

Obteve-se a solução da pressão no poço por técnica de transformadas de Laplace, modelando o teste de formação como sendo um "slug test" com uma mudança brusca de estocagem.

Os gradientes de pressão necessários para implementar a técnica de regressão foram determinados analiticamente e depois invertidos numericamente para o espaço real usando o algoritmo de Stehfest.

Analisou-se o período de fluxo, o período de estática e ambos os períodos simultaneamente (um ciclo completo) do teste de formação para o caso de um reservatório homogêneo, infinito com fluxo radial para o poço e incluindo os efeitos de estocagem e "skin" (positivo ou negativo).

Esta análise fornece a pressão estática inicial do reservatório, a permeabilidade da formação e o dano no poço.

Atribuiu-se pesos individuais aos dados de pressão vs tempo para compensar os efeitos de flutuação devido instabilidade dos registradores de pressão.

Analisou-se testes com dados reais e simulados para ilustrar a aplicação do método, e verificou-se os resultados com um algoritmo de diferenças finitas.

Embora não seja necessária a determinação da vazão de fluxo para esta análise, é de vital importância a estimativa da densidade média dos fluidos produzidos.

Este método reduz o tempo gasto para análise do teste e elimina a subjetividade da interpretação.

ABSTRACT

This paper presents a method for automatic interpretation of drillstem tests when produced fluids do not fill the drillstring.

The method matches the field data with theoretical reservoir models using an unconstrained, nonlinear, least-squares regression technique coupled with numerical Laplace inversion of both flowing and shut in pressures.

The solution for the pressure at the wellbore has been obtained by Laplace transformation, by modelling a drillstem test as a slug test with a step change in wellbore storage.

The parameter gradients needed to implement the regression technique were determined analytically and then numerically inverted to real space using the Stehfest algorithm.

Analysis of the flow period, of the shut in period and of both periods (one complete cycle) of a drillstem test were done for a single, homogeneous and infinite system with wellbore storage and skin effect (both positive and negative). This analysis may provide the initial reservoir pressure, the formation permeability and the skin effect factor.

The pressure vs time data points have been properly weighted in order to eliminate the effects of fluctuations or instability on data acquisition device.

Simulated pressure tests and actual field data are analyzed to illustrate the application of the method.

The results are checked by a finite difference algorithm.

Although flow rate measurements are not required for the applications of the proposed method, it is very important to estimate correctly the average density of the produced fluids for a good interpretation of the test.

The method reduces the time to perform drillstem test analysis and minimizes the subjectivity of interpretation.

1. INTRODUÇÃO

A prática atual de interpretação de teste consiste em usar técnicas log-log e semi-log principalmente durante o período de estática. Em poços não surgentes uma vazão média é estimada do volume recuperado, e procede-se à interpretação com um dado modelo de comportamento a fim de determinar a permeabilidade (k), o efeito de película (S) e a pressão estática (p_i).

Não é feito contudo um estudo dos resultados da interpretação para verificar a sua validade com os dados de pressão versus tempo obtidos do poço.

Este trabalho apresenta uma técnica de interpretação de teste em poços não surgentes, usando um microcomputador digital, para determinação dos principais parâmetros do sistema poço-reservatório considerando os efeitos de estocagem e de película no poço.

Este capítulo 1 apresenta uma cronologia dos estudos da interpretação de teste em poços não surgentes, um histórico da interpretação automatizada e as definições do objetivo e metodologia usadas. Nos capítulos 2 e 3 introduz-se os modelos físicos e matemáticos usados. No capítulo 4 estuda-se critérios matemáticos para aplicação do algoritmo que será aplicado inicialmente para os dados simulados no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta a aplicação do método a dados reais e novos critérios práticos para serem usados. O capítulo 7 discute o método por diferenças finitas e no capítulo 8 apresentam-se as conclusões e recomendações.

Nos apêndices A e C estão as deduções das equações da pressão durante os períodos de fluxo e estática para o "skin" positivo e negativo. Nos apêndices B e D estão as respectivas expressões analíticas dos gradientes de pressão. O apêndice E apresenta um estudo comparativo de métodos de integração. O apêndice F mostra o método de diferenças finitas e nos apêndices G e H estão as listagens dos programas usados.

1.1. HISTÓRICO DA TEORIA DE ANÁLISE DO TESTE DE FORMAÇÃO

O teste de formação (ou DST) é o mais antigo método usado na determinação de parâmetros de reservatório. O DST pode ser visto como uma completação provisória do poço. As ferramentas de teste são descidas no poço e uma sequência de períodos de produção e fechamento é feita com o objetivo de registrar o comportamento de pressão durante o teste.

Durante o período de fluxo (também dito "slug test") é imposta uma mudança de pressão no poço devido à entrada de fluido da formação para o interior da coluna. A análise deste período, que normalmente é curto, pode nos fornecer a transmissibilidade da formação e as condições do poço (dano).

No período de estática, após o fluxo, a pressão do reservatório é recomposta e a análise deste crescimento de pressão pode fornecer a transmissibilidade, o efeito de película e a pressão estática do reservatório..

O desenvolvimento da teoria de análise do DST dependeu do progresso da análise do período de fluxo ("slug test") e da elaboração de métodos coerentes para o período de estática.

A teoria do "slug test" progrediu em complexidade desde a consideração do poço como uma fonte linear até a inclusão de efeitos de película e estocagem num poço de raio finito.

Em 1954 Ferris & Knowles estenderam o conceito de fonte linear de Theis (1935) para a solução de longo tempo do "slug test" para determinar a transmissibilidade em aquíferos.

Em 1960 Carslaw & Jaeger apresentaram em estudo de calor, a solução no espaço de Laplace para o problema do "slug test" considerando raio finito e incluindo o efeito de estocagem, mas sem efeito de película ("skin").

Cooper (1960) aplicou esta solução para fluido semi-compressível em um aquífero usando análise semilog do "slug test".

A técnica de ajuste em curva tipo semilog foi usada pela

primeira vez em análise de DST por *Kohlhaas* em 1972.

Agarwal & Ramey (1972) mostraram que a solução do "slug test" é proporcional à derivada em relação ao tempo da solução da pressão de fluxo para poços produzindo com vazão constante, incluindo os efeitos de estocagem e "skin".

Ramey et al. (1972) apresentaram duas novas curvas tipo log-log incluindo o efeito de película, sendo que uma descreve o "slug test" em tempos iniciais, e a outra os tempos finais. As curvas apresentadas por *Cooper* foram consideradas válidas para os tempos intermediários.

Contudo, devido a extensão do estudo do "slug test" o conceito do efeito de película não foi solucionado corretamente, e as curvas tipo de *Ramey* não valem para os tempos iniciais e intermediários.

Em recente publicação *A. Sogeev* (1986) apresentou a solução do "slug test" com efeito de estocagem e "skin" através de curvas tipo e concluiu:

- i) São necessárias 2 curvas tipo log-log para a análise da resposta do "slug test" nos tempos iniciais, dependendo da presença do efeito de película.
- ii) O efeito de película causa uma vazão constante nos tempos iniciais de produção, durante o qual o parâmetro de correlação deve ser $C_D S$ nas curvas tipo.
- iii) O parâmetro de correlação para tempos longos na curva tipo log-log é $C_D \exp(2 S)$ como apresentado por *Ramey*.

Em geral o período de fluxo do DST ("slug test") é curto e os métodos de análise simplificados não podem ser aplicados, pois não se atinge o trecho reto no gráfico de pressão versus inverso do tempo, ficando pois a interpretação restrita aos métodos manuais ou automatizados de ajustes em curvas tipo.

No período da estática do DST a vazão da formação decresce rapidamente com o tempo, fornecendo uma curva suave de crescimento de pressão. Historicamente este período tem sido interpretado pelo método de *Horner*, o qual foi concebido

para poços produzindo com vazão constante. O método de *Horner* apresenta resultados exatos para poços produzidos com pressão constante (como é o caso de muitos DST) desde que se utilize como tempo de produção a razão entre o volume total recuperado dividido pela última vazão antes do fechamento.

Horner (1951) aplicou o princípio da superposição com a solução de vazão constante a fim de obter uma equação para a pressão estática, a qual poderia ser usada como método para estimar a permeabilidade e a pressão estática da formação.

Ehlig-Economides & Ramey (1972) usaram a integral de superposição para computar a pressão estática após um período de produção com pressão constante. Eles concluíram, que a linha correta do método de *Horner* poderia ser obtida usando o tempo de produção calculado por balanço de materiais; e que a permeabilidade correta deveria ser calculada usando a última vazão antes do fechamento do poço.

Uraiet & Raghavan (1979) resolveram o mesmo problema usando a técnica de diferenças finitas, e concluíram que deveria ser usado o tempo de produção correto no método de *Horner*, e também a vazão média para determinação da permeabilidade do reservatório.

Soliman (1981) usou a função degrau unitário para representar a condição de contorno interna para cálculo da pressão estática após um período de fluxo com vazão constante.

Corrêa (1988) apresentou a solução analítica exata para os períodos de fluxo e de estática através da solução da equação da difusividade com uma condição de contorno mista. A solução inclui os efeitos de estocagem e "skin", e foi obtida por transformada de *Laplace* e generalizada para o caso de vários ciclos de produção e fechamento.

A solução geral de *Corrêa* para o DST será usada neste trabalho em conjunto com o algoritmo para inversão numérica da transformada de *Laplace* desenvolvido por *Stehfest* (1970), para a interpretação automatizada dos dados de teste de

pressão de poços não surgentes (DST), usando regressão não linear.

1.2. HISTÓRICO DA ANÁLISE AUTOMATIZADA DE TESTE DE PRESSÃO

Earlougher & Kersch (1972) apresentaram 2 exemplos de análise de teste transiente de pressão com dados de campo.

Eles usaram a solução da fonte linear para reservatório infinito e empregaram um método de análise de regressão para determinação de parâmetros de reservatório em teste de interferência e fall-off.

Em 1972 *Hernandez & Swift* formularam um algoritmo diferencial de quadrados mínimos que eliminava os problemas de linearização de sistemas não lineares.

Chen et al. (1974) compararam a eficiência de vários métodos (*Steepest descent*, *Gauss-Newton* e gradiente conjugado) para obterem ajustes com histórico de pressão de reservatório.

Em 1981 *Rodger et al.* empregaram técnicas de regressão não linear para estimar permeabilidade, difusividade, pressão inicial e distância geométrica em reservatórios limitados sem incluir efeitos de estocagem e "skin".

Em 1983 *Rosa* testou alguns métodos quase Newton (ou seja métodos que otimizam usando somente a derivada primeira) para ajuste automático de dados de campo em curvas tipo geradas em cada iteração. Foram considerados modelos de reservatório homogêneo e heterogêneos, com estocagem e "skin" positivo, mas a análise foi desenvolvida somente para o período de fluxo em poços surgentes.

No estudo de *Rosa* as soluções da pressão para os diversos modelos de fluxo em reservatórios foram obtidas no espaço de *Laplace*, tendo sido invertidas numericamente para o espaço real a fim de se fazer o ajuste com os dados de campo. Isto possibilitou não só a estimativa dos parâmetros do reservatório como também os do poço.

Rosa escreveu o algoritmo de regressão passo a passo e explorou vários aspectos dos métodos de Gauss e de Gauss-Marquardt (também conhecido como Levenberg-Marquardt) tais como:

- i) Singularidade nas matrizes devido a dependência linear entre os parâmetros a serem determinados.
- ii) Conjunto de parâmetros que podem ser determinados para cada modelo de reservatório.
- iii) Influência do parâmetro de Marquardt (λ) que cresce com o número de condição da matriz.
- iv) Necessidade de restrição nos parâmetros para evitar respostas negativas indesejáveis.
- v) Intervalo de confiança dos parâmetros determinados.

Para cada modelo de reservatório deve-se estudar qual o melhor algoritmo de regressão a ser aplicado, e isto parece ser o problema mais difícil.

Horne & Barua (1985) publicaram vários artigos sobre a escolha e uso de diversos algoritmos para aplicação em regressão não linear para análise de teste de pressão. Parece que informações complementares, como uso de algoritmo com derivada segunda e ou inclusão do comportamento da vazão vs tempo, podem melhorar o mal condicionamento dos parâmetros e até mesmo permitir a determinação de maior quantidade deles.

Comparando os diversos algoritmos Horne & Barua concluem que o método de Levenberg-Marquardt é o melhor (em termos de convergência e menor trabalho nos cálculos das derivadas), quando só existe apenas um parâmetro mal condicionado.

Neste trabalho será usado o método de Levenberg-Marquardt sem restrição nos parâmetros do modelo.

1.3. OBJETIVO E METODOLOGIA

O principal objetivo deste estudo é a determinação dos parâmetros do poço e do reservatório automaticamente, através do uso de algoritmo de regressão não linear, e da solução

recentemente desenvolvida por Corrêa para poços não surgentes.

As equações das pressões de fluxo e estática (1 ciclo) serão usadas em conjunto para determinação da pressão de fluxo inicial (p_o), da pressão estática do reservatório (p_i), da permeabilidade (k), do efeito de película ou "skin" (S), e dos coeficientes de estocagem no fluxo (C_f) e estática (C_e).

Como as soluções exatas das pressões dos períodos de fluxo e estática só são conhecidas explicitamente no espaço de Laplace, os seus valores e dos seus respectivos gradientes com relação aos parâmetros desconhecidos serão obtidos no espaço real através da inversão numérica pelo o algoritmo de Stehfest (1970). O ajuste dos dados com o modelo serão então feito no espaço real.

Será estudado o caso do DST em reservatório infinito com fluxo radial, homogêneo, e inicialmente em repouso.

2. MODELO MATEMATICO DO PROBLEMA DE TESTE DE FORMAÇÃO

A dedução da equação que descreve o comportamento da pressão como função da posição e do tempo para o fluxo de fluido em um meio poroso, é baseada nos seguintes princípios:

- (A) Conservação da massa
- (B) Equação de Estado
- (C) Equação de escoamento (lei de Darcy)

O princípio da conservação de massa produz a equação da continuidade que, combinada com a equação de fluxo e com a equação de estado adequada fornece a equação diferencial que descreve o comportamento da pressão no modelo proposto.

Para resolver esta equação diferencial parcial é necessário a definição das condições iniciais e de contorno.

Como o DST é um teste de curta duração, e devido a geometria cilíndrica do poço, o fluxo no reservatório pode ser descrito pela equação da difusividade em forma radial

2.1. Equações dimensionais

As equações no sistema internacional de unidades serão:

2.1.1. Equação diferencial parcial da difusividade

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\phi \mu c_l}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.1)$$

Na derivação da equação da difusividade acima, foram feitas as seguintes hipóteses :

- (1) Fluxo horizontal radial
- (2) Meio poroso isotrópico e homogêneo
- (3) Fluxo monofásico
- (4) Fluido com viscosidade constante
- (5) Fluido com pequena compressibilidade
- (6) Gradiente de pressão pequeno em todo o reservatório

2.1.2. Condição inicial do reservatório :

Assume-se que o reservatório tenha uma distribuição de pressão homogênea antes do teste, ou seja :

$$p(r,0) = p_i, \quad r > r_w \quad (2.2)$$

2.1.3. Condição de contorno externa :

Devido à curta duração do DST os efeitos de limites externos do reservatório não afetam o seu comportamento de pressão.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} p(r,t) = p_i \quad (2.3)$$

2.1.4. Condição inicial do poço :

Por causa da entrada instantânea de fluido no poço e ou a presença de um colchão de fluido na coluna de teste, tem-se:

$$p_v(0^+) = p_o \quad (2.4)$$

2.1.5. Período de fluxo :

Como o período de fluxo é pequeno e nenhum líquido é produzido na superfície, a taxa de acumulação de fluido no poço deve ser igual à vazão da formação.

$$q_v(t) - C_f \frac{dp_v}{dt} = 0, \quad 0 < t < t_p \quad (2.5)$$

Determina-se C_f pela equação de balanço de materiais:

-Vazão do reservatório:

$$q(r) = \frac{2\pi khr}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (2.6)$$

$$\dot{q} = \rho_r q_r = \frac{2\pi khpr}{\mu} \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} \quad (2.7)$$

$$c_v = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} \quad (\text{equação de estado}) \quad (2.8)$$

$$\dot{q} = \frac{2\pi khpr}{\mu} \frac{1}{c_v \rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{2\pi khr}{\mu c_v} \frac{\partial \rho}{\partial r} \quad (2.9)$$

- Taxa de acumulação de fluido no poço :

$$ms = \int \rho_v dv = A \int_0^1 \rho_v dl \quad (2.10)$$

$$\frac{dms}{dt} = \dot{q} = A \rho_v \frac{dl}{dt} \quad (2.11)$$

$$p = \int_0^1 \rho g dh \quad (2.12)$$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1}{\rho_v g} \frac{dp}{dt} \quad (2.13)$$

Derivando parcialmente e substituindo (2.8) em (2.13) tem-se:

$$\dot{q} = \frac{A}{\rho g c_v} \frac{dp}{dt} \quad (2.14)$$

Igualando as equações (2.9) e (2.14) teremos que :

$$\frac{2\pi khr}{\mu c_v} \frac{\partial \rho}{\partial r} = \frac{A}{\rho g c_v} \frac{d\rho}{dt} \quad (2.15)$$

$$\text{então} \quad C_r = \frac{A}{\rho_v g} = \frac{\pi r^2}{\gamma_v} \quad (2.16)$$

2.1.6. Período de estática

Após o fechamento, através da válvula de fundo, o fluido proveniente do reservatório é comprimido abaixo do ponto de fechamento, o que pode ser descrito por :

$$q_v(t) - C_s \frac{dp_v}{dt} = 0 \quad , \quad t > t_p \quad (2.15)$$

$$\text{onde:} \quad C_s = c_v V_v \quad (2.16)$$

A semelhança entre as equações do período de fluxo (2.5) e da estática (2.18) sugere que o problema de DST pode ser visto como um "slug test" com uma mudança brusca do coeficiente de estocagem.

2.1.7. Condição de acopamento

Assumindo a existência de um efeito de película num raio infinitesimal no poço, Segundo *Van Everdingen & Hurst* (1953), pode-se relacionar a pressão do reservatório com a pressão no poço por:

$$p_v(t) = p(r_w, t) - q_w(t) S, \quad S > 0 \quad (2.19)$$

No caso de "skin" negativo pode-se usar o conceito de raio efetivo do poço (segundo *Matthews & Russel* (1967)):

$$p_v(t) = p(r_{wa}, t), \quad S < 0 \quad (2.20)$$

2.2 - Equações normalizadas :

Usando os grupos adimensionais da tabela 2.1, obtém-se

para o problema do DST as seguintes equações :

Tempo	$t_D = \frac{k \ t}{\phi \ \mu \ c_t \ r_v^2}$
Raio	$r_D = \frac{r}{r_v}$
Pressão do reservatório	$p_D(r_D, t_D) = \frac{p_i - p(r, t)}{p_i - p_o}$
Pressão do poço	$p_{wD}(t_D) = \frac{p_i - p_w(t)}{p_i - p_o}$
Fator de estocagem	$C_D = \frac{C}{2 \ \pi \ \phi \ c_t \ r_v^2}$

Tabela 2.1 - Definição das variáveis adimensionais.

2.2.1. Equação da difusividade no reservatório:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (2.21)$$

2.2.2. Condição inicial do reservatório :

$$p_D(r_D, 0) = 0 \quad (2.22)$$

2.2.3. Condição de contorno externa do reservatório :

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_D(r_D, t_D) = 0 \quad (2.23)$$

2.2.4. Condição inicial no poço :

$$p_{wD}(0^+) = 1 \quad (2.24)$$

2.2.5. Equação de fluxo no poço :

$$q_{vD}(t_D) + C_{fD} \frac{dp_{vD}}{dt_D} = 0 \quad 0 < t_D < t_{pD} < \infty \quad (2.25)$$

2.2.6. Equação da estática no poço :

$$q_{vD}(t_D) + C_{eD} \frac{dp_{vD}}{dt_D} = 0 \quad t_D > t_{pD} \quad (2.26)$$

2.2.7. Equação da vazão no poço:

$$q_{vD}(t_D) = - r_D \left. \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \right|_{r_D=1} \quad (2.27)$$

2.2.8. Equação da vazão na formação :

$$p_{vD}(t_D) = p_D(1, t_D) + S q_{vD}(t_D), \quad S > 0 \quad (2.28)$$

$$p_{vD}(t_D) = p_D(e^{-S}, t_D), \quad S < 0 \quad (2.29)$$

3. SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO PARA POÇOS NÃO SURGENTES

3.1. As equações governantes

A equação diferencial que descreve o escoamento de fluido no meio poroso, e as condições iniciais e de contorno, que delimitam as hipóteses de solução do problema, já foram discutidas no capítulo anterior.

O problema do DST pode agora ser resolvido analisando o período do fluxo, que pode ser visto como um "slug test", e o respectivo período de fechamento. A solução será então uma função contínua por partes, onde:

$$p_v(t) = \begin{cases} p_{wf}(t) & \text{se } 0 < t \leq t_p \\ p_{ws}(t) & \text{se } t \geq t_p \end{cases} \quad (3.1)$$

$$(3.2)$$

3.1.1. Solução do período de fluxo ou "Slug test"

Embora muitas vezes seja conveniente trabalhar com as equações em forma adimensional, no nosso caso será preciso escrevê-la num sistema consistente de unidades. Isto porque deseja-se estimar os vários parâmetros do reservatório, os quais precisam aparecer explicitamente na solução da equação diferencial.

Para o período de fluxo o problema estará bem posto com as equações (2.21) a (2.25) mais as equações (2.26) ou (2.29). Todas elas estão reunidas no Apêndice A que apresenta esta solução do "slug test" através do uso de transformada de Laplace.

A equação (A.16) que mostra a solução final no espaço de Laplace, é dada por (em unidades do Sistema Internacional):

$$\overline{p_{vf}} = \frac{p_o \left\{ s + \frac{Ko(r_w \sqrt{s/\eta})}{r_w \sqrt{s/\eta} K_1(r_w \sqrt{s/\eta})} \right\} + \frac{2\pi kh p_i}{C_f \mu s}}{s \left\{ s + \frac{Ko(r_w \sqrt{s/\eta})}{r_w \sqrt{s/\eta} K_1(r_w \sqrt{s/\eta})} \right\} + \frac{2\pi kh}{C_f \mu}} \quad (3.3)$$

Os parâmetros do reservatório estimados pela equação acima normalmente são: permeabilidade (k), fator de película (S), e pressão de fluxo inicial ou de abertura (p_o). A análise cartesiana convencional permite, em alguns casos, a estimativa da transmissibilidade (kh/μ) e do fator de película (S).

A técnica de ajustagem em curva tipo (Ramey - 1970) propõe a estimativa da transmissibilidade (kh/μ), e do

produto do fator de película (S) pelo coeficiente de estocagem adimensional (C_p); sendo que na prática este procedimento de ajustagem é muito difícil de ser obtido.

Observando-se a equação (3.3) que rege o comportamento da pressão de fluxo em poços não surgentes, nota-se que não é possível obter a inversão analítica para o espaço real devido à complexidade da expressão, a qual é função não linear dos parâmetros do sistema.

3.1.2. Solução do período de estática ou do problema de DST

A solução deste problema foi desenvolvida por Corrêa (1988), sem envolver superposição, através do uso de uma nova condição de contorno interna dependente do tempo.

Uma vez que o poço é fechado, a produção do reservatório fica confinada abaixo do ponto de fechamento e a pressão estática é afetada pela magnitude do coeficiente de estocagem do poço. Um balanço de materiais nesse período nos fornece a equação (2.28).

A semelhança entre as equações (2.25) e (2.26) sugere que o problema de DST pode ser visto como uma solução de "slug test" com uma mudança do coeficiente de estocagem. Para todos os tempos menores que t_p , o mecanismo de produção é governado pela mudança do nível de líquido no poço, e após o fechamento do poço (tempos maiores que t_p), o mecanismo passa a ser dominado pela compressão do fluido no volume confinado abaixo do ponto de fechamento.

As equações (2.25) e (2.26) podem ser combinadas, através da função degrau de Heaviside, que é apresentada na Figuras 3.1, gerando uma nova condição de contorno.

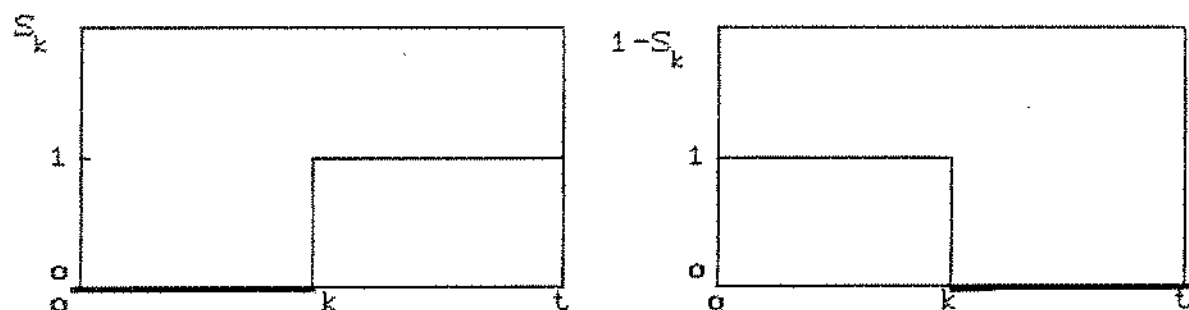


Figura 3.1 - Função degrau unitário e seu complemento

Esta nova condição de contorno interna para o problema do DST é válida para todos os tempos de teste:

$$\left[(1-S_k) C_{fd} + S_k C_{sd} \right] \frac{dp_{vD}}{dt_D} - r_D \frac{\partial P_D}{\partial t_D} \Big|_{r_D=1} = 0, \quad t_D > 0 \quad (3.4)$$

onde k é equivalente ao tempo de produção t_p .

O problema de DST poderá então ser resolvido se formos as equações (2.21) a (2.26), (2.28) ou (2.29) e a equação (3.4) acima.

Para se resolver esta equação diferencial com as respectivas condições de contornos e iniciais, incluindo a condição de contorno dada por (3.4), através de técnicas de Transformadas de Laplace, foram desenvolvidas por Corrêa novas regras para transformadas das quais serão usadas:

$$\mathbb{L} \left\{ S_k F(t) \right\} = \bar{f}(s) - \int_0^k e^{-st} F(t) dt \quad (3.5)$$

$$\mathbb{L} \left\{ S_k F'(t) \right\} = s \bar{f}(s) - F(k_-) e^{-ks} - \int_0^k e^{-st} F(t) dt \quad (3.6)$$

O apêndice C mostra o desenvolvimento teórico da solução exata em forma dimensional deste problema, no espaço de Laplace, para o Sistema Internacional de unidades, que é:

$$\frac{p_i}{s} \left\{ \frac{1}{S + \frac{Ko(r_w \sqrt{s/k})}{r_w \sqrt{s/k} K_1(r_w \sqrt{s/k})}} \right\} + C_c \left\{ \int_0^t e^{-st} p_{wf}(t) dt + C_d \right\} + C_o$$

$$p_{ws} = \frac{\frac{p_i}{s} \left\{ \frac{1}{S + \frac{Ko(r_w \sqrt{s/k})}{r_w \sqrt{s/k} K_1(r_w \sqrt{s/k})}} \right\} + s \frac{C_o}{(2\pi h/\mu) k}}{(3.7)}$$

onde:

$$C_c = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} - \frac{C_o}{(2\pi h/\mu) k} \quad (3.8)$$

$$C_d = p_{ff} e^{-st} p \quad (3.9)$$

$$C_o = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} p_o \quad (3.10)$$

A obtenção do comportamento de pressão no campo real deverá ser feita através da inversão numérica da eq. (3.7).

Existe aqui a não linearidade da função com relação aos parâmetros do reservatório e do poço.

Os parâmetros de reservatório normalmente estimados pelos métodos de análise de teste de pressão no período de estática para poços não surgentes são: permeabilidade (k), efeitos de película ou "skin" (S) e pressão estática do reservatório (p_i).

A análise convencional semi-log (método de *Horner*) parece ter aplicação restrita aos casos de poços produzidos com vazão constante, com o uso do tempo de produção calculado por balanço de materiais. Determina-se então k , S e p_i .

A análise cartesiana (método de *Corrêa*) é aplicável para poços onde o tempo de fechamento seja longo, se comparado ao tempo de produção, para a determinação de k e p_i . Para a determinação do "skin" faz-se o estudo do período de fluxo

pelas curvas de "slug test" ou usa-se uma fórmula que se baseia na hipótese de produção com vazão constante.

A análise através de curva tipo não é disponível para o período de estática em poços não surgentes.

4. ESTIMATIVA DOS PARAMETROS POR REGRESSÃO NÃO LINEAR

A determinação dos parâmetros do poço e do reservatório por regressão não linear pode ser feita no período de fluxo, no período de estática ou em ambos os períodos de teste simultaneamente.

A Figura 4.1 com as equações (3.3) e (3.7) definem o modelo esquemática e matematicamente.

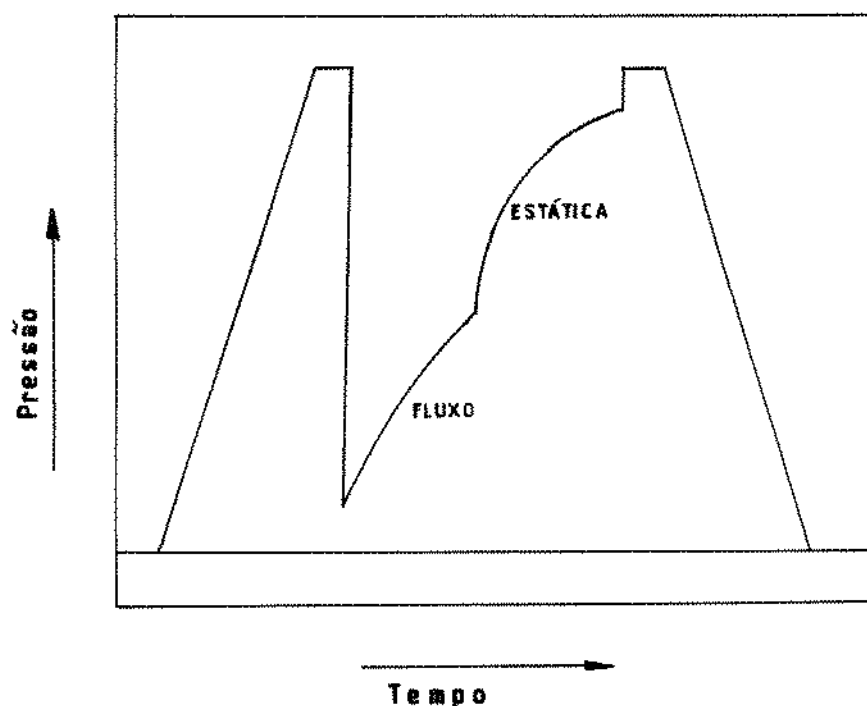


Figura 4.1 - Desenho esquemático de um DST

As incógnitas do modelo são os parâmetros do reservatório.

Deseja-se determinar os valores de parâmetros que fazem as equações (3.3) e (3.7) ajustarem-se aos dados de pressão

obtidos do teste de campo, resultando em um problema de ajustagem de um modelo não linear.

4.1. Escolha do método de estimativa

Apesar de existirem vários métodos para a estimativa de parâmetros em regressão, será usado neste trabalho o método dos quadrados mínimos.

Seja $[p_v]_{t=t_i}$ o valor teórico da pressão no poço no tempo t_i , definido pela inversão numérica das equações (3.3) ou (3.9), dependendo do valor de t ser maior ou menor que o tempo de produção t_p .

Seja $[p_{vpi}]$ o valor registrado ou observado de pressão no teste do poço não surgente no tempo t_i .

O procedimento do método dos quadrados mínimos procura minimizar a soma dos quadrados dos resíduos definida por:

$$SSR(\vec{x}) = \sum \left\{ [p_v]_{t=t_i} - p_{vpi} \right\}^2 \quad (4.1)$$

onde $\vec{x} = (k, S, p_o, p_i, \dots, C_f, C_a)^T$ é o vetor formado pelos m parâmetros desconhecidos, cujos valores devem ser determinados.

SSR é função somente dos parâmetros do reservatório, pois a variável tempo é conhecida. SSR dá uma medida da proximidade ou afastamento dos pontos reais do modelo teórico e é conhecida como função objetivo.

Procura-se por um vetor $\vec{x}^*$ no qual a função objetivo seja mínima. A determinação do valor mínimo de $SSR(\vec{x})$ denomina-se otimização, a qual pode ser do tipo restrito ou irrestrito.

Quando o problema a ser resolvido não impõe nenhuma restrição sobre os valores que as variáveis independentes podem assumir, o método é dito sem restrição. Alguns destes métodos são: gradiente projetado, gradiente reduzido, gradiente conjugado, método de Newton e quase Newton (ou Newton modificado), etc.

Os problemas de quadrados mínimos não lineares são um caso especial de minimização sem restrições, embora para

muitos problemas já se sabe a priori que certos valores são inaceitáveis como solução.

As restrições nos valores das variáveis são do tipo linear e não linear.

Na otimização restrita existem dois métodos básicos:

1. Transformar o problema restrito numa sequência de problemas irrestritos; com isto a solução não é factível mas é ótima. Também o valor inicial não precisa ser factível. Os métodos mais usados são: o método de penalidades, o método de barreiras (que é uma exceção pois a solução e o valor inicial são factíveis), dualidade, lagrangeano aumentado e lagrangeano projetado.
2. Adaptar as técnicas de otimização irrestrita onde a solução é sempre factível e também o valor fornecido inicialmente necessita ser factível. Os métodos mais usados são: Gradiente projetado, Gradiente reduzido, etc.

Adotar um método de otimização restrita parece mais vantajoso, pois já se sabe que parâmetros como por exemplo a permeabilidade e pressão de reservatório não podem assumir valores negativos. Porém estes algoritmos têm de ser desenvolvidos para cada modelo específico, considerando as restrições desejadas. Os algoritmos sem restrições funcionam bem para valores iniciais próximos da solução e serão usados neste trabalho.

4.2. Escolha do método de procedimento para o problema de de quadrado mínimo não linear

O problema de quadrados mínimos não lineares, para ajuste de dados (t_i, p_{vi}) , $i = 1, 2, \dots, n$, com um modelo $p(\vec{x}, t_i)$ consiste em se determinar um vetor $\vec{x}$, tal que o ajuste seja o melhor possível, no sentido de que a soma dos quadrados dos resíduos seja minimizada.

Da equação (4.1), seja :

$$F(\vec{x}) = [p_v]_{t=t_i} - p_{wp_i} \quad (4.2)$$

O problema se torna então :

$$\begin{aligned} \text{Min}_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n} \text{SSR}(\vec{\mathbf{x}}) &= \sum_{i=1}^n \left\{ F_i(\mathbf{x}) \right\}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde $n > m$ e $F_i(\vec{\mathbf{x}})$ é conhecida como função residual, a qual é não linear em $\mathbf{x}$.

Serão apresentados a seguir, alguns métodos para resolver problemas de quadrados mínimos não lineares segundo Dennis & Schnabel (1985).

4.2.1. Método de Newton para quadrados mínimos não lineares

As derivadas de $\text{SSR}(\mathbf{x})$ são :

primeira derivada :

$$\nabla \text{SSR}(\vec{\mathbf{x}}) = 2 \sum_{i=1}^n F_i(\vec{\mathbf{x}}) \cdot \nabla F_i(\mathbf{x}) = 2\mathbf{J}(\vec{\mathbf{x}})^t \cdot \mathbf{F}(\vec{\mathbf{x}}) \quad (4.4)$$

segunda derivada :

$$\nabla^2 \text{SSR}(\vec{\mathbf{x}}) = 2 \sum_{i=1}^n (\nabla F_i(\vec{\mathbf{x}}) \cdot \nabla F_i(\vec{\mathbf{x}})^t + F_i(\vec{\mathbf{x}}) \nabla^2 F_i(\vec{\mathbf{x}})) \quad (4.5)$$

$$= 2(\mathbf{J}^t(\vec{\mathbf{x}})\mathbf{J}(\vec{\mathbf{x}}) + \mathbf{DSC}(\vec{\mathbf{x}})) \quad (4.8)$$

$$\text{onde } \mathbf{DSC}(\vec{\mathbf{x}}) = \sum_{i=1}^m F_i(\vec{\mathbf{x}}) \nabla^2 F_i(\vec{\mathbf{x}}) \quad (4.9)$$

$\mathbf{DSC}(\vec{\mathbf{x}})$ são informações de $F(\vec{\mathbf{x}})$ de segunda ordem em $\nabla^2 \text{SSR}$.

O método de Newton aplicado ao problema de minimização sem restrições fornece o valor de $\vec{\mathbf{x}}$, dado um vetor inicial $\vec{\mathbf{x}}^k$, através da seguinte expressão:

$$\vec{\mathbf{x}} = \vec{\mathbf{x}}^k - \left[\mathbf{J}_k^t \mathbf{J}_k + \mathbf{DS} \right]^{-1} \mathbf{J}_k^t \mathbf{F}_k \quad (4.10)$$

A sua convergência é quadrática mas a maior dificuldade é para se obter $\mathbf{DSC}(\vec{\mathbf{x}})$, ou seja a expressão da 2a. derivada, além da estimativa de $\mathbf{DSC}(\vec{\mathbf{x}})$ exigir aproximadamente $(m^2 + 3m)$ avaliações da função resíduo $F(\vec{\mathbf{x}})$ por iteração.

4.2.2. Método de Gauss para quadrados mínimos não lineares

Dada uma aproximação $\mathbf{x}^k$, os métodos tipo Gauss (ou Gauss-Newton) usam, para determinar uma nova aproximação $\mathbf{x}$ para o modelo linear de $F(\mathbf{x})$ em torno de $\mathbf{x}^k$ a seguinte expressão:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^k - \left[\mathbf{J}_k^t \mathbf{J}_k \right]^{-1} \mathbf{J}_k^t F_k \quad (4.11)$$

As equações (4.10) e (4.11) diferem somente pelo termo $DSC(\mathbf{x})$.

Outras conclusões do método de Gauss :

- A convergência local é quadrática em problemas de resíduo zero.
- A convergência local é linear em problemas não lineares e que tenham resíduos razoavelmente pequenos.
- Resolve problema de quadrados mínimos lineares em uma iteração.
- Convergência local linear lenta em problemas que são suficientemente não lineares ou que tenham resíduos razoavelmente grandes.
- Não convergente localmente em problemas que sejam muito não-lineares ou que tem resíduos muito grandes.

4.2.3. Método de Levenberg-Marquardt ou Gauss-Marquardt para problemas de quadrados mínimos não lineares.

Marquardt (1963) desenvolveu um método que evita a divergência do método de Gauss e também acelera a convergência do método gradiente. Ele mostrou que resolver o sistema $\mathbf{E} \mathbf{D} = \mathbf{U}$ é equivalente a resolver o sistema:

$$(\mathbf{E} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{D} = \mathbf{U} \quad (4.12)$$

onde $\mathbf{I}$ é a matriz identidade e λ é uma constante.

As iterações são dadas pela expressão :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^k - \left[\mathbf{J}_k^t \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{I} \right]^{-1} \mathbf{J}_k^t F_k \quad (4.13)$$

A solução do vetor de parâmetros a serem determinados $\mathbf{x}$ após cada iteração $k+1$ é dada em termos da solução k , por:

$$\hat{\beta}^{(k+1)} = \hat{\beta}^{(k)} + \hat{D}^{(k+1)} \quad (4.14)$$

onde $\hat{D}$ é a solução do sistema normal de equações modificadas pelo método de *Marquardt*.

O procedimento será:

(a) Iniciar com $\lambda = 0.01$

(b) Substituir λ por 0.1λ se $SSR\{\hat{\beta}^{(k+1)}\} < SSR\{\hat{\beta}^{(k)}\}$

(c) Caso contrário determinar um fator de relaxação dado por $\hat{\beta}^{(k+1)} = \hat{\beta}^{(k)} + \theta^{(k+1)}\hat{D}$ tal que $SSR\{\hat{\beta}^{(k+1)}\} < SSR\{\hat{\beta}^{(k)}\}$ e substituir λ por 10λ .

Conclusões sobre o método de *Levenberg-Marquardt*:

-Se o resíduo de $F(x^*)$ for zero, o método converge quadraticamente.

-O método pode ainda, ter convergência local lenta em problemas de resíduos grandes ou muito não lineares.

Este método é melhor que o de *Gauss* quanto ao:

i) mal condicionamento da matriz do sistema,

ii) tamanho do passo na direção da máxima descida.

Existem também os métodos tipo secante para problemas de quadrados mínimos não lineares, que na prática são muito complexos quanto a implementação, e devem ser aplicados a problemas com resíduos grandes ou não muito lineares.

Uma boa implementação dos métodos de *Gauss-Marquardt* e do método secante fornece valores semelhantes, para problemas de resíduos relativos pequenos ou pouco não lineares.

Pela simplicidade e disponibilidade de várias implementações do método de *Gauss-Marquardt*, além de outras utilizações em problemas semelhantes com sucesso, justifica-se o seu uso neste trabalho. A versão do algoritmo utilizada é a apresentada por *Press, W.H. et al. (1986)*.

4.3. Justificativa teórica do uso do método na determinação de k , S e p_i

Para a utilização de algoritmos de otimização sem

restrição aos problemas de quadrados mínimos não lineares, tem-se que determinar o mínimo da função objetivo:

$$SSR(\vec{X}) = \sum \left\{ [pw]_{t=t_i} - p_{wpi} \right\}^2 \quad (4.15)$$

A condição necessária para existência de mínimo é que a derivada primeira se anule:

$$\frac{\partial SSR(\vec{X})}{\partial \vec{X}} = 0 \quad (4.16)$$

logo

$$\nabla SSR(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n F_i(\vec{X}) \cdot \nabla F_i(\vec{X}) = 0 \quad (4.17)$$

Quando se tem $\nabla F(\vec{X})$ anulado, obtém-se o mínimo da função resíduo e também o mínimo da função objetivo.

Como se deseja minimizar o desvio entre as pressões observadas e teórica

$$F_i(\vec{X}) = [p_v]_{t=t_i} - p_{vpi} \quad (4.18)$$

pelo método de *Gauss-Marquardt* deveremos fazer a linearização de cada resíduo F_i na série de *Taylor* até a derivada primeira

$$\begin{aligned} F_i(k, S, p_i) &= F_i(k_o, S_o, p_{io}) + \left. \frac{\partial F_i}{\partial k} \right|_{k=k_o} (k - k_o) + \\ &+ \left. \frac{\partial F_i}{\partial S} \right|_{S=S_o} (S - S_o) + \left. \frac{\partial F_i}{\partial p_i} \right|_{p_i=p_{io}} (p_i - p_{io}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

Sendo os gradientes calculados nos pontos (k_o, S_o, p_{io}) .

Resolvendo-se o sistema de equações acima para os valores iniciais de k_o, S_o, p_{io} , determina-se as correções para os próximos passos até a convergência.

Para se determinar

$$F_i(\vec{X}) = [p_v]_{t=t_i} - p_{vpi} \quad (4.20)$$

faz-se inversão numérica da transformada de *Laplace* de

$$[p_v]_{t=t_i} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \overline{p_v}(s) \right\} \quad (4.21)$$

As derivadas também podem ser obtidas no espaço real pois

$$F(\vec{x}) = [p_v]_{t=t_i} - p_{vpi} \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial F_i(\vec{x})}{\partial \vec{x}} = \frac{\partial [p_v]_{t=t_i}}{\partial \vec{x}} \quad \text{sendo} \quad \frac{\partial p_{vpi}}{\partial x_j} = 0 \quad (4.23)$$

Usando-se um dos teoremas da teoria da transformada de Laplace:

$$\frac{\partial F_i(\vec{x}, t)}{\partial x_j} = \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_v}{\partial x_j}(\vec{x}, s) \right\} \quad (4.24)$$

onde $j = 1, 2, \dots, m$.

As expressões das derivadas com relação a cada parâmetro encontram-se no apêndice B para o período de fluxo, e no apêndice D para o período de estática.

Pode-se também usar um algoritmo que avalie numericamente estas derivadas em relação aos parâmetros, através de diferenças finitas.

5.0. INTERPRETAÇÃO AUTOMATIZADA EM DADOS SIMULADOS

Para evitar problemas causado pelos dados, fixaram-se os dados de fluido e rocha (Tabela 5.1) e geraram-se dados de pressão vs tempo pelo programa do anexo H (Tabela 5.2).

Parâmetro	valor assumido	unidade
Permeabilidade(k)	1.384	Darcy
Fluido: Óleo	25.92	API
Compr. total(c_t)	149.9	atm ⁻¹
Efeito Pelic.(S)	-2.	-
P. fluxo in.(p_o)	5.85	atm
P. estática (p_i)	60.68	atm
Viscosidade (μ)	60.	cp
Espessura (h)	38.	pés
Raio poço (r_w)	4.248	pol.
Raio tubo (r_p)	1.908	pol.
Porosidade (ϕ)	0.062	-

Tabela 5.1-Dados de fluido e rocha para "slug test" simulado.

t(hr)	p_{wf} (psig)	t(hr)	p_{wf} (psig)	t(hr)	p_{wf} (psig)
0.022	151.968	0.166	359.328	0.470	577.895
0.026	160.472	0.187	380.819	0.528	604.529
0.034	176.479	0.209	401.907	0.590	629.653
0.041	189.614	0.235	425.155	0.662	655.165
0.053	210.657	0.264	449.182	0.774	688.467
0.067	233.345	0.295	472.901	0.835	703.914
0.084	258.766	0.334	500.206	0.938	726.506
0.106	288.897	0.372	524.424	1.051	747.149
0.132	321.266	0.418	550.996	1.126	758.896

Tabela 5.2 - Dados gerados de pressão de fluxo vs tempo.

5.1. OTIMIZAÇÃO NO PERÍODO DE FLUXO COM CÁLCULO DOS GRADIENTES POR DIFERENÇAS FINITAS

O cálculo dos parâmetros será feito inicialmente considerando-se os dados referentes ao período de fluxo do teste de formação.

Sabe-se que, o método de *Levenberg-Marquardt* definido pela equação (4.13) exige que calculemos as derivadas da função objetivo com relação às incógnitas inúmeras vezes, porque a solução é encontrada através de uma sequência de aproximações até o ponto de mínimo.

Pode-se calcular estas derivadas por diferenças finitas avançadas:

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{1}{h_j} \left\{ f_i(x + h_j) - f_i(x) \right\}$$

ou diferenças centradas:

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{1}{2h_j} \left\{ f_i(x + h_j) - f_i(x - h_j) \right\}$$

onde $h_j = \max(|x_j|, 0.1) \text{ eps}^{1/2}$ sendo

eps a precisão computador, j o número de parâmetros, e $i = 1, \dots, n$.

As pressões serão calculadas pela equação (3.3) através do algoritmo de inversão numérica de *Stehfest* com 8 termos.

A implementação do método de minimização por quadrados mínimos de *Levenberg-Marquardt*, calculando-se as derivadas por diferenças finitas, será feita através de um programa da biblioteca de rotinas matemáticas do IMSL para microcomputadores padrão IBM-PC, a fim de testar a aplicabilidade do algoritmo apresentado no apêndice G.1.

O período de fluxo do DST (ou "slug test") depende basicamente de 4 parâmetros do reservatório, que para estes dados gerados apresentados na Tabela 5.2 são $k = 1.384$ Darcy, $C_f = 85240 \text{ cm}^3/\text{atm}$, $S = -2$ e $p_o = 5.85 \text{ atm}$.

Na primeira tentativa aplicou-se o algoritmo para a determinação de todos os 4 parâmetros. A seguir aplicou-se

novamente o método para se determinar 3 parâmetros (fixando 1 parâmetro) e finalmente para se determinar 2 parâmetros (fixando 2).

Os valores iniciais arbitrados foram os mesmos nas 3 tentativas, sendo $k = 1.00$ Darcy, $C_f = 80000$ cm³/atm, $S = 0.0$ e $p_o = 5.85$ atm.

O critério de convergência adotado exige que a diferença entre a soma dos quadrados dos resíduos entre 2 iterações sucessivas seja menor que 10^{-6} .

A Tabela 5.3 abaixo apresenta o resumo dos resultados.

Parâmetros arbitrados inicialmente (sis. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. total iterações	SSR (atm ²)	Valor real param. (s. Darcy)	Erro percentual %
$k = 1.$ $S = 0.$ $p_o = 9.69$ $C_f = 80000$	$k = 0.90$ $S = -1.79$ $p_o = 5.85$ $C_f = 58500$	8	5×10^{-6}	$k = 1.384$ $S = -2.$	-35. -10. 0. -31
$k = 1.$ $S = 0.$ $C_f = 80000$	$k = 1.05$ $S = -1.86$ $C_f = 64460$	9	3×10^{-5}	$p_o = 5.85$	-24. -7. -24.
$k = 1.$ $C_f = 80000$	$k = 1.383$ $C_f = 85200$	8	7×10^{-6}	$C_f = 85240$	0.07 0.05

Tabela 5.3 - Resultado do método de *Levenberg-Marquardt* com cálculo das derivadas por diferenças finitas para o período de fluxo do DST, tentando-se calcular k , S , C_f e p_o .

5.1.1. Discussão do método usado e dos resultados

Uma vez que a soma dos quadrados dos resíduos são da ordem de 10^{-5} ou menor, os 3 resultados podem ser aceitos

como solução do problema, porém como os dados foram gerados artificialmente e a solução correta é conhecida, vê-se que existe combinação de parâmetros que não reproduzem a solução verdadeira com unicidade. A causa disto pode ser a alta correlação existente entre os parâmetros a serem determinados, ou o erro no cálculo das derivadas por diferenças finitas, devido a precisão do computador e a sensibilidade do método com relação ao número de parâmetros a serem estimados.

Pode-se pesquisar todas as combinações possíveis de parâmetros com este algoritmo, mas devido ao longo tempo envolvido no cálculo das derivadas, esta pesquisa será feita calculando-se as derivadas através de inversões numéricas de expressões analíticas.

5.2 - OTIMIZAÇÃO NO PERÍODO DE FLUXO

A otimização para o período de fluxo será baseada no cálculo dos gradientes de pressão por inversão numérica das expressões no espaço de *Laplace*.

O apêndice B apresenta as derivadas da solução do período de fluxo, com relação aos parâmetros k , S , p_i , p_o e C_f .

Para aplicação do método foram usados:

- i) O algoritmo de *Stehfest*, para a inversão numérica das expressões da pressão e derivadas obtidas no espaço de *Laplace*, com 8 termos.
- ii) Um critério de convergência baseado na variação da soma dos quadrados dos resíduos entre duas iterações sucessivas,

$$| SSR_{i+1} - SSR_i | < 10^{-2},$$
- iii) Valores iniciais dos parâmetros arbitrados de modo a evitar a divergência ou impossibilitar convergência nas iterações sucessivas.
- iv) Uso das equações A.16, B.1.8, B.1.12, B.1.13, B.1.14 e B.1.15 para cálculo da pressão e dos gradientes de pressão.

v) O programa de otimização apresentado no anexo G.2.

Para o teste do método foram geradas pressões de fluxo com o programa apresentado no Apêndice F. Os parâmetros fixados para as propriedades de fluido e rocha estão na Tabela 5.4, e os valores obtidos de pressão vs tempo estão na Tabela 5.5.

Parâmetro	valor assumido	unidade
Permeabilidade(k)	1.384	Darcy
Estoc. fluxo(C_f)	85240	cm ³ /atm
Efeito Pelic.(SD)	2.	-
P. fluxo in.(p_o)	5.85	atm
P. estatica (p_i)	60.68	atm
Viscosidade (μ)	60.	cp
Espessura (h)	38.	pés
Raio poço (r_w)	4.248	pol.
Porosidade (ϕ)	0.062	-

Tabela 5.4 -Dados de fluido e rocha para "slug test" simulado

t(hr)	p_{wf} (psig)	t(hr)	p_{wf} (psig)	t(hr)	p_{wf} (psig)
0.022	107.897	0.166	215.743	0.470	381.277
0.026	111.445	0.187	229.337	0.528	406.778
0.034	118.367	0.209	243.156	0.590	432.344
0.041	124.266	0.235	258.970	0.662	460.022
0.053	134.099	0.264	275.990	0.774	499.211
0.067	145.196	0.295	293.512	0.835	518.768
0.084	158.217	0.334	314.638	0.938	549.225
0.106	174.438	0.372	334.308	1.051	579.306
0.132	192.820	0.418	356.997	1.126	597.544

Tabela 5.5 - Dados gerados de pressão de fluxo vs tempo.

A Tabela 5.6 a seguir apresenta o resumo dos resultados:

Parâmetros arbitrados inicialmente (sist. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. total itera- ções	SSR (atm ²)	Valor real param. (s. Darcy)	Erro per- cen- %
k = 0.5 S = 0. p _o = 9.69	k = 1.384 S = -2.00 p _o = 5.85	7	5x10 ⁻⁶	k = 1.384 S = -2.	0. 0. 0.
k = 1. S = 2. C _f = 80000	k = 1.15 S = 2.09 C _f = 70838	10	5x10 ⁻⁵	p _o = 5.85	-17. 4.3 20.
k = 0.5 S = 5. C _f = 75000	k = 1.405 S = 1.97 C _f = 90242	9	5x10 ⁻⁶	p _i = 60.68 C _f = 85240	5.8 -1.5 5.8

Tabela 5.6 - Resultado do método de Levenberg-Marquardt com cálculo das derivadas por inversão numérica para o período de fluxo do DST, tentando calcular combinações de k, S, p_o e C_f.

5.2.1. Discussão do método e dos resultados obtidos:

Dos resultados acima nota-se que, quando a combinação de parâmetros a serem determinados é k, S e p_o, o método funciona com muita rapidez (tempo total de execução menor que 30 segundos) e a resposta é precisa.

Quando há a inclusão de C_f, que afeta principalmente os dados iniciais do teste, o método não converge com unicidade para a solução correta. As 3 Figuras a seguir mostram este comportamento.

Na Figura 5.1 os valores das respostas obtidas nas diversas iterações para cada parâmetro foram normalizadas com relação ao valor correto, sendo que todas as razões deverão

ser unitárias quando a convergência for correta. De fato, obteve-se este resultado correto quando tentou-se determinar k , S e p_o mantendo fixos p_i e C_f .

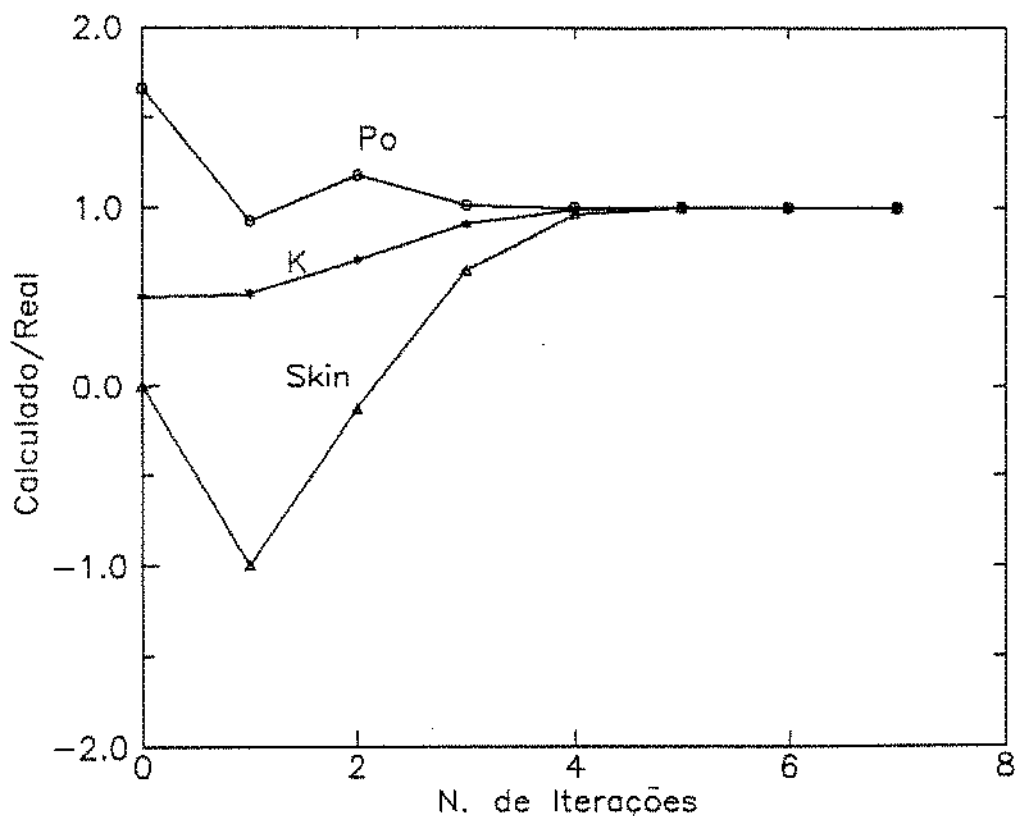


Figura 5.1 - Otimização no fluxo

O mesmo já não ocorre ao se tentar determinar k , S e C_f (vide Figura 5.2) mantendo-se fixo p_i e p_o ; pois embora a solução tenda para 1 muito lentamente, observa-se que existe uma aparente dependência entre k e C_f , pois os dois parâmetros crescem a uma mesma taxa. O critério de convergência é sempre satisfeito com os mesmos resíduos antes que se atinja a solução correta, o que sugere uma limitação da capacidade do microcomputador, ou do algoritmo utilizado.

A Figura 5.3 mostra que, para o mesmo procedimento, mantendo-se fixo o valor da permeabilidade pode-se determinar S e C_f .

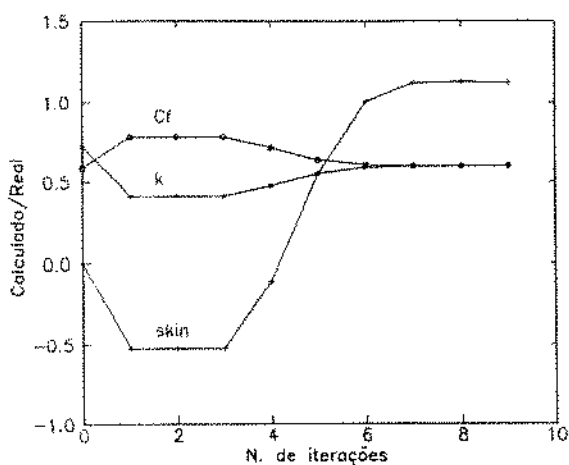


Figura 5.2 - Otimização para o fluxo

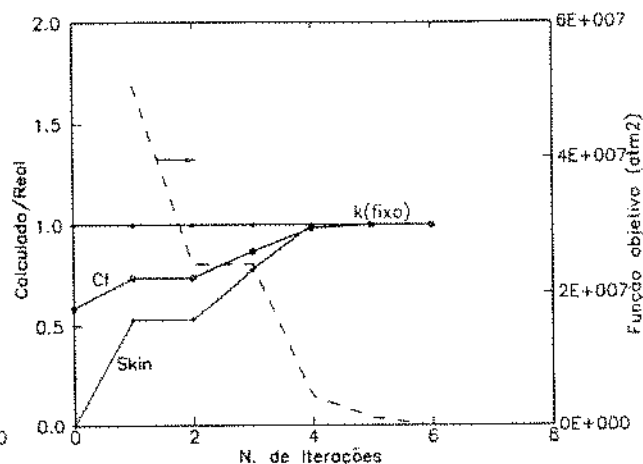


Figura 5.3 - Otimização para o fluxo

Estas observações permitem se concluir:

- i) É possível se determinar k , S e p_o com rapidez e precisão mantendo-se fixos, em seus valores corretos, a estocagem no fluxo (C_f) e pressão estática do reservatório (p_i).
- ii) Quando se deseja determinar C_f e S , deve-se conhecer com exatidão os valores de k , p_o e p_i .
- iii) O número máximo de parâmetros que pode ser determinado para este caso é aparentemente 3.

Pelo exposto seria interessante estudar a influência na determinação de k e S , de pequenas variações de C_f .

O valor de C_f , quando não se tem variação no diâmetro das ferramentas de teste, depende apenas da densidade do fluido produzido (vide equação 2.16).

As 2 Figuras a seguir mostram esta influência.

A Figura 5.4 apresenta o resultado da permeabilidade calculada como função da estocagem adotada, sendo ambos os

parâmetros normalizados com relação a seus valores reais. Nota-se que existe uma relação linear entre estes dois parâmetros, ou seja adotando-se um valor de C_f diferente do real causa-se o mesmo erro na permeabilidade. É importante lembrar que a densidade do fluido pode variar bastante com a produção de gás, sendo difícil estabelecer um valor médio correto para o valor de C_f que satisfaça ao modelo.

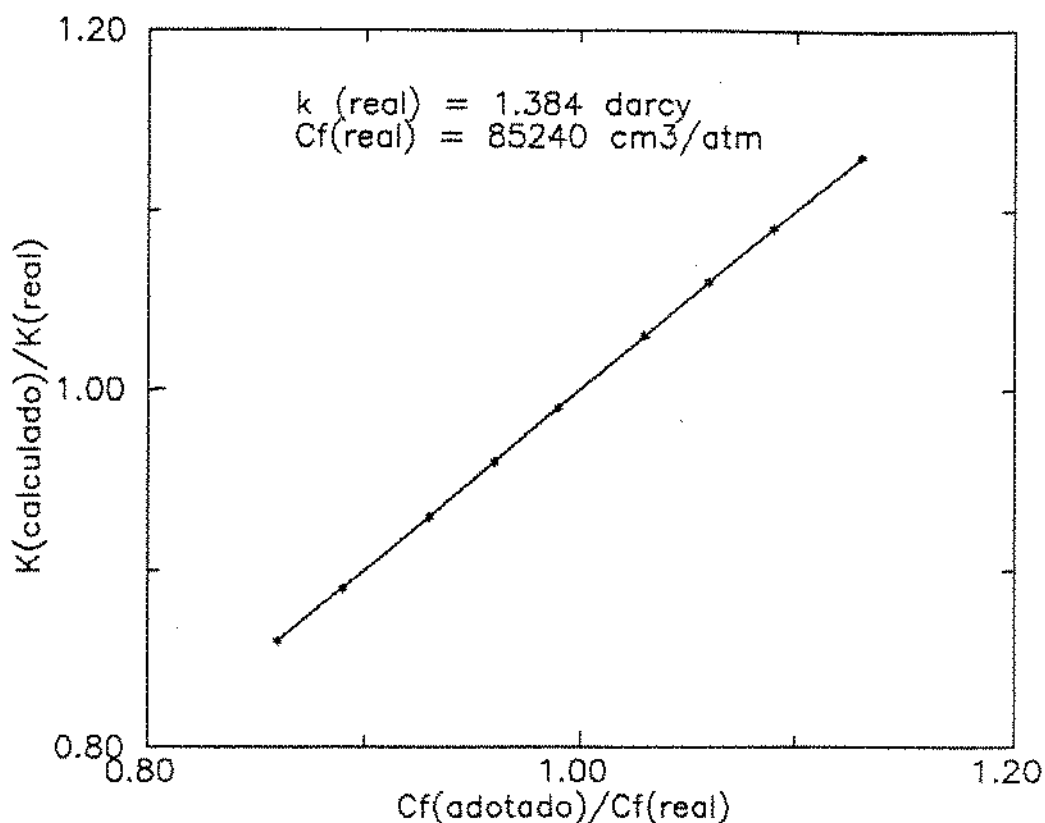


Fig. 5.4 – Sensibilidade da permeabilidade com a estocagem

Por outro lado se o reservatório produzir apenas água ou óleo morto, a densidade será função do grau API médio do líquido, medido nas condições de pressão e temperatura do reservatório. A variação de k e S com o grau API é apresentada na Figura 5.5.

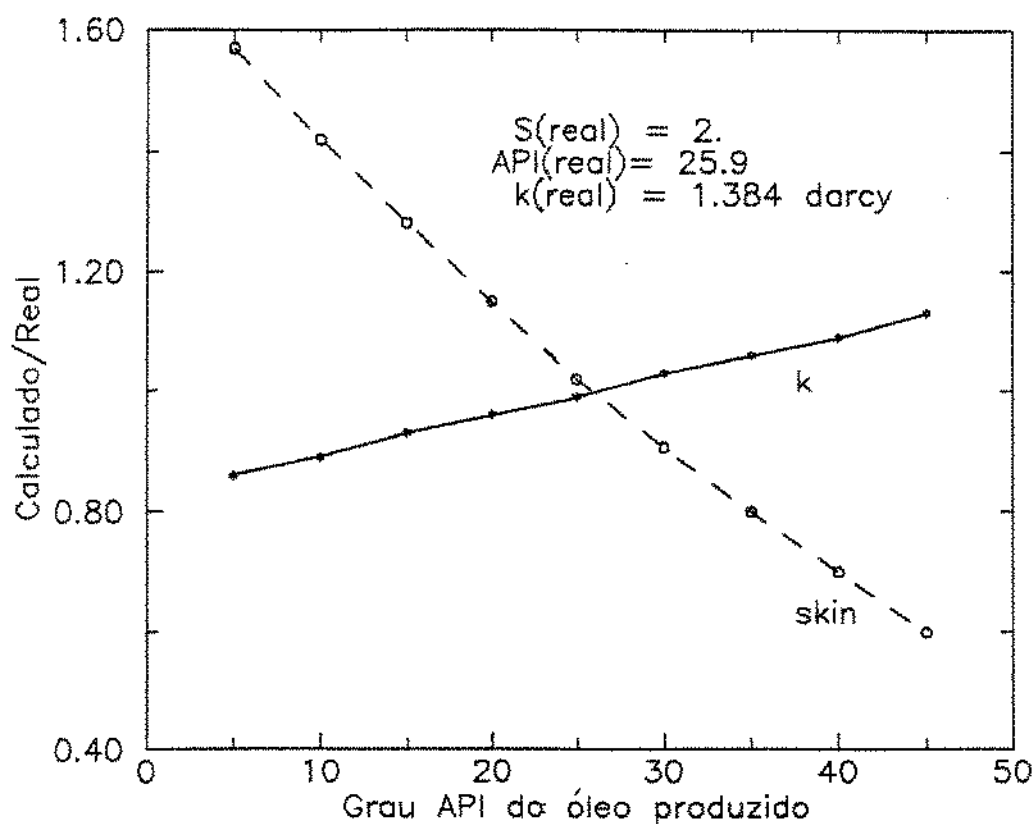


Fig. 5.5 – Sensibilidade da permeabilidade e skin com o API do fluído

A Figura 5.6 mostra a influência de pequenos erros no cálculo do coeficiente de estocagem do fluxo C_f sobre o valor skin, revelando que quanto mais acima do valor real estiver o valor de C_f adotado, menor em termos reais será o valor do skin calculado.

Logo, se o valor de C_f estiver super-estimado, o valor da permeabilidade obtida deverá estar acima da real, e o valor obtido para o skin estará abaixo do real.

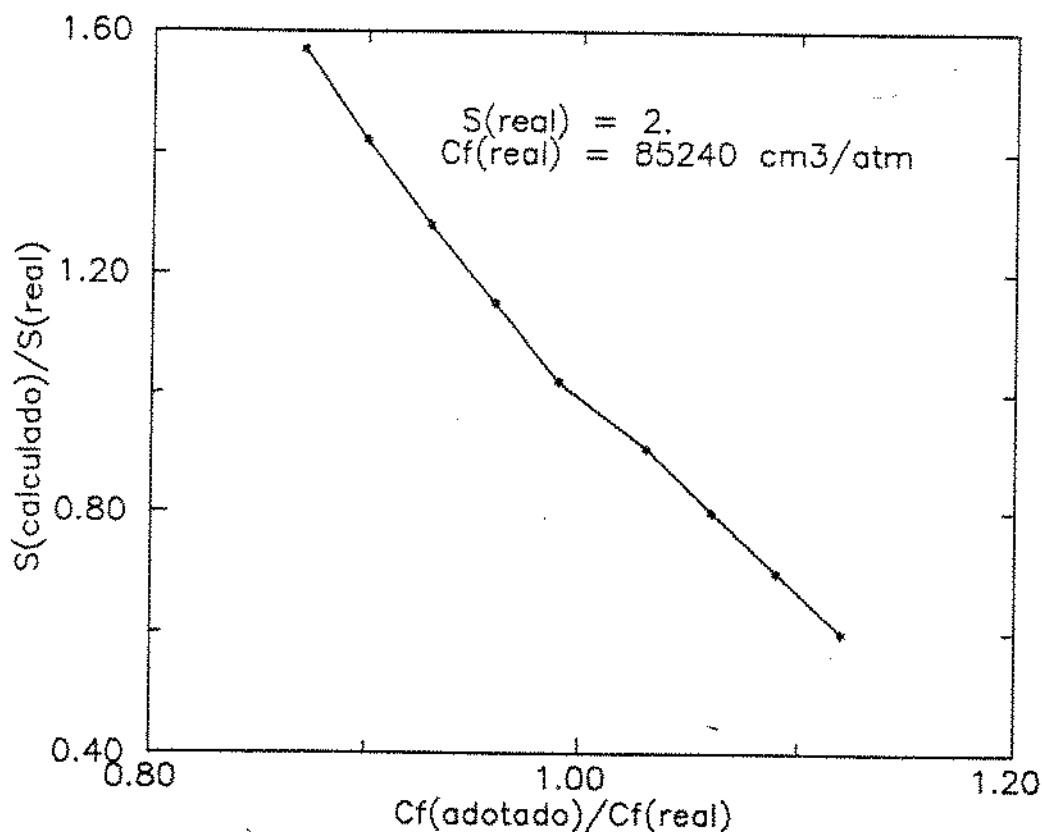


Fig. 5.6 - Sensibilidade do skin com a estocagem

5.3. OTIMIZAÇÃO NO PERÍODO DE ESTATICA

A otimização para o período de estática será realizada com base no cálculo dos gradientes de pressão através da inversão numérica das expressões no espaço de *Laplace*.

A equação (3.7), deduzida no apêndice C, e as derivadas determinadas no apêndice D, serão usadas para o processo de otimização no período de estática.

A equação (3.7) permite o cálculo dos valores das pressões para todos os tempos do teste, durante os períodos de fluxo e de estática, sendo que para o período de fluxo ela pode ser simplificada para a equação (3.3).

O cálculo da pressão no período de estática exige que se calcule o valor de uma integral dependente do período de

fluxo definida por:

$$\text{Integral} = \int_0^{t_p} e^{-st} p_{wf}(t) dt$$

5.3.1. Estudo dos métodos de solução da integral acima

Estudaram-se várias alternativas de soluções para esta integral, visando-se principalmente a rapidez e a precisão nos cálculos.

Esta integral deve ser calculada numericamente em instantes discretos, ou seja, nos pontos onde se conhece os valores de pressão no período de fluxo, ou nos tempos onde se calculou o valor de $p_{wf}(t)$ através da inversão numérica da sua expressão obtida no campo de *Laplace*.

Deve-se notar que o tipo de função existente no integrando é o produto de uma função com declínio exponencial (e^{-st}) pelos valores de pressões de fluxo no intervalo (0- t_p), que neste caso são sempre crescente para o poços não surgentes. O resultado é um integrando decrescente rapidamente com o tempo.

Dentre os princípios utilizados para a resolução desta integral podemos citar:

- i) Integração direta : Consiste em se adotar uma função qualquer para $p_{wf}(t)$, tornando-se possível a integração analítica.
- ii) Integração através das fórmulas de *Newton-Côtes*, que utilizam valores calculados da função $p_{wf}(t)$, para tempos regularmente espaçados.
- iii) Integração através da fórmula de quadratura *Guassiana*, que utiliza pontos diferentemente espaçados, onde este espaçamento é determinado por certas propriedades dos polinômios ortogonais.
- iv) Integração direta dos coeficientes dos polinômios cúbicos obtidos após interpolação de $p_{wf}(t)$ por splines cúbicos.
- v) Quadratura da biblioteca de subrotinas do IMSL que

utiliza basicamente os mesmos princípios do item (iv) acima.
vi) Integração usando técnicas de transformada de Laplace.
vii) Integração através de uso da função B-splines com quadrados mínimos.

O apêndice E apresenta o desenvolvimento teórico e comparativo de cada um destes métodos.

A Tabela 5.7 a seguir apresenta uma comparação resumida entre os resultados obtidos (seguindo a mesma numeração acima), principalmente quanto ao tempo gasto e quanto a confiabilidade.

Método	Vantagens	Desvantagens	tempo padrão*
i	Rapidez	Não é genérico	20 seg
ii	Facilidade	Demora	7200seg
iii	Facilidade	Não confiável	40 seg
iv	Precisão	Não é genérico	50 seg
v	Precisão	Repetitivo	55 seg
vi	Precisão	Não confiável	35 seg
vii	Generalidade	-	6 seg

* Tempo requerido para cálculo e impressão de um período de estática padrão formado por 33 pontos.

Tabela 5.7-Quadro comparativo de métodos de integração.

As Tabelas 5.8 e 5.9 a seguir apresentam um estudo comparativo dos diversos métodos para a solução da integral, no casos em que $pwf(t) = t$ ou $pwf(t) = \sqrt{t}$ para $s = tp = 1$.

Estas funções tem derivadas diferentes no tempo zero de fluxo, o que é uma condição auxiliar usada na interpolação por splines.

A função $p_{wf}(t) = t$ tem um comportamento crescente e linear semelhante ao crescimento de pressão de fluxo em poços não surgentes de baixa produtividade. Suas derivadas primeira e segunda são constantes iguais a um e zero respectivamente.

Estudo comparativo dos métodos de solução de $\int_0^1 e^{-t} \cdot t \cdot dt \rightarrow p_{wf} = t, t_p = s = 1.$			
Método	Princípio matemático	Resultado	Erro %
Integração analítica	Integração por partes	0.264241117	0
Integração dos coeficientes de interp.	Splines cúbicos	0.264241117	0
Quadratura do IMSL	Splines cúbicos	0.2642407138	-2D-4
Transformada de Laplace	Inversão numérica por Stehfest	0.2651804479	0.36
Transformada de Laplace	Inversão numérica por Crump	0.264241117	0
Interpolação com quadrados mínimos	B-Splines com quadrados mínimos	0.264241117	0

Tabela 5.8 - Comparações dos resultados da integração da função $F(t) = t e^{-t}$ através de diversos métodos.

A função $p_{wf}(t) = \sqrt{t}$ tem um comportamento crescente e levemente assintótico que assemelha ao crescimento inicial de pressão de fluxo em poços não surgentes de alta produtividade. Suas derivadas primeira e segunda tem valores infinito no tempo zero.

Estudo comparativo dos métodos de solução de $\int_0^1 e^{-t} \cdot \sqrt{t} \cdot dt \Rightarrow \text{Pvf} = \sqrt{t}, t_p = 5 = 1.$			
Integ. Gauss. com 3 pontos p/ 100 subdiv	Polinômios or- togonais	0.378947257	8D-4
Integração dos coeficien- tes de interp.	Splines cúbicos	0.378945890	0
Quadratura do IMSL	Splines cúbicos	0.3762631362	-0.71
Transformada de Laplace	Inversão numérica por Crump	0.37894543823	0
Integração c/ quadrados min.	B-Splines c/ qua- drados mínimos	0.37509861199	-1.0

Tabela 5.9 - Comparações dos resultados da integração da função $F(t) = \sqrt{t} e^{-t}$ através de diversos métodos.

Do estudo feito para escolha do método apropriado para o cálculo da integral conclue-se que:

- i) As melhores rotinas para o cálculo da integral quanto ao critério da precisão dos resultados são: Quadratura do IMSL, Integração numérica usando a transformada de Laplace e a integração numérica dos coeficientes da função B-splines com quadrados mínimos.
- ii) O algoritmo desenvolvido por Crump fornece valores confiáveis para o cálculo da integral através do uso de transformadas de Laplace.
- iii) Como a quadratura do IMSL exige muito tempo para calcular o valor da integral, e o método da transformada de Laplace exige o conhecimento das funções de Bessel modificadas para argumentos complexos (que não estão disponíveis), deve-se então usar o processo de integração dos quadrados mínimos com a função B-splines, que foi o método que exigiu menor tempo de computação e é igualmente preciso e

genérico.

iv) No método de integração por funções B-splines com quadrados mínimos, existe a dependência da precisão da integral com o número de funções B-splines utilizado, que define o número de sub-intervalos que serão usados para fazer a interpolação. Porém concluiu-se através de integrais conhecidas que para o número de B-splines igual a 2, obtém-se o valor exato da integração.

v) As integrais obtidas pela derivação da expressão da pressão com relação aos parâmetros (vide apêndice C) devem ser resolvidas por este método.

5.3.2. Otimização para o período de estática

Para o teste do método foram gerados dados de pressão estática a partir de:

- i) Parâmetros de fluido e rocha mostrados na Tabela 5.1.
- ii) Dados do fluxo artificialmente gerados e apresentados na Tabela 5.2.
- iii) Cálculo da integral pelo método de integração por funções B-splines com quadrados mínimos.
- iv) Parâmetros de fluido produzido e dados mecânicos do poço, para o cálculo de C_g , definidos por:

Dados do poço e do fluido	
$C_v = 88.2 \times 10^{-6} \text{ atm}^{-1}$	
Prof. packer = 810.39 m	Fundo do poço = 822.61 m

Tabela 5.10 - Dados arbitrados para geração de pressão estática.

A partir destes dados, pode-se determinar o volume da câmara de estocagem $V_w = 0.446948545 \times 10^6 \text{ cm}^3$ e o fator de estocagem da estática $C_g = 39.42 \text{ cm}^3/\text{atm}$.

A Tabela 5.10 apresenta os dados de pressão estática resultante.

t(hr)	p_{va} (psig)	t(hr)	p_{va} (psig)	t(hr)	p_{va} (psig)
0.022	718.304	0.209	780.089	0.774	861.560
0.026	719.896	0.235	786.814	0.835	865.179
0.034	723.044	0.264	793.846	0.938	870.107
0.041	725.757	0.295	800.846	1.051	874.159
0.053	730.319	0.334	808.941	1.181	877.519
0.067	735.502	0.372	816.120	1.325	880.080
0.084	741.595	0.418	823.955	1.486	881.953
0.106	749.161	0.470	831.792	1.666	883.240
0.132	757.650	0.528	839.400	1.870	884.068
0.166	768.042	0.590	846.377	2.098	884.541
0.187	774.073	0.662	853.196	2.189	884.652

Tabela 5.11 - Dados gerados de pressão estática vs tempo.

Para a aplicação do método serão usados:

- i) As condições (i), (ii) e (iii) da seção 5.2.
- ii) A equação (D.1.1) e as derivadas deduzidas no apêndice D.
- v) o programa apresentado no apêndice G.3.

Deseja-se encontrar o grupo de parâmetros através de minimização da função objetivo considerando apenas o período de estática.

A Tabela 5.12 a seguir resume os resultados obtidos:

Parâmetros arbitrados inicialmente (sist. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. total iterações	SSR (atm^2)	Valor real param. (s. Darcy)	Erro percentual %
$k = 0.50$ $S = 0.$ $p_i = 60.18$	$k = 1.384$ $S = 2.00$ $p_i = 60.68$	8	$<10^{-4}$	$k = 1.384$ $S = +2.$	0. 0. 0.
$k = 0.1384$ $S = 0.20$ $C_s = 3.94$	$k = 1.385$ $S = 1.99$ $C_s = 70.44$	8	$<10^{-1}$	$p_o = 5.85$	0.07 0. 79.
$k = 0.028$ $C_s = 0.78$	$k = 1.384$ $C_s = 50.02$	6	$\begin{matrix} -1 \\ <10 \end{matrix}$	$p_i = 60.68$	0. 27.
$S = 0.667$ $C_s = 19.71$	$S = 1.99$ $C_s = 45.27$	6	$\begin{matrix} -1 \\ <10 \end{matrix}$	$C_f = 85240$	0.05 15.
$p_i = 60.18$ $C_s = 0.78$	$p_i = 60.18$ $C_s = 50.02$	8	$\begin{matrix} -1 \\ <10 \end{matrix}$	$C_s = 39.42$	0. 27.

Tabela 5.12 - Resultado do método de *Levenberg-Marquardt* com cálculo das derivadas por inversão numérica para o período de estática do DST, tentando determinar k , S , p_i e C_s .

5.3.2.1 - Discussão do método e dos resultados obtidos

Para o período de estática, o conjunto de parâmetros melhor determinado é formado por k , S , e P_i . Quando o conjunto de parâmetros inclui o fator de estocagem C_s , há convergência sem que se atinja os valores corretos dos parâmetros. A Figura 5.7 mostra a evolução dos parâmetros calculados durante as iterações.

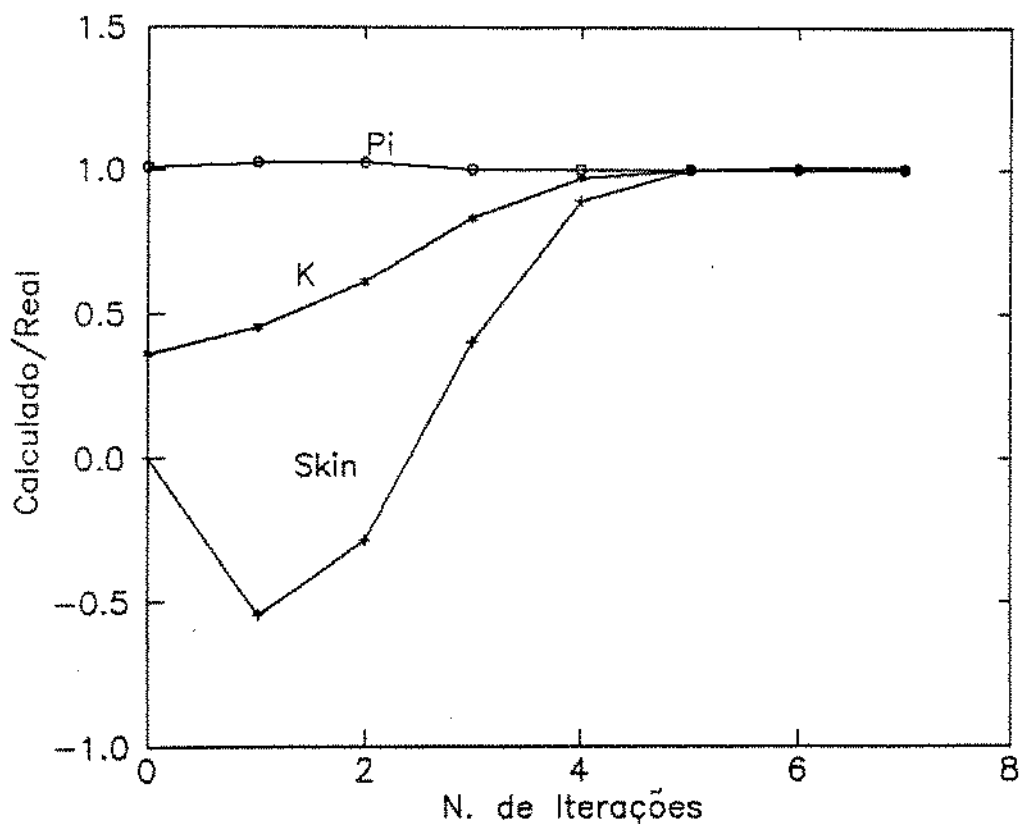


Figura 5.7 – Otimização para a estática

5.4. OTIMIZAÇÃO NOS PERÍODOS DE FLUXO E DE ESTATICA

A otimização será feita com base no cálculo dos gradientes de pressão por inversão numérica das expressões no espaço de *Laplace*.

Usando-se a experiência obtida nas aplicações dos métodos descritos nos itens 5.2 e 5.3, serão determinados os parâmetros que explicam simultaneamente os dados do fluxo e estática.

Geraram-se dados de pressão vs tempo para um DST completo, os quais estão apresentados na Tabela 5.14 e na Figura 5.8 :

Dados de pressão							
Período de fluxo				Período de estática			
t (hr)	P _{vf} (psig)	t (hr)	P _{vf} (psig)	Δt (hr)	P _{vs} (psig)	Δt (hr)	P _{vs} (psig)
0.000	86.0	0.264	449.1	0.000	759.4	0.372	850.6
0.022	152.0	0.295	472.8	0.022	781.4	0.418	853.9
0.026	160.5	0.334	500.0	0.026	782.7	0.470	856.4
0.034	176.5	0.372	524.3	0.034	785.2	0.528	858.5
0.041	189.6	0.418	550.8	0.041	787.4	0.590	859.9
0.053	210.7	0.470	577.7	0.053	791.1	0.662	860.9
0.067	233.3	0.528	604.4	0.067	795.2	0.774	862.0
0.084	258.8	0.590	629.6	0.084	800.2	0.835	862.6
0.106	288.9	0.662	655.2	0.106	806.3	0.938	863.6
0.132	321.2	0.774	688.8	0.132	813.0	1.051	864.8
0.166	359.3	0.835	704.1	0.166	821.0	1.810	866.3
0.187	380.7	0.938	726.8	0.187	825.4	1.325	868.1
0.209	401.8	1.051	747.6	0.209	829.8	1.486	870.1
0.235	425.1	1.260	759.4	0.235	834.3	1.666	872.0
				0.264	838.8	1.870	873.9
				0.295	843.0	2.098	875.5
				0.334	847.2	2.189	876.1

Tabela 5.13 - Dados simulados de um DST completo (um ciclo).

Os dados gerados (vide apêndice H), para o DST completo, assumem os valores apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, assim como os dados mecânicos do poço e do fluido produzido resumidos na Tabela 5.10, considera-se também que:

$$p_{vf}(t) = \begin{cases} p_{vf}(t) & \text{se } 0 < t \leq t_p \quad (\text{equação 3.3}) \\ p_{vs}(t) & \text{se } t > t_p \quad (\text{equação 3.7}) \end{cases}$$

A Figura 5.8 abaixo mostra os dados gerados de pressão vs tempo para este DST.

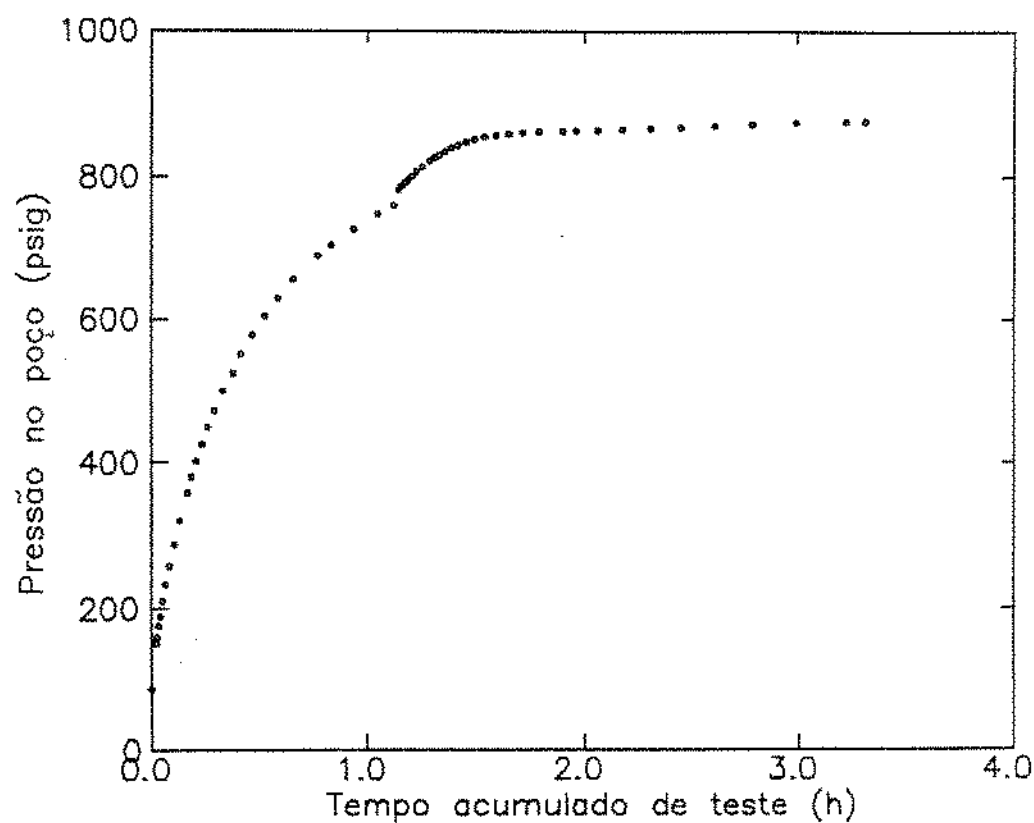


Fig. 5.8 – Dados gerados para DST

5.4.1. Otimização para o DST completo

A Tabela 5.14 abaixo apresenta uma tentativa de se determinar todos os 6 parâmetros que definem o DST, usando o programa do apêndice G.4.

Parâmetros iniciais (sis. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. itera- ções	SSR (atm ²)	Valor real (s. Darcy)	Erro %
k = 0.923	k = 0.783	5	-3 <10	k = 1.384	-43.
S = 1.333	S = 2.28			S = 2.00	14.
p _i = 50.04	p _i = 60.68			p _i = 60.68	0.
C _s = 59.13	C _s = 21.56			C _s = 39.42	-45.
C _f = 56830	C _f = 48250			C _f = 85240	-43.
p _o = 40.65	p _o = 5.85			p _o = 5.85	0.

Tabela 5.14 - Resultado do método de *Levenberg-Marquardt* com cálculo das derivadas por inversão numérica para o DST de um ciclo, tentando determinar k, S, p_i, C_s, C_f, e p_o.

A Figura 5.9 mostra a aderência perfeita que existe entre os valores medidos e calculados com os dados acima.

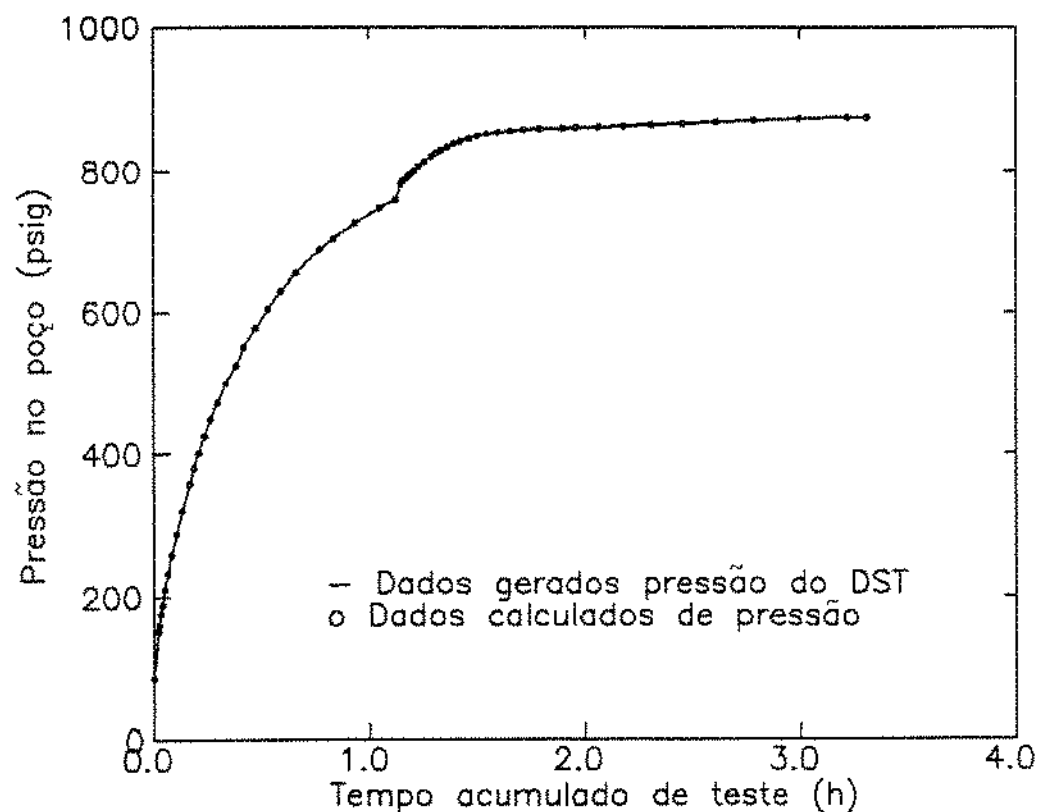


Fig. 5.9 - Otimização no fluxo e na estática

5.4.2. Discussão dos resultados obtidos e novas propostas para determinação dos parâmetros.

Da experiência numérica, vê-se que não é possível determinar todos os seis parâmetros simultaneamente pois não há convergência para os valores corretos, embora o resíduo final seja baixo.

Para se determinar apenas 3 ou 4 parâmetros deve-se fixar os demais. Para a aplicação do algoritmo num caso real, quando não são conhecidos os valores corretos a serem fixados deve-se descobrir uma maneira de determiná-los corretamente.

Nas aplicações anteriores do método, os dois parâmetros que apresentam pior condicionamento eram os coeficientes de estocagem no fluxo e na estática, C_u e C_f .

Suponhamos que se fixem os valores dos coeficientes de estocagem, restando então 4 parâmetros a se determinar: k , S , p_i e p_o .

Estes quatro parâmetros podem ser determinados simultaneamente para dados gerados, como mostra a tabela 5.15.

Parâmetros arbitrados inicialmente (s. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. total iterações	SSR (atm ²)	Valor real param. (s. Darcy)	Erro per-cen-%
$k = 1.110$ $S = -1.$ $p_i = 60.92$ $p_o = 6.80$	$k = 1.384$ $S = -2.$ $p_i = 60.68$ $p_o = 5.85$	5	$<10^{-4}$	$k = 1.384$ $S = -2.00$ $p_i = 60.68$ $p_o = 5.85$	0. 0. 0. 0.

Tabela 5.15 - Resultado do método de *Levenberg-Marquardt* com cálculo das derivadas por inversão numérica, para o DST completo, tentando determinar k , S , p_i e p_o .

Outra alternativa é a de se otimizar os parâmetros por etapas:

i) Aplica-se a regressão não linear ao fluxo usando como p_i o último valor lido da estática, ou o valor extrapolado do gráfico do método de Corrêa, e determina-se k , S e p_o .

ii) Com os valores aproximados estimados em (i) aplica-se a regressão não linear na estática e determina-se p_i correto.

iii) Volta-se ao item (i) com p_i correto e determina-se p_o correto.

vi) Com o valor de p_o correto determina-se então os valores de k , S e p_i que satisfazem o fluxo e estática dentro do critério estabelecidos.

A Tabela 5.16 a seguir resume este último procedimento:

Parâmetros arbitrados inicialmente (sis. Darcy)	Solução calculada (s. Darcy)	Num. total iterações	SSR (atm^2)	Valor real param. (s. Darcy)	Erro percentual %
$k = 0.50$ $S = 0.$ $p_i = 60.18$	$k = 1.384$ $S = 2.00$ $p_i = 60.68$	8	$<10^{-4}$	$k = 1.384$ $S = +2.00$ $p_i = 60.68$	0. 0. 0.

Tabela 5.16 - Resultado do método de *Levenberg-Marquardt* com cálculo das derivadas por inversão numérica, para o DST completo, determinando k , S , p_i corretos.

O comportamento da função objetivo durante as várias etapas da otimização está apresentado na Figura 5.10, que nos mostra que em cada período há uma redução brusca nos valores dos resíduos.

Simultaneamente, com o decréscimo da função objetivo tem-se a convergência para os valores reais dos parâmetros determinados pela regressão, como está apresentado na Figura 5.11.

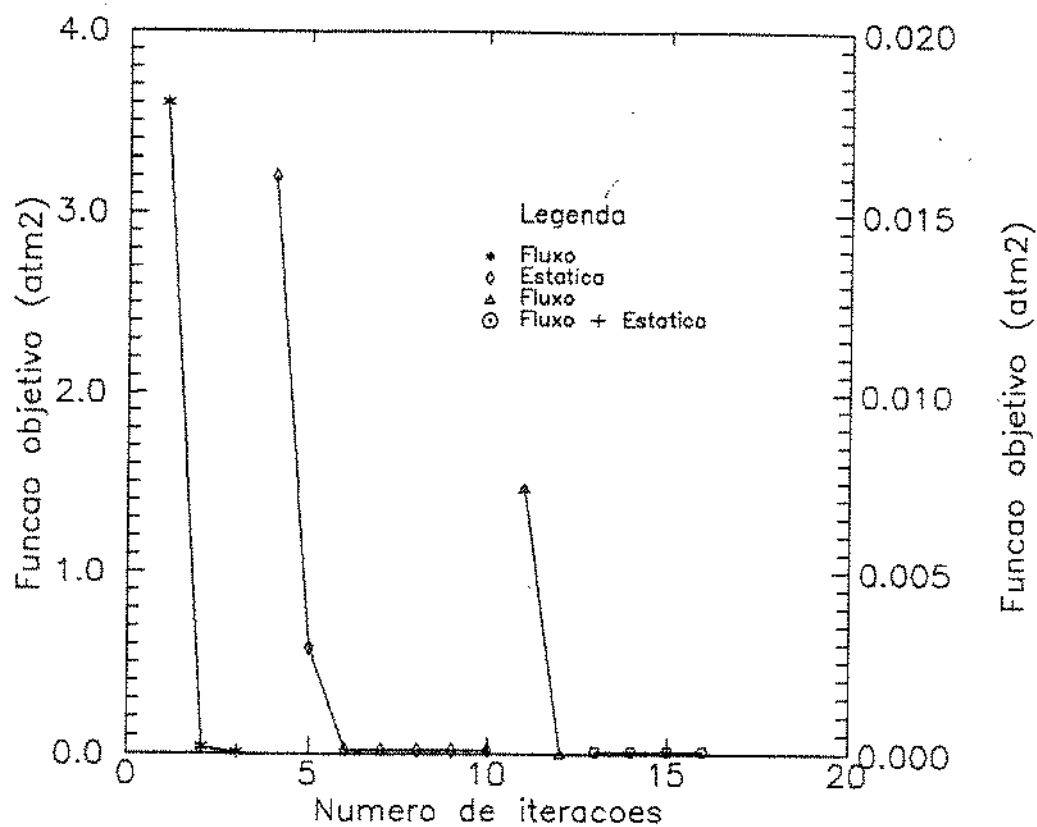


Fig. 5.10 - Funcao objetivo nas etapas da otimizacao

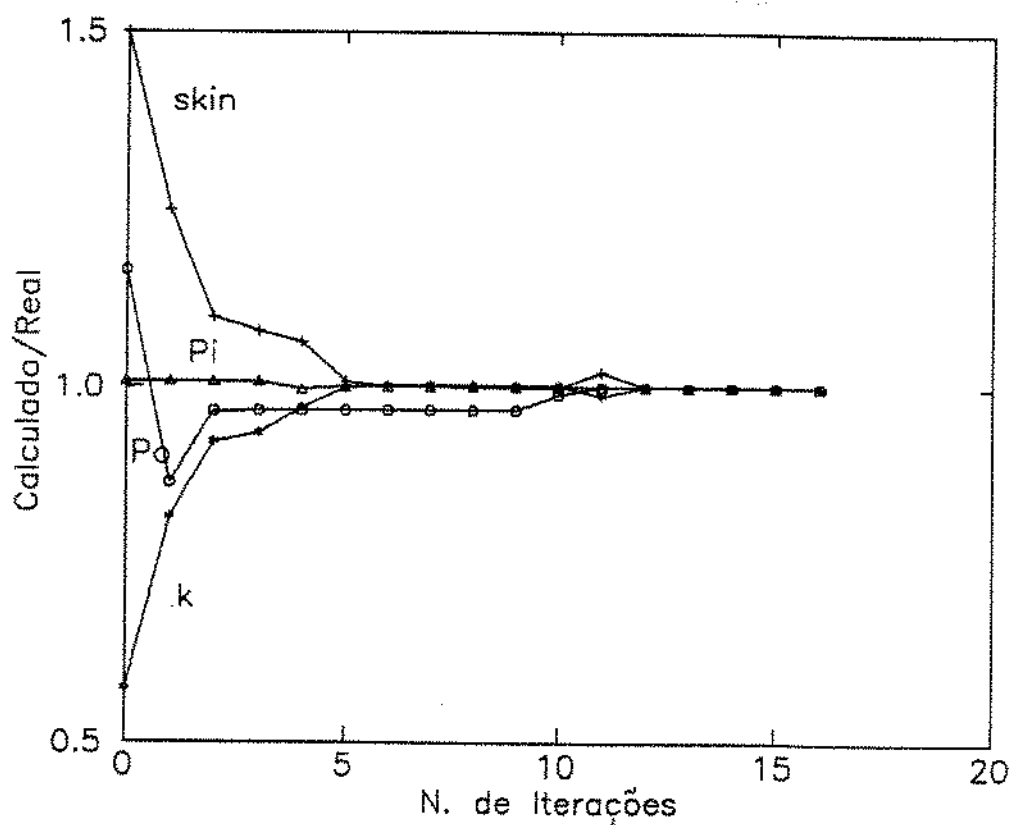


Figura 5.11 - Otimização no fluxo e na estática

O estudo de sensibilidade do ajuste aos parâmetros C_f e C_e estão apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13. Eles indicam que os parâmetros k , S e p_i são pouco sensíveis à variação de C_e . Entretanto, esta indicação precisa de investigação mais profunda, uma vez que a região de maior influência de C_e encontra-se logo após o fechamento do poço, onde o gradiente de pressão em relação ao tempo é elevado, podendo causar imprecisão no cálculo da transformada inversa através do método de Stehfest.

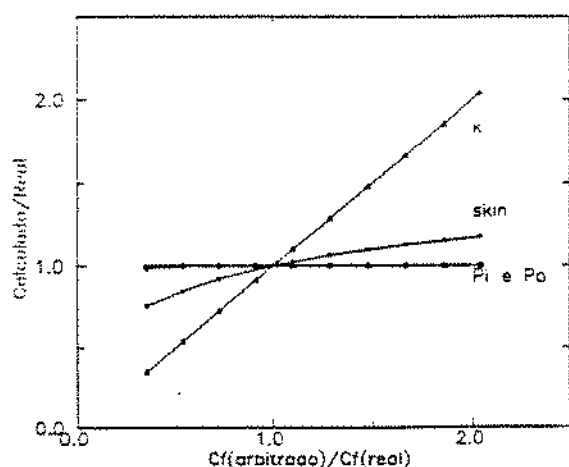


Fig. 5.12 - Sensibilidade dos parâmetros a estocagem no período de fluxo

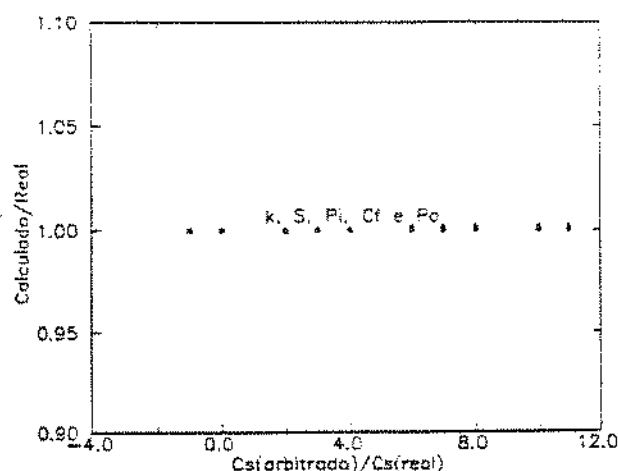


Fig. 5.13 - Sensibilidade dos parâmetros a estocagem no período de estabilização

Quanto à sensibilidade dos parâmetros em relação a C_f , nota-se que existe uma relação linear entre a variação de C_f e a permeabilidade, e inversamente proporcional em relação ao "skin". No caso estudado na Figura 5.12 o "skin" é negativo e por isto embora seu valor real decresça a razão entre valores calculado e real é crescente.

O cálculo de C_f depende principalmente da densidade do fluido produzido. A sensibilidade dos cálculos dos parâmetros com o valor de C_f mostra a importância da determinação correta da densidade média dos fluidos produzidos no teste.

6.0. APLICAÇÃO DA INTERPRETAÇÃO AUTOMATIZADA EM DADOS REAIS

Até agora, discutiu-se basicamente a solução analítica do DST e sua aplicação no "match" automatizado dos dados simulados. Descobriu-se que os parâmetros que podem ser determinados pela regressão não linear são k , S , p_i e p_o .

Viu-se também que entre todos os parâmetros que foram mantidos fixos, o que mais influencia os resultados da análise do teste é a densidade do fluido produzido, pois dele depende o coeficiente de estocagem do fluxo C_f .

Passaremos então à aplicar este método de regressão não linear a dados reais de campo obtidos nos testes de formação.

6.1. Otimização em poços de alta produtividade.

Nos poços de alta produtividade há uma tendência de amortecimento de pressão durante o fluxo.

A aplicação da regressão não linear para o teste composto de um ciclo completo será feita de acordo com os princípios apresentados na seção 5.4.

Para a determinação dos valores iniciais dos parâmetros para o processo de otimização usou-se os seguintes critérios:

- i) O método de Corrêa, o qual foi automatizado para cálculo de k , e p_i , tomando-se os 5 pontos finais da estática.
- ii) O valor lido da pressão de abertura para p_o .
- iii) O último valor lido na estática como sendo p_i .
- iv) O valor discreto do Skin entre -5 e 5 que conduz ao menor residuo entre os dados observados e calculados durante o fluxo.

Vamos estudar inicialmente o exemplo A apresentado por Corrêa (1988). Trata-se de um DST feito a poço aberto num campo de óleo viscoso (Carmópolis-SE). O reservatório é um conglomerado que foi completamente aberto para fluxo.

O detalhe dos dados de pressão vs tempo e demais informações estão apresentados na Tabela 6.1, e Figura 6.0.

Dados do poço do fluido e da rocha							
$\phi = 0.062$ API = 25.92 $r_w = 0.354 \text{ ft}$ $C_v = 6.0 \times 10^{-6} \text{ psig}^{-1}$ $\mu_o = 60 \text{ cp}$ Prof. packer = 810.39 m				$h = 38 \text{ ft}$ $C_t = 10.2 \times 10^{-6} \text{ psig}^{-1}$ $r_p = 0.159 \text{ ft}$ $C_f = 0.0365 \text{ RB/psig}^{-1}$ Fundo do poço = 822.61 m			
Dados de pressão							
Período de fluxo				Período de estática			
t (hr)	P_{vf} (psig)	t (hr)	P_{vf} (psig)	Δt (hr)	P_{vs} (psig)	Δt (hr)	P_{vs} (psig)
0.000	142.4	0.264	430.3	0.000	712.2	0.372	856.6
0.022	186.2	0.295	449.6	0.022	766.9	0.418	858.2
0.026	195.1	0.334	470.9	0.026	798.7	0.470	859.4
0.034	209.9	0.372	491.0	0.034	816.4	0.528	861.0
0.041	221.6	0.418	511.1	0.041	824.0	0.590	862.2
0.053	239.3	0.470	537.7	0.053	830.9	0.662	863.4
0.067	261.8	0.528	561.0	0.067	835.7	0.774	864.6
0.084	282.3	0.590	583.9	0.084	838.9	0.835	865.8
0.106	310.5	0.662	607.3	0.106	841.3	0.938	867.4
0.132	333.4	0.774	630.2	0.132	844.1	1.051	868.7
0.166	364.0	0.835	655.1	0.166	846.9	1.810	870.3
0.187	380.0	0.938	677.2	0.187	848.5	1.325	871.5
0.209	394.9	1.051	698.9	0.209	849.8	1.486	872.3
0.235	412.2	1.260	712.2	0.235	851.4	1.666	873.5
				0.264	852.6	1.870	874.7
				0.295	853.8	2.098	876.3
				0.334	855.4	2.189	876.3

Tabela 6.1 - Dados poço A - (SPE 16802)

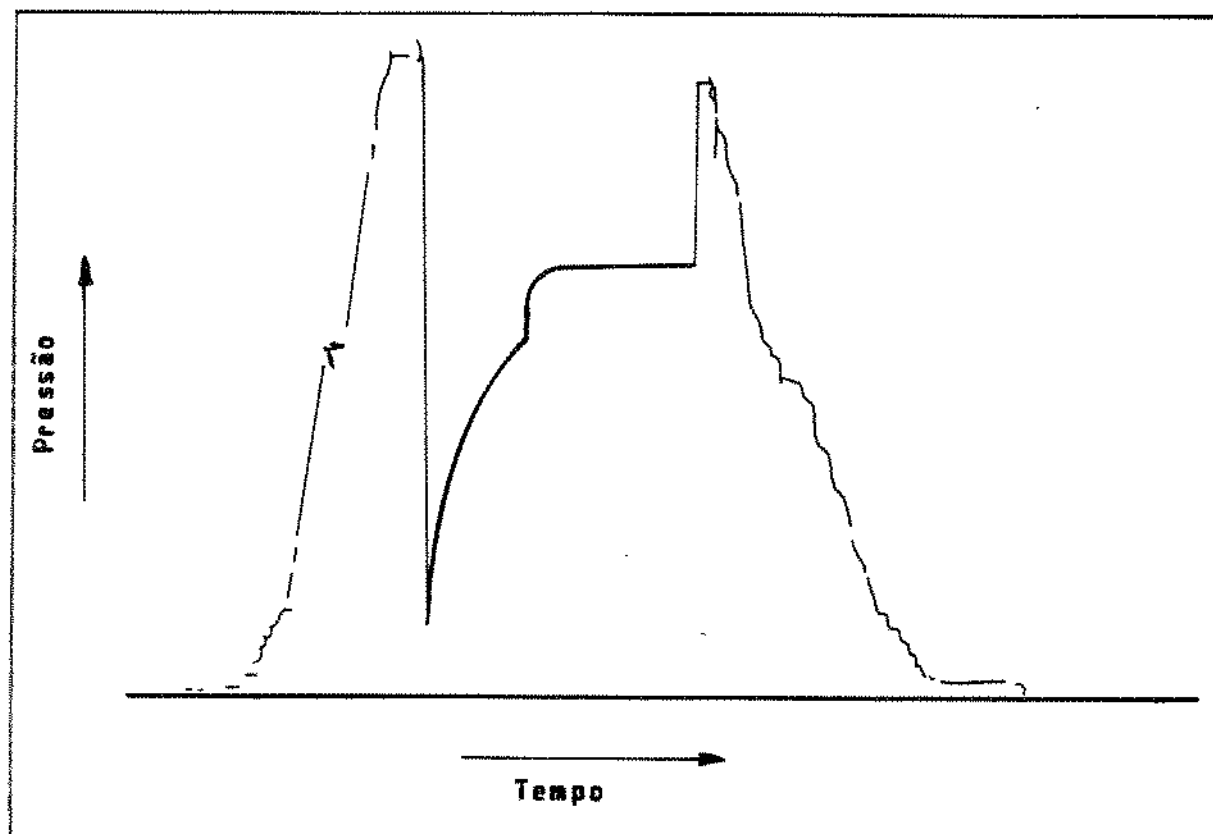


Figura 6.0 - Carta do DST no poço A (SPE 16802)

A interpretação manual foi feita pelo método de Corrêa na estática para calcular k e p_i , e pela análise da pressão de fluxo vs raiz quadrada do tempo para calcular S e p_o .

Parâmetro	Valor calculado	Unidade
Permeabilidade (k)	1.384	Darcy
Efeito de Película (S)	-3.4	-
Pressão estática reserv. (p_i)	60.68	atm
Pressão fluxo inicial (p_o)	5.85	atm

Tabela 6.2 - Interpretação gráfica manual poço A - SPE 16802.

A Interpretação automatizada foi feita usando o programa apresentado no apêndice G.4 e tivemos o seguinte resultado:

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Calculado	Unidade
Permeabilidade (k)	1.16	1.03	Darcy
Efeito de Película (S)	-1.0	-2.21	-
Pressão estática (p_l)	60.54	61.46	atm
Pressão inicial (p_o)	9.69	8.28	atm

Tabela 6.3 - Interpretação automatizada poço A - SPE 16802.
 Vejamos a Figura 6.1 para discussão dos resultados.

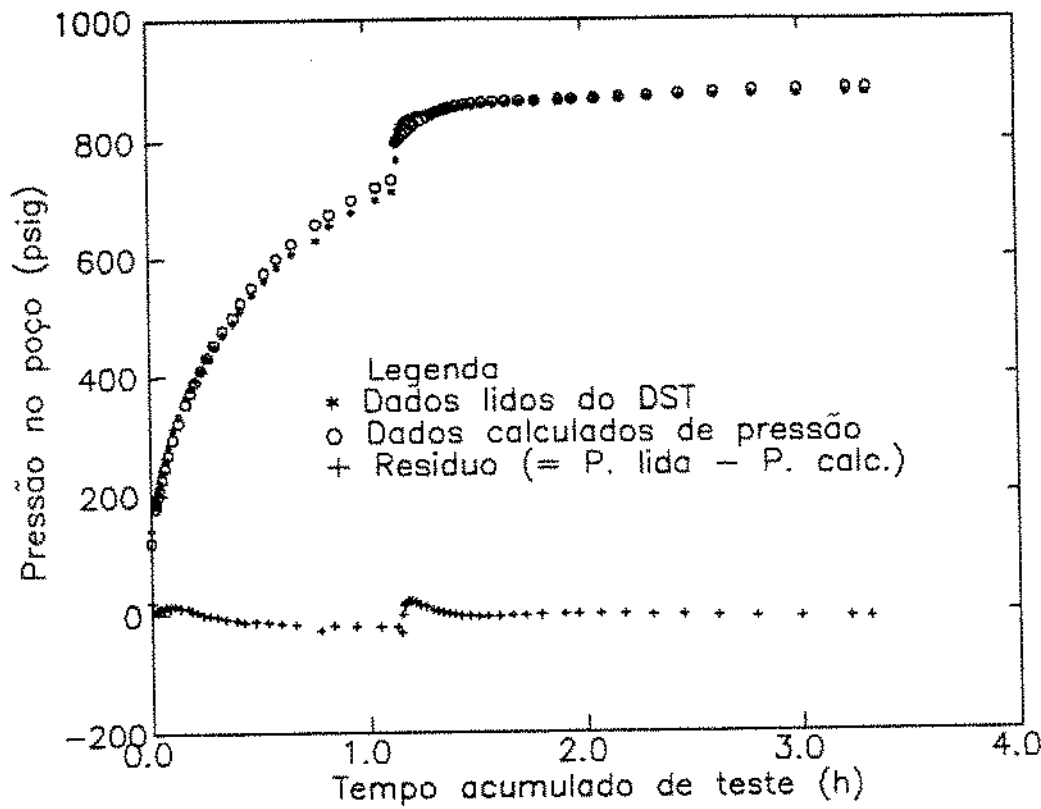


Fig. 6.1 - Otimização no DST do poço A

6.1.1. Discussão dos resultados

Pela aplicação do método verificou-se que:

- i) O programa funcionou bem e a convergência foi rápida.
- ii) O valor final da função objetivo é de 41.08 atm².
- iii) Os trechos que apresentaram maiores resíduos foram o final do fluxo, o início da estática e o final da estática.
- iv) Os menores resíduos foram obtidos nos trechos intermediários.
- v) Quanto à comparação dos resultados obtidos pela interpretação automatizada e pela interpretação manual, observa-se diferenças acentuadas nos valores dos parâmetros.

6.1.2. Nova proposta para otimização do DST (1 ciclo)

Na análise de DST's os trechos mais importantes para interpretação com gráficos específicos (métodos de Corrêa, Horner, Cartesiano, etc.), são os finais da estática e do fluxo uma vez que os dados nestas faixas estão pouco influenciados pela estocagem.

Sabe-se também que os registradores de pressão tem seu intervalo de medição ideal que é de aproximadamente de 30% a 80% de sua capacidade máxima. Este fato, junto ao grande choque inicial imposto à formação no DST, podem explicar a má qualidade da leitura obtida de pressão obtida neste trecho.

Para a otimização foram fixados os valores dos coeficientes de estocagem de fluxo (C_f) e estática (C_a), o que torna o período de estocagem quase definido.

Por outro lado, os valores de pressão calculados para os pontos iniciais da estática não são confiáveis devido à limitação do algoritmo de inversão numérica de Stehfest.

Por todos estes motivos expostos acima parece que se houver minimização dos resíduos nos trechos finais dos respectivos períodos o resultado da interpretação do teste será mais confiável. Isto pode ser feito atribuindo pesos

individuais aos pontos lidos proporcionalmente ao seu valor de pressão.

6.1.3. Interpretação automatizada usando pesos diferenciados por pontos.

Usando o mesmo programa apresentado no apêndice F, mas atribuindo pesos para cada ponto lido, proporcional à pressão do período, que em forma de desvio padrão é:

$$\sigma_i = \frac{P_{ff}}{P_{vfi}} \quad i = 1, \quad \text{ndf. Para pontos do fluxo e}$$

$$\sigma_i = \frac{P_{vef}}{P_{vei}} \quad i = 1, \quad \text{nde. Para pontos da estática.}$$

O residuo será a diferença de pressão dividido por σ_i .

O resultado da interpretação automatizada fica então:

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Calculado	Unidade
Permeabilidade (k)	1.16	1.31	Darcy
Efeito de Película (SD)	-1.0	-1.31	-
Pressão estática (p_l)	60.54	60.78	atm
Pressão inicial (p_o)	9.69	9.13	atm

Tabela 6.4 - Interpretação automatizada poço A - SPE 16802.

Observando a Figura 6.2 apresentada na página seguinte vemos que os trechos com maiores resíduos são os trechos iniciais do fluxo e da estática. O trecho com menor residuo agora é o final da estática, com a função objetivo da última

iteração igual a 22.73 atm^2 . Este ajuste parece explicar melhor o histórico da pressão. Na Figura 6.3 a curva gerada com os dados da interpretação manual é o que apresenta pior desempenho, talvez devido aos valores errôneos obtidos para o skin e a pressão inicial do gráfico $p_{wf}(t)$ vs $\sqrt{t}$.

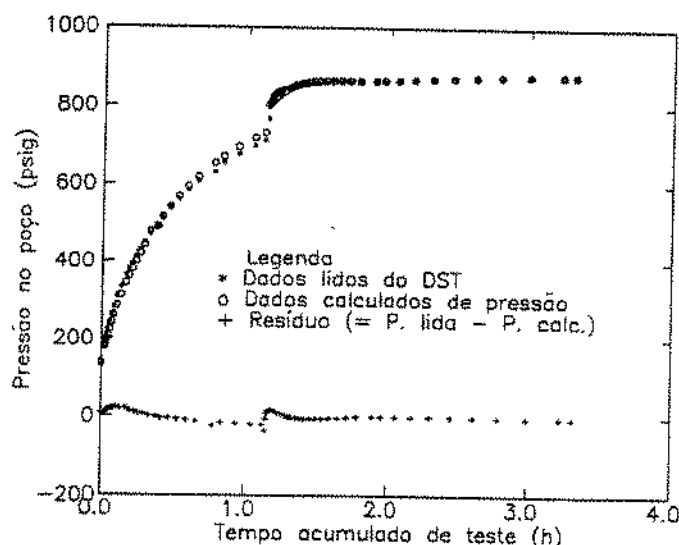


Fig. 6.2 - Otimização com peso no DST do poço A

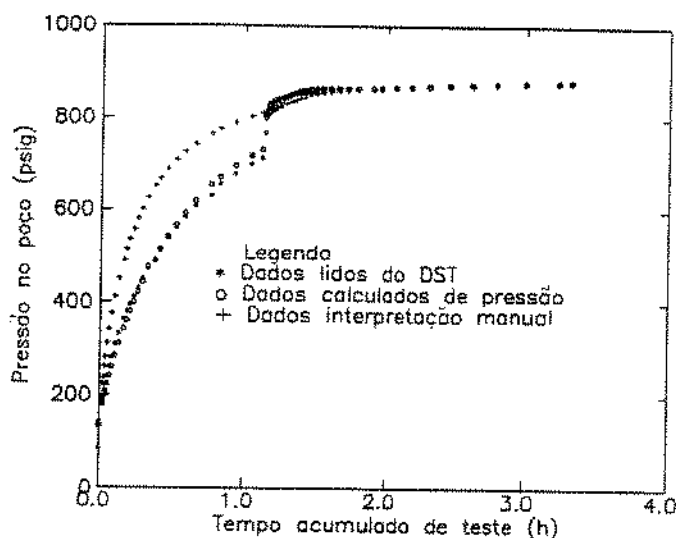


Fig. 6.3 - Comparação dos resultados manual x otimizado

6.1.4. Outros exemplos estudados

A Tabela 6.5 abaixo apresenta os resultados comparativos em outras aplicações do método para teste de formação de um ciclo em poços de alta produtividade.

Poço	Parâmetro	Resultado das interpretações do teste		
		Gráfica Manual	Automatizada (sem peso)	Automatizada (com peso)
Cp-115	k [md]	6.5	4.8	5.3
	S []	2.5	-1.3	-0.9
	p_i [atm]	19.07	19.13	19.08
	p_o [atm]	7.07	6.71	6.81
Cp-137	k [md]	4.00	2.16	3.21
	S []	-2.01	-4.58	-3.97
	p_i [atm]	25.99	27.99	27.22
	p_o [atm]	3.49	3.44	4.68
Cp-222	k [md]	81.60	17.46	20.01
	S []	-3.10	-3.38	-3.25
	p_i [atm]	41.80	42.64	42.30
	p_o [atm]	8.67	3.92	3.68
Cp-295	k [md]	264.00	310.80	318.90
	S []	-3.46	-3.28	-3.33
	p_i [atm]	38.33	38.00	38.00
	p_o [atm]	3.58	1.48	0.00

Tabela 6.5 - Outros exemplos de otimização em poços

As Figuras 6.4 a 6.11 a seguir mostram os respectivos ajustes de curvas obtidos. A análise dos resíduos, indicará a aplicabilidade do modelo e/ou a qualidade dos dados do DST.

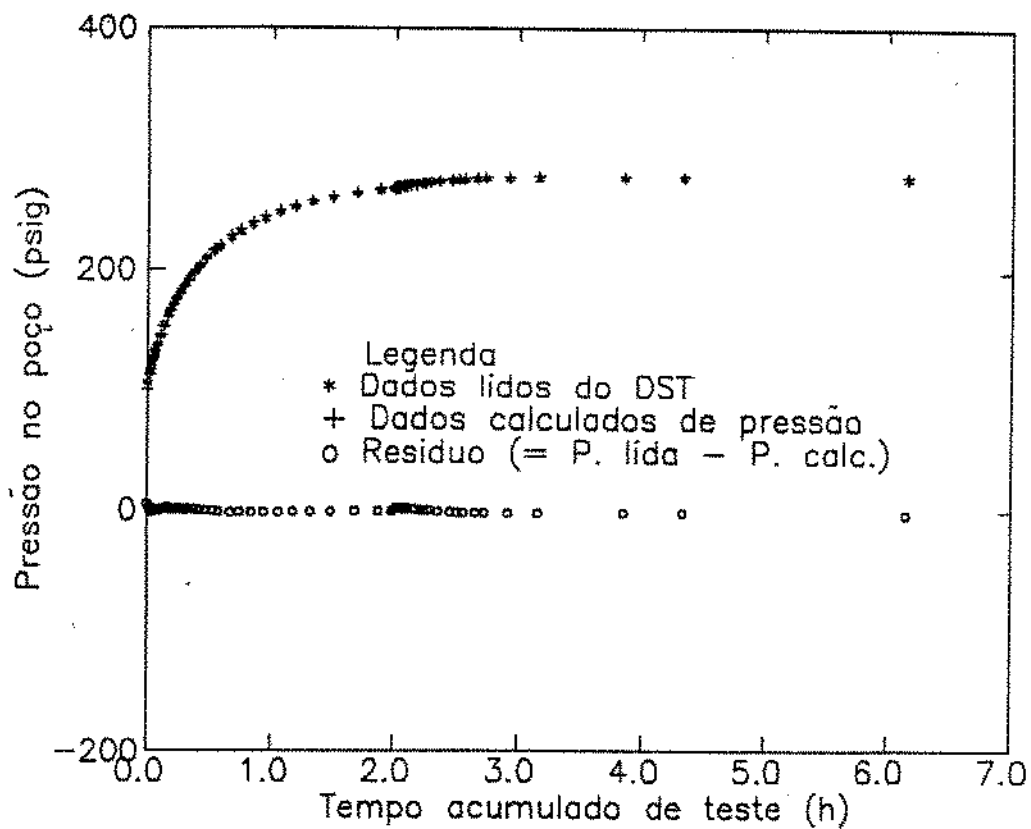


Fig. 6.4 - Otimização sem peso - poço CP 115

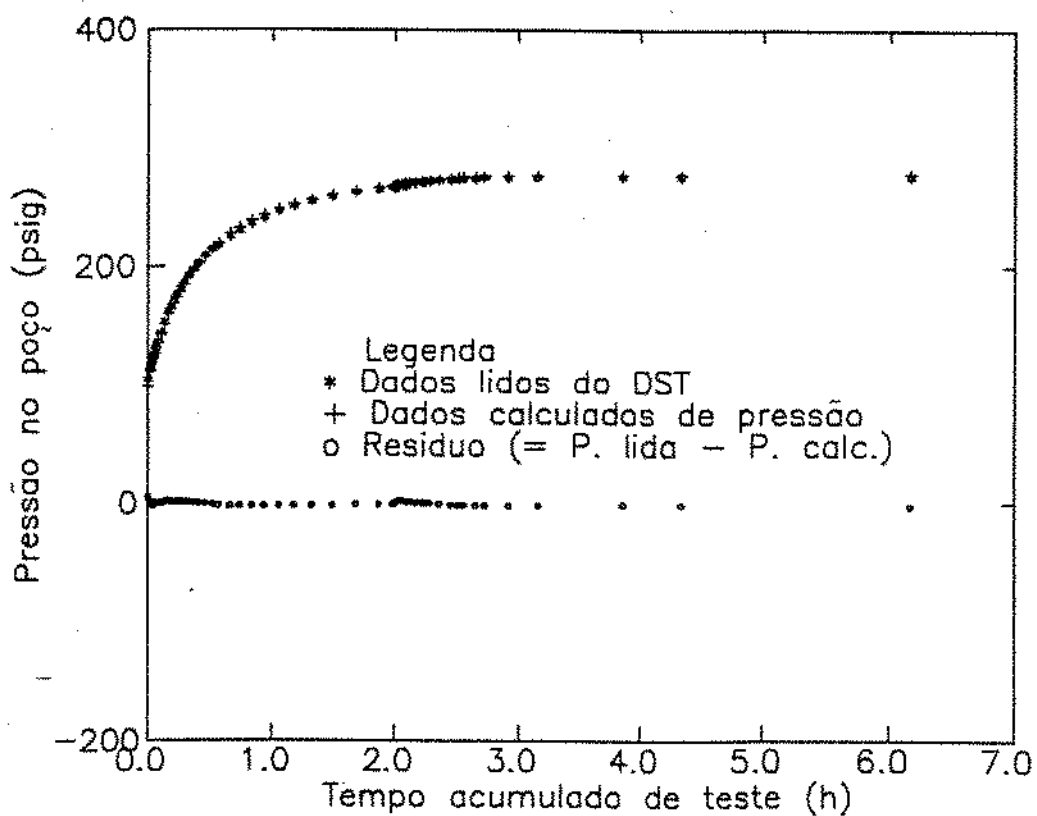


Fig. 6.5 - Otimização com peso - poço CP 115

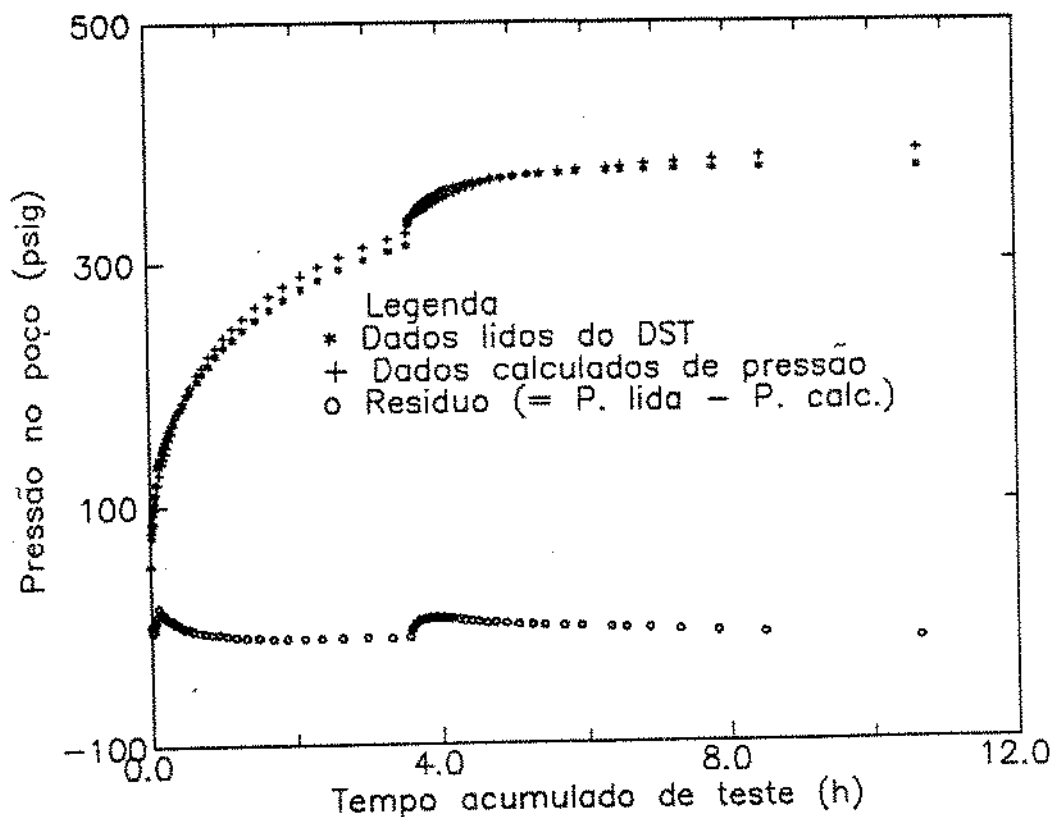


Fig. 6.6 - Otimização sem peso - poço CP 137

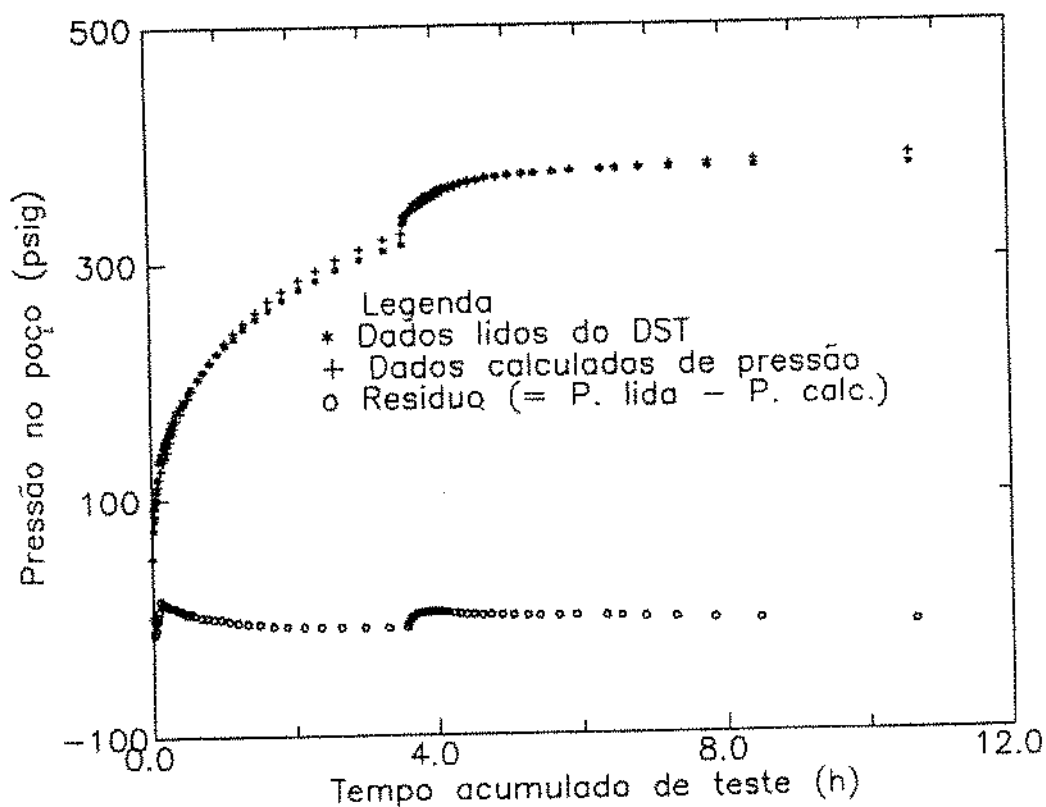


Fig. 6.7 - Otimização com peso - poço CP 137

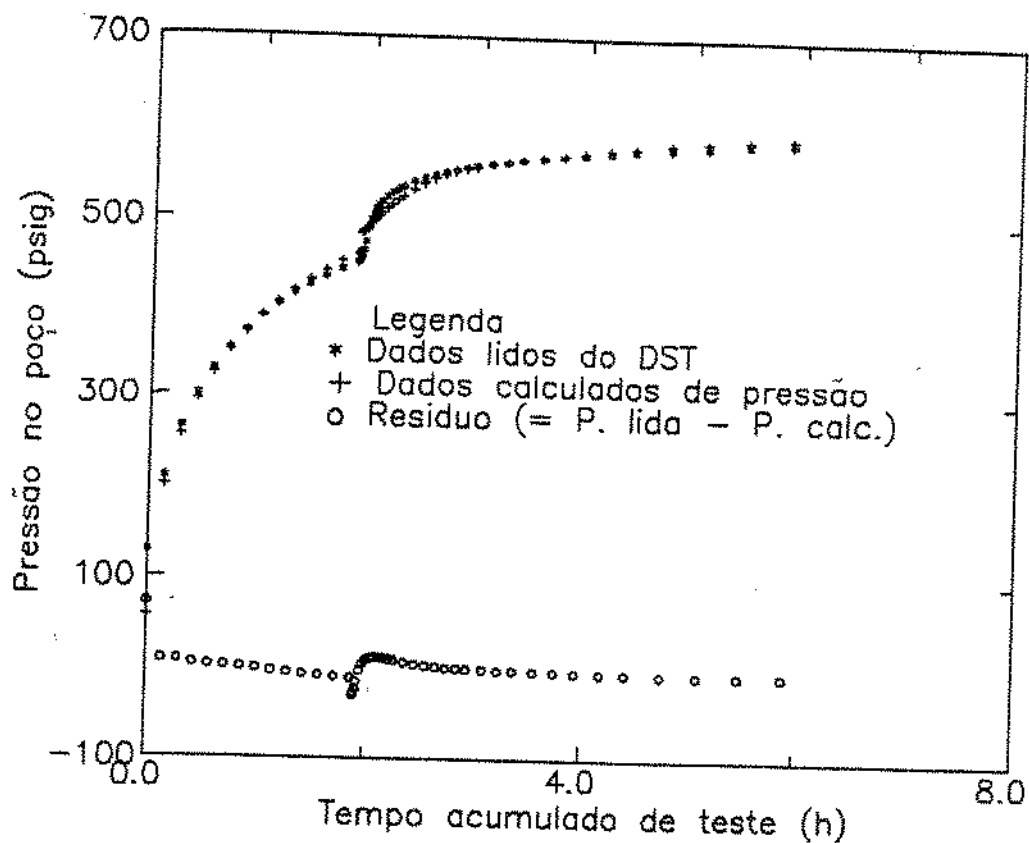


Fig. 6.8 - Otimização sem peso - poço CP 222

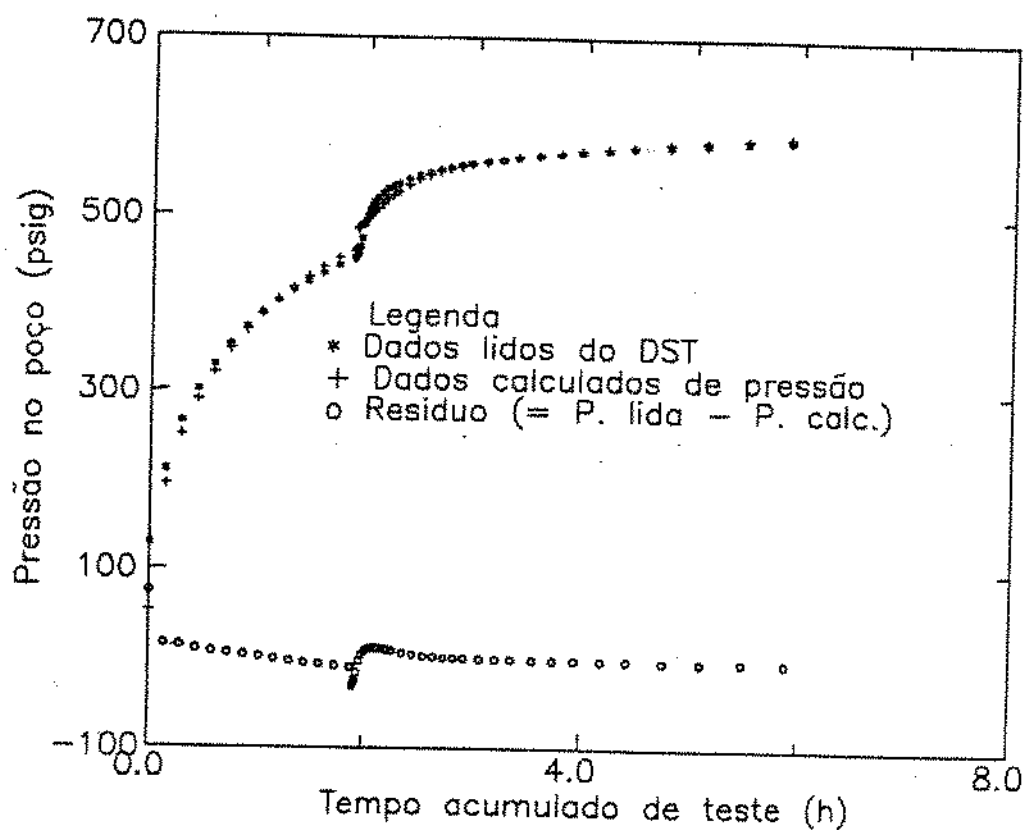


Fig. 6.9 - Otimização com peso - poço CP 222

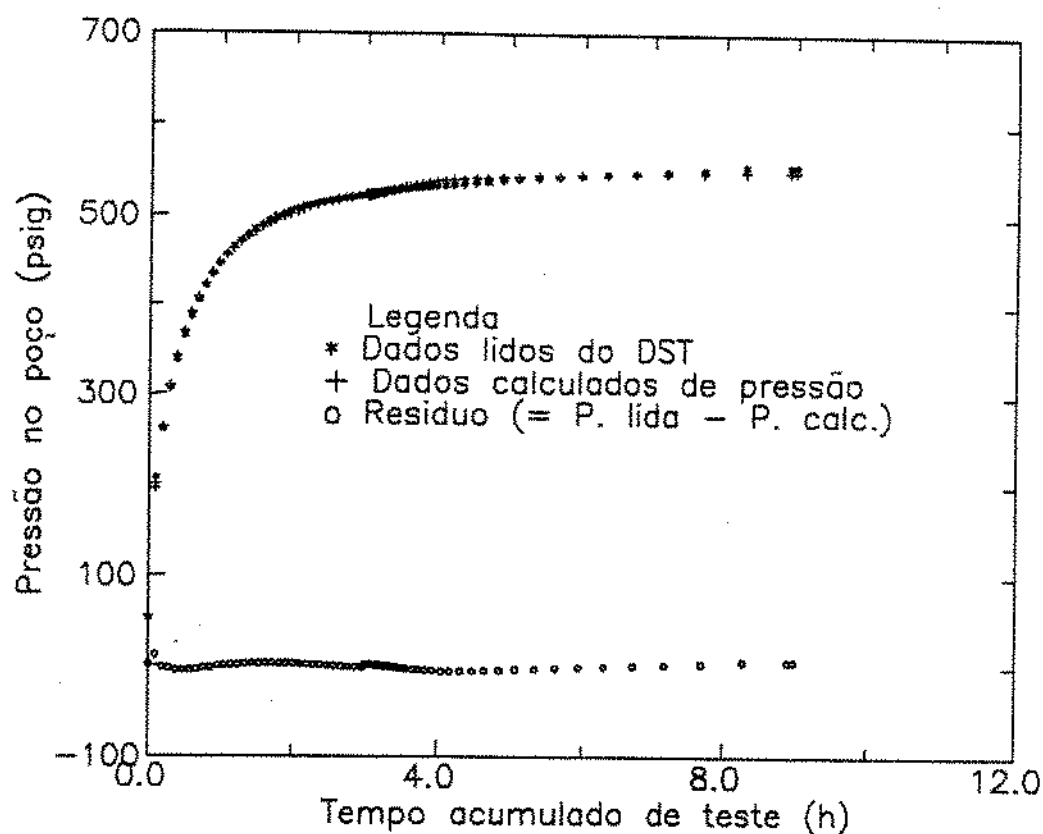


Fig. 6.10 - Otimização sem peso - Poço CP 295

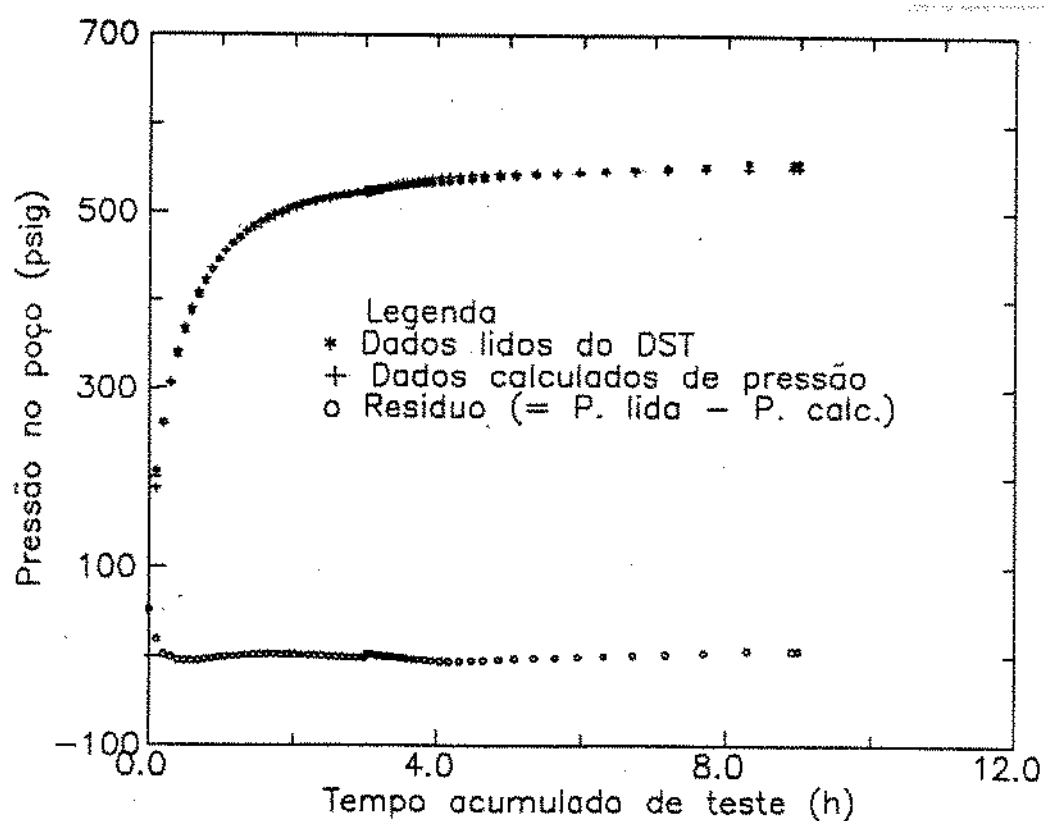


Fig. 6.11 - Otimização com peso - Poço CP 295

6.2 - Otimização em poços de baixa produtividade

Nos poços de baixa produtividade há um crescimento contínuo de pressão, sem tendência de amortecimento.

Inicialmente será aplicado a regressão não linear, para o teste composto de um ciclo completo, usando-se os mesmos princípios da seção 6.1.3 para definição dos valores iniciais dos parâmetros e da seção 5.4 para a convergência do método.

O TFR-3 (Teste de formação revestido nº 3) do poço 7-Cp-760-Se é um exemplo de DST com baixa produtividade, conforme mostra o desenho esquemático da carta na Figura 6.12 abaixo:

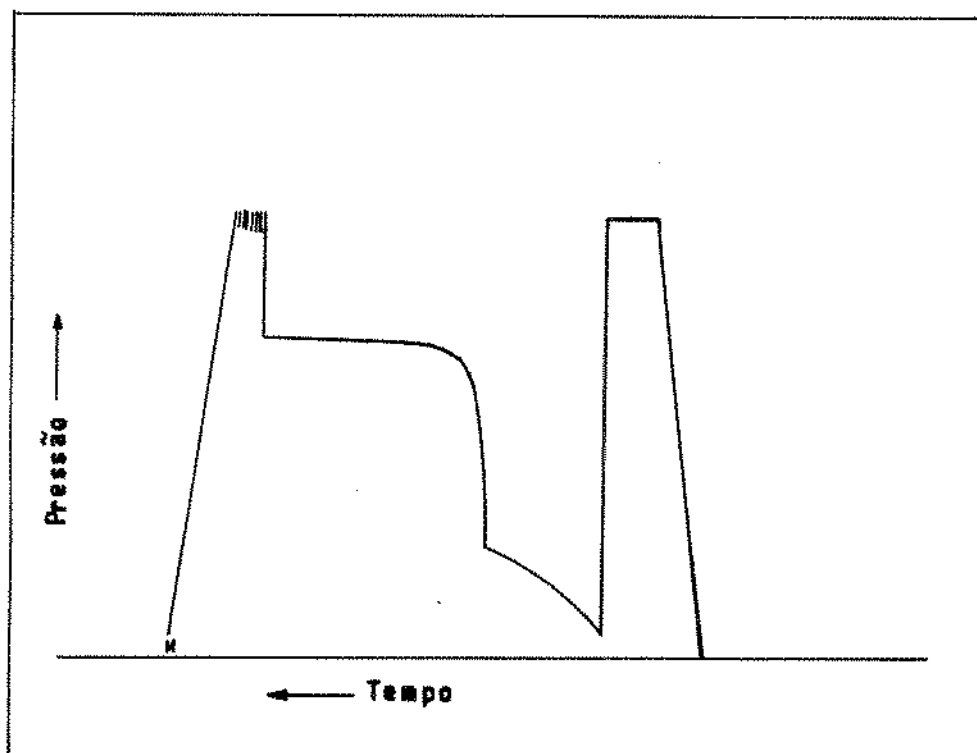


Fig. 6.12 - DST no poço 7 - Cp - 760 - Se (TFR-3).

A Tabela 6.6 mostra as respectivas pressões no poço:

Dados lidos de pressão do poço : 7-Cp-760-Se							
Período de fluxo(*)				Período de estática			
t (pol)	P _{vf} (pol)	t (pol)	P _{vf} (pol)	Δt (pol)	P _{vs} (pol)	Δt (pol)	P _{vs} (pol)
0.000	0.143	0.318	0.416	0.004	0.629	0.110	1.599
0.043	0.182	0.379	0.378	0.006	0.642	0.120	1.608
0.086	0.221	0.441	0.491	0.009	0.660	0.140	1.629
0.129	0.261	0.502	0.529	0.011	0.679	0.155	1.631
0.171	0.300	0.563	0.566	0.014	0.706	0.175	1.641
0.214	0.339	0.624	0.604	0.017	0.733	0.195	1.650
0.257	0.378			0.019	0.768	0.220	1.659
				0.022	0.827	0.245	1.667
				0.025	0.904	0.275	1.674
				0.028	0.996	0.310	1.682
				0.031	1.082	0.350	1.689
				0.035	1.186	0.390	1.695
				0.039	1.275	0.440	1.702
				0.044	1.341	0.490	1.708
				0.049	1.405	0.550	1.714
				0.055	1.456	0.620	1.720
				0.062	1.499	0.780	1.730
				0.069	1.526	0.870	1.734
				0.078	1.552	1.980	1.738
				0.087	1.568	1.100	1.743
				0.098	1.584	1.205	1.746
Equação de calibração registrador e constante do relógio							
$P_{vf} = M t + A \quad \text{ou} \quad P_{vs} = M \Delta t + A$ $M = 377.81200 \text{ psig/pol.} \quad A = -3.0431 \text{ psig}$ $K_{rel.} = 4.8 \text{ h/pol.}$							

Tabela 6.6 - Pressão no poço 7-Cp-760-Se

(*) Os dados de pressões de fluxo foram obtidos por interpolação linear em 2 trechos, porque só se dispunha da pressão de fluxo inicial e final no relatório de teste.

O teste foi executado com o objetivo de determinar a produtividade, permeabilidade, dano, pressão estática e demais parâmetros da formação. O tempo de fluxo foi de 3 horas e o de estática de 6 horas.

A Tabela 6.7 mostra os demais dados a serem usados para a interpretação do teste:

Dados de fluido e rocha do poço: 7-Cp-760-Se	
$\phi = 0.148$	$h = 6.0 \text{ m}$
API = 22.8	$C_l = 9.52 \times 10^{-6} \text{ psig}^{-1}$
$r_w = 3.183 \text{ pol.}$	$\mu_o = 51.9 \text{ cp}$
$C_v = 6.0 \times 10^{-6} \text{ psig}^{-1}$	
Capacidade da coluna de produção = $0.00302 \text{ m}^3/\text{m}^3$	
Prof. packer = 577.00 m	Fundo do poço = 550.24 m

Tabela 6.7 - Dados de fluido, rocha e mecânico do 7-Cp-760-Se

A Tabela 6.8 mostra o resultado da interpretação manual

Parâmetro	Valor calculado	Método
Permeabilidade [md]	113.76	Horner
Coefficiente de película []	0.92	Horner
Pressão estática [atm]	45.79	Horner
Pressão fluxo inicial [atm]	3.60	-

Tabela 6.8 - Interpretação gráfica manual poço 7-Cp-760-Se.

A Interpretação automatizada foi feita usando o programa do apresentado no apêndice G.4, com o seguinte resultado:

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Calculado (*)	Valor Calculado (**)
Permeabilidade [Md]	59.9	86.2	133.0
Efeito de Película []	-1.0	1.07	3.58
Pressão estática [Atm]	46.11	46.33	45.57
Pressão fluxo [Atm]	3.47	2.78	2.78

* Interpretação com peso diferenciado e *Stehfest* com $N = 20$.

** Interpretação com peso diferenciado e *Stehfest* com $N = 10$.

Tabela 6.9 - Interpretação automatizada poço 7-Cp-760-Se.

As Figuras 6.13 e 6.14 mostram estes resultados:

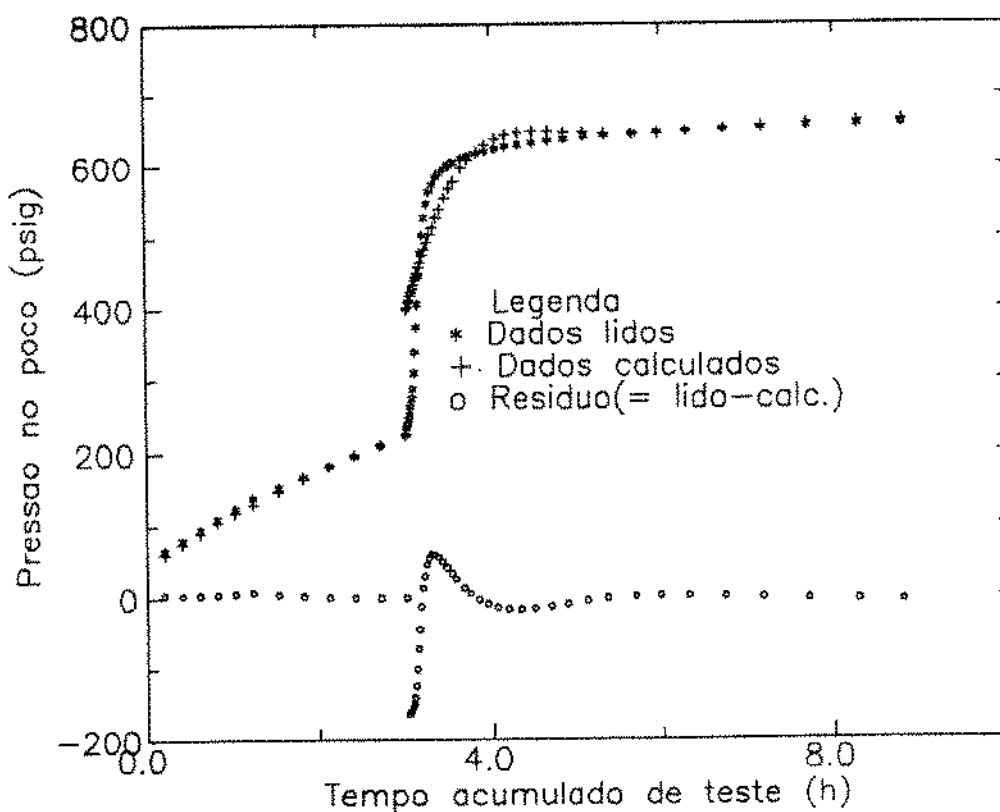


Fig. 6.13 - Otimização com peso - Poço CP 760

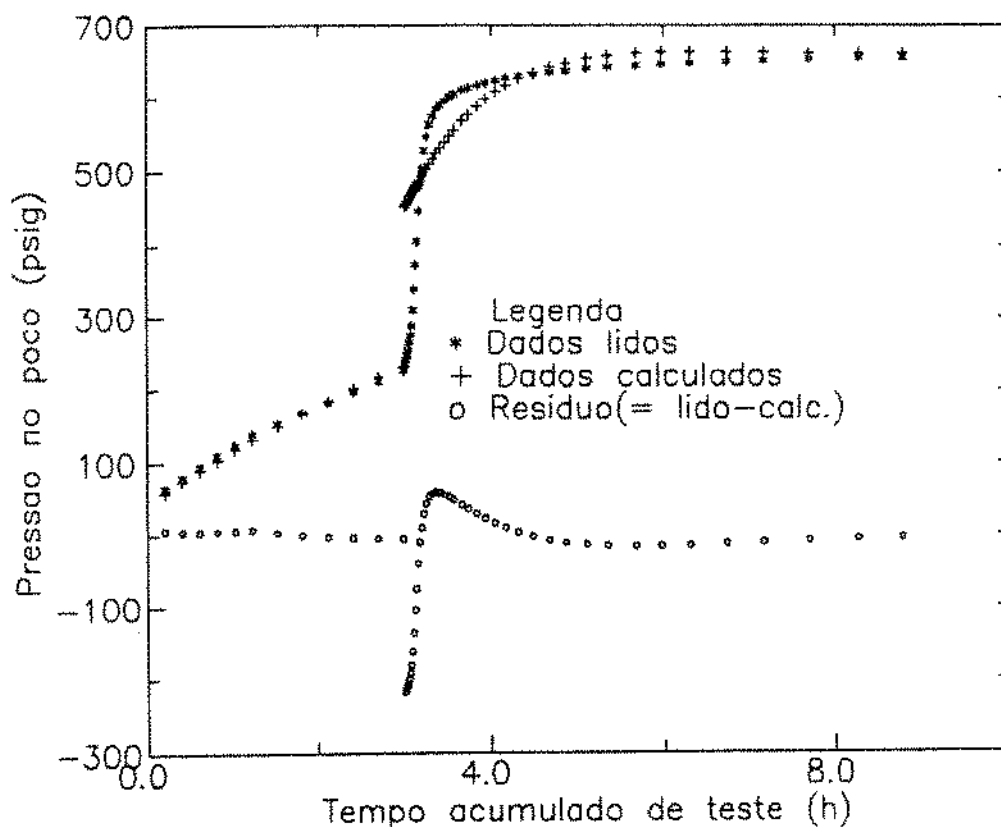


Fig. 6.14 - Otimização com peso - POCO CP 760
(N = 10)

6.2.1 - Discussão dos resultados

Pela aplicação do método verificou-se que:

- O programa funcionou bem e a convergência foi rápida.
- O valor final da função objetivo é alto ($= 238.7 \text{ atm}^2$).
- O trecho com maiores resíduos foi o do início da estática.
- Nos demais trechos verificou-se resíduos baixíssimos.
- Quanto a comparação dos resultados obtidos pela interpretação manual e automatizada (com pesos e para diferentes parâmetros N de *Stehfest*) nota-se semelhanças bastantes acentuadas nos valores finais dos parâmetros.

O método dos quadrados mínimos não lineares faz um ajuste final da curva de tal modo que, além da soma dos quadrados ser mínima, há uma distribuição uniforme dos erros ou resíduos. Como isto aconteceu no exemplo acima, podemos dizer

que o método de regressão funcionou satisfatoriamente e os resultados podem ser aceitos.

O grande problema da aplicação desta metodologia de otimização está exatamente no algoritmo de inversão numérica das expressões da pressão e gradientes de pressão para poços de baixa produtividade.

O algoritmo de *Stehfest* usado tem apenas controle sobre a precisão dos seus coeficientes, mas não tem nenhuma condição de convergência imposta para diferentes tipos de funções a serem invertidas, logo ele fornece uma resposta que pode ser incorreta.

Para a inversão de funções contínuas, mas com descontinuidades nas derivadas, como é o caso da expressão da pressão de fluxo para a estática em poços de baixa produtividade, o algoritmo de *Stehfest* não fornece valores corretos.

Uma alternativa para a análise do teste é aplicar o método retirando estes pontos iniciais da estática onde o algoritmo não funciona corretamente e prosseguir a análise normalmente.

Outra alternativa é fazer esta análise do teste por regressão não linear avaliando as pressões e gradientes de pressões numericamente como por exemplo através do método das diferenças finitas.

6.2.3. Interpretação automatizada retirando os pontos iniciais da estática

Será usado o mesmo programa anterior, que é apresentado no apêndice G.4, e também o mesmo critério de pesos diferenciados estabelecido anteriormente; apenas retirando os 34 pontos iniciais da estática.

A Tabela 6.12 da página seguinte apresenta o resultado desta interpretação automatizada, que mostra um resultado bastante próximo da interpretação manual gráfica.

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Final
Permeabilidade [md]	59.90	90.0
Efeito de Película [1]	-1.	1.19
Pressão estática [atm]	46.11	46.09
Pressão fluxo [atm]	3.47	2.78

Tabela 6.10 - Interpretação automatizada poço 7-Cp-760-Se.

A Figura 6.15 mostra a curva final e os resíduos obtidos, donde se conclui que neste caso o resultado final faz um ajuste muito bom com os dados de campos usados.

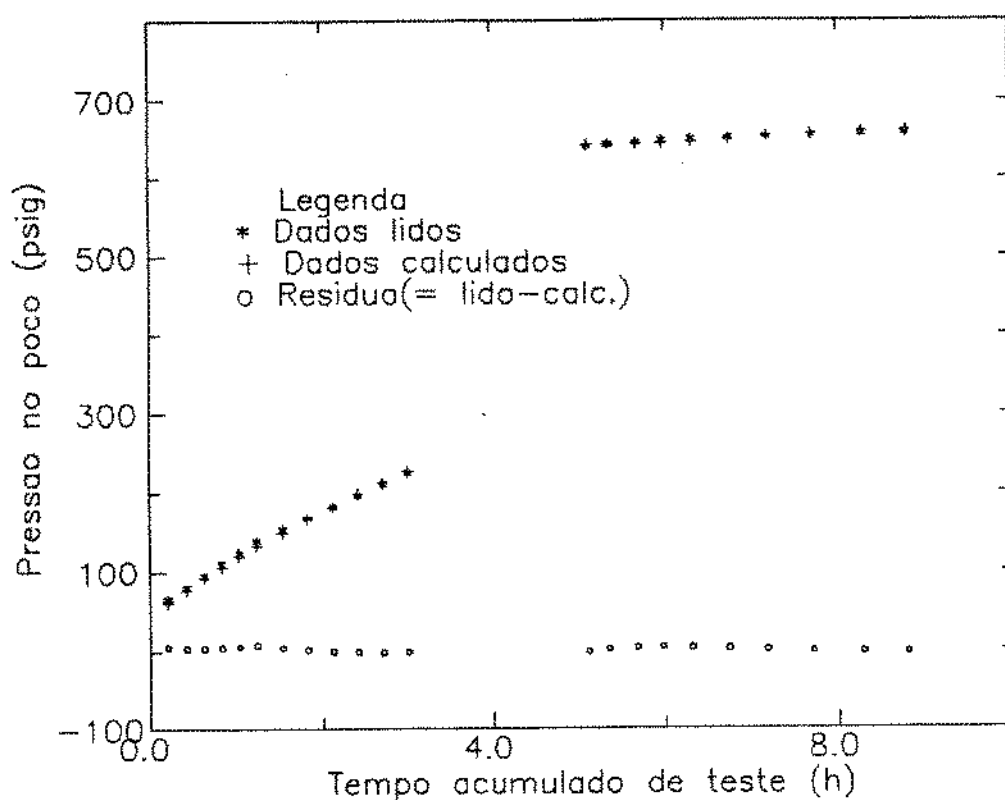


Fig. 6.15 - Otimização com peso - Poço CP 760

6.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DA REGRESSÃO

Até agora tratou-se apenas de se obter uma estimativa pontual de um parâmetro desconhecido. Existem contudo vários métodos estatísticos, tais como intervalo de confiança e coeficientes de correlação, que podem conduzir a resultados mais significativos da análise da regressão. Assim ao invés de informar apenas o valor ótimo de um dado parâmetro, pode-se fornecer um intervalo com uma certa probabilidade de conter esse parâmetro calculado.

Intervalos de confiança muito grande indicam que a análise não é confiável.

O intervalo de confiança de cada parâmetro é computado, segundo *Hartley* (1964), pela seguinte relação aproximada:

$$x_j - \beta_{xj} t_{\alpha/2, n-m} < x_j < x_j + \beta_{xj} t_{\alpha/2, n-m}$$

onde

$$\beta_{xj} = \sqrt{E_{jj}^{-1} \beta_r^2} \quad \text{é o desvio padrão de cada parâmetro}$$

$$\beta_r^2 = \frac{SSR}{n - m} \quad \text{é o desvio padrão médio da regressão}$$

$$t_{\alpha/2, n-m} = \text{valor da distribuição de Student com nível de risco } \alpha \text{ (Exp.: para interv. de 95\% } \Rightarrow \alpha = 5\%).$$

O nível de risco α é tal que

$$\text{Probabilidade } \left\{ t \geq t_{\alpha/2, n-m} \right\} = \frac{\alpha}{2}$$

Assim, quanto menor o nível de risco α escolhido para análise da regressão, maiores serão os intervalos de confiança dos parâmetros, embora esses dependam também da qualidade dos pontos registrados e da quantidade de pontos n .

Quanto maior o número de pontos, menor será o intervalo de confiança e maior será a confiança nos resultados da otimização.

Adotaremos para este estudo nível de risco $\alpha = 5\%$ que equivale aos intervalos de confiança de 95%.

O programa apresentado no apêndice G.4 fornece os intervalos de confiança para este caso.

As Tabelas abaixo trazem os limites destes intervalos para o poço A que está sendo analisado, considerando-se a otimização sem peso e com peso diferenciado nos pontos.

Parâmetro [unid.]	Limite Inferior	Limite Superior	Valor Ótimo
Permeabilidade [Darcy]	-0.60	2.72	1.03
Efeito de Película []	-2.29	-2.12	-2.21
Pressão estática [atm]	61.18	61.74	61.46

Tabela 6.11 - Intervalos de confiança da otimização sem peso do poço A - SPE 16802.

Parâmetro [unid.]	Limite Inferior	Limite Superior	Valor Ótimo
Permeabilidade [Darcy]	0.05	2.57	1.31
Efeito de Película []	-1.43	-1.20	-1.31
Pressão estática [atm]	60.54	61.02	60.78

Tabela 6.12 - Intervalos de confiança da otimização com peso do poço A - SPE 16802.

Como vemos o intervalo de confiança de maior comprimento é o da permeabilidade. Isto evidencia que nesta análise este parâmetro pode ser o menos confiável, o que está coerente com a análise de sensibilidade feita anteriormente no qual verificou-se que este parâmetro era o mais sensível aos valores de densidade média de fluido adotado.

7.0 - OTIMIZAÇÃO NO DST USANDO DIFERENÇAS FINITAS

Estudaremos a otimização por regressão não linear, sob o critério dos quadrados mínimos, calculando as pressões e gradientes de pressões com relação aos parâmetros do reservatório via diferenças finitas com o objetivo de:

i) Comparação entre os resultados obtidos anteriormente pela inversões numérica da pressão e gradientes via algoritmo de *Stehfest*.

ii) Apresentação de um algoritmo capaz de interpretar todos os dados de pressão vs tempo de um teste de formação de baixa produtividade.

O cálculo das pressões por diferenças finitas consiste em determinar novos valores de pressão no espaço e no tempo, a partir de padrões iniciais conhecidos, como pressão de fluxo inicial (p_o), reservatório em repouso, etc.

O apêndice F apresenta o desenvolvimento teórico do método através das discretizações:

i) Da equação diferencial parcial para fluxo radial em reservatório homogêneo,

ii) Da condição de contorno interna, que considera o problema do DST como um "slug test" com uma mudança brusca do coeficiente de estocagem,

iii) Da condição de contorno externa, que considera o sistema com extensão radial infinita.

O apêndice I apresenta o programa que :

i) Calcula as pressões no poço através das diferenças finitas.

ii) Usa a subrotina ZERXTS.LIB da biblioteca de programas do IMSL para cálculo dos gradientes de pressão em relação aos parâmetros a serem determinados, e também para a regressão não linear por quadrados mínimos através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*.

iii) Calcula as pressões nos tempos lidos e em mais um ponto intermediário para melhorar a precisão do resultado.

7.1 - Otimização por diferenças finitas em dados simulados

Para evitar erros causados pelos dados na aplicação do método, gerou-se dados de pressões de um DST completo, usando o algoritmo de *Stehfest* e o algoritmo de diferenças finitas, que está resumido na Tabela 7.1 abaixo.

Os parâmetros de fluido, rocha e poço são os mesmos das Tabelas 5.1 e 5.10.

Dados simulados de pressão no poço							
Período de fluxo				Período de estática			
t (h)	P _{wf} (psig)	t (h)	P _{wf} (psig)	Δt (h)	P _{vs} (psig)	Δt (h)	P _{vs} (psig)
0.000	86.0	0.122	306.3	0.005	687.8	0.209	818.1
0.005	106.3	0.132	318.4	0.011	712.4	0.315	832.4
0.011	123.4	0.149	337.8	0.022	734.9	0.418	841.6
0.022	149.0	0.166	356.2	0.024	738.2	0.500	847.0
0.024	153.4	0.177	367.7	0.026	741.2	0.662	854.9
0.026	157.7	0.187	377.7	0.030	746.4	0.800	859.7
0.028	161.9	0.198	388.5	0.034	750.9	0.938	863.4
0.034	173.8	0.209	398.8	0.037	754.1	1.325	870.2
0.037	179.5	0.222	410.7	0.041	757.9	1.400	871.2
0.041	186.9	0.235	422.1	0.045	761.3	1.486	872.1
0.045	194.2	0.250	434.7	0.053	767.3	1.520	872.5
0.053	208.0	0.264	446.1	0.060	771.9	1.666	873.9
0.060	219.6	0.279	457.8	0.067	775.9	1.750	874.6
0.067	230.7	0.295	469.8	0.075	780.2	1.870	875.5
0.075	242.9	0.382	527.2	0.084	784.4	1.950	876.1
0.084	256.0	0.400	537.8	0.095	788.9	2.098	877.1
0.094	270.1	0.460	569.7	0.106	793.0	2.140	877.3
0.106	286.1	0.500	588.9	0.119	797.3	2.189	877.6

Tabela 7.1 - Dados simulados de DST com baixa produtividade

A Figura 7.1 apresenta a comparação das pressões no poço obtidas por estes dois métodos.

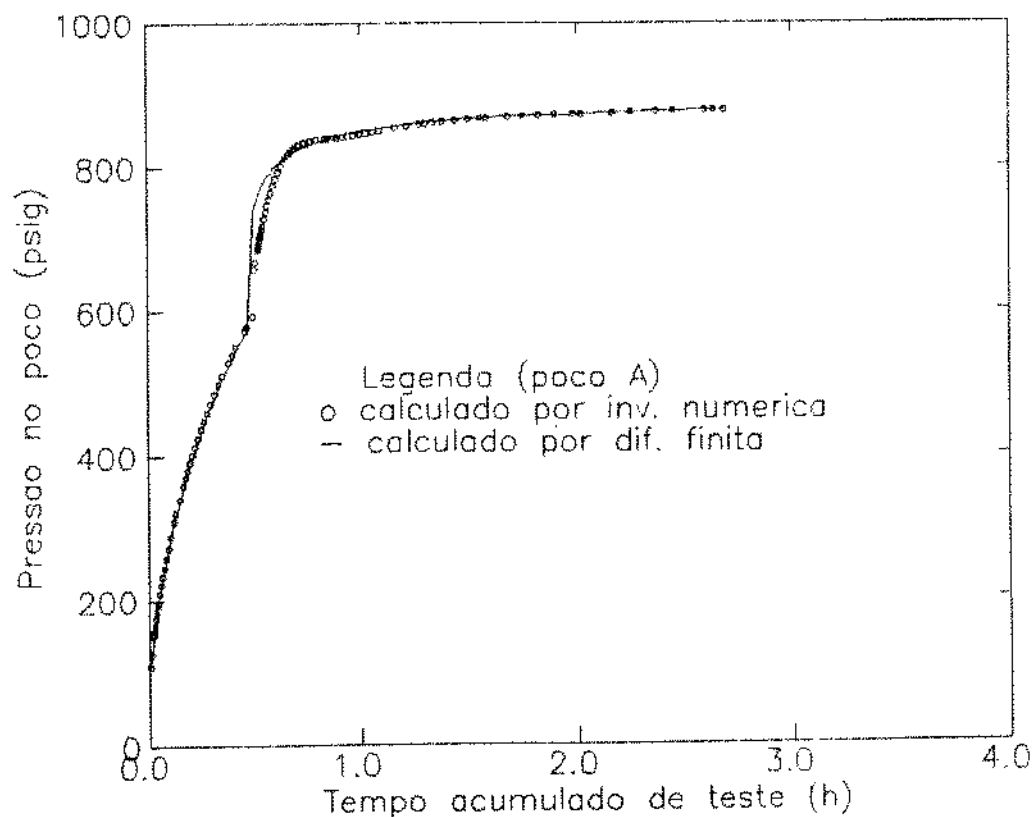


Fig. 7.1 - Pressões por inversão numerica x por dif. finita

Usando apenas os dados gerados por diferenças finitas, vamos aplicar o método de otimização por diferenças finitas do apêndice I, para determinar a permeabilidade (k), o efeito de película (S) e a pressão estática (p_i).

Os critérios usados para os valores iniciais dos parâmetros são os mesmos do item 6.1.

Será feita inicialmente uma regressão apenas nos dados do fluxo até a convergência e depois no período de fluxo e estática em conjunto até a otimização final.

A Figura 7.2 mostra os valores das razões entre os valores calculados e os valores reais, usados para gerar os dados de k , S e p_i para as diversas iterações, sendo as 19 iterações iniciais no período de fluxo e as restantes no DST

completo (fluxo e estática).

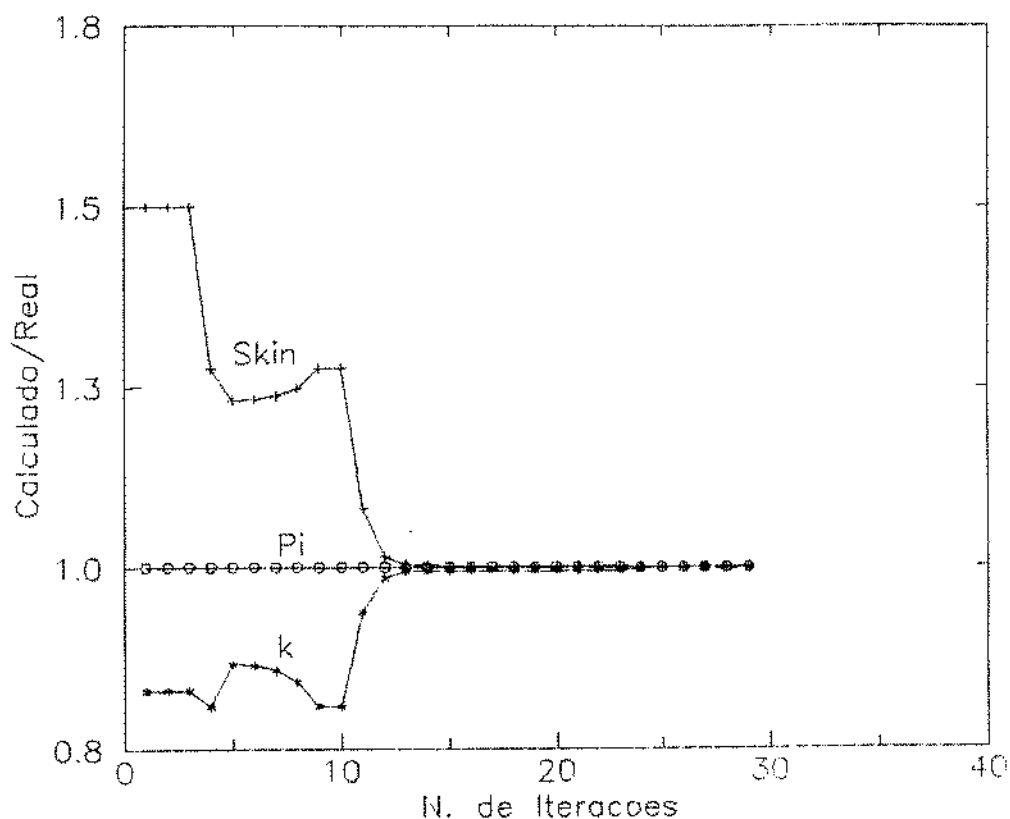


Figura 7. 2 – Otimização para o fluxo e fluxo+estático

A Figura 7.3 mostra as curvas de pressões obtidas na primeira iteração no DST completo, na otimização final e a curva gerada para aplicação do método. Nota-se que quando iniciou-se o processo de otimização no DST completo os valores dos parâmetros já estavam praticamente iguais aos valores finais, mas a função objetivo ainda diminuiu.

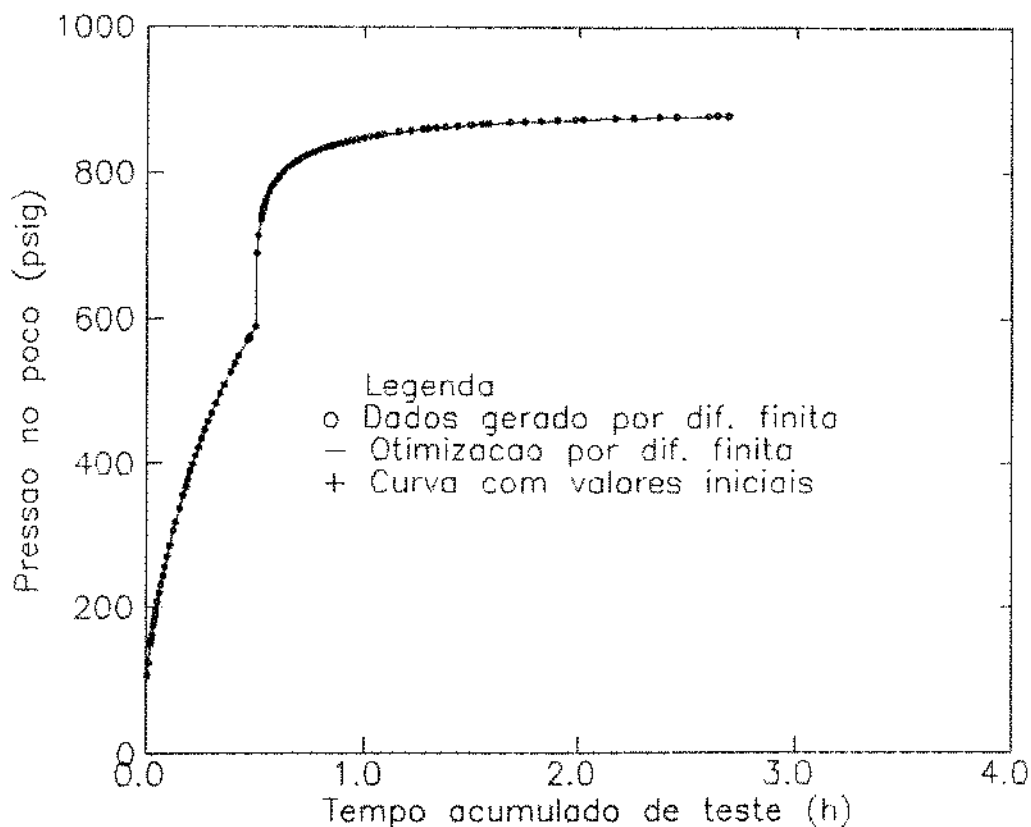


Fig. 7.3 - Otimização para fluxo e estática por dif. finita

Para a otimização inicial que é apenas no fluxo os valores iniciais ainda são distantes dos valores finais como mostra a Figura 7.4.

A Figura 7.5 resume este comportamento da função objetivo. Ela mostra a convergência rápida dos parâmetros durante o fluxo nas 19 iterações iniciais e lenta a para o DST completo. Há também um aumento da função objetivo no início da otimização em todo DST que é devido ao maior número de pontos analisados.

Em termos de valores absolutos a permeabilidade, skin e pressão estática têm valores iniciais 1.11 darcy, -1, e 60.8 atm ; atingem 1.378 darcy, -2.005, com $p_i = 60.8$ (fixo) no fluxo e convergem para seus valores exatos no DST completo.

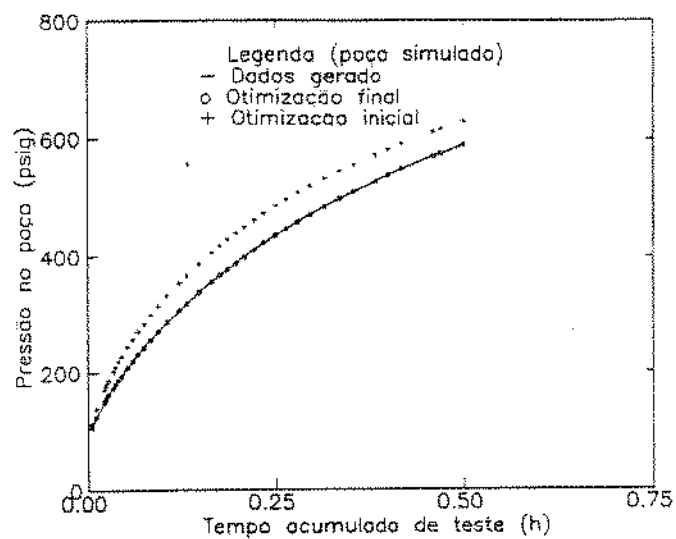


Fig. 7.4 - Otimização no fluxo por dif. finitas

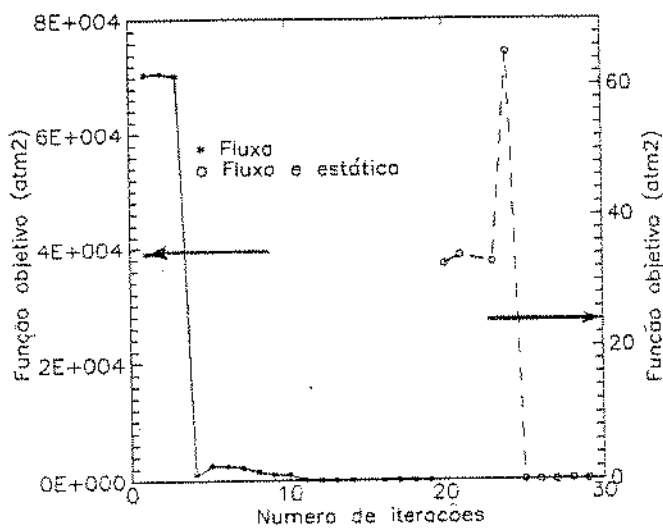


Fig. 7.5 - Função objetivo nas etapas da otimização

7.2. Otimização por diferenças finitas em dados reais

O método de otimização baseado na inversão numérica das expressões obtidas em *Laplace* não funcionou em poços de baixa produtividade devido à limitação no algoritmo que faz a inversão numérica das respectivas equações. Para que o algoritmo de *Stehfest* seja confiável a função deve ser monotônica, e sem descontinuidade brusca nas derivadas.

O algoritmo de otimização que calcula a pressão e gradientes através de diferenças finitas em poços de baixa produtividade forneceu valores exatos e convergiu rapidamente na sua aplicação para dados simulados.

Para a aplicação em dados reais é necessário que se faça um escalonamento dos parâmetros a determinar, colocando-os na mesma ordem de grandeza, para que na convergência todos eles tenham a mesma quantidade de número significativos.

A Figura 7.6 seu uso no DST do poço 7-Cp-760-Se.

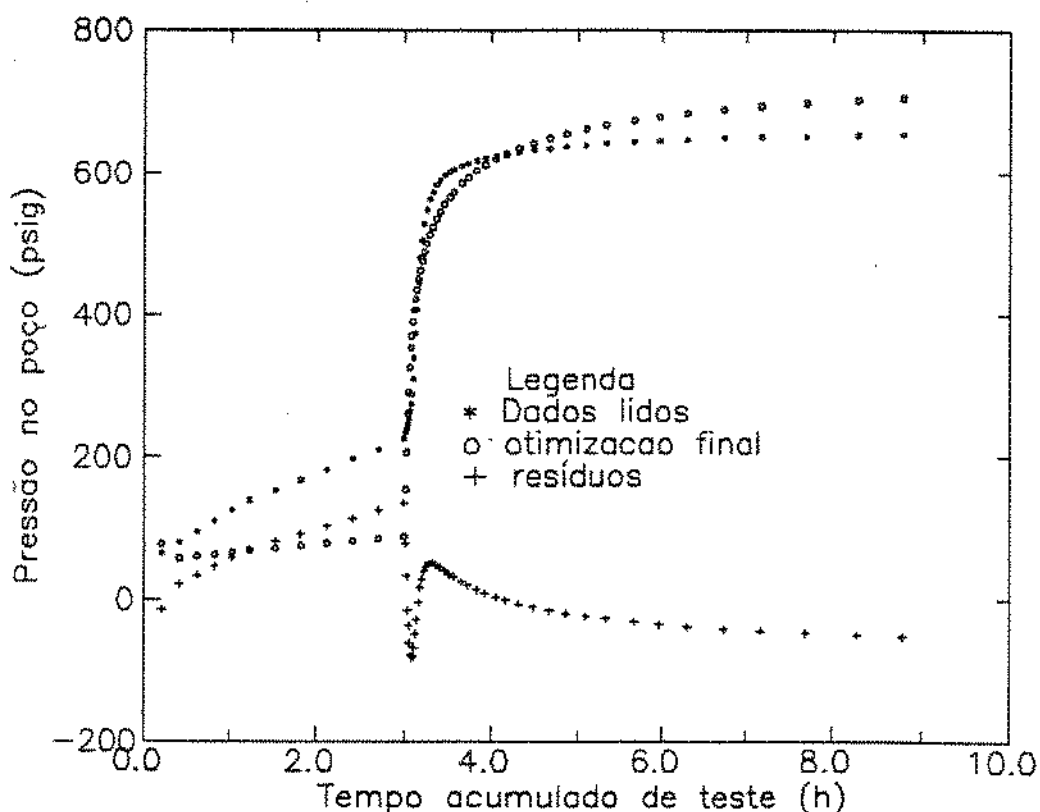


Fig. 7.6 - Otimizacao por dif. finitas para 7-Cp-760-Se

O resultado da otimização não é bom. O algoritmo não converge e os resíduos são altos. Tudo isto devido aos valores de pressões finais da estática que são diferentes dos valores calculados por diferenças finitas, o que causa um deslocamento de toda a curva do DST na tentativa da minimização dos quadrados mínimos.

O gráfico de Corrêa na Figura 7.7 mostra o comportamento anômalo existente no período de estocagem.

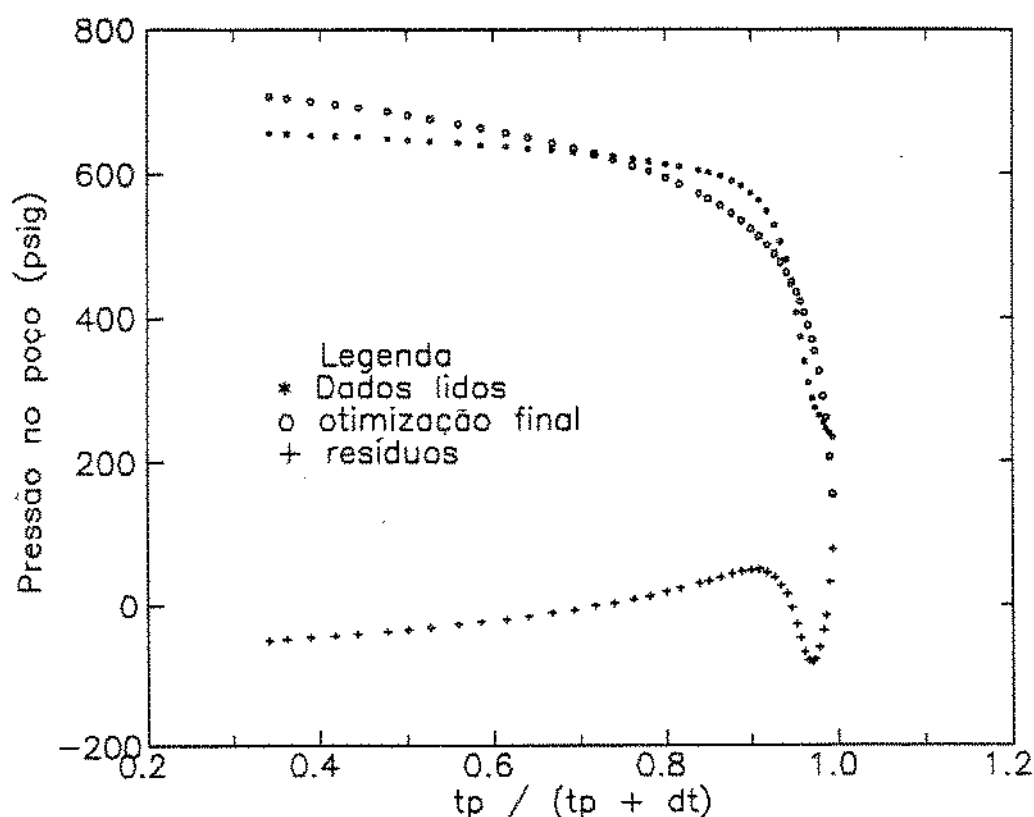


Fig. 7.7 - Gráfico cartesiano da otimiz. do 7-Cp-760-Se

A aplicação de qualquer método de análise para dados reais é sempre mais complicada, porque existem fenômenos tais como fricção, inércia, simplificação da equação da difusividade na linearização (onde se despreza os gradientes de primeira ordem), variações dos coeficientes de estocagem no fluxo e estática (que pelo modelo são constantes).

A primeira idéia que surge é o uso de pesos diferenciados para os pontos, de tal modo se que force o ajuste sempre nos

pontos finais do período em estudo (fluxo ou estática), pois é onde se tem maior confiança no modelo matemático e nos dados medidos. Estes pesos são fatores introduzidos nos cálculos dos resíduos ou

$$SSR(\vec{X}) = \sum \left\{ ([p_w]_{t=t_i} - p_{wpi})^2 / \sigma_i \right\} \quad (7.1)$$

onde

$$\sigma_i = \frac{1}{(p_{ff} - [p_w]_{t=t_i})} \quad \text{para período de fluxo} \quad (7.2)$$

$$\sigma_i = \frac{p_{wpi}}{[p_w]_{t=t_i}} \quad \text{para a análise em todo o DST} \quad (7.3)$$

$[p_w]_{t=t_i}$ e p_{wpi} estão definidos no item (4.1).

Este método também não convergiu e apresenta resultados ruins, embora os pontos finais da estática estejam mais próximos como mostra a Figura 7.8 abaixo.

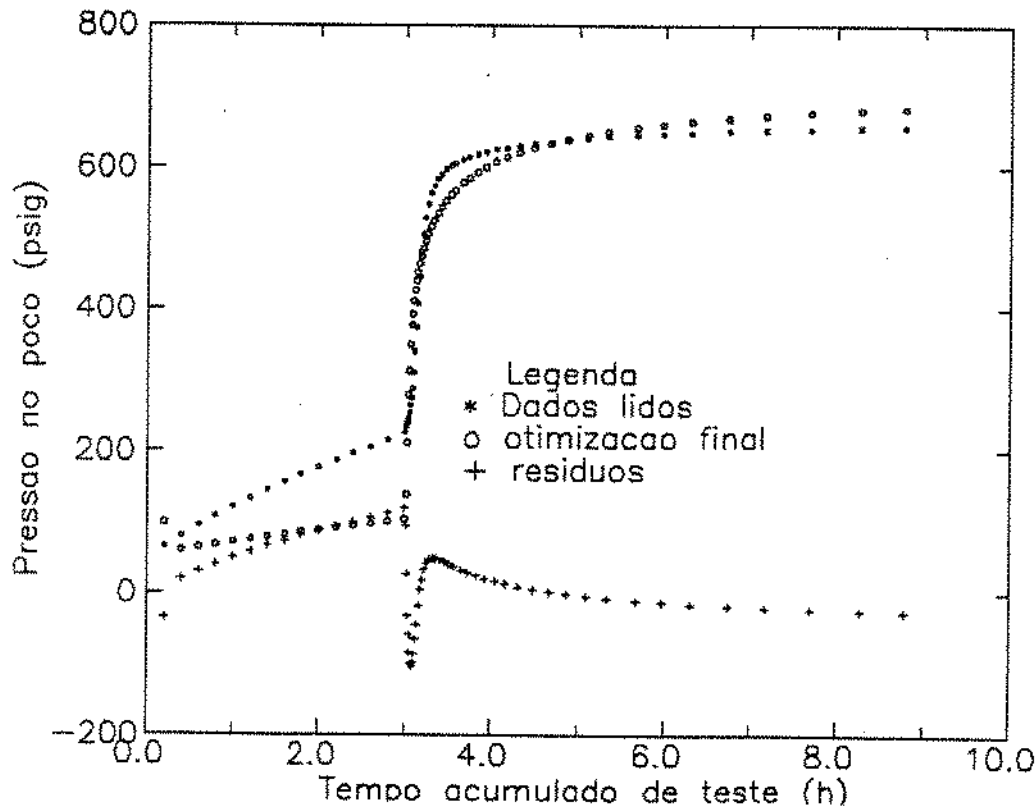


Fig. 7.8 - Otimizacao por dif. finitas para 7-Cp-760-Se

Se retirarmos os 15 pontos iniciais da estática no computo do residuo e aplicarmos o método, usando pesos para os pontos, há convergência e os resultados serão realistas como mostra a Tabela 7.2 e a Figura 7.9 abaixo.

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Final
Permeabilidade [md]	59.90	66.3
Efeito de Pelicula []	-1.	-0.09
Pressão estática [atm]	46.11	46.13

Tabela 7.2 - Interpretação automatizada poço 7-Cp-760-Se, por diferenças finitas para determinar k, S e p_i .

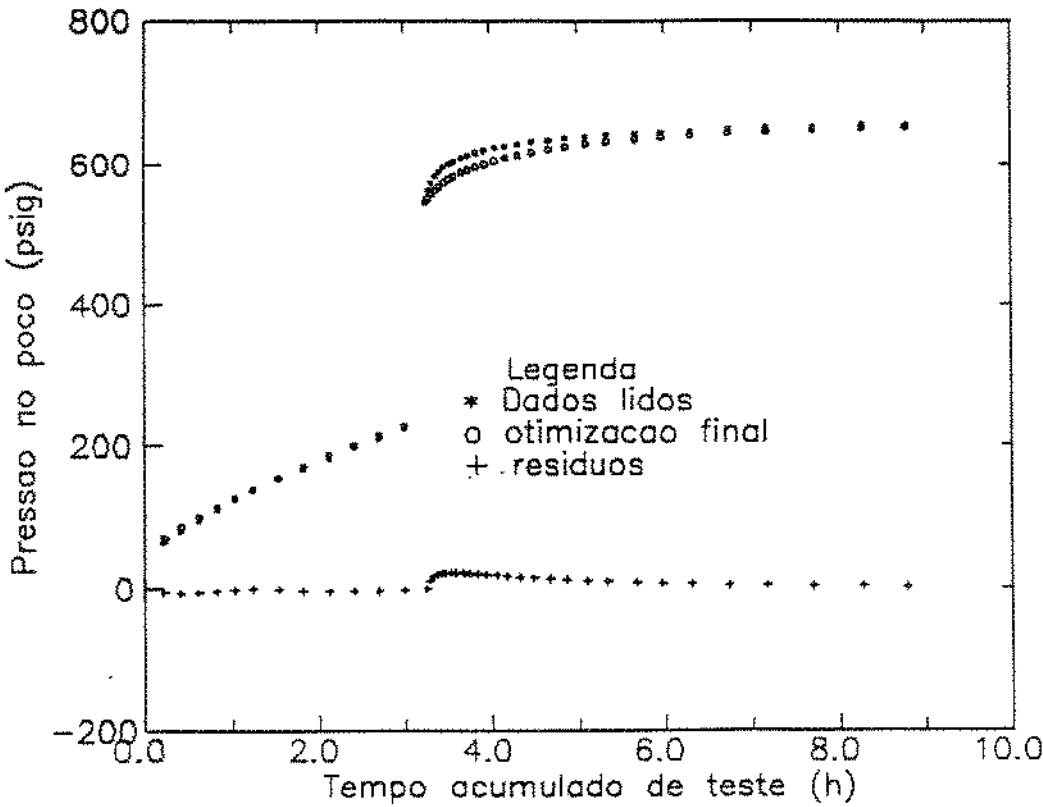


Fig. 7.9 – Otimizacao por dif. finitas para 7-Cp-760-Se

Estes valores ainda podem ser melhorados se retirarmos os 34 pontos iniciais da estática como fizemos na análise por inversão numérica da transformada de Laplace para este poço.

A Figura 7.10 mostra o ajuste obtido.

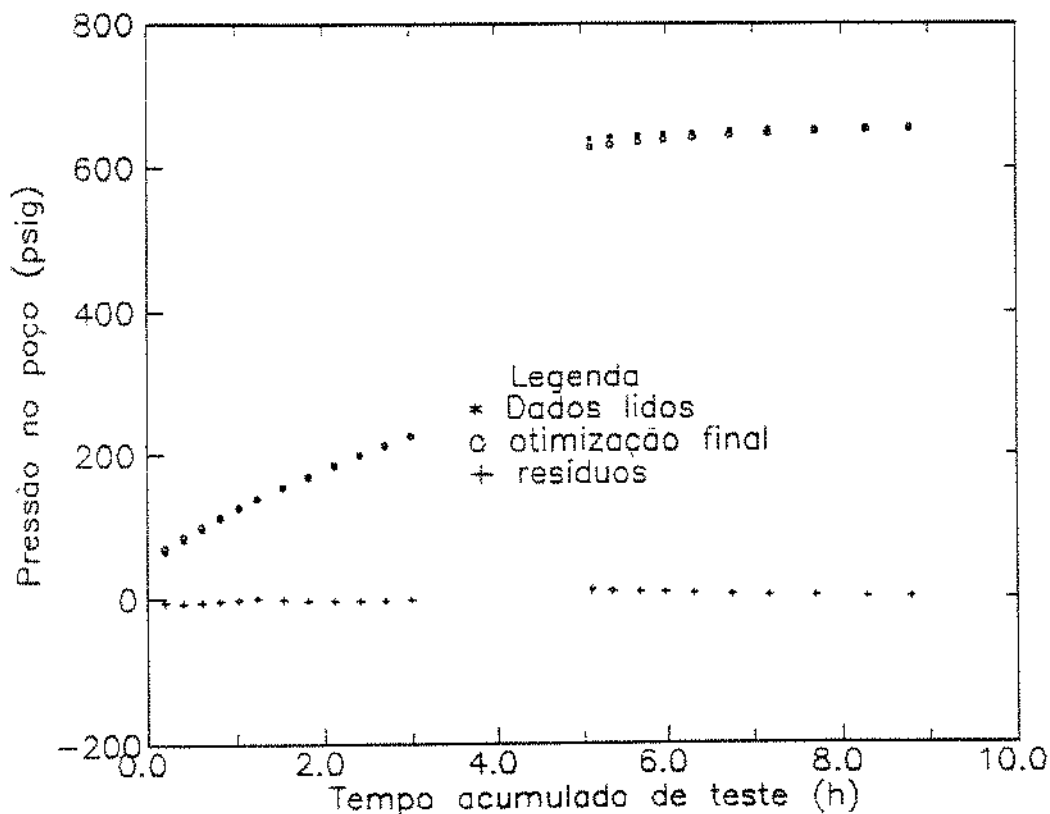


Fig. 7.10 - Otimização por dif. finitas para 7-Cp-760-Se

A Tabela 7.3 apresenta um quadro comparativo da interpretação pelo dois métodos.

Parâmetro	Inversão numé-rica (Stehfest)	Diferenças fini-tas com $p_o = p_{fi}$
Permeabilidade [md]	90.00	66.17
Efeito de Película []	1.19	0.03
Pressão estática [atm]	46.09	46.10

Tabela 7.3 - Interpretação automatizada poço 7-Cp-760-Se.

7.2.1. Outro exemplo estudado por diferença finita

Aplicou-se o método no poço 7-Fu-22-A1.

As Figuras 7.11 e 7.12 mostram o resultado com todos os pontos do DST e sem os 11 pontos iniciais de pressão vs tempo respectivamente.

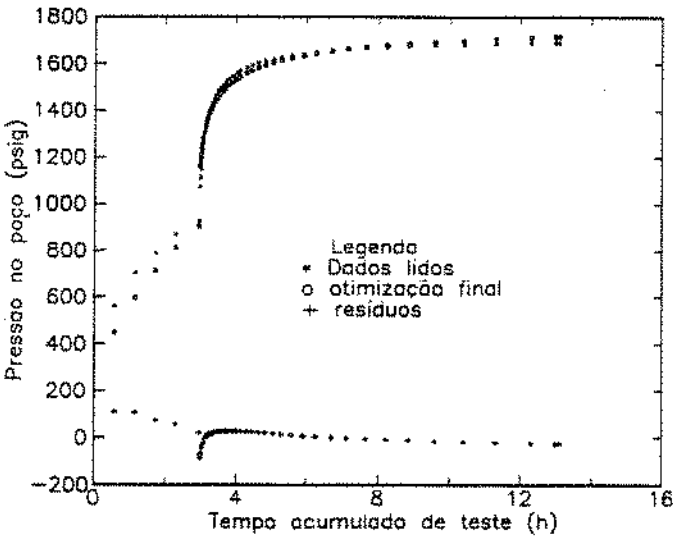


Fig. 7.11 - Otimização por dif. finitas para 7-Fu-22-A1

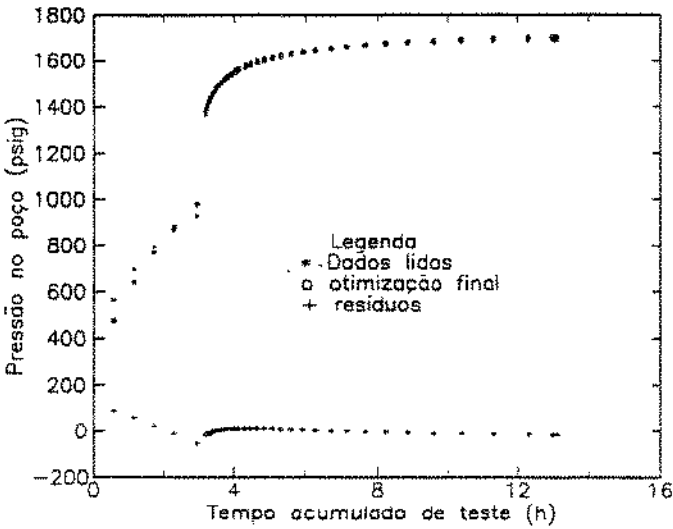


Fig. 7.12 - Otimização por dif. finitas para 7-Fu-22-A1

A Tabela 7.4 abaixo apresenta o resultado comparativo dos métodos:

Parâmetros	Valores finais calculados pelos métodos			
	Manual gráfica		Automatizada por dif. fin.	
	<i>Corrêa</i>	<i>Horner</i>	todos pontos	-11 pontos*
k [md]	8.0	11.3	5.7	7.5
S []	-0.5	-2.0	-2.7	-2.6
p_i [atm]	117.3	116.8	120.2	119.1

* retirando os 11 pontos iniciais da estática.

Tabela 7.4 - Resultados dos métodos gráficos e de otimização por diferenças finitas no DST do poço 7-Fu-22-A1.

7.2.2. Discussão do método

Podemos afirmar que o melhor resultado é o que apresenta menores resíduos principalmente para os pontos finais da estática.

Os exemplos analisados tinham poucos pontos lidos no período de fluxo, o que influencia negativamente a precisão dos resultados quanto aos erros no cálculo das diferenças finitas.

Para este método de cálculo o critério de pesos diferenciados para os pontos lidos, parece não influenciar tanto quanto no método anterior mas mesmo assim ele está incluído no programa.

Para os poços de média e alta produtividade os métodos de diferenças finitas e o método de inversão numérica apresentam resultados bem próximos, embora esta comparação seja difícil porque a pressão de fluxo inicial, que é importante no estudo do DST, é calculada pelo método de inversão numérica e é um valor fixo fornecido pelo método das diferenças finitas.

A Tabela 7.5 abaixo mostra os resultados das duas análises para o poço A (do SPE 16802) que vinha sendo estudado.

Parâmetro	Inversão numé- rica (Stehfest)	Diferenças fini- tas com $p_o = p_{fi}$
Permeabilidade [md]	1130.00	1145.00
Efeito de Película []	-1.31	- 1.74
Pressão estática [atm]	60.78	61.45
Pressão fluxo in. [atm]	9.13	9.69

Tabela 7.5 - Resultados da interpretação automatizada por diferenças finitas e por inversão numérica no poço A.

A Figura 7.13 mostra o ajuste final por diferenças finitas.

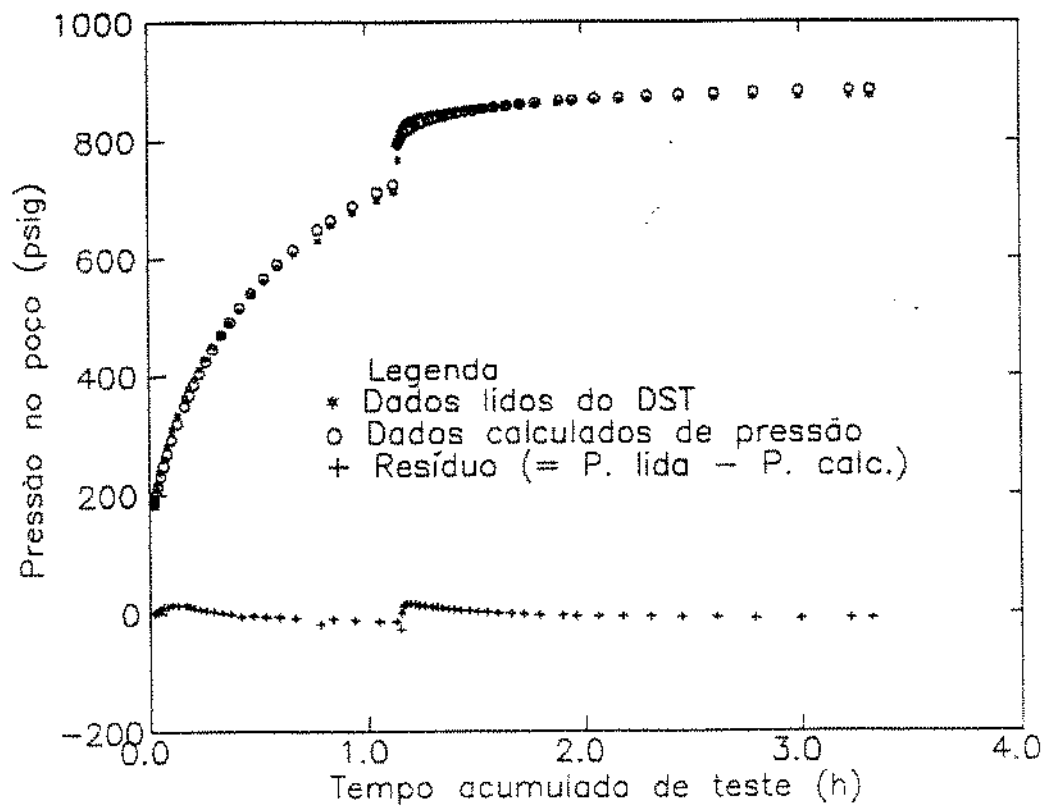


Fig. 7.13 - Otimização por dif. finita no poço A

8.0. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A interpretação automatizada para poços não surgentes é mais um método de análise de teste, que somente deve ser aceito após verificação da qualidade do ajuste, análise estatística e principalmente com informações de outras fontes como testemunhos, perfis e geologia.

Estudou-se aqui a aplicação do método de análise para o caso do reservatório homogêneo, infinito e com fluxo radial para o poço. Este modelo parece ser válido para a maioria dos testes, mas não para todos.

Como nem todos os parâmetros podem ser calculados pelo algoritmo de regressão, porque alguns deles podem ter correlação entre si e outros podem ter pouco efeito na resposta de pressão, os primeiros estudos foram para determinar quais parâmetros podem ser determinados com unicidade e precisão.

A premissa básica para a análise de ajuste automatizado é que o modelo matemático escolhido descreva o comportamento do poço/reservatório. Se isto não ocorrer o processo de regressão por quadrados mínimos simplesmente forçará um ajuste que melhor explique os dados de campo. Também é importante a estimativa inicial dos parâmetros a serem calculados, e principalmente a qualidade dos dados do teste.

8.1 - Conclusões

1.- O método de análise automatizado para poços não surgentes, num ciclo completo de fluxo e estática, permite a determinação dos 4 parâmetros governantes do teste que são: permeabilidade (k), efeito de película (S), pressão estática do reservatório (p_i) e pressão de fluxo inicial (p_o).

2.- A inclusão nesta análise das equações com alternativas de determinação do skin positivo ou negativo tornou a interpretação mais abrangente e realista.

3.- A análise simultânea do fluxo e da estática constitui um avanço em termos de técnicas de análise automatizada de teste. As informações adicionais do período de estática permitiram a determinação de maior quantidade de parâmetros e maior confiabilidade na interpretação.

4.- O uso de pesos diferenciados para cada ponto de pressão vs tempo do fluxo e estática força o ajuste da curva (match) nos trechos mais confiáveis do teste. Estes trechos são aqueles com maior densidade de medições e com pressão de fluxo mais próxima da capacidade ideal do registrador.

5.- Embora este método de análise não exija o cálculo das vazões de teste, é imprescindível a determinação correta da densidade média do fluido produzido para uma análise realista, devido sua influencia no cálculo do coeficiente de estocagem do fluxo.

6.- A sensibilidade dos parâmetros calculados com relação ao coeficiente de estocagem da estática (C_g) é muito baixa, e portanto o seu cálculo (que depende do volume de estocagem do teste e da compressibilidade do fluido) não precisa ser rigoroso.

7.- A análise automatizada apenas no período de fluxo do DST (ou slug test) permite a determinação de 3 parâmetros que podem ser: k , S e p_o ou k , S e p_i . No caso de k , S e p_i é necessário que haja uma tendência de estabilização de pressão (amortecimento).

8.- A versão usada do algoritmo de regressão de quadrados mínimos não lineares de *Levenberg-Marquardt* com cálculo dos gradientes de pressão pela expressão analítica obtida no espaço de *Laplace* é mais rápida que a versão que calcula estes gradientes através de diferenças finitas.

9.- O método foi usado para análise de testes em poços não surgentes de alta, média e baixa produtividade e mostrou-se mais realista para análise em teste de alta e média produtividade.

8.2 - Recomendações

1.- Investigar a possibilidade de uso dos algoritmos de regressão não linear com cálculo das derivadas de segunda ordem (por exemplo o algoritmo de *Newton-Greenstad*), com o objetivo de determinação de 6 parâmetros do DST que são: k , S , p_i , p_o , C_f e C_g .

2. - Implementar algoritmos que calculem a função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem zero e um para argumentos complexos. Eles serão usados em conjunto com o algoritmo de *Crump* para inversão numérica da transformada de Laplace para resolver a integral do DST conforme método apresentado no apêndice E.6.

3.- Implementar este algoritmo apresentado para problemas de DST com vários ciclos, e também para outros tipos de modelo de fluxo e reservatórios, tais como:

i) Fluxo linear, esférico e elíptico

ii) Sistema heterogêneos: dupla porosidade, dupla permeabilidade e reservatório composto.

iii) Reservatórios limitados com pressão constante nos limites ou com falha plana selante.

4. - Incluir neste estudo os efeitos inerciais e de turbulência existentes em poços não surgentes de altíssima produtividade.

5. - Incluir neste estudo os efeitos de inércias, de atrito, gradientes de pressão de primeira ordem em relação ao espaço e variações do coeficiente de estocagem do fluxo (C_f) existentes em poços não surgentes de baixa produtividade.

9. MONENCLATURA

SÍMBOLOS ROMANOS:

A	=	área da seção transversal do tubo $[cm]^2$
C	=	constante de estocagem, $[atm][cm]^{-3}$
c_t	=	compressibilidade total, $[atm]^{-1}$
c_v	=	compressibilidade do fluido do poço, $[atm]^{-1}$
d	=	operador diferencial
$\vec{D}$	=	vetor solução do sistema de equações lineares
$DSC(\vec{x})$	=	Derivações de segunda ordem da função objetivo
E	=	matriz dos coeficientes do sistema normal
E^{-1}	=	matriz inversa dos coeficientes do sistema normal
F	=	função resíduo (= diferença entre os valores computados e medidos em cada iteração da regressão)
h	=	espessura da formação, $[cm]$
g	=	constante de aceleração da gravidade $[cm][s]^{-2}$
I	=	matriz identidade
J	=	jacobiano
k	=	permeabilidade da formação, $[cm]^2$
K_0	=	função Bessel modificada de 2a. espécie ordem 0.
K_1	=	função Bessel modificada de 2a. espécie ordem 1.
∇	=	operador de Laplace
l	=	altura de fluido no tubo $[cm]$
m	=	número de parâmetros a serem determinados
m_s	=	massa específica do fluido
n	=	número de pontos de tempo vs. pressão do teste
ndf	=	número de pontos lidos no período de fluxo
nde	=	número de pontos lidos no período de estática
p	=	pressão, $[atm]$
p_D	=	solução do fluxo para S, C e vazão constantes
p_i	=	pressão inicial do reservatório, $[atm]$
p_o	=	pressão de fluxo inicial, $[atm]$
p_{ff}	=	pressão de fluxo final, $[atm]$
p_{ve}	=	pressão estática final, $[atm]$
p_v	=	pressão no poço, $[atm]$

$\bar{p}_{wf}$	=	pressão fluxo no poço (espaço Laplace), [atm]
p_{wp}	=	pressão lida no teste, [atm]
p_{ws}	=	pressão estática no poço (espaço Laplace), [atm]
$q_w(t)$	=	vazão instantânea da formação, [cm] ³ [s] ⁻¹
$\dot{q}(t)$	=	vazão específica, [cm] ³ [s] ⁻¹
r	=	distância radial do poço, [cm]
r_e	=	raio externo do reservatório, [cm]
r_p	=	raio interno da tubulação de produção, [cm]
r_w	=	raio do poço, [cm]
r_{wa}	=	raio efetivo do poço ($r_{wa} = r_w \cdot D_{exp}(-S)$) [cm]
s	=	variável ou argumento no espaço de Laplace
SSR	=	função objetivo ou soma dos quadrados dos resíduos em cada passo ([atm]) ²
S	=	fator de película ou fator skin ou skin
Sk	=	função degrau unitário
t	=	tempo, [s]
τ	=	transposto
t_p	=	tempo de produção ou de fluxo, [s]
$t_{\alpha, n-m}$	=	distribuição de student com nível de risco α e n-m
$\bar{z}$	=	graus de liberdade
V_v	=	volume da camera de estocagem do fundo, [cm] ³
$\vec{x}$	=	vetor composto dos parametros da formação/reservatório.
x^*	=	vetor solução da minimização da função objetivo

SÍMBOLOS GREGOS:

α	=	nível de risco para o intervalo de confiança com probabilidade (1- α)
β_r^2	=	desvio padrão médio da regressão
$\overline{\Delta p}$	=	transformada de laplace de $\Delta p(r, t)$
∂	=	operador diferencial parcial
ϕ	=	porosidade, fração do volume total
γ_v	=	peso específico do fluido do poço, [gfl[cm] ⁻³
η	=	constante de difusividade, [cm] ² [s] ⁻¹
λ	=	parametro do método de Gauss-Marquardt
μ	=	viscosidade do fluido do reservatório, [cpl]

ρ = densidade do fluido produzido no teste, $[g/cm]^3$
 α_i = fator de peso para cálculo do resíduo $i=1, \dots, n$
 θ = fator de relaxação usado por *Gauss-Marquardt*

subscrito:

D = adimensional
 d = adimensional
 s = estática
 f = fluxo
 i = número do ponto
 j = número do parâmetro
 k = número da iteração
 o = inicial
 w = poço
 wf = fluxo no poço
 we = estática final no poço

Superescrito:

$'$ = derivada primeira
 $''$ = derivada segunda
 t = transpôsto

Unidades físicas:

$[L]$ = comprimento
 $[M]$ = massa
 $[T]$ = tempo

Sistema DARCY de unidade

$[L]$ = centímetro
 $[M]$ = grama
 $[T]$ = segundos

tempo (t_D)	$\frac{\alpha k t}{\phi \mu c_l r_w^2}$
raio (r_D)	$\frac{r}{r_w}$
queda de pressão (p_D)	$\frac{\beta k h}{q B \mu} \cdot (p_i - p)$
coeficiente de estocagem do poço (C_D)	$\frac{\gamma C}{2 \pi \phi c_l h r_w^2}$

SISTEMA	α	β	γ
DARCY	1.	2π	1.
AMERICANO	0.0002637	1/141.2	5.615
PETROBRÁS	0.0003484	1/19.03	1.

Tabela 9.1 - Conversão de grupos adimensionais

Quantidade	Unidade Darcy	Multiplicar por	Unidade SI
Área	cm ²	1.0E-4	m ²
Comprimento	cm	1.0E-2	m
Compressibilidade	atm ⁻¹	9.867E-6	Pa ⁻¹
Massa específica	g/cm ³	1.0E+3	kg/m ³
Permeabilidade	Darcy	9.869E-7	m ²
Pressão	atm	1.0132E-1	Mpa
Viscosidade	cp	1.0E-3	Pa/s

Tabela 9.2 - Constantes de transformação de unidades

10. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

1. Abramovitz, M. and Stegun, I. A. editores : Handbook of Mathematical functions, Dover Publications Inc., New York (1970).
2. Barua, J. and Horne, R.N. : Improved Estimation Algorithm for Automated Type Curve Analysis of Well Test Data - SPE 14255 (1985).
3. Barua, J. and Horne, R. N. : Computerized Analysis for Thermal Recovery Well Test Data - SPE 12745 (1984).
4. Barua, J. and Horne, R. N. : Using Simultaneous Downhole Flow Rate and Pressure Measurement to Improve Analysis of Well Test Data - SPE 12985 (1984).
5. Chang, J. and Ershaghi, I.: An Improved Microcomputer Approach to Well Test Interpretation - SPE 15928 (1986).
6. Corrêa, A. C.: Análise de Teste de Pressão em Poços Produzidos com Pressão Constante - Trabalho Apresentado no Segundo Congresso Brasileiro de Petróleo, Rio De Janeiro (RJ) Brasil, Outubro 3 - 7, 1982.
7. Corrêa, A.C. and Ramey, H. J. Jr. : Combined Effects of Shut-In and Production : Solution with a New Inner Boundary Condition- SPE 15579 (1986).
8. Corrêa, A.C. : Application of the Unit Step Function to Transient Flow Problems with Time-Dependent Boundary Conditions, Dissertação de Ph.D., Stanford University, Stanford, CA, Março, 1988.

9. Corrêa, A. C. and Ramey, H. J. Jr. : A Method for Pressure Buildup Analysis of Drill Stem Test - SPE 16802 (1987).
10. Dennis, J.E. Jr. and Schnabel, R.B.: Numerical Methods for unconstrained Optimization and Nonlinear Equations - Ed. Academic Press, London - Chapter 10 (1985).
11. Earlougher, Robert C. Jr.: Advances in Well Test Analysis, Monograph Series, Society of Petroleum Engineers of Aime, Dallas Chapter 8 (1977).
12. Hanson, J.M.: Nonlinear Inversion of Pressure Transient Data- SPE 12848 (1984).
13. Hefeman, P.S. and Abbaszadh, M.: A Simulator for Drillstem Test Interpretation - SPE 16380 (1987).
14. Marquardt, D.W.: An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameter - J. Soc. Ind. Appl. Math. vol. 11, No. 2, Vol. 11, No. 2, 431-41 (June 1963).
15. Press, W.H., Fannery, B.P., Teukolsky S.A. and Vetterling W.T.: Numerical Recipes - Cambridge University Press, 1986.
16. Ramey, Henry J., Jr. and Agarwal, R.: Annulus Unloading Rates as influenced by Wellbore Storage and Skin Effects - Soc. Pet. Eng. J. 453-462; Trans., Aime, 253 (July-Sept. 1975).
17. Ramey, Henry J. Jr., and Agarwal, R. and Martin, I.: Analysis of 'Slug Test' or Dst Flow Period Data , J. Cdn. Pet. Tech. (July - Sept. 1985) 37 -42.
18. Rosa, A. J. and Horne, R.N.: Automated Type Curve Matching in Well Test Analysis Using Laplace Space

Determination of parameter Gradients , paper SPE 12131 presented at the 1983 SPE Annual technical Conference and Exhibition, San Francisco, Oct. 5-8.

19. Sageev, A.: Slug Test Analysis - Water Resources Research, vol. 22, N. 8 Pages 1323-1333, (August 1986).

20. Santos, S. A. : Algoritmo para aproximação de Função Tabelada Segundo Quadrados Mínimos Usando B-Splines, Comunicação pessoal (Dez-1987).

21. Scales, L.E.: Introduction to Non-Linear Optimization - Ed. Springer-Verlag New York Inc. Chapter 4 - (1985).

22. Silva, M.L.F. : Soluções para Testes de Formação com Geometrias Diversas ", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas-SP, Unicamp (Março, 1989)

23. Stehfest, H.: Numerical Inversion of Laplace Transform - communications to the ACM, Volume 13, N. 1, Algorithm 368(Jan. 1970).

24. Wylie, C.R.: Advanced Engineering Mathematics, Ed. Macgraw Hill Book Company, New York (1975).

25. Van Everdingen, A.F. and Hurst, W.: The Application of Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs, Trans. Aime Vol. 186, 305-324, (1949).

APENDICE A - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO SLUG TEST EM FORMA
DIMENSIONAL (Sistema Internacional)

Considerando o fluxo radial de um fluido com viscosidade pequena e com baixa compressibilidade escoando num meio poroso homogêneo isotrópico de espessura constante teremos as seguintes equações diferencial, inicial e de contorno:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (A.1)$$

$$p_D(r_D, 0) = 0 \quad (A.2)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_D(r_D, t_D) = 0 \quad (A.3)$$

$$p_{vD}(0^+) = 1 \quad (A.4)$$

$$p_{vD}(t_D) = \left[p_D(r_D, t_D) - S r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (A.5)$$

$$C_D \frac{\partial p_{vD}}{\partial t_D} = \left[r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (A.6)$$

Usando os grupos dimensionais da tabela 1 e os conceitos de:

queda de pressão no reservatório: $\Delta p(r, t) = p_i - p(r, t)$

queda de pressão no poço: $\Delta p_v(t) = p_i - p_v(t)$

o problema se torna então:

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta p}{\partial r} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial \Delta p}{\partial t} \quad (A.7)$$

$$\Delta p(r, 0) = 0 \quad (A.8)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Delta p(r, t) = 0 \quad (A.9)$$

$$\Delta p_v(0^+) = 1 \quad (A.10)$$

$$\Delta p_v(t) = \left[\Delta p(r_v, t) - S r \frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right]_{r=r_v} \quad (A.11)$$

$$\left[r_v \frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right]_{r=r_v} = \frac{-C_f \mu}{2 \pi k h} \frac{\partial p_{vf}}{\partial t} \quad (A.12)$$

Aplicando a transformada de Laplace nas equações (A.7) a (A.11), e resolvendo a equação ordinária tem-se:

$$\overline{\Delta p}(r_v, s) = \frac{K_0(r_v \sqrt{s/\eta})}{K_0(r_v \sqrt{s/\eta}) + S(r_v \sqrt{s/\eta}) K_1(r_v \sqrt{s/\eta})} \overline{\Delta p}_v(s) \quad (A.13)$$

e também

$$\left[r \frac{\partial \overline{\Delta p}(r, s)}{\partial r} \right]_{r=r_v} = \frac{-r_v \sqrt{s/\eta} K_1(r_v \sqrt{s/\eta})}{K_0(r_v \sqrt{s/\eta}) + S(r_v \sqrt{s/\eta}) K_1(r_v \sqrt{s/\eta})} \overline{\Delta p}_v(s) \quad (A.14)$$

A transformada de Laplace da condição de contorno interna, equação (A.12), é:

$$\left[r \frac{\partial (\overline{\Delta p})}{\partial r} \right]_{r=r_v} = \frac{C_f \mu}{2 \pi k h} (s \overline{p}_{vf} - p_o) \quad (A.15)$$

Substituindo (A.15) na equação (A.14) e resolvendo para $\overline{p}_{vf}$, teremos:

$$\overline{p_{wf}} = \frac{p_o \left\{ S + \frac{K_o (r_v \sqrt{s/\eta})}{r_v \sqrt{s/\eta} K_1 (r_v \sqrt{s/\eta})} \right\} + \frac{2 \pi k h p_i}{C_f \mu s}}{s \left\{ S + \frac{K_o (r_v \sqrt{s/\eta})}{r_v \sqrt{s/\eta} K_1 (r_v \sqrt{s/\eta})} \right\} + \frac{2 \pi k h}{C_f \mu}} \quad (A.16)$$

APENDICE B - DERIVAÇÃO DAS EQUAÇÕES DO "SLUG TEST" COM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DO RESERVATÓRIO

B.1 - Caso do Poço com efeito de película positivo (Skin > 0)

A equação para $\overline{p_{wf}}(\vec{x}, s)$ foi deduzida no apêndice A.

$$\text{Definindo } C_1 = \sqrt{\phi \mu c_t r_v^2} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{2 \pi h}{\mu}$$

Então a equação (A.16) se torna :

$$\overline{p_{wf}} = \frac{p_o \left\{ S + \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\} + \frac{C_2 k p_i}{C_f s}}{s \left\{ S + \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\} + \frac{C_2 k}{C_f}} \quad (B.1.1)$$

definindo as seguintes funções auxiliares, teremos:

$$\text{Aux1} = S + \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \quad (B.1.2)$$

$$\text{Aux2} = \frac{C_2 k p_i}{C_f s} \quad (\text{B.1.3})$$

$$\text{Aux3} = p_o \text{Aux1} + \text{Aux2} \quad (\text{B.1.4})$$

$$\text{Aux4} = C_2 \frac{k}{C_f} \quad (\text{B.1.5})$$

$$\text{Aux8} = s \text{Aux1} + \text{Aux4} \quad (\text{B.1.6})$$

A expressão da pressão no poço se torna :

$$\overline{p_{wf}} = \frac{\text{Aux3}}{\text{Aux8}} \quad (\text{B.1.7})$$

A derivada da pressão com relação à permeabilidade será:

$$\frac{\partial \overline{p_{wf}}}{\partial k} = \frac{(C_2/C_f)(p_i - p_o) \{ \text{Aux1}/k - \text{Aux7} \}}{(\text{Aux8})^2} \quad (\text{B.1.8})$$

$$\text{Aux5} = \left\{ \frac{K_o (C_1 \sqrt{S/k})}{K_1 (C_1 \sqrt{S/k})} \right\} \quad (\text{B.1.9})$$

$$\text{Aux6} = 1 - \text{Aux5}^2 \quad (\text{B.1.10})$$

$$\text{Aux7} = \frac{\text{Aux6}}{2k} \quad (\text{B.1.11})$$

As outras derivadas são:

i) Em relação ao "skin":

$$\frac{\partial \overline{p_{wf}}}{\partial S} = \frac{\text{Aux4} (p_o - p_i)}{(\text{Aux8})^2} \quad (\text{B.1.12})$$

ii) Em relação a p_o :

$$\frac{\partial \overline{p_{wf}}}{\partial p_o} = \frac{\text{Aux1}}{\text{Aux8}} \quad (\text{B.1.13})$$

iii) Em relação a C_f :

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial C_f} = \frac{(Aux1/C_f)(p_o - Aux4 - s Aux2)}{(Aux8)^2} \quad (B.1.14)$$

iv) Em relação a pressão do reservatório p_i :

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial p_i} = \frac{Aux4}{s Aux8} \quad (B.1.15)$$

Foram usadas as seguintes relações para a derivação da função de Bessel modificadas :

$$a) \quad \frac{d}{dx} \{ x^p K_p(\alpha x) \} = -\alpha x^p K_{(p-1)}(\alpha x) \quad (B.1.16)$$

$$b) \quad 2 \frac{d}{dx} K_p(\alpha x) = -\alpha \{ K_{n-1}(\alpha) + K_p(\alpha x) \} \quad (B.1.15)$$

lembrando que $K_{-p}(\alpha x) = K_p(\alpha x)$

c) regra da cadeia

$$\frac{\partial \{ K_0(C_1 \sqrt{s/k}) \}}{\partial k} = \frac{\partial \{ K_0(\alpha x) \}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial k} \quad (B.1.16)$$

$$\text{sendo } \alpha = C_1 \sqrt{s}$$

$$x = 1/\sqrt{k}$$

B.2 - Caso do Poço com efeito de película negativo (Skin < 0)

A equação para $p_{wf}(\vec{x}, s)$ foi deduzida no apêndice A.

Neste caso usa-se o conceito de raio efetivo do poço (r_{wa})

$$r_{wa} = r_w \exp(-S)$$

$$\text{Definindo } C_1 = \sqrt{\phi \mu c_l r_{wa}^2} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{2 \pi h}{\mu}$$

então a equação (A.16) se torna :

$$\bar{p}_{wf} = \frac{p_o \left\{ \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\} + \frac{C_2 k p_i}{C_f s}}{s \left\{ \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\} + \frac{C_2 k}{C_f}} \quad (B.2.1)$$

sendo:

$$Aux1 = \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \quad (B.2.2)$$

$$Aux2 = \frac{C_2 k p_i}{C_f s} \quad (B.2.3)$$

$$Aux3 = p_o Aux1 + Aux2 \quad (B.2.4)$$

$$Aux4 = C_2 \frac{k}{C_f} \quad (B.2.5)$$

$$Aux8 = s Aux1 + Aux4 \quad (B.2.6)$$

A expressão da pressão no poço se torna :

$$\bar{p}_{wf}(\vec{x}, s) = \frac{Aux3}{Aux8} \quad (B.2.7)$$

A derivada da pressão com relação a permeabilidade é:

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial k} = \frac{(C_z/C_f) (p_i - p_o) \{Aux1 - k Aux7\}}{(Aux8)^2} \quad (B.2.8)$$

$$Aux7 = \frac{Aux6}{2 k} \quad (B.2.9)$$

$$\text{Aux6} = 1 - \text{Aux5}^2 \quad (\text{B.2.10})$$

$$\text{Aux5} = \left\{ \frac{K_0(C_1 \sqrt{s/k})}{K_1(C_1 \sqrt{s/k})} \right\}^2 \quad (\text{B.2.11})$$

As outras derivadas são:

i) Em relação ao "skin":

É a expressão mais complicada, pois a função de Bessel depende também deste parâmetro; que pode ser explicitado

$$C_1 \sqrt{s/k} = \sqrt{\phi \mu c_t r_w^2} e^{-S}$$

logo,

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial S} = \frac{(\text{Aux1}/C_f)(p_o \text{Aux4} - s \text{Aux2})}{(\text{Aux8})^2} \quad (\text{B.2.12})$$

ii) Em relação a p_o :

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial p_o} = \frac{\text{Aux1}}{\text{Aux8}} \quad (\text{B.2.11})$$

iii) Em relação a C_f :

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial C_f} = \frac{(\text{Aux1}/C_f)(p_o \text{Aux4} - s \text{Aux2})}{(\text{Aux8})^2} \quad (\text{B.2.12})$$

iv) Em relação a pressão do reservatório p_i :

$$\frac{\partial \bar{p}_{wf}}{\partial p_i} = \frac{\text{Aux4}}{s \text{Aux8}} \quad (\text{B.2.13})$$

Usou-se a relação para a derivação da função de Bessel:

$$\omega \frac{d}{dx} \{ K_1(\alpha x) \} = -\alpha K_0(\alpha x) - \frac{1}{x} K_1(\alpha x) \quad (\text{B.2.14})$$

APÊNDICE C - SOLUÇÃO DO DST EM FORMA DIMENSIONAL
(Sistema Internacional)

Usando as mesmas hipóteses estabelecidas no Apêndice A para a solução do "slug test" o problema do DST será dado por:

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} = \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \quad (C.1)$$

$$p_D(r_D, 0) = 0 \quad (C.2)$$

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} p_D(r_D, t_D) = 0 \quad (C.3)$$

$$p_{wD}(0^+) = 1 \quad (C.4)$$

$$p_{wD}(t_D) = p_D(r_D, t_D) - S \left[r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (C.5)$$

$$\left\{ (1 - S_k)C_{fD} + S_k C_{sD} \right\} \frac{\partial p_{wD}}{\partial t_D} = \left[r_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right]_{r_D=1} \quad (C.6)$$

Usando os grupos adimensionais da tabela 1 e os conceitos:

i) queda de pressão no reservatório $\Delta p(r, t) = p_i - p(r, t)$

ii) queda de pressão no poço : $\Delta p_v(t) = p_i - p_{va}(t)$

o problema se torna então:

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta p}{\partial r} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial \Delta p}{\partial t} \quad (C.7)$$

$$\Delta p(r, 0) = 0 \quad (C.8)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Delta p(r, t) = 0 \quad (C.9)$$

$$\Delta p_v(0^+) = 1 \quad (C.10)$$

$$\Delta p_v(t) = \Delta p(r_v, t) - S \left[r \frac{\partial p}{\partial r} \right]_{r=r_v} \quad (C.11)$$

$$\left\{ (1 - S_k) C_a + S_k C_b \right\} \left[\frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right]_{r=r_v} = \left[r \frac{\partial \Delta p}{\partial r} \right]_{r=r_v} \quad (C.12)$$

$$\text{Onde} \quad C_a = \frac{C_f \mu}{2 \pi h k} \quad (C.13)$$

$$C_b = \frac{C_s \mu}{2 \pi h k} \quad (C.14)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace às equações (C.7) a (C.11), e resolvendo-se a equação ordinária resultante,

$$\overline{\Delta p}(r_v, s) = \left[\frac{K_0(r_v \sqrt{s/\eta})}{K_0(r_v \sqrt{s/\eta}) + S(r_v \sqrt{s/\eta}) K_1(r_v \sqrt{s/\eta})} \right] \overline{\Delta p}_v(s) \quad (C.15)$$

e também

$$\left[r \frac{\partial \overline{\Delta p}(r, s)}{\partial r} \right]_{r=r_w} = \frac{-r_v \sqrt{s/\eta} K_1(r_v \sqrt{s/\eta})}{K_0(r_v \sqrt{s/\eta}) + S(r_v \sqrt{s/\eta}) K_1(r_v \sqrt{s/\eta})} \overline{\Delta p}_v(s) \quad (C.16)$$

A transformada de Laplace da condição de contorno interna, eq. (C.12), é:

$$\begin{aligned} \left[r \frac{\partial (\overline{\Delta p})}{\partial r} \right]_{r=r_v} = & -(C_a - C_b) \left\{ s \int_0^t e^{-s \cdot t} p_{vf}(t) dt + p_{ff} e^{-s t_p} \right\} + \\ & + C_a p_o - s C_b p_{vs} \end{aligned} \quad (C.17)$$

Substituindo a equação (C.17) em (C.16) e resolvendo-se para $\overline{p}_{vs}(s)$, resulta:

$$\bar{p}_{va} = \frac{\frac{p_i}{s} \left\{ \frac{1}{s + \frac{K_o(r_v \sqrt{s/\eta})}{r_v \sqrt{s/\eta} K_1(r_v \sqrt{s/\eta})}} \right\} + C_c \left\{ \int_0^{t_p} e^{-st} p_{vf}(t) dt + C_d \right\} + C_o}{\left\{ \frac{1}{s + \frac{K_o(r_v \sqrt{s/\eta})}{r_v \sqrt{s/\eta} K_1(r_v \sqrt{s/\eta})}} \right\} + \frac{C_s}{(2\pi h/\mu) k}} \quad (C.18)$$

onde

$$C_c = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} - \frac{C_s}{(2\pi h/\mu) k} \quad (C.19)$$

$$C_d = p_{ff} e^{-st_p} \quad (C.20)$$

$$C_o = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} P_o \quad (C.21)$$

APENDICE D : DERIVAÇÃO DA EQUAÇÃO DO DST COM RELAÇÃO AOS PARAMETROS DO RESERVATÓRIO EM FORMA DIMENSIONAL

D.1 - Caso do poço com efeito de película positivo (Skin > 0)

A equação geral do DST para o caso de um ciclo foi deduzida no apêndice C.

$$\text{Definindo-se } C_1 = \sqrt{\phi \mu c_l r_v^2} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{2 \pi h}{\mu},$$

então a equação (C.18) se torna :

$$\bar{p}_{vs} = \frac{\frac{p_t}{s} \left\{ \frac{1}{s + \frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1(C_1 \sqrt{s/k})}} \right\} + C_c \left\{ \int_0^{t_p} e^{-st} p_{vf}(t) dt + C_d \right\} + C_o}{\left\{ \frac{1}{s + \frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1(C_1 \sqrt{s/k})}} \right\} + \frac{C_s}{(2\pi h/\mu) k}} \quad (D.1.1)$$

sendo

$$C_c = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} - \frac{C_a}{(2\pi h/\mu) k} \quad (D.1.2)$$

$$C_d = p_{ff} e^{-s t_p} \quad (D.1.3)$$

$$C_o = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu) k} p_o \quad (D.1.4)$$

definindo-se:

$$Aux10 = \frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{(C_1 \sqrt{s/k}) K_1(C_1 \sqrt{s/k})}, \quad (D.1.5)$$

$$Aux11 = \left[s + \frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1(C_1 \sqrt{s/k})} \right], \quad (D.1.6)$$

$$Aux12 = C_b = \frac{C_s}{C_2 k}, \quad (D.1.7)$$

$$Aux13 = C_a = \frac{C_f}{C_2 k}, \quad (D.1.8)$$

$$\text{Aux14} = C_a - C_b = \text{Aux13} - \text{Aux12}, \quad (\text{D.1.9})$$

$$\text{Aux15} = p_{ff} e^{-s t_p}, \quad (\text{D.1.10})$$

$$\text{Aux16} = \frac{p_i}{s} \text{Aux11} - \text{Aux14} \left\{ s \int_0^{t_p} e^{-st} p_{vf}(t) dt + \text{Aux15} \right\} + p_o \text{Aux13}, \quad (\text{D.1.11})$$

$$\text{Aux17} = \text{Aux11} + s \cdot \text{Aux12}, \quad (\text{D.1.12})$$

$$\text{então: } \bar{p}_{vs}(\vec{x}, s) = \frac{\text{Aux16}}{\text{Aux17}} \quad (\text{D.1.13})$$

A derivada em relação a permeabilidade é :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial k} = \frac{\text{Aux17} (\text{Aux16})' - \text{Aux16} (\text{Aux17})'}{(\text{Aux17})^2}, \quad (\text{D.1.14})$$

sendo:

$$\begin{aligned} (\text{Aux16})' &= \frac{\partial \text{Aux16}}{\partial k} = \frac{-p_i \text{Aux19} \text{Aux11}^2}{s} - s \left\{ \text{CI} \text{Aux20} + \right. \\ &\quad \left. + \text{Aux14} \text{CIDK} \right\} - \text{Aux15} \text{Aux20} - \frac{p_o \text{Aux13}}{k} \end{aligned} \quad (\text{D.1.15})$$

e

$$\text{Aux18} = \left\{ 1 - \left\{ \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\}^2 \right\}, \quad (\text{D.1.16})$$

$$\text{Aux19} = \frac{\text{Aux18}}{2k}, \quad (\text{D.1.17})$$

$$\text{Aux20} = \frac{-\text{Aux14}}{k}, \quad (\text{D.1.18})$$

$$\text{CI} = \int_0^{t_p} e^{-st} p_{vf}(t) dt, \quad (\text{D.1.19})$$

$$CIDK = \int_0^t e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial k} (\vec{x}, s) \right\} dt, \quad (D.1.20)$$

$$(Aux17)' = \frac{\partial(Aux17)}{\partial k} = -Aux19 \, Aux11^2 - \frac{s \, Aux12}{k}. \quad (D.1.21)$$

As outras derivadas são:

ii) Em relação ao "skin":

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial S} = \frac{(Aux11)^2 (Aux16 - p_i \, Aux17/s) - Aux17 \, Aux14 \, s \, CIOS}{(Aux17)^2} \quad (D.1.22)$$

sendo

$$CIOS = \int_0^t e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_{vf}}{\partial S} (\vec{x}, s) \right\} dt \quad (D.1.23)$$

iii) Em relação a estocagem dimensional da estática, C_s :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial C_s} = \frac{\left\{ \frac{1}{C_2 \, k} \right\} \left\{ Aux17 \left\{ s \, CI + Aux15 \right\} - s \, Aux16 \right\}}{(Aux17)^2} \quad (D.1.24)$$

iv) Em relação a pressão estática, p_i :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial p_i} = \frac{\left\{ Aux11/s - s \, Aux14 \, CIPI \right\}}{Aux17}, \quad (D.1.25)$$

sendo

$$CIPI = \int_0^t e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_{vf}}{\partial p_i} (\vec{x}, s) \right\} dt. \quad (D.1.26)$$

v) Em relação a pressão de fluxo inicial, p_o :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial p_o} = \frac{Aux13 - s \, Aux14 \, CIPO}{Aux17}, \quad (D.1.27)$$

sendo

$$C_{IPO} = \int_0^t p e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_{vf}}{\partial p_o} (\vec{x}, s) \right\} dt \quad (D.1.28)$$

iii) Em relação a estocagem dimensional do fluxo, C_f :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial C_f} = \frac{\left\{ \frac{1}{C_2 k} \right\} \left\{ p_o - \text{Aux15} - s \text{ CI} \right\} - s \text{ CICF Aux14}}{(\text{Aux17})} \quad (D.1.29)$$

sendo:

$$\text{CICF} = \int_0^t p e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_{vf}}{\partial C_f} (\vec{x}, s) \right\} dt. \quad (D.1.30)$$

D.1 - Caso do poço com efeito de película positivo ($\text{Skin} < 0$)

A equação geral do DST para o caso de um ciclo foi deduzida no apêndice C (eq.C.18).

$$\text{Definindo-se } C_1 = \sqrt{\phi \mu c_l r_{va}^2} \quad \text{e} \quad C_2 = \frac{2 \pi h}{\mu},$$

onde $r_{va} = r_v \cdot \exp(-S)$,

então a equação (C.10) se torna :

$$\bar{p}_{vs} = \frac{\frac{p_i}{s} \left\{ \frac{1}{\frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1(C_1 \sqrt{s/k})}} \right\} + C_c \left\{ \int_0^t e^{-st} p_{vf}(t) dt + C_d \right\} + C_e}{\left\{ \frac{1}{\frac{K_o(C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} K_1(C_1 \sqrt{s/k})}} \right\} + s \frac{C_s}{(2\pi h/\mu) k}} \quad (D.2.1)$$

onde:

$$C_c = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu)k} - \frac{C_e}{(2\pi h/\mu)k} , \quad (D.2.2)$$

$$C_d = p_{ff} e^{-st_p} , \quad (D.2.3)$$

$$C_e = \frac{C_f}{(2\pi h/\mu)k} p_o , \quad (D.2.4)$$

definindo-se

$$Aux10 = \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} \cdot K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} , \quad (D.2.5)$$

$$Aux11 = \left[\frac{1}{\frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{C_1 \sqrt{s/k} \cdot K_1 (C_1 \sqrt{s/k})}} \right] , \quad (D.2.6)$$

$$Aux12 = C_b = \frac{C_s}{C_z k} , \quad (D.2.7)$$

$$Aux13 = C_a = \frac{C_f}{C_z k} , \quad (D.2.8)$$

$$Aux14 = C_a - C_b = Aux13 - Aux12 , \quad (D.2.9)$$

$$Aux15 = p_{ff} e^{-s \cdot t_p} , \quad (D.2.10)$$

$$Aux16 = \frac{P_i}{s} Aux11 - Aux14 \left\{ s \int_0^t e^{-st} p_{wf}(t) dt + Aux15 \right\} , \quad (D.2.11)$$

$$Aux17 = Aux11 + s Aux12 , \quad (D.2.12)$$

$$\text{então: } \bar{p}_{ws}(\vec{x}, s) = \frac{Aux16}{Aux17} , \quad (D.2.13)$$

A derivada em relação a permeabilidade é :

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial k} = \frac{\text{Aux17} \cdot (\text{Aux16})' - \text{Aux16} \cdot (\text{Aux17})'}{(\text{Aux17})^2}, \quad (\text{D.2.14})$$

para

$$\begin{aligned} (\text{Aux16})' &= \frac{\partial (\text{Aux16})}{\partial k} = \frac{-p_i \cdot \text{Aux18} \cdot (\text{Aux11})^2}{s} - s \{ \text{CI} \cdot \text{Aux20} + \\ &\quad - \text{Aux15} \cdot \text{Aux20} \} - p_o \cdot \text{Aux13}, \end{aligned} \quad (\text{D.2.15})$$

$$\text{Aux18} = \left\{ 1 - \left\{ \frac{K_o (C_1 \sqrt{s/k})}{K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\}^2 \right\}, \quad (\text{D.2.16})$$

$$\text{Aux19} = \frac{1}{2k} \text{Aux18}, \quad (\text{D.2.17})$$

$$\text{Aux20} = \frac{-\text{Aux14}}{k}, \quad (\text{D.2.18})$$

$$\text{CI} = \int_0^t e^{-st} p_{vf}(t) dt, \quad (\text{D.2.19})$$

$$\text{CIDK} = \int_0^t e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\partial \bar{p}_{vf}}{\partial k} (\vec{x}, s) \right\} dt, \quad (\text{D.2.20})$$

$$e \quad (\text{Aux17})' = -\text{Aux11}^2 \text{Aux19} - \frac{s}{k} \text{Aux12}. \quad (\text{D.2.21})$$

As outras derivadas são:

ii) Em relação ao "skin"

$$\frac{\partial \bar{p}_{vs}}{\partial S} = \frac{(\text{Aux11})^2 \text{Aux18} (\text{Aux16} - p_i \text{Aux17}/s) - \text{Aux17} \text{Aux14} s \text{CIOS}}{(\text{Aux17})^2},$$

sendo:

(D.2.22)

$$CIOS = \int_0^t e^{-st} \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\bar{\partial p}_{vf}}{\partial s} (\vec{x}, s) \right\} dt, \quad (D.2.23)$$

$$Aux18 = \left\{ 1 - \left\{ \frac{K_0 (C_1 \sqrt{s/k})}{K_1 (C_1 \sqrt{s/k})} \right\}^2 \right\}. \quad (D.2.24)$$

iii) Em relação a estocagem dimensional da estática, C_s :

$$\frac{\bar{\partial p}_{vs}}{\partial C_s} = \frac{\left\{ \frac{1}{C_2 k} \right\} \left\{ Aux17 \left\{ s CI + Aux15 \right\} - s Aux16 \right\}}{(Aux17)^2} \quad (D.2.25)$$

iv) Em relação a pressão estática, p_i :

$$\frac{\bar{\partial p}_{vs}}{\partial p_i} = \frac{\left\{ \frac{Aux11}{s} - s Aux14 CIPI \right\}}{Aux17} \quad (D.2.26)$$

D.3 - Comentários adicionais:

Os termos do tipo

$$\frac{\partial F(\vec{x}, t)}{\partial x_i} = \mathbb{L}^{-1} \left\{ \frac{\bar{\partial p}_w}{\partial x_i} (\vec{x}, s) \right\} \quad (D.2.27)$$

onde $i = 1, 2, \dots, m$

$\vec{x}$ = parametros $(k, s, \dots, C_f)$

representam a transformada inversa de Laplace da derivação da pressão do período de fluxo, em relação aos parâmetros a serem determinados

O termo $CI = \int_0^t e^{-st} p_{vf}(t) dt$ representa a integração sobre

o período de fluxo, para cada argumento de *Laplace* s do período de estática.

Para a derivação desta integral em relação aos parâmetros foi usada a regra de *Leibnitz*:

$$\frac{d}{d\alpha} \int_{\phi_1(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} F(x, \alpha) dx = \int_{\phi_1(\alpha)}^{\phi_2(\alpha)} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dx + F(\phi_1, \alpha) \frac{d\phi_1}{d\alpha} - F(\phi_2, \alpha) \frac{d\phi_2}{d\alpha} \quad (D.2.28)$$

Para o cálculo das derivadas no tempo zero, a qual não é possível de se obter por inversão numérica da transformada de *Laplace*, foi usado o teorema do valor inicial:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s \mathbb{L}\{f(t)\} = \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = f(0^+) \quad (D.2.29)$$

Obteve-se , usando as equações B.1.8, B.1.10, B.1.11, B.1.12 e B.1.13 respectivamente:

$$\left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial k} (\vec{x}, s) \right\}_{t=0} = 0. \quad (D.2.30)$$

$$\left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial S} (\vec{x}, s) \right\}_{t=0} = 0. \quad (D.2.31)$$

$$\left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial p_o} (\vec{x}, s) \right\}_{t=0} = 0. \quad (D.2.32)$$

$$\left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial C_f} (\vec{x}, s) \right\}_{t=0} = 0. \quad (D.2.33)$$

$$\left\{ \frac{\partial p_{vf}}{\partial p_i} (\vec{x}, s) \right\}_{t=0} = 0. \quad (D.2.34)$$

APENDICE E - MÉTODOS INVESTIGADOS COMO ALTERNATIVAS PARA SOLUÇÃO DA INTEGRAL DO PROBLEMA DO DST

Para se gerar valores de pressão estática tem-se que resolver a integral $\int_0^{t_p} e^{-st} p_{vf}(t) dt$.

Para o processo de otimização através de regressão não linear usando dados da estática, tem-se que resolver as seguintes integrais:

$$\int_0^{t_p} e^{-st} \frac{\partial p_{wf}(t)}{\partial k} dt, \quad \int_0^{t_p} e^{-st} \frac{\partial p_{wf}(t)}{\partial p_o} dt, \quad \int_0^{t_p} e^{-st} \frac{\partial p_{wf}(t)}{\partial s} dt, \quad \int_0^{t_p} e^{-st} \frac{\partial p_{wf}(t)}{\partial c_f} dt,$$

e finalmente $\int_0^{t_p} e^{-st} \frac{\partial p_{wf}(t)}{\partial p_i} dt$, todas definidas no intervalo de zero até o tempo de fluxo final t_p .

E.1 - Integração direta através do uso de expressões para

$p_{wf}(t)$ como por exemplo: $p_{wf}(t) = a\sqrt{t} + b t + c$

Vantagens:

i) A integração é rápida.

Desvantagens:

i) Perde-se muito tempo na determinação de a, b , e c através de regressão não linear, e muitas vezes obtém-se resíduos muito grandes.

ii) A expressão não é genérica, pois depende do comportamento das pressões de fluxo.

iii) Este processo não pode ser aplicado para resolver as demais integrais que dependem da derivação de parâmetros no fluxo.

E.2- Integração através de avaliações do integrando pelos métodos trapezoidais: Regra de Simpson, método de Newton-Cotes, Quanc8 etc.

Estes algoritmos exigem que se forneça a expressão para o cálculo do integrando, no caso através de inversão numérica da expressão obtida em *Laplace*, em pontos igualmente espaçados.

-Vantagens:

i) Facilidade de uso do método

-Desvantagens:

i) Exige-se muito tempo para convergir para o valor correto, devido aos fatos:

i.1) O integrando não é uma função suave,

i.2) Para se determinar cada valor do integrando tem-se que fazer a inversão numérica da expressão em *Laplace*.

i.3) Exige-se a estimativa de muitos valores do integrando para a convergência(em torno de 200 estimativas).

E.3 - Integração através de método tipo polinômios ortogonais: método de Gauss.

Deve-se fornecer a expressão para cálculo do integrando, através da inversão numérica, em pontos diferentemente espaçados.

-Vantagens:

i) Facilidade de uso

ii) Rapidez nos cálculos

iii) Possibilidade de melhorar a precisão do resultado através de subdivisões do intervalo de integração.

-Desvantagens:

i) A precisão do método depende da quantidade de subdivisões do intervalo, e não se sabe qual a subdivisão ideal para cada caso.

ii) O tempo gasto para a integração é proporcional a quantidade de subdivisões do intervalo de integração.

E.4 - Integração através de uso do splines cúbicos

Interpola-se os valores obtidos de $\text{pwf}(t)$ ou $\partial \text{pwf}(t)/\partial x_j$ através do polinômio cúbico definido por:

$$f(t) = C(i,3).(t-t_i)^3 + C(i,2).(t-t_i)^2 + C(i,1).(t-t_i) + P(i)$$

e integra-se a expressão resultante analiticamente.

O problema se torna então a determinação dos coeficientes $C(i,3)$, $C(i,2)$ e $C(i,1)$ para cada caso.

Pode-se também usar a função degrau unitário para efetuar esta integração, e transformar a integração do intervalo de zero a t_p em:

$$CI = \int_0^{t_p} e^{-st} . f(t) . dt = \sum_{i=1}^n \int_{t(i)}^{t(i+1)} e^{-st} f(t) dt, \quad (E.1)$$

onde n é o número de pontos existentes no intervalo de $[0, t_p]$.

A expressão da integral fica então:

$$CI_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-st} \left\{ C(i,3)(t-t_i)^3 + C(i,2)(t-t_i)^2 + C(i,1)(t-t_i) + P(i) \right\} dt \quad (E.2)$$

$$CI = \sum_{i=1}^n CI_i \quad (E.3)$$

O resultado desta integração será $CI = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$

sendo

$$I_1 = C(i,3) . E1 . (E2(A1^3 + A2) - 6/s^4) \quad (E.4)$$

$$I_2 = C(i,2) . E1 . (E2(B1^3 + 1/s^2) + 2/s^3) \quad (E.5)$$

$$I_3 = C(i,1) . E1 . (E2 . B1 + 1/s^2) \quad (E.6)$$

$$I_4 = P(i) . E1 . (E2 + 1/s) \quad (E.7)$$

onde

$$Dt = T_{i+1} - T_i \quad (E.8)$$

$$A1 = (Dt - 1/s) \quad (E.9)$$

$$A2 = 3.Dt/s^2 - 5/s^3 \quad (E.10)$$

$$B1 = Dt + 1/s \quad (E.11)$$

$$E1 = e^{-sTi} \quad (E.12)$$

$$E2 = \frac{-e^{-s.Dt}}{s} \quad (E.13)$$

-Vantagens:

- i) Rapidez no cálculo da integral
- ii) Precisão nos resultados

-Desvantagens:

- i) O método de integração só funciona bem para integração com dados gerados (sem ruídos), porque a variação dos valores da interpolação entre os pontos tem que ser suave.
- ii) Para alguns casos deve-se modificar os valores das condições auxiliares do splines cúbicos, que geralmente são os valores das derivadas primeira ou segunda, devido à mudança das derivadas nos tempos inicial e final de um teste para outro dependendo do comportamento do poço.
- iii) gasta-se um tempo grande calculando os coeficientes do splines.

E.5 - Cálculo da integral através do uso de quadratura dos coeficientes do splines cúbicos pelo IMSL:

Para cada valor de pressão estática requerido tem-se que calcular o integrando $e^{-st}.p_{wf}(t)$ para gerar os coeficientes do splines cúbicos, os quais serão usados no cálculo da integral.

-Vantagens:

- i) Facilidade de uso
- ii) Precisão nos resultados

-Desvantagens:

- i) Demora nos cálculos das integrais

6. Integração através do uso de transformada de Laplace.

O método consiste em obter uma nova expressão no espaço de *Laplace*, a qual possa ser invertida numericamente, seja

$$CI = \int_0^t e^{-st} \cdot p_{vf}(t) \cdot dt \quad (E.14)$$

Aplicando-se a transformada de *Laplace* a eq. E.14 tem-se:

$$\mathcal{L}\{CI\} = \frac{1}{z} \overline{p_{vf}}(z + s), \quad (E.15)$$

Logo

$$CI = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{1}{z} \cdot \overline{p_{vf}}(z + s) \right\}, \quad (E.16)$$

onde:

z é o novo argumento da transformada de *Laplace*

$\overline{p_{vf}}(z + s)$ é a transformada de *Laplace* da pressão p_{vf}

calculada em $(z + s)$.

-Vantagens:

i) Rapidez e simplicidade do método

-Desvantagens:

i) A precisão do método depende basicamente da precisão do algoritmo de inversão numérica da transformada de *Laplace*.

ii) O algoritmo que apresenta melhor precisão é o algoritmo de *Crump*, que inclusive tem o controle do erro máximo permitido. Entretanto, sua utilização requer o conhecimento das funções de *Bessel* modificadas para argumentos complexos, as quais não estão disponíveis.

iii) O algoritmo de *Stehfest* apresentou erros consideráveis quando aplicado ao exemplo, principalmente para os dados finais do período de estática.

E.7 - Cálculo da integral através do uso dos quadrados mínimos com funções B-Splines cúbicos.

Para se resolver a integral $CI = \int_0^{tp} e^{-st} p_{vf}(t) dt$ no intervalo de zero a tp (tempo de produção), pode-se usar um ajuste que não passa necessariamente pelos pontos observados.

O método consiste em se aproximar o integrando $p_{vf}(t)$ por²⁰:

$$p_{vf}(t) = \sum_{i=1}^{(Ns+2)} A(i) \cdot B_i(t) \quad (E.17)$$

onde Ns é o número de B-splines do intervalo $B_i(t)$ são valores definidos pela base B-splines, $A(i)$ são coeficientes que minimizam o residuo ao quadrado definido por:

$$R(A(i)) = \text{Min} \sum_{j=1}^n \left[p_{vf}(t) - \sum_{i=1}^{(Ns+2)} A(i) \cdot B_i(t) \right]^2 \quad (E.18)$$

Para determinação de $A(i)$ dever-se derivar a expressão acima com relação a cada $A(i)$ e obter o valor nulo da derivada:

$$\frac{\partial R}{\partial A(i)} = 0 \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, ns+2 \quad (E.19)$$

Resultando em um sistema normal com $ns+2$ equações $ns+2$ incógnitas, as quais são os coeficientes $A(i)$.

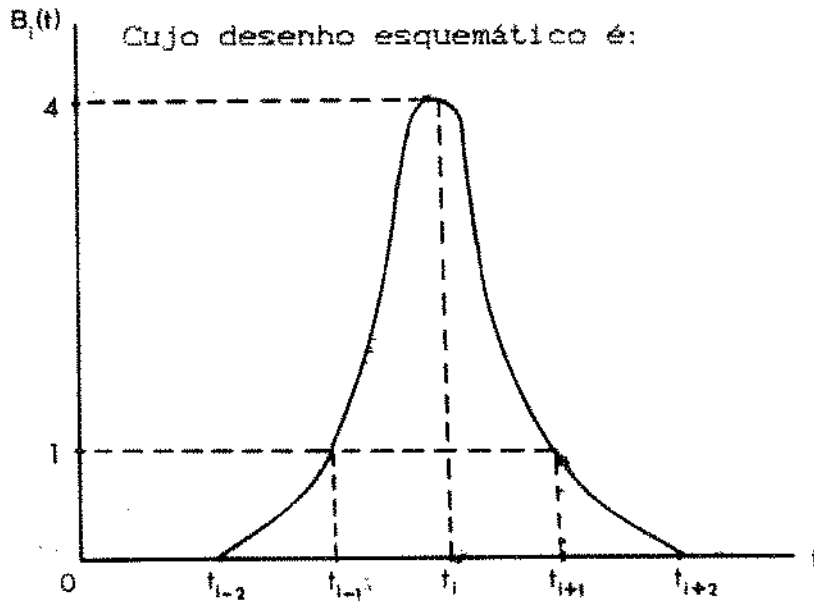
Para se efetuar o cálculo da integral em sub-intervalos definidos entre os tempos t_j e t_{j+1} , deve-se novamente multiplicar a integral pela função degrau unitário $[S_{i+1}-S_i]$, a fim de restringir o limite de integração:

$$CI = \int_0^{tp} e^{-st} \sum_{j=1}^{(Ns+2)} A(j) B_j(t) \cdot dt = \sum_{i=1}^N A(j) \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-st} B_j(t) dt \quad (E.20)$$

Nesse caso a função B-Splines também deve ser definida no intervalo de t_i a t_{i+1} ao invés de t_{i-2} a t_{i+2} como

Nesse caso a função B-Splines também deve ser definida no intervalo de t_j a t_{j+1} ao invés de t_{i-2} a t_{i+2} como normalmente aparece na literatura:

$$B_i(t) = \frac{1}{h^3} \begin{cases} (t_j - t)^3 \\ h^3 + 3h^2(t_{j+1} - t_j) + 3h(t_{j+1} - t_j)^2 - 3(t_{j+1} - t)^3 \\ h^3 + 3h^2(t - t_j) + 3h(t - t_j)^2 - 3(t - t_j)^3 \\ (t - t_j)^3 \end{cases} \quad (E.21)$$



O cálculo da integral se torna então:

$$CI = \int_0^{tp} e^{-st} \sum_{j=1}^{(ns+2)} A(j) B_j(t) dt = \sum_{i=1}^n A(j) \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-st} B_j(t) dt \quad \text{ou} \quad (E.22)$$

$$CI = \sum_{i=1}^N A(j) \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-st} \left\{ e^{-st} (t - t_j)^3 + e^{-st} (h^3 + 3h^2(t - t_j) + 3h(t - t_j)^2 - 3(t_{j+1} - t)^3 + e^{-st} (t_{j+1} - t)^3 \right\} dt \quad (E.23)$$

cuja solução é:

$$CI = 1/h^3 (AC_{j-1}) I_1 + AC_j I_2 + AC_{j+1} I_3 + AC_{j+2} I_4),$$

para $j = 1, 2, \dots, N_s+2$. (E. 24)

onde:

$$I_1 = E1(E2(A1^3 + 3Dt/s^2 - 5/s^3) + 6/s^4) \quad (E. 25)$$

$$I_2 = E1(E2 A2 - A3/s) \quad (E. 26)$$

$$I_3 = E3(E4 B2 + B3/s) \quad (E. 27)$$

$$I_4 = E3(E4(B1^3 + 3Dt/s^2 + 5/s^3) + 6/s^4) \quad (E. 28)$$

com

$$A1 = Dt - 1/s \quad (E. 29)$$

$$\text{sendo } Dt = t_{j+1} - t_j \quad (E. 30)$$

$$A2 = h^3 + 3h/s^2 - 9Dt/s^2 + 15/s^3 - 3A1(A1^2 - A1 h - h^2) \quad (E. 31)$$

$$A3 = (h-1/s)^3 + 3h/s^2 + 19/s^3 \quad (E. 32)$$

$$B1 = Dt + 1/s \quad (E. 33)$$

$$B2 = h^3 + 3h/s^2 - 9Dt/s^2 - 15/s^3 - 3B1(B1^2 - B1 h - h^2) \quad (E. 34)$$

$$B3 = (h+1/s)^3 + 3h/s^2 + 19/s^3 \quad (E. 35)$$

$$E1 = e^{-s t_{j+1}} \quad (E. 36)$$

$$E2 = \frac{e^{-s Dt}}{s} \quad (E. 37)$$

$$E3 = e^{-s t_j} \quad (E. 38)$$

$$E4 = \frac{e^{-s Dt}}{s} \quad (E. 39)$$

-Vantagens do método:

- (i) Rapidez no cálculo da integral
- (ii) Precisão nos resultados
- (iii) Permite suavizar a curva de fluxo pela minimização dos ruídos.
- (iv) Permite o cálculo das integrais envolvendo a derivada da pressão no integrando com relação aos parâmetros.

-Desvantagens do método:

- (i) Com relação aos métodos pesquisados não há desvantagem.

APÊNDICE H - SOLUÇÃO DO PROBLEMA DO DST ATRAVÉS DE DIFERENÇAS FINITAS

Considerando a equação diferencial parcial para um fluxo radial de um fluido com viscosidade pequena e com baixa compressibilidade escoando num meio poroso homogêneo, isotrópico, de espessura constante teremos a seguinte transformação²²:

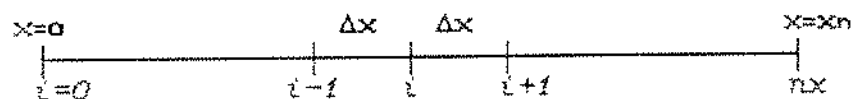
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r \frac{\partial p}{\partial r} \right\} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{H.1})$$

$$\text{definindo } x = \ln r \quad \Rightarrow \quad r = e^x \quad (\text{H.2})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ r \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{r} \right\} \frac{1}{r} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{H.3})$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{H.4})$$

A discretização fica:



$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{p_{i-1} - 2p_i + p_{i+1}}{\Delta x^2} \quad (\text{H.5})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t} \quad (\text{H.6})$$

sendo

$n \Rightarrow$ nível de tempo atual

$n + 1 \Rightarrow$ nível de tempo futuro

O método totalmente implícito fica

$$\frac{p_{i-1}^{n+1} - 2p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} = e^{2x} \left\{ \frac{p_i^{n+1} - p_i^n}{\Delta t^2} \right\} \quad (H.5)$$

$$p_{i-1}^{n+1} - p_i^{n+1} - \left[2 + e^{2x} \frac{\Delta x^2}{\Delta t^2} \right] + p_{i+1}^{n+1} = -e^{(2x)_i} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} p_i^n \quad (H.6)$$

$$\text{Chamando } \alpha = e^{(2x)_i} \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \quad (H.7)$$

$$p_{i-1}^{n+1} - \left[2 + \alpha \right] p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1} = -\alpha p_i^n \quad (H.8)$$

$$2 \leq i \leq nx - 1$$

Discretização da condição de contorno interna

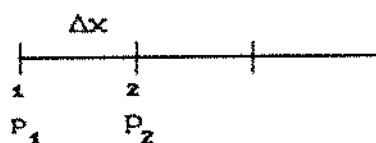
$$C \frac{d p_v}{d t} - \left[\frac{\partial p}{\partial r} \right]_{r=1} = 0 \quad (H.9)$$

onde

$$C = \begin{cases} C_f & \text{no fluxo} \\ C_s & \text{na estática} \end{cases}$$

Fazendo a substituição de variável

$$C \frac{d p_v}{d t} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (H.9)$$



$$C \left[\frac{p_1^{n+1} - p_2^n}{\Delta t} \right] = \left[\frac{p_2^{n+1} - p_1^{n+1}}{\Delta x} \right] = 0 \quad (H.10)$$

$$p_1^{n+1} \left[\frac{C}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \right] - \frac{p_2^{n+1}}{\Delta x} = \frac{C}{\Delta t} p_2^n \quad (H.11)$$

chamando

$$\beta = C \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (H.12)$$

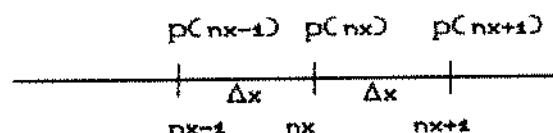
$$-\left[\beta + 1 \right] p_1^{n+1} + p_2^{n+1} = -\beta p_1^n \quad (H.13)$$

Discretização da condição de contorno externa

Considera-se um reservatório limitado com raio externo grande o suficiente para que a queda de pressão em $r = r_e$ seja nulo.

$$\left[\frac{\partial p}{\partial r} \right] = 0 \quad (H.14)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial x} \right]_{x=x_n} = 0 \quad (H.15)$$



o ponto $(nx+1)$ é um ponto imaginário.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_{n+1}^{n+1} - p_{n-1}^{n+1}}{2 \Delta x} = 0 \quad (H.16)$$

$$p_{n+1}^{n+1} = p_{n-1}^{n+1} \quad (H.17)$$

Montagem do sistema tridiagonal

$i = 1$

$$-\left[\beta + 1 \right] p_1^{n+1} + p_2^{n+1} = -\beta p_1^n \quad (H.13)$$

$$\beta = C \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (H.14)$$

$$i \leq 2 \leq nx - 1$$

$$p_{i+1}^{n+1} - \left[2 + \alpha_i \right] p_i^{n+1} + p_{i+1}^{n+1} = -\alpha_i p_i^n \quad (H.15)$$

$$\text{para} \quad \alpha_i = e^{(2\alpha_i)} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (H.16)$$

$$i = nx$$

$$2. p_{nx-1}^{n+1} - \left[2 + \alpha_{nx} \right] p_{nx}^{n+1} = -\alpha_{nx} p_{nx}^n \quad (H.17)$$

Sistema tridiagonal

Seja A a matriz dos coeficientes abaixo:

$$i = \begin{bmatrix} 1 & -(\beta+1) & 1 & & & \\ 2 & 1 & -(2+\alpha_1) & 1 & & \\ . & & 1 & -(2+\alpha_1) & 1 & \\ . & & & & & \\ nx-1 & & & & 1 & -(2+\alpha_1) & 1 \\ nx & & & & 1 & -(2+\alpha_{nx}) \end{bmatrix}$$

Seja B e C os vetores coluna abaixo:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ . \\ . \\ p_{nx} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -\beta p_1^n \\ -\alpha p_2^n \\ . \\ -\alpha_{nx-1} p_{nx-1}^n \\ -\alpha_{nx} p_{nx}^n \end{bmatrix}$$

A solução das pressões será dada por $A B = C$

PROGRAMAS

fontes

em

fortran

- Apêndice G.1 - Otimização no fluxo para cálculo de k , S , p_o e C_f
- As subrotinas C_f , Coeff, S18acf, e S18adf estão no apêndice G.4
 - A subrotina Zxssq é da biblioteca do IMSL para micro PC.

```

Program zero
External Pressa,Coeff,S18acf,S18adf
Integer M,N,Ixjac,Nsig,Maxfn,Iopt,I,Infer,Ier
Real Param(4),X(4),F(27),Xjac(27,4),Xjtj(10),Work(84),Eps,Delta
*,Ssq,X1(4)
Real*8 Time(27),Pwf(27),Dpwf(27),P1,Pe,Po,Rw,Ct,Phi,Visc,Th,C1,C2,
*C3
Common /Dados/Time,Pwf
Common /calc/ Dpwf
Common /reser/Po,Pe,Rw,Ct,Phi,Visc,Th,P1,C1,C2,C3
Open (1,File = 'Topo.dat')
Open (2,File = 'c:slug.dat')
Open(3,File = 'C:itera.dat')
Open(4,File = 'C:curva.dat')
C..... Parametros para a rotina de minimizacao.....
M = 27
N = 4
Ixjac = 27
Nsig = 8
Eps = 0.0
Delta = 0.0
Maxfn = 500
Iopt = 2
Param(1) = 0.01
Param(2) = 25.
Param(3) = 120.
Param(4) = 0.1
C..... Valores iniciais dos parametro k,c,pi,s.....
X1(1) = 1.
X1(2) = 80000.
X1(3) = 0.
X1(4) = 9.69
C..... Outros dados(Unidades Americanas)
Ct = 10.20D-06
Phi= 0.062
Visc= 60.0
Pe = 892.
Th = 38.
Rw = 4.248
C
C..... parametros iniciais de reservatorios k,c,po e s (Unidades Darcy)...
Write(2,200)
200 Format(1h,/,49x,/,10x,'Permeabilidade(darcy)',
*,3x,'Estocagem(cm3/atm)',3x,'PoCatm)',5x,'Skin',/)
Write(2,210)X1(1),X1(2),X1(4),X1(3)
210 Format(10x,D11.4,9x,D11.2,10x,D12.3,5x,D12.3,/)

```

```

C.....parametros de fluido e rocha.....
  Write(2,120)
120  Format(//,25x,'Dados de fluido e rocha',/,3x,'Compress. (1/psi)',
    *3x,'Porosidade',3x,'visc(cP)',4x,'Pi (psi)',3x,'Th(pes)',3x,
    *'Rw(cin)',/)
    Write(2,140)Ct,Phi,Visc,Pe,Th,Rw
140  Format(1x,E10.3,10x,F8.3,7x,F6.3,5x,F9.2,6x,F6.2,3x,F8.3)
C.....Transformacao dos dados para o sistema Darcy de unidades.
  Ct = Ct*14.7
  Pe = Pe/14.7
  Th = Th*30.48
  Rw = Rw*2.54
C.....Parametro auxiliar
  P1 = 4.*Datan(1.0D0)
  C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rw*Rw)
  C2 = 2.*P1*Th/Visc
  C3 = Dlog(2.D0)
C
C.....Escalonamento dos parametros para minimizacao.....
  X(1) = X(1)
  X(2) = X(2)/100000.
  X(3) = X(3)/10.
  X(4) = X(4)/10.
  Call Zxssq(Pressa,M,N,NSIG,EPS,DELTA,MAXFN,IOPT,PARAM,X,SSQ,F,
    *XJAC,IXJAC,XJTJ,WORK,INFER,IER)
C::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
  Write(2,3)Ssq,Infer,Ier
  3  Format(5x,'Soma dos quadrados dos residuos =',D10.5,/,5x,'Criterio
    * de convergencia que foi satisfeito =',I3,/,5x,'Erro =',I3,/,5x,
    *'Valores residuais = Pmed.-Pcal na ultima convergencia',/)
C.....Descalonamento dos residuos apos minimizacao.....
  DO 51 I = 1,M
51  F(i) =F(i)*Pwf(i)
    Write(2,220)
220  Format(1H,////,15x,'Pressoes Geradas no file 4',/,19x,'t(hr)',5x,
    *'Pwf(psi)',5x,'Dpwf(Psi)',5x,'Residuos',/)
    Write(4,240)(Time(i),Pwf(i),Dpwf(i),F(i),I=1,M)
240  Format(17x,F7.4,6x,F9.2,5x,F9.3,3x,F10.5)
C.....Descalonamento dos parametros apos a minimizacao.....
  X(1) = X(1)
  X(2) = X(2)*100000.
  X(3) = X(3)*10.
  X(4) = X(4)*10.
  Write(2,1)(1,X(1),I = 1,4)
  1  Format(5x,'Valor otimo = ','X(',I3,')= ',2x,D10.4)
    Write(2,11)
  11  Format(//,5x,'Matriz aproximada do ultimo jacobiano',/)
    Do 7 I = 1,13
  7  Write(2,9) I,(Xjac(i,j),j = 1,4)
  9  Format(2x,i2,4(4x,1Pe12.5))
    Write(2,13)
  13  Format(//,1x,'Vetor norma grad- num iteracoes-num digitos signific-
    * e marquadt algorit resp. ',/)

```

```

        Write(2,15)(i,Work(i),i=1,5)
15  Format(5x,'Work(',i2,')= ',F15.5)
        Close(1)
        Close (2)
        Close(3)
        Close(4)
        End
        Block Data Entra
C.....Dados de pressao do teste
        Real*8 Time(27),Pwf(27)
        common /Dados/ Time,Pwf
        Data Time /0.022,0.026,0.034,0.041,0.053,0.067,0.084
        *,0.106,0.132,0.166,0.187,0.209,0.235,0.264,0.295,0.334,
        *0.372,0.418,0.47,0.528,0.59,0.662,0.774,0.835,0.938,1.051,
        *1.126/
C
        Data Pwf /154.36,162.77,178.64,191.66,212.55,235.07,260.33
        *,290.27,322.45,360.31,381.69,402.68,425.82,449.74,473.37,500.57,
        *524.7,551.18,578.,604.56,629.63,655.09,688.34,703.76,726.34,
        *746.97,758.71/
        End
        Subroutine Pressa(X,M,N,F)
        Integer M,N,M1,N1,I,K,J,Ifail
        Real*8 Pwf(27),Time(27),A(27),V(20),DPwf(27),S18acf,
        *S18adf,Xs,C1,C2,C3,Bk0,Bk1,Aux1,Aux2,Aux3,Aux4,Sumr,P1apr,Y,Z,P1
        *,Pe,Po,Rw,Ct,Phi,visc,Th
        Real X(N),F(M)
        Common/lpl/V,M1
        Common /Dados/Time,Pwf
        Common /calc/Dpwf
        Common /reser/Po,Pe,Rw,Ct,Phi,Visc,Th,P1,C1,C2,C3
C.....Descalonamento dos parametros para minimizacao.....
        X(1) = X(1)
        X(2) = X(2)*100000.
        X(3) = X(3)*10.
        X(4) = X(4)*10.
C.....Impressao dos parametros que serao minimizado.....
        Write(3,42)(X(i),i=1,N)
42  Format(3x,4(3x,F15.5))
C.....Calculo da funcao com inversao de laplace.....
        N1 = 8
        M1 = 1
        Do 10 i = 1,M
10  Time(i) = Time(i)*3600.
        Gama = Dsqrt(X(1))
        Alfa = C1/Gama
        Aux4 = C2*X(1)/X(2)
C
        DO 20 I=1,M
20  A(I)=C3/Time(I)
C
        Call Coeff(N1)
C

```

```

Do 40 i = 1,M
Sumr = 0.
Do 30 j = 1,N1
Z = J * A(i)
Y = Dsqrt(z)
Xs = Y* Alfa
Bk0 = S18ACF(Xs,IFAIL)
Bk1 = S18ADF(Xs,IFAIL)
Aux1 = X(3) + Bk0/(Xs * BK1)
Aux2 = C2*X(1)*Pe/(X(2)*Z)
Aux3 = X(4)*Aux1 + Aux2
Plapr = Aux3/(Z*Aux1 + Aux4 )
30 Sumr = Sumr + V(j)*Plapr
40 Dpwf(i)= Sumr* A(i)
C
Do 50 I = 1,M
Dpwf(i) = Dpwf(i)*14.7
Time(i) = Time(i)/3600.
F(i) = (Pwf(i) - Dpwf(i))/Pwf(i)
50 Write (*,1)F(i)
1 Format(3x,'F =',E15.8)
C
C.....Impressao do valor da soma dos quad. residuo nesta iteracao.....
Tot = 0.
Do 31 jk=1,M
31 Tot = Tot + F(jk)*F(jk)
C.....Escalonamento dos parametros para minimizacao.....
X(1) = X(1)
X(2) = X(2)/100000.
X(3) = X(3)/10.
X(4) = X(4)/10.
Write(1,32)(X(I),I=1,N),Tot
32 Format(5F14.4)
Return
End

```

Apêndice G.2 - Otimização no fluxo para cálculo de k , S e P_o
 -As subrotinas Mrqmin, Sl8acf, Sl8adf, Coeff estão apresentadas
 no apêndice G.4.

```

Program Kspoposi
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Mrqmin,Funcs
Dimension X(27),Pwf(27),Sig(27),A(3),Lista(3),
*Covar(3,3),Alfa(3,3),V(20)
Common /reser/Cf,Pe,Rw,Ct,Phi,Visc,Th,PI,C1,C2,C3
Common /Lpl/V,Ml
Save Ic

```

```

C
Open(2,file = 'Kspo.dat')
Data Ic/1/
Data X /0.022,0.026,0.034,0.041,0.053,0.067,0.084
*,0.106,0.132,0.166,0.187,0.209,0.235,0.264,0.295,0.334,
*0.372,0.418,0.47,0.528,0.59,0.662,0.774,0.835,0.938,1.051,
*1.126/

```

```

C
Data Pwf /107.897,111.445,118.367,124.266,134.099,145.196,158.217
*,174.438,192.820,215.743,229.337,243.156,258.970,275.990,293.512,
*314.638,334.308,356.997,381.277,406.778,432.344,460.022,499.211,
*518.768,549.225,579.306,597.544/

```

```

C
Data A /.5,0.,8.5/
Ml = 1
Ndp = 27
Np = 3
Nca = 3
Mfit = 3
Alamda = -1.
Chisq1 = 0.
Lista(1)=1
Lista(2)=2
Lista(3)=3

```

```

C.....Outros dados(Unidades Darcy)
Cf = 85239.7
Ct = 10.20D-06*14.7
Phi= 0.062
Visc= 60.0
Pe = 892./14.7
Th = 38.*30.48
Rw = 4.248*2.54

```

```

C.....Impressao dos parametros
Write(2,*) ' Valores arbitrados inicialmente para otimizacao '
Write(2,200)
200 Format(10x,'Permeabilidade(darcy)',5x,'Skin',3x,'Po(atm)',/
Write(2,210)A(1),A(2),A(3)
210 Format(10x,D11.4,9x,D11.2,10x,D12.3)

```

```

C.....parametros de fluido e rocha.....

```



```

        Write(2,120)
120  Format(/,25x,'Dados de fluido e rocha',/,2x,'Compress.(1/atm)',
      *2x,'Porosidade',2x,'visc(cp)',3x,'Pi (atm)',3x,'Th(cm)',3x,
      *'Cf',2x,'Rw(cm)',/)
        Write(2,140)Ct,Phi,Visc,Pe,Th,Cf,Rw
140  Format(1x,E10.3,7x,F8.3,5x,F6.3,4x,F8.2,5x,F8.2,2x,F8.5,2x,F8.3)
C..... Parametro auxiliar.....
      PI = 4.*Datan(1.0D0)
      C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rw*Rw)
      C2 = 2.*PI*Th/Visc
      C3 = Dlog(2.D0)
C..... Transformacao do Tempo para unidades Darcy.....
      Do 10 I = 1,Ndp
      X(i) = X(i)*3600.
      Pwf(i) = Pwf(i)/14.7
10  Sig(i) = 1.D-03
C
190  Call Mrqmin(X,Pwf,Sig,Ndp,A,Np,Lista,Mfit,Covar,Alfa,Nca,Chisq
      *,Funcs,Alamda)
      Write(*,155)Chisq,Alamda
155  Format(5x,'Chisq= ',F25.7,3x,'Alamda=',F15.10)
C      Write(1,180)
C 160  Format(10x,'Permeab.(darcy)',3x,'Po(atm)',5x,'Skin')
      Write(1,180)Ic,(ACI),I=1,Np)
180  Format(I3,3x,F11.4,3x,F12.3,3x,F12.3)
      Ic = Ic + 1
      If((Chisq-Chisq1).Ge.0.) Then
      Chisq1 = Chisq
      Go to 190
      Endif
      If((Dabs(Chisq-Chisq1)).Le.1.0D-2) Go to 195
      Chisq1 = Chisq
      Go to 190
195  Do 55 I = 1, Ndp
      Call Funcs(X(i),A,Dpwf,Dp,Np)
55  Write(2,11)(X(i)/3600.),(Pwf(i)*14.7),(Dpwf*14.7),(Pwf(i)-Dpwf)*
      *14.7
11  Format(3x,F10.5,3(3x,F15.5))
      Close(2)
      End
      Subroutine Funcs(X1,A,Dpwf,Dp,Np)
C esta func e para o caso de determinacao de K,S e Po.
      Implicit real*8(a-h,o-z)
      External Coeff,S18acf,S18adf
      Dimension A(Np),Dp(Np),V(20)
      Common /Lpl/V,Ml
      Common /reser/Cf,Pe,Rw,Ct,Phi,Visc,Th,PI,C1,C2,C3
C
      Write(*,*)(A(i),i=1,Np)
C..... Calculo da funcao com inversao de laplace.....
      N1 = 8
      Do 40 I = 1,Np-1,3
      Gama = Dsqrt(ACI))

```

```

Alfa = C1/Gama
Aux4 = C2*ACI)/Cf
C
A1 = C3/X1
C
If(CM1.Eq.N1)Go to 11
C
Call Coeff(N1)
C
11 Sumr = 0.
Sumb1 = 0.
Sumb2 = 0.
Sumb3 = 0.
Do 30 j = 1,N1
Z = J * A1
Y = Dsqr(2)
Xs = Y* Alfa
Bk0 = S18ACF(Xs,IFAIL)
Bk1 = S18ADF(Xs,IFAIL)
B = Bk0/Bk1
Aux1 = ACI+1) + B/Xs
Aux2 = C2*ACI)*Pe/(Cf*Z)
Aux3 = ACI+2)*Aux1 + Aux2
Aux5 = (1./(2.*ACI)))*(1.-B*B)
Aux8 = Z*Aux1 + Aux4
Plapr = Aux3/Aux8
Plap2 = (Z*Aux2 -ACI+2)*Aux4)*(Aux1/(ACI)) - Aux5)/(Aux8*Aux8)
Plap3 = (Aux8*ACI+2)-Aux3*Z)/(Aux8*Aux8)
Plap4 = Aux1/Aux8
Sumr = Sumr + VC(j)*Plapr
Sumb1= Sumb1+ VC(j)*Plap2
Sumb2= Sumb2+ VC(j)*Plap3
30 Sumb3= Sumb3+ VC(j)*Plap4
Dpwr = Sumr * A1
Dp(i)= Sumb1*A1
Dp(i+1)= Sumb2*A1
40 Dp(i+2)= Sumb3*A1
Return
End

```

Apêndice G.3 - Otimização na estática para cálculo de k, S, P_i
 -As rotinas Mrqmin, Sl8acf, Sl8adf, Coeff e Qmbs estão apresentadas no apêndice G.4.

```

PROGRAM DSTp
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Mrqmin,Funcs
Dimension A(6),Lista(6),Covar(6,6),Alfa(6,6)
Real*8 T(Nx),P(Nx)
Real*8 Dpwe(Ndx),Xt(Ndx),Sig(Ndx),V(20)
Common /Lpl/ V,Ml
Common /Cest/Vw,Cw
Common /reser/C1,C2,C3
Common /Spl/T,P,Sig,Xt,Dpwe
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
Common /Va/A
Save /Va/
C:::::Abre-se arquivo para dados de saida:::::
Open(2,file = 'Dstp.dat')
C:::::Chama-se todos os dados do fluxo, estatica e Pvt (Via Common):::::
Call Dados
C:::::Chuta-se os parametros iniciais para otimizacao:::::
A(1) = Pk/S.
A(2) = S/S.
A(3) = Dpwe(Ndx)
A(4) = Cw*Vw/2.
A(5) = Cf
A(6) = Po
C:::::Define-se os parametros para o algoritmo de otimizacao:::::
Np = 6
Nca = 6
Mfit = 4
Alamda = -1.
Chisq1 = 0.
Lista(1)=1
Lista(2)=2
Lista(3)=3
Lista(4)=4
C    Lista(5)=5
C    Lista(6)=6
C:::::Imprime os valores iniciais das variaveis:::::
Write(2,*) 'Valores e iteracoes de K,S,PI,Cs,Cf e Po sao:'
Write(2,180)(A(I),I=1,Np)
180 Format(6(2x,D10.4))
C:::::Processo de otimizacao:::::
C
190 Call Mrqmin(Xt,DPwe,Sig,Ndx,A,Np,Lista,Mfit,Covar,Alfa,Nca,Chisq

```

```

*,Funcs,Alamda)
C:::::Imprime-se os resultados da regressao nao linear:::::
Write(*,155)Chisq,Alamda
155 Format(5x,'Chisq= ',E15.5,3x,'Alamda=',F25.15)
Write(2,185)(A(I),I=1,Np)
185 Format(6(3x,D10.4))
If((Chisq-Chisq1).Ge.0.) Then
Chisq1 = Chisq
Go to 190
Endif
If((Dabs(Chisq-Chisq1)).Le.1.0D-2) Go to 195
Chisq1 = Chisq
Go to 190
195 Write(2,165)
165 Format(5x,'Valores finais de K S Pi Cs Cf e Po apos a otimizacao')
Write(2,183)(A(I),I=1,Np)
183 Format(6(3x,D10.4))
Do 55 I = 1, Ndx
Call Funcs(I,Xt(i),A,Dpws,Dp,Np)
55 Write(2,11)((Xt(i))/3600.),(Dpwe(i)*14.7),(Dpws*14.7),
*(Dpwe(i)-Dpws)*14.7
11 Format(3x,F10.5,3(3x,F15.5))
Close(2)
Return
End

C
C:::::Entrada de todos os dados do fluxo,estatica e Pvt:::::
Subroutine Dados
Implicit Real*8(a-h,o-z)
Real*8 V(20)
Real*8 Time(Ndp),Pwf(Ndp),T(Nx),PC(Nx)
Real*8 X(Nde),Pws(Nde),Dpwe(Ndx),Xt(Ndx),Sig(Ndx)
Common/Lpl/V,Ml
Common /Cest/Vw,Cw
Common /reser/C1,C2,C3
Common /Spl/T,P,Sig,Xt,Dpwe
Common /pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
C:::::os parametros para o calculo dos coeficientes de Stehfest:::::
Ml = 1
N = 8
C:::::Dados relativos ao Spline:::::
Ndp = 27
Nde = 33
Nx = Ndp + 1
Ic = Ndp
Ndx = Ndp + Nde
C:::::Outros dados(Unidades Americanas):::::
Ct = 10.2D-06
Phi = 0.062

```

```

Visc = 60.
Po = 86.
Pff = 597.544
Th = 38.
Rw = .354
C:----:Calculo do parametro auxiliar PI :-----:
PI = 4.*Datan(1.D0)
CPA= 1./14.7
C:----:As unidades relativas a estatica ja estao em DARCY:-----:
Vw = 0.446948545E+06
Cw = 6.0E-06*14.7
Cs = Cw*Vw
Rp = (3.826/2)*2.54
Grad = 0.00087017
C:----:Parametros de reservatorios k,c,pi e s (Unidades DARCY):-----:
Pk = 1.384
Cf = (PI*Rp*Rp)/Grad
S = 2.
Pe = 892.*CPA
C:----:Transformacao dos outros dados para o sistema DARCY:-----:
Ct = Ct*14.7
Po = Po*CPA
Pff = Pff*CPA
Th = Th*30.48
Rw = Rw*30.48
C:----:Parametro auxiliar:-----:
C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rw*Rw)
C2 = 2.*PI*Th/Visc
C3 = Dlog(2.D0)
C:----:Impressao dos parametros:-----:
C      Write(*,200)
C 200   Format(10x,'Permeabilidade(darcy)',5x,'Skin',5x,'Pi(atm)',/
C      Write(*,210)Pk,S,PI
C 210   Format(10x,D11.4,9x,D11.2,5x,D12.3)
C:----:Parametros de fluido e rocha:-----:
C      Write(2,120)
C120   Format(/,25x,'Dados de fluido e rocha',/,3x,'Compress. (1/atm)',
C      *3x,'Porosidade',3x,'visc(cp)',4x,'Pff (atm)',3x,'Th(cm)',3x,
C      *'Rw(cm)',/
C      Write(2,140)Ct,Phi,Visc,Pff,Th,Rw
C140   Format(1x,E10.3,10x,F8.3,7x,F6.3,5x,F8.2,4x,F8.2,2x,F8.3)
C
      Data Time /0.022D0,0.026D0,0.034D0,0.041D0,0.053D0,0.067D0,0.084D0
*,0.106D0,0.132D0,0.166D0,0.187D0,0.209D0,0.235D0,0.264,0.295,0.334
*,0.372,0.418,0.47,0.528,0.59,0.662,0.774,0.835,0.938,1.051,1.126/
C
      Data Pwf /107.897,111.445,118.366,124.266,134.099,145.196,158.217
*,174.438,192.820,215.743,229.337,243.156,258.970,275.990,293.512,
*314.638,334.308,356.997,381.277,406.778,432.344,460.022,499.211,
*518.768,549.225,579.306,597.544/

```

C Data X /0.022D0,0.026D0,0.034D0,0.041D0,0.053D0,0.067D0,0.084D0
 *,0.106D0,0.132D0,0.166D0,0.187D0,0.209D0,0.235D0,0.264,0.295,0.334
 *,0.372,0.418,0.47,0.528,0.59,0.662,0.774,0.835,0.938,1.051,1.181,
 *1.325,1.486,1.666,1.87,2.098,2.189/

C Data Pws /718.327,719.993,723.106,725.840,730.437,735.658,741.793,
 *749.407,757.946,768.390,774.449,780.488,787.236,794.288,801.302,
 *809.408,816.592,824.426,832.254,839.846,846.801,853.591,861.905,
 *865.498,870.382,874.390,877.707,880.226,882.063,883.319,884.120,
 *884.573,884.677/

C C.....Transformacao do Tempo para unidades Darcy.....

```

TC(1) = 0.
PC(1) = Po
Do 10 I = 1,Ndp
  K = I + 1
  TK(K) = Time(I)*3600.
  Xt(I) = TK(K)
  PK(K) = Pwf(I)/14.7
  Sig(I) = 1.D-03
10  Dpwe(I) = PK(K)
  Do 17 K = Nx,Ndx
    Ie = K-Ndp
    Dpwe(K) = Pws(Ie)/14.7
    Xt(K) = X(Ie)*3600. + TC(Nx)
17  Sig(K) = 1.D-03
  Return
End

```

```

SUBROUTINE FUNCSCKF,X1,A,DPWF,DP,NP)
  Implicit real*8(a-h,o-z)
  External Coeff
  Dimension AC(Np),Dp(Np),VC(20)
  Real*8 TC(50),PC(50),Sig(100),Xt(100),Dpwe(100)
  Common /Lpl/V,Ml
  Common /Reser/C1,C2,C3
  Common /Controle/Id,Icont
  Common /Spl/T,P,Sig,Xt,Dpwe
  Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
  Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
  Save /Controle/,/Deri/

```

```

C:::::Calculo da funcao com inversao de laplace:::::
  If(Kf.LE.Ndp)Then
    CALL FLUXOC(X1,A,DPWF,DP,NP)
    Icont = Icont + 1
    Return
  Endif
  A1 = C3/X1
  If(Ml.Eq.N)Go to 9

```

```

CALL COEFFCND
9  If(Id.Eq.1) Go to 11
CALL CONSTCNP,A)
11 Continue
Sumr = 0.
Sumb1= 0.
Sumb2= 0.
Sumb3= 0.
Sumb4= 0.
Sumb5= 0.
Sumb6= 0.
Do 30 j = 1,N
Z = J * A1
Y = Dsqr(CZ)
Xs = Y* Alfa
CALL PDESTATICACA,NP,XS,Z,PLAP,PLAP1,PLAP2,PLAP3,
* PLAP4,PLAP5,PLAP6)
Sumr = Sumr + VC(j)*Plap
Sumb1= Sumb1+ VC(j)*Plap1
Sumb2= Sumb2+ VC(j)*Plap2
Sumb3= Sumb3+ VC(j)*Plap3
Sumb4= Sumb4+ VC(j)*Plap4
Sumb5= Sumb5+ VC(j)*Plap5
30 Sumb6= Sumb6+ VC(j)*Plap6
Dpwf = Sumr * A1
Write(*,*)(X1/3600.),Dpwf*14.7
Dp(1)= Sumb1*A1
Dp(2)= Sumb2*A1
Dp(3)= Sumb3*A1
Dp(4)= Sumb4*A1
Dp(5)= Sumb5*A1
Dp(6)= Sumb6*A1
Icont = Icont + 1
If(Icont.Eq.Ndx) Then
Id = 0
Icont = 0
Endif
Return
End

C
SUBROUTINE CONSTCNP,A)
Implicit Real*8 (a-h,o-z)
Dimension AC(Np)
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
Save /Deri/
Gama = Dsqr(CA(1))
Alfa = C1/Gama
Cte = 1./(C2 * AC(1))

```

```

Aux12 = (AC(4))* Cte
Aux13 = (AC(5))* Cte
Aux14 = Aux13-Aux12
Aux20 = -Aux14/AC(1)
Return
End

```

C

```

SUBROUTINE PDFLUXOCA,ZE,NP,CI,CIDK,CIOS,CIFI,CIPOD
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Coeff,S18acf,S18adf,Mqbs,Cinteg
Dimension AC(Np),VC(20),TC(50),PC(50),Sig(100),Xt(100),Dpwe(100)
Real*8 Pwf(50),Dk(50),Ds(50),Dpi(50),Dpcf(50),Dppo(50),A2(50)
Real*8 As(4),Bs(4),Csw(4),Dsp(4),Es(4),Fs(4)
Common /Lpl/V,Ml
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Controle/Id,Icont
Common /Spl/T,P,Sig,Xt,Dpwe
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
Save /Controle/,/Deri/,As,Bs,Csw,Dsp,Es,Fs
If(Id.Eq.1) Go to 45
Aux4 = C2*AC(1)/AC(5)
Pwf(1) = PC(1)
Dk(1) = 0.
Ds(1) = 0.
Dpi(1) = 0.
Dpcf(1) = 0.
Dppo(1) = 1.
Do 40 I = 2,Nx
A2(i) = C3/TC(i)
Sumb0 = 0.
Sumb1 = 0.
Sumb2 = 0.
Sumb3 = 0.
Sumb4 = 0.
Sumb5 = 0.
Do 30 J = 1,N
Z = J * A2(i)
Y = Dsqrt(Z)
X = Y * Alfa
Bk0 = S18acf(X,Ifail)
Bk1 = S18adf(X,Ifail)
Zi = 1./Z
Aux5 = Bk0/Bk1
Aux1 = AC(2) + Aux5/X
Aux2 = Aux4*AC(3)*Zi
Aux3 = AC(6)*Aux1 + Aux2
Aux6 = 1.-Aux5*Aux5
Aux7 = Aux6/(2.*AC(1))

```



```

Aux8 = Z * Aux1 + Aux4
Aux8i = 1./Aux8
Aux8qi = Aux8i * Aux8i
Pressa = Aux3 * Aux8i
Derk = (C2/AC5) * (AC3 - AC6) * (Aux1 - AC1) * Aux7 * Aux8qi
Dersw = Aux4 * (AC6 - AC3) * Aux8qi
Derpi = Aux4 * Zi * Aux8i
Dercf = Aux1 / AC5 * (AC6) * Aux4 - Z * Aux2 * Aux8qi
Derpo = Aux1 * Aux8i
Sumb0 = Sumb0 + VC(j) * Pressa
Sumb1 = Sumb1 + VC(j) * Derk
Sumb2 = Sumb2 + VC(j) * Dersw
Sumb3 = Sumb3 + VC(j) * Derpi
Sumb4 = Sumb4 + VC(j) * Dercf
30 Sumb5 = Sumb5 + VC(j) * Derpo
Pwf(i) = Sumb0 * A2(i)
Dk(i) = Sumb1 * A2(i)
Ds(i) = Sumb2 * A2(i)
Dpi(i) = Sumb3 * A2(i)
Dpcf(i) = Sumb4 * A2(i)
40 Dppo(i) = Sumb5 * A2(i)

```

```

C
CALL QMBST, PWF, ASD
CALL QMBST, DK, BSD
CALL QMBST, DS, CSW
CALL QMBST, DPI, DSP
CALL QMBST, DPCF, ESD
CALL QMBST, DPPO, FSD
Id = 1
45 CALL CINTEGZE, CI, T, ASD
CALL CINTEGZE, CIDK, T, BSD
CALL CINTEGZE, CIOS, T, CSW
CALL CINTEGZE, CIPI, T, DSP
CALL CINTEGZE, CICF, T, ESD
CALL CINTEGZE, CIPO, T, FSD
Return
End

```

```

C
SUBROUTINE PDESTATICACA, NP, XS, Z, PLAPR, PLAP1, PLAP2, PLAP3, PLAP4,
* PLAP5, PLAP6)
Implicit Real*8(a-h,o-z)
Real*8 A(Np), TC(50), PC(50), Sig(100), Xt(100), Dpwe(100)
Common /Reser/ C1, C2, C3
Common /Spl/ T, P, Sig, Xt, Dpwe
Common /Pontos/ N, Ndp, Nx, Nde, Ndx
Common /Deri/ Gama, Alfa, Aux12, Aux13, Aux14, Aux20
Common /Pvt/ Ct, Phi, Visc, Po, Pff, Th, Rw, PI, Cs, Cf, Pk, S, Pe
CALL PDFLUXOCA, Z, NP, CI, CIDK, CIOS, CIPI, CICF, CIPO
Bk0 = S18ACFC(Xs, IFAIL)
Bk1 = S18ADFC(Xs, IFAIL)

```

```

B = Bk0/Bk1
Zi = 1./Z
Aux10 = B/Xs
Aux11 = 1./(AC2) + Aux10)
Aux11q = Aux11*Aux11
Aux15 = Pff*Dexp(-T(Nx)*Z)
Aux16 = (AC(3)*Zi)*Aux11 - Aux14*(Z*CI + Aux15) + AC(6)*Aux13
Aux17 = Aux11 + Z*Aux12
Aux17i = 1./Aux17
Aux17qi = Aux17i*Aux17i
Aux18 = 1. - B*B
Aux19 = Aux18/(2.*AC(1))
Daux16 = (-AC(3)*Aux19*Aux11q*Zi) -Z*(Ci*Aux20 + Cidk*Aux14)
* -Aux15*Aux20 - AC(6)*Aux13/AC(1)
Daux17 = -Z*Aux12/AC(1) - Aux19*Aux11q
Aux = Aux12/AC(4)
Plapr = Aux16*Aux17i
Plap1 = (Aux17*Daux16 - Aux16*Daux17)*Aux17qi
Plap2 = (Aux11q*(Aux16-AC(3)*Zi*Aux17) -Z*Cios*Aux14*Aux17)*Aux17qi
Plap3 = (Aux11*Zi - Z*Cipi*Aux14)*Aux17i
Plap4 = Aux*(Aux17*(Z*CI+Aux15) -Z*Aux16)*Aux17qi
Plap5 = (Aux*(AC(6) -Aux15 -Z*Ci) -Z*Cicf*Aux14)*Aux17i
Plap6 = (Aux13 -Z*Cipo*Aux14)*Aux17i
Return
End

```

C

```

SUBROUTINE FLUXOCX1,A,DPWF,DP,NP)
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Coeff,S18acf,S18adf
Dimension AC(Np),Dp(Np),VC(20)
Common /Lpl/V,Ml
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe

```

C.....Calculo da funcao com inversao de laplace.....

```

Gama = Dsqrt(AC(1))
Alfa = C1/Gama
Aux4 = C2*AC(1)/AC(5)
A1 = C3/X1
If(Ml.Eq.N)Go to 11
CALL COEFFCND
11 Sumr = 0.
Sumb1= 0.
Sumb2= 0.
Sumb3= 0.
Sumb5= 0.
Sumb6= 0.
Do 30 j = 1,N
Z = J * A1
Y = Dsqrt(Z)

```

```

Xs = Y* Alfa
Bk0 = S18ACF(Xs,IFAIL)
Bk1 = S18ADF(Xs,IFAIL)
Zi = 1./Z
Aux5 = Bk0/Bk1
Aux1 = AC(2) + Aux5/Xs
Aux2 = Aux4*AC(3)*Zi
Aux3 = AC(6)*Aux1 + Aux2
Aux6 = 1.-Aux5*Aux5
Aux7 = Aux6/(2.*AC(1))
Aux8 = Z*Aux1 + Aux4
Aux8i = 1./Aux8
Aux8qi = Aux8i*Aux8i
Pressao = Aux3*Aux8i
Derk = C2/AC(5)*(AC(3)-AC(6))*(Aux1-AC(1)*Aux7)*Aux8qi
Dersw = Aux4*(AC(6)-AC(3))*Aux8qi
Derpi = Aux4*Zi*Aux8i
Dercf = Aux1/AC(5)*(AC(6)*Aux4-Z*Aux2)*Aux8qi
Derpo = Aux1*Aux8i
Sumr = Sumr + VC(j)*Pressao
Sumb1 = Sumb1 + VC(j)*Derk
Sumb2 = Sumb2 + VC(j)*Dersw
Sumb3 = Sumb3 + VC(j)*Derpi
Sumb5 = Sumb5 + VC(j)*Dercf
Sumb6 = Sumb6 + VC(j)*Derpo
Dpwf = Sumr*A1
Write(*,*)(X1/3600.),Dpwf*14.7
Dp(1) = Sumb1*A1
Dp(2) = Sumb2*A1
Dp(3) = Sumb3*A1
Dp(4) = 0.
Dp(5) = Sumb5*A1
Dp(6) = Sumb6*A1
Return
End

```

```

SUBROUTINE CINTEG(Z,CI,X,A)
Implicit real*8 (a-h,o-z)
Real*8 X(Nx),AC(0:3)
Common/Vetor2/C(0:10)
Common/Geral/Np,Ns,H
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Tp = X(NP)
Hq = H*H
Hc = H*H*H
Hci = 1./Hc
Zi = 1./Z
Zq = Z*Z
Zqi = 1./Zq
Zc = Zq*Z

```

```

Zci = 1./Zc
C1 = 6.*Zqi*Zqi
Hg = H+Zi
Hgc = Hg*Hg*Hg
H1 = (H-Zi)
H1c= H1*H1*H1
C1 = 0.
T1 = 0
T2 = Tp
Dt = T2-T1
A1 = Dt-Zi
A1q = A1*A1
A1c = A1q*A1
A2 = Hc + 3.*H*Zqi - 9.*Dt*Zqi + 15.*Zci -3.*A1*(A1q-A1*H-Hq)
A3 = H1c + 3.*H*Zqi + 19.*Zci
B1 = Dt+Zi
B1q= B1*B1
B1c= B1q*B1
B2 = Hc + 3.*H*Zqi - 9.*Dt*Zqi - 15.*Zci - 3.*B1*(B1q-B1*H-Hq)
B3 = Hgc + 3.*H*Zqi - 19.*Zci
E1 = Dexp(-Z*T2)
E2 = Dexp(Z*Dt)*Zi
E3 = Dexp(-Z*T1)
E4 = -Dexp(-Z*Dt)*Zi
Q1 = E1*(E2*(A1c + 3.*Dt*Zqi - 5.*Zci) + C1)
Q2 = E1*(E2*A2 -A3*Zi)
Q3 = E3*(E4*B2 +B3*Zi)
Q4 = E3*(E4*(B1c+3.*Dt*Zqi+5.*Zci)+C1)
CI = CI + Q1*AC(0)+Q2*AC(1)+Q3*AC(2)+Q4*AC(3)
CI = CI*Hci
Return
End

```

C

```

BLOCK DATA COM
Implicit Real*8 (a-h,o-z)
Common /Controle/Id,Icont
Data Id,Icont /0,0/
End

```

Apêndice G.4 - Otimização em um ciclo completo de um DST para determinação de k , S , p_o e p_i .

PROGRAMA AUTO

AUTOR : José oliveira VIDAL (SET/88)

OBJETIVO :

Calcular os parâmetros k , S , P_i e P_o através do ajuste automatico em poços não surgentes de um ciclo completo

METODO UTILIZADO :

Regressão não linear de Levenberg-Marquardt

USO :

- i) Rodar programa em fortran (com co-processador 8087)
- ii) Nome do programa : Auto
- iii) Arquivo de dados : Dados.dat ou outro nome sem extensão

PARÂMETROS DE ENTRADA :

LEITURA DO TESTE

NLFF : Número de pontos lidos no fluxo (inclusive em $t=0$).
 TIME,PWF : Pares de pontos lidos no fluxo (inclusive em $t=0$).
 NLE : Número de pontos lidos na estática (sem $Dt = 0$)
 X,PWS : Pares de pontos lidos na estática (sem $Dt = 0$)
 CCM : Constante do registrador [psig/pol] ou [psig/mm]
 CCA : Constante do registrador [psig]
 CR : Constante do relógio [pol/h] ou [mm/h]

LEITURA PVT E DO POÇO

CT : Compressibilidade total [psig-1]
 PHI : Porosidade [Fração 0-1]
 VISC : Viscosidade [cp]
 TH : Espessura do reservatório ou net pay [m]
 RW : Raio do poço [pol = polegadas]
 PP : Profundidade vertical do packer [m]
 FP : Profundidade vertical do Fundo poço [m]
 CW : Compressibilidade do fluido produzido [psig-1]
 CDP : Capacidade da coluna de teste [m3/m3]
 DO : Densidade média do fluido produzido [água = 1]

PARAMETROS DE SAIDA :

k : Permeabilidade do reservatório [darcy]
 S : skin ou efeito de película []
 P_i : Pressão estática do reservatório [atm]
 P_o : Pressão de abertura ou de fluxo inicial [atm]
 C_f : Coeficiente de estocagem de fluxo (fixo) [atm/cm3]
 C_s : Coeficiente de estocagem estática (fixo) [atm/cm3]

PROGRAM AUTO

```

C .....
C ESTE PROGRAMA PRINCIPAL ABRE OS ARQUIVOS DE ENTRADA E SAIDA, DEFINE.
C OS VETORES DE TRABALHO E LE ARQUIVO DE DADOS DO FLUXO + ESTATICA,
C E CHAMA AS ROTINAS AUXILIARES DE OTIMIZACAO.
C ESTA VERSAO CONSIDERA O CASO DO SKIN POSITIVO E/OU NEGATIVO.
C .....
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*8 TIME(50),PWF(50),SIGF(50)
      REAL*8 X(50),PWS(50),SIGE(50),XT(100),DPWE(100),SIG(100),VC(20)
      CHARACTER*30 DADOS
      COMMON /LPL/ V,ML
      COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
      COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
      COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
C: ::: Parametros para o calculo dos coeficientes de Stehfest :::::::::::
      ML = 1
      N = 20
C: ::: Arquivos de entrada e saida de dados ::::::::::::::::::::::::::::
      CALL LIMPA
      WRITE(*, '(A)') ENTRE NOME DO ARQUIVO DE DADOS PRESSAO E PVT:
      READ(*, '(BN,A30)') DADOS
      IF(DADOS.EQ.' ') DADOS = 'DADOS'
      OPEN(1,FILE = DADOS,STATUS = 'OLD')
      OPEN(2,FILE = 'AUTO.DAT')
C: ::: Dados relativos a leitura do fluxo e estatica ::::::::::::::::::::::
      READ(1,10) NLFF
      READ(1,20) TEMPO,PO
      NLF = NLFF -1
      READ(1,20)(TIME(I),PWF(I),I=1,NLF)
      READ(1,10) NLE
      IF(NLE.EQ.0) GO TO 5
      READ(1,20)(X(J),PWS(J),J=1,NLE)
10      FORMAT(I2)
20      FORMAT(2F15.0)
5       READ(1,30) CCM
      READ(1,30) CCA
      READ(1,30) CR
30      FORMAT(F15.0)
      PO = PO*CCM + CCA
      DO 15 I = 1,NLF
      TIME(I) = TIME(I)*CR
15      PWF(I) = PWF(I)*CCM + CCA
      DO 25 I = 1,NLE
      X(I) = X(I)*CR
25      PWS(I)=PWS(I)*CCM + CCA
      NDP = NLF
      NDE = NLE
      NX = NDP + 1
      NDX = NDP + NDE
C
      CALL DSTPCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE,SIGF,SIGE,SIG)
      CLOSE(1)
      CLOSE(2)

```

```

CLOSE(3)
END

C
SUBROUTINE DSTPCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE,SIGF,SIGE,SIG)
C .....
C  ESTA SUBROTINA PASSA TODOS OS DADOS DE ENTRADA PARA O SISTEMA CGS.
C  CALCULA OS PARAMETROS INICIAIS E PASSA/RECEBE DADOS DA OTIMIZACAO
C .....
  IMPLICIT REAL*8CA-H,O-Z
  EXTERNAL MRQMIN,FUNCS,PIKSR2
  DIMENSION SWC(5),CHIC(5)
  DIMENSION AC(6),LISTAC(6),COVAR(6,6),ALFAC(6,6)
  REAL*8 TC(50),PC(50),TIME(NDP),PWF(NDP),SIGF(NDP)
  REAL*8 XC(NDE),PWSC(NDE),SIGEC(NDE),DPWEC(NDX),XTC(NDX),SIGC(NDX),VC(20)
  COMMON /LPL/ V,ML
  COMMON /SPL/T,P
  COMMON /RESER/C1,C2,C3
  COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
  COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
  COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PPF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
  COMMON /VA/A
  SAVE /VA/
C:::: Chamam-se todos os dados do fluxo, estatica e Pvt (Via Common) ::
  CALL DADOSCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE,SIGF,SIGE,SIG)
C:::: Regressao nao linear nos pontos somente do fluxo ::::::::::::::::::::
  IFCNDE.EQ.0) GO TO 5
C:::: Estima-se pelo metodo cartesiano K e Pi como valores iniciais :::
  CAP = PI*RP*RP
  J = NDX - 5
  DT = TC(NX)*(1./XTC(NDX)-1./XTC(J))
  DP = (DPWEC(NDX)-DPWEC(J))*14.7
  DC = -DP/DT
  DPF = (PWF(NDP)-PWF(1))
  DH = DPF/GRAD
  DV = DH*CAP
  DTF = (TIME(NDP)-TIME(1))/86400.
  QW = DV*6.29D-06/DTF
  PKC = 2.151888*QW*VISC/(DC*TH)
  FC1 = TC(NX)/XTC(NDX)
  PEI = DPWEC(NDX)*14.7 + DC*FC1
  PEI = PEI/14.7
C:::: Inicia-se alguns parametros para o processo de otimizacao ::::::::::
  NP = 6
  NCA = 6
  ALAMDA = -1.
  CHISQ1 = 0.
C:::: Busca unidimensional para definir o valor do skin ::::::::::::::::::::
  AC(1) = PKC
  AC(3) = PEI
  AC(4) = CS
  AC(5) = CF
  AC(6) = PO
  SWMAX = 5.

```

```

SWMIN = -5.
DSW = SWMAX-SWMIN
NB = 5
DO 20 I = 1,NB+1
SWC(I) = SWMIN + DSW*(I-1)/NB
AC(2) = SWC(1)
SUMF = 0.
DO 30 KF = 1,NDP
CALL FLUXOCTIME(KF),A,DPWF,DP,NP)
RES = PWF(KF)-DPWF
30 SUMF = SUMF + RES*RES
CHI(I) = SUMF
20 WRITE(*,*) SWC(I),CHI(I)
CALL PIKSR2(NB,CHI,SW)
S = SWC(1)
WRITE(*,*)'VALOR DO SKIN QUASE OTIMO = ',S
C:,,, Primeira Regressao(Somente no fluxo) para determinar K,S e Po :,,
AC(1) = PKC
AC(2) = S
AC(3) = PEI
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
MFIT = 3
LISTAC(1) = 1
LISTAC(2) = 2
LISTAC(3) = 6
M = 0
ICONTA=0
WRITE(*,*) 'VALORES INICIAIS E ITERACOES DE K,S,Pi,CF e PO SAO: '
WRITE(*,40)0,(AC(I),I=1,NP)
15 CALL MRQMINCTIME,PWF,SIGF,NDP,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
*,FUNCS,ALAMDA,MD
WRITE(*,40)0,(AC(I),I=1,NP),CHISQ
CALL IMPRESSACM,A,NP,CHISQ
IF(CHISQ-CHISQ1).GE.0.) THEN
CHISQ1 = CHISQ
ICONTA = ICONTA + 1
IF(ICONTA.GT.5.AND.(CHISQ-CHISQ1).LT.1.D-05) GO TO 25
GO TO 15
ENDIF
ICONTA = 0
25 IF(DABS(CHISQ-CHISQ1).LE.1.0D-01) GO TO 35
CHISQ1 = CHISQ
GO TO 15
C:,,, Segunda Regressao(So na estatica) para determinar K,S e Pi :,,,,:
35 PK= AC(1)
S = AC(2)
IF(AC(6).LT.0) THEN
AC(6) = 0.
ENDIF
PO= AC(6)
PC(1)=PO

```



```

CHISQ1 = 0.
ALAMDA = -1.
AC(1) = PK
AC(2) = S
AC(3) = PEI
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
MFIT = 3
LISTAC(1) = 1
LISTAC(2) = 2
LISTAC(3) = 3
ICONTA = 0
M = 1
WRITE(*,*) 'VALORES INIC. E ITERACOES DE K,S,PI,CS,CF E PO SAO: '
WRITE(*,40)1,(ACI),I=1,NP)
45 CALL MRQMINCX,PWS,SIGE,NDE,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
*,FUNCS,ALAMDA,MD
WRITE(*,40)1,(ACI),I=1,NP),CHISQ
CALL IMPRESSA(M,A,NP,CHISQ)
IF((CHISQ-CHISQ1).GE.0.) THEN
CHISQ1 = CHISQ
ICONTA = ICONTA + 1
IF(ICONTA.GT.3.AND.(CHISQ-CHISQ1).LT.1.D-05) GO TO 55
GO TO 45
ENDIF
ICONTA = 0
55 IF((DABS((CHISQ1-CHISQ)/CHISQ1)).LE.1.0D-01) GO TO 65
CHISQ1 = CHISQ
GO TO 45
C::: Terceira Regressao(Somente no fluxo) para determinar K,S e Po ::
65 PE=AC(3)
ALAMDA = -1.
CHISQ1 = 0.
AC(1) = PK
AC(2) = S
AC(3) = PE
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
MFIT = 3
LISTAC(1) = 1
LISTAC(2) = 2
LISTAC(3) = 6
M = 0
ICONTA= 0
WRITE(*,*) 'Valores iniciais e iteracoes de K,S,PI,Cf e Po sao: '
WRITE(*,40)0,(ACI),I=1,NP)
75 CALL MRQMINCTIME,PWF,SIGF,NDP,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
*,FUNCS,ALAMDA,MD
WRITE(*,40)0,(ACI),I=1,NP),CHISQ
CALL IMPRESSA(M,A,NP,CHISQ)
IF((CHISQ-CHISQ1).GE.0.) THEN

```

```

CHISQ1 = CHISQ
ICONTA = ICONTA + 1
IF(ICONTA.GT.5.AND.(CHISQ-CHISQ1).LT.1.D-05) GO TO 85
GO TO 75
ENDIF
ICONTA = 0
85 IF((DABS(CHISQ-CHISQ1)).LE.1.0D-1) GO TO 95
CHISQ1 = CHISQ
GO TO 75
C::: Quarta Regressao(no fluxo+estatica) para determinar K,S,Pi :::::
95 PK=AC(1)
S =AC(2)
IF(AC(6).LT.0) THEN
AC(6) = 0.
ENDIF
PO=AC(6)
PC(1)=PO
CHISQ1 = 0.
ALAMDA=-1.
AC(1) = PK
AC(2) = S
AC(3) = PE
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
MFIT = 3
LISTA(1) = 1
LISTA(2) = 2
LISTA(3) = 3
WRITE(*,*) 'VALORES INIC. E ITERACOES DE K,S,Pi,CS,CF E PO SAO: '
WRITE(*,40)2,(AC(I),I=1,NP)
40 FORMAT(12,7(D10.4))
ICONTA = 0
M = 2
105 CALL MRQMIN(XT,DPWE,SIG,NDX,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
*,FUNCS,ALAMDA,MD
WRITE(*,40)2,(AC(I),I=1,NP),CHISQ
CALL IMPRESSA(M,A,NP,CHISQ)
IF((CHISQ-CHISQ1).GE.0.) THEN
CHISQ1 = CHISQ
ICONTA = ICONTA + 1
IF(ICONTA.GT.3.AND.(CHISQ-CHISQ1).LT.1.D-05) GO TO 115
GO TO 105
ENDIF
ICONTA = 0
115 IF((DABS((CHISQ1-CHISQ)/CHISQ1)).LE.1.0D-2) GO TO 125
CHISQ1 = CHISQ
GO TO 105
C::: Calculo e Impressao dos valores finais otimizados K,S,Po,Pi :::::
125 WRITE(2,135)
135 FORMAT(5X,'VALORES FINAIS DE K S Pi CS CF E PO APOS A OTIMIZACAO')
WRITE(2,145)M,(AC(I),I=1,NP)
145 FORMAT(12,1X,6(2X,D10.4))

```

```

ALAMDA = 0.
SSR = 0.
DO 50 I = 1, NDX
CALL FUNCSCI,XT(I),A,DPWS,DP,NP,2)
SSR = SSR + (DPWE(I) - DPWS)*(DPWE(I) - DPWS)
50 WRITE(2,60)((XT(I))/3600.), (DPWE(I)*14.7), (DPWS*14.7),
*(DPWE(I)-DPWS)*14.7,SIG(I)
60 FORMAT(3X,F10.3,4(3X,F12.3))
WRITE(2,*)'VALOR DA FUNCAO OBJETIVO NA ULTIMA ITERACAO',SSR
CALL MROMINCXT,DPWE,SIG,NDX,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
*,FUNCS,ALAMDA,MD
C::::: Estudo estatistico dos valores finais dos parametros ::::::::::::::
EMS = SSR/(NDX - 3)
VARK = DSQRT(EMS*COVAR(1,1))
STUD = TINVER(NDX-3)
PKINF= AC(1)-STUD*VARK
PKSUP= AC(1)+STUD*VARK
WRITE(2,*)'(PKINF,PKSUP)',PKINF,PKSUP
VARS = DSQRT(EMS*COVAR(2,2))
SKINF= AC(2)-STUD*VARS
SKSUP= AC(2)+STUD*VARS
WRITE(2,*)'(SKINF,SKSUP)',SKINF,SKSUP
VARPI= DSQRT(EMS*COVAR(3,3))
PIINF= AC(3)-STUD*VARPI
PISUP= AC(3)+STUD*VARPI
WRITE(2,*)'(PIINF,PISUP)',PIINF,PISUP
RETURN
C::::: Final da regressao nos dados completos do Dst ::::::::::::::
C::::: Regressao ou analise so do slug teste (se for o caso) ::::::::::::::
5 WRITE(*,'(A)') ENTRE VALOR PROVAVEL DA PERMEABILIDADE [Md] :
READ(*,'(BN,F10.3)')PKC
WRITE(*,'(A)') PRESSAO ESTATICA PROVAVEL EM [ Psig ] :
READ(*,'(BN,F10.3)')PEI
NP = 6
NCA = 6
ALAMDA = -1.
CHISQ1 = 0.
AC(1) = PKC/1000.
AC(3) = PEI/14.7
AC(4) = 0.
AC(5) = CF
AC(6) = PO
SWMAX = 5.
SWMIN = -5.
DSW = SWMAX-SWMIN
NB = 6
DO 70 I = 1,NB+1
SW(I) = SWMIN + DSW*(I-1)/NB
AC(2) = SW(1)
SUMF = 0.
DO 80 KF = 1,NDP
CALL FLUXO(TIME(KF),A,DPWF,DP,NP)
RES = PWF(KF)-DPWF

```

```

80  SUMF = SUMF + RES*RES
    CHIC(I) = SUMF
70  WRITE(*,*) SW(I),CHIC(I)
    CALL PIKSR2(NB,CHI,SW)
    S = SW(I)
    WRITE(*,*) 'VALOR DO SKIN QUASE OTIMO = ',S
    AC(2) = S
    MFIT = 3
    LISTAC(1) = 1
    LISTAC(2) = 2
    LISTAC(3) = 3
    M = 0
    ICONT=0
    WRITE(*,*) 'VALORES INICIAIS E ITERACOES DE K,S,P1,CF E PO SAO: '
    WRITE(*,40)O,(AC(I),I=1,NP)
155  CALL MROMINCTIME,PWF,SIGF,NDP,A,NP,LISTA,MFIT,COVAR,ALFA,NCA,CHISQ
    *,FUNCS,ALAMDA,MD
    WRITE(*,40)O,(AC(I),I=1,NP),CHISQ
    CALL IMPRESSAC(M,A,NP,CHISQ)
    IF((CHISQ-CHISQ1).GE.0.) THEN
        CHISQ1 = CHISQ
        ICONT = ICONT + 1
        IF(ICONT.GT.5.AND.(CHISQ-CHISQ1).LT.1.D-10) GO TO 165
        GO TO 155
    ENDIF
    ICONT = 0
165  IF(DABS(CHISQ-CHISQ1).LE.1.0D-01) GO TO 175
    CHISQ1 = CHISQ
    GO TO 155
175  WRITE(2,90)
90  FORMAT(5X,'VALORES FINAIS DE K S P1 CF E PO APOS A OTIMIZACAO')
    WRITE(2,100)M,(AC(I),I=1,NP)
100  FORMAT(12,1X,5(2X,D10.4))
    ALAMDA = 0.
    SSR = 0.
    DO 110 I = 1, NDX
        CALL FUNCS(I,XT(I),A,DPWS,DP,NP,O)
        SSR = SSR + (DPWE(I) - DPWS)*(DPWE(I) - DPWS)
110  WRITE(2,120)((XT(I))/3600.),(DPWE(I)*14.7),(DPWS*14.7),
    *(DPWE(I)-DPWS)*14.7,SIG(I)
120  FORMAT(3X,F10.3,4(3X,F12.3))
    RETURN
    END
C.....
C  Rotina de impressao dos parametros calculados nas iteracoes
C.....
SUBROUTINE IMPRESSAC(M,A,NP,CHISQ)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 AC(NP)
IF(M.EQ.0) THEN
    WRITE(2,10) M,(AC(I),I = 1,NP),CHISQ
    RETURN
ENDIF

```

```

IFCM.EQ.1) THEN
WRITE(2,10)M,(ACID),I = 1,NP),CHISQ
RETURN
ENDIF
IFCM.EQ.2) THEN
WRITE(2,10) M,(ACID),I = 1,NP),CHISQ
10 FORMAT(I2,7(1X,E10.4))
ENDIF
RETURN
END

C.....
C Transformacao de todos os dados de Entrada para unidades Darcy .
C.....
SUBROUTINE DADOS(TIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE,SIGF,SIGE,SIG)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 TIME(NDP),PWF(NDP),SIGF(NDP),TC(50),PC(50)
REAL*8 X(NDE),PWS(NDE),SIGE(NDE),DPWE(NDX),XT(NDX),SIG(NDX),VC(20)
COMMON/LPL/V,ML
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,Pe
C::: Calculo dos parametros auxiliares PI e CPA ::::::::::::::::::::
PI = 4.*DATAN(1.DO)
CPA= 1./14.7
C::: Outros dados(Unidades Americanas e SI ::::::::::::::::::::
C::: Ct,Cw(Psi-1);Th,Pp,Fp(m);Rw(pol);Cdp(m3/m3);Do(),Phi(decimal) ::
READ(1,10)CT
READ(1,10)PHI
READ(1,10)VISC
READ(1,10)TH
READ(1,10)RW
READ(1,10)PP
READ(1,10)FP
READ(1,10)CW
READ(1,10)CDP
READ(1,10)DO
10 FORMAT(F25.0)
C::: Transformacao dados fluido e reservatorio para o sistema DARCY :
RP = DSQRT(CDP/PI)*100.
GRAD=DO*0.000966397
CF = (PI*RP*RP)/GRAD
CW = CW*14.7
RW = RW*2.54
VW = PI*RW*RW*(FP-PP)*100.
CS = CW*VW
CT = CT*14.7
PO = PO*CPA
PE = PWS(NDE)*CPA
PFF = PWF(NDP)*CPA
TH = TH*100.
C::: Calculo dos parametros auxiliares C2 e C3 ::::::::::::::::::::

```

```

C2 = 2.*PI*TH/VISC
C3 = DLOG(2.D0)
C:::: Impressao dos parametros ::::::::::::::::::::::::::::::
WRITE(2,20)
20  FORMAT(/,25X,'DADOS DE FLUIDO E ROCHA',/,3X,'COMPRESS.(1/atm)',
*3X,'POROSIDADE',3X,'VISC(cp)',4X,'TH(cm)',3X,'RW(cm)',/)
WRITE(2,40)CT,PHI,VISC,TH,RW
40  FORMAT(1X,E10.3,10X,F8.3,7X,F6.3,5X,F8.2,3X,F8.3)
C:::: Transformacao do Tempo e pressao para unidades Darcy ::::::::::
TC(1) = 0.
PC(1) = PO
DO 50 I = 1,NDP
    K = I + 1
    TC(K) = TIME(I)*3600.
    TIME(I) = TC(K)
    XT(I) = TC(K)
    PC(K) = PWF(I)/14.7
    PWF(I) = PC(K)
    SIG(I) = Pff/PC(K)
    SIGF(I) = SIG(I)
50  DPWF(I) = PC(K)
DO 60 K = NX,NDX
    IE = K-NDP
    DPWE(K) = PWSC(IE)/14.7
    PWSC(IE) = DPWE(K)
    XT(K) = X(IE)*3600. + TC(NX)
    X(IE) = XT(K)
    SIG(K) = PE/PWSC(IE)
60  SIGE(IE) = SIG(K)
RETURN
END
SUBROUTINE FUNCSCKF,X1,A,DPWF,DP,NP,MPER)
C.....
C  Esta rotina calcula os valores de pressao e gradiente de pressao .
C  em relacao aos parametros para os periodos de fluxo e/ou estatica .
C.....
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 TC(50),PC(50)
DIMENSION AC(NP),DP(NP),VC(20)
EXTERNAL COEFF
COMMON /LPL/V,ML
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /CONTROLE/ID,ICONT
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /DERI/GAMA,ALFA,AUX12,AUX13,AUX14,AUX20,CTE
SAVE /CONTROLE/,/DERI/
IF(AC(1).LT.0)THEN
    AC(1)=DABSC(1)
    WRITE(*,*)'Convergencia dificil devido dados de entrada'
ENDIF
IF(MPER.EQ.1) GO TO 7
IF(MPER.EQ.2.AND.KF.GT.NDP) GO TO 7

```

```

IFCKF.LE. NDP. AND. MPER. EQ. 0. OR. MPER. EQ. 2) THEN
CALL FLUXOCX1, A, DPWF, DP, NP)
IFCMPER. EQ. 2) THEN
ICONT = ICONT + 1
RETURN
ENDIF
IFCMPER. EQ. 0. AND. KF. EQ. NDP) THEN
ICONT = 0
ID = 0
RETURN
ENDIF
IFCMPER. EQ. 0. AND. KF. LT. NDP) THEN
ICONT = ICONT + 1
RETURN
ENDIF
ENDIF
7  A1 = C3/X1
IFCML. EQ. N) GO TO 9
CALL COEFFC(N)
9  IF(ID. EQ. 1) GO TO 11
CALL CONSTC(NP, A)
11 CONTINUE
SUMR = 0.
SUMB1 = 0.
SUMB2 = 0.
SUMB3 = 0.
SUMB4 = 0.
SUMB5 = 0.
SUMB6 = 0.
DO 30 J = 1, N
Z = J * A1
Y = DSQRT(Z)
XS = Y * ALFA
CALL PDESTATICACA, NP, XS, Z, PLAPR, PLAP1, PLAP2, PLAP3,
* PLAP4, PLAP5, PLAP6)
SUMR = SUMR + VC(J)*PLAPR
SUMB1 = SUMB1 + VC(J)*PLAP1
SUMB2 = SUMB2 + VC(J)*PLAP2
SUMB3 = SUMB3 + VC(J)*PLAP3
SUMB4 = SUMB4 + VC(J)*PLAP4
SUMB5 = SUMB5 + VC(J)*PLAP5
30 SUMB6 = SUMB6 + VC(J)*PLAP6
DPWF = SUMR * A1
DPC1) = SUMB1 * A1
DPC2) = SUMB2 * A1
DPC3) = SUMB3 * A1
DPC4) = SUMB4 * A1
DPC5) = SUMB5 * A1
DPC6) = SUMB6 * A1
IFCMPER. EQ. 1. AND. ICONT. LT. (NDE-1)) THEN
ICONT=ICONT+1
RETURN
ENDIF

```

```

IFCMPER.EQ.1.AND.ICONT.EQ.(NDE-1)) THEN
ICONT=0
ID = 0
RETURN
ENDIF
IFCMPER.EQ.2.AND.ICONT.LT.(NDX-1)) THEN
ICONT = ICONT + 1
RETURN
ENDIF
IFCMPER.EQ.2.AND.ICONT.EQ.(NDX-1)) THEN
ID = 0
ICONT = 0
RETURN
ENDIF
END

```

C

```

SUBROUTINE CONSTCNP,A)

```

C

C
C Esta rotina calcula os valores de alguns parametros auxiliares da .
C estatica que sao usados varias vezes. .
C

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION ACNP)
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /DERI/GAMA,ALFA,AUX12,AUX13,AUX14,AUX20,CTE
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
SAVE /DERI/
GAMA = DSQRT(A(1))
IF(A(2).LT.0) THEN
RWA = RW*DEXP(-A(2))
C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RWA*RWA)
ELSE
C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RW*RW)
ENDIF
ALFA = C1/GAMA
CTE = 1./(C2 * A(1))
AUX12 = (A(4))* CTE
AUX13 = (A(5))* CTE
AUX14 = AUX13-AUX12
AUX20 = -AUX14/A(1)
RETURN
END

```

C

```

SUBROUTINE PDFLUXOCA,ZE,NP,CI,CIDK,CIOS,CIFI,CIPO)

```

C

C
C Esta rotina calcula os valores da integracao sobre o fluxo para .
C a pressao e para os gradientes de pressao. .
C

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL COEFF,S18ACF,S18ADF,QMBS
DIMENSION ACNP),VC(20),TC(50),PC(50)
REAL*8 ASC(0:3),BSC(0:3),CSWC(0:3),DSPC(0:3),ESCC(0:3),FSC(0:3)
REAL*8 DKC(50),DSC(50),DPI(50),DPCF(50),DPPOC(50),A2C(50)

```



```

COMMON /LPL/V,ML
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /CONTROLE/ID,I CONT
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /DERI/GAMA,ALFA,AUX12,AUX13,AUX14,AUX20,CTE
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
SAVE /CONTROLE/,/DERI/,AS,BS,CSW,DSP,ES,FS
IF (ID.EQ.1) GO TO 45
AUX4 = C2*AC(1)/AC(5)
PC(1) = AC(6)
DK(1) = 0.
DSC(1) = 0.
DPI(1) = 0.
DPCF(1) = 0.
DPPOC(1) = 1.
DO 40 I = 2,NX
A2(I) = C3/TC(I)
Sumb0 = 0.
SUMB1 = 0.
SUMB2 = 0.
SUMB3 = 0.
SUMB4 = 0.
SUMB5 = 0.
DO 30 J = 1,N
Z = J * A2(I)
Y = DSQRT(Z)
X = Y * ALFA
BK0 = S18ACF(X,IFALHA)
BK1 = S18ADF(X,IFALHA)
ZI = 1./Z
AUX5 = BK0/BK1
IF (AC(2).LT.0) THEN
AUX1 = AUX5/X
ELSE
AUX1 = AUX5/X + AC(2)
ENDIF
AUX2 = AUX4*AC(3)*ZI
AUX3 = AC(6)*AUX1 + AUX2
AUX6 = 1.-AUX5*AUX5
AUX7 = AUX6/(2.*AC(1))
AUX8 = Z * AUX1 + AUX4
AUX8I = 1./AUX8
AUX8QI = AUX8I*AUX8I
PRESSA = AUX3*AUX8I
DERK = (C2/AC(5))*(AC(3) - AC(6))*(AUX1 - AC(1)*AUX7)*AUX8QI
IF (AC(2).LT.0) THEN
DERSW = AUX4*AUX6*(AC(6) - AC(3))*AUX8QI
ELSE
DERSW = AUX4*(AC(6) - AC(3))*AUX8QI
ENDIF
DERPI = AUX4*ZI*AUX8I
DERCF = AUX1/AC(5)*(AC(6)*AUX4-Z*AUX2)*AUX8QI

```

```

DERPO = AUX1*AUX8I
Sumb0 = Sumb0 + VC(J)*PRESSA
SUMB1 = SUMB1 + VC(J)*DERK
SUMB2 = SUMB2 + VC(J)*DERSW
SUMB3 = SUMB3 + VC(J)*DERPI
SUMB4 = SUMB4 + VC(J)*DERCF
30 SUMB5 = SUMB5 + VC(J)*DERPO
P(I) = Sumb0 * A2(I)
DK(I) = SUMB1 * A2(I)
DS(I) = SUMB2 * A2(I)
DPI(I) = SUMB3 * A2(I)
DPCF(I) = SUMB4 * A2(I)
40 DPPO(I) = SUMB5 * A2(I)
C
CALL QMBSC(T,P,ASD)
CALL QMBSC(T,DK,BSD)
CALL QMBSC(T,DS,CSW)
CALL QMBSC(T,DPI,DSP)
CALL QMBSC(T,DPCF,ESD)
CALL QMBSC(T,DPPO,FSD)
ID = 1
45 CALL CINTEG(ZE,CI,T,ASD)
CALL CINTEG(ZE,CIDK,T,BSD)
CALL CINTEG(ZE,CIOS,T,CSW)
CALL CINTEG(ZE,CIPI,T,DSP)
CALL CINTEG(ZE,CICF,T,ESD)
CALL CINTEG(ZE,CIPO,T,FSD)
RETURN
END
C
SUBROUTINE PDESTATICACA(NP,XS,Z,PLAPR,PLAP1,PLAP2,PLAP3,PLAP4,
* PLAP5,PLAP6)
C.....
C Esta rotina calcula os valores de pressao estatica e os respecti-
C vos gradientes em relacao aos parametros.
C.....
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 ACNP),T(50),P(50)
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /DERI/GAMA,ALFA,AUX12,AUX13,AUX14,AUX20,CTE
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
CALL PDFLUXOCA,Z,NP,CI,CIDK,CIOS,CIPI,CICF,CIPO)
BK0 = S18ACF(XS,IFALHA)
BK1 = S18ADF(XS,IFALHA)
B = BK0/BK1
ZI = 1./Z
AUX10 = B/XS
IF(AC2).LT.0) THEN
AUX11 = 1./AUX10
ELSE
AUX11 = 1./(AUX10 + AC2))

```

```

ENDIF
AUX11Q = AUX11*AUX11
AUX15 = PFF*DEXPC(-TCNX)*Z)
AUX16 = (AC3)*ZI)*AUX11 - AUX14*(Z*CI + AUX15) + AC6)*AUX13
AUX17 = AUX11 + Z*AUX12
AUX17I = 1./AUX17
AUX17QI = AUX17I*AUX17I
AUX18 = 1. - B*B
AUX19 = AUX18/(2.*AC1)
DAUX16 = (-AC3)*AUX19*AUX11Q*ZI) -Z*(CI*AUX20 + CIDK*AUX14)
* -AUX15*AUX20 - AC6)*AUX13/AC1)
DAUX17 = -Z*AUX12/AC1) - AUX19*AUX11Q
PLAPR = AUX16*AUX17I
PLAP1 = (AUX17*DAUX16 - AUX16*DAUX17)*AUX17QI
IF(AC2).LT.0) THEN
PLAP2 = (AUX11Q*AUX18*(AUX16-AC3)*ZI*AUX17)-Z*CI*OS*AUX14*AUX17)*
* AUX17QI
ELSE
PLAP2 = (AUX11Q*(AUX16-AC3)*ZI*AUX17)-Z*CI*OS*AUX14*AUX17)*
* AUX17QI
ENDIF
PLAP3 = (AUX11*ZI - Z*CI*PI*AUX14)*AUX17I
PLAP4 = CTE*(AUX17*(Z*CI+AUX15)-Z*AUX16)*AUX17QI
PLAP5 = (CTE*(AC6)-AUX15-Z*CI)-Z*CI*CF*AUX14)*AUX17I
PLAP6 = (AUX13-Z*CI*PO*AUX14)*AUX17I
RETURN
END

```

C SUBROUTINE FLUXOCX1,A,DPWF,DP,NP)

C
C Esta rotina calcula os valores da pressao no periodo de fluxo e
C dos respectivos gradientes com relacao aos parametros.
C

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL COEFF,S18ACF,S18ADF
DIMENSION AC(NP),DPC(NP),VC(20)
COMMON /LPL/V,ML
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
GAMA = DSQRT(AC1)
IF(AC2).LT.0) THEN
RWA = RW*DEXPC(-AC2)
C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RWA*RWA)
ELSE
C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RW*RW)
ENDIF
ALFA = C1/GAMA
AUX4 = C2*AC1)/AC5)
A1 = C3/X1
IF(ML.EQ.N)GO TO 11
CALL COEFFCND
SUMR = 0.

```

```

SUMB1= 0.
SUMB2= 0.
SUMB3= 0.
SUMB5= 0.
SUMB6= 0.
DO 30 J = 1,N
Z = J * A1
Y = DSQRT(CZ)
XS = Y* ALFA
BK0 = S18ACF(XS,IFALHA)
BK1 = S18ADF(XS,IFALHA)
ZI = 1./Z
AUX5 = BK0/BK1
IF(AC(2).LT.0) THEN
AUX1 = AUX5/XS
ELSE
AUX1 = AUX5/XS + AC(2)
ENDIF
AUX2 = AUX4*AC(3)*ZI
AUX3 = AC(5)*AUX1 + AUX2
AUX6 = 1.-AUX5*AUX5
AUX7 = AUX6/(2.*AC(1))
AUX8 = Z*AUX1 + AUX4
AUX8I = 1./AUX8
AUX8QI = AUX8I*AUX8I
PRESSAO = AUX3*AUX8I
DERK = C2/AC(5)*(AC(3)-AC(6))*(AUX1-AC(1)*AUX7)*AUX8QI
IF(AC(2).LT.0) THEN
DERSW = AUX4*AUX6*(AC(6)-AC(3))*AUX8QI
ELSE
DERSW = AUX4*(AC(6)-AC(3))*AUX8QI
ENDIF
DERPI = AUX4*ZI*AUX8I
DERCF = AUX1/AC(5)*(AC(6)*AUX4-Z*AUX2)*AUX8QI
DERPO = AUX1*AUX8I
SUMR = SUMR + V(J)*PRESSAO
SUMB1= SUMB1+ V(J)*DERK
SUMB2= SUMB2+ V(J)*DERSW
SUMB3= SUMB3+ V(J)*DERPI
SUMB5= SUMB5+ V(J)*DERCF
30 SUMB6= SUMB6+ V(J)*DERPO
DPWF = SUMR* A1
DPC(1)= SUMB1*A1
DPC(2)= SUMB2*A1
DPC(3)= SUMB3*A1
DPC(4)= 0.
DPC(5)= SUMB5*A1
DPC(6)= SUMB6*A1
RETURN
END

```

C
SUBROUTINE CINTEG(Z,CI,X,A)
C.....

```

C  Esta rotina executa a integracao dos coeficientes da funcao B-
C  splines obtidos por quadrados minimos.
C.....
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      REAL*8 X(NX),A(0:3)
      Common/GERAL/NP,NS,H
      COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
      TP = X(NP)
      HQ = H*H
      HC = H*H*H
      HCI = 1./HC
      ZI = 1./Z
      ZQ = Z*Z
      ZQI = 1./ZQ
      ZC = ZQ*Z
      ZCI = 1./ZC
      C1 = 6.*ZQI*ZQI
      HG = H+ZI
      HGC = HG*HG*HG
      H1 = (H-ZI)
      H1C= H1*H1*H1
      CI = 0.
      DO 5 J = 1,NS-1
        T1 = TP*(J-1)/(NS-1)
        T2 = TP*(J/(NS-1))
        DT = T2-T1
        A1 = DT-ZI
        A1Q = A1*A1
        A1C = A1Q*A1
        A2 = HC + 3.*H*ZQI - 9*DT*ZQI + 15.*ZCI - 3.*A1*(A1Q-A1*H-HQ)
        A3 = H1C + 3.*H*ZQI + 19.*ZCI
        B1 = DT+ZI
        B1Q= B1*B1
        B1C= B1Q*B1
        B2 = HC + 3.*H*ZQI - 9.*DT*ZQI - 15.*ZCI - 3.*B1*(B1Q-B1*H-HQ)
        B3 = HGC + 3.*H*ZQI - 19.*ZCI
        E1 = DEXP(-Z*T2)
        E2 = DEXP(Z*DT)*ZI
        E3 = DEXP(-Z*T1)
        E4 = -DEXP(-Z*DT)*ZI
        Q1 = E1*(E2*(A1C + 3.*DT*ZQI - 5.*ZCI) + C1)
        Q2 = E1*(E2*A2 -A3*ZI)
        Q3 = E3*(E4*B2 +B3*ZI)
        Q4 = E3*(E4*(B1C+3.*DT*ZQI+5.*ZCI)+C1)
5      CI = CI + Q1*(AC(J-1))+Q2*(AC(J))+Q3*(AC(J+1))+Q4*(AC(J+2))
      CI = CI*HCI
      RETURN
      END

C
      BLOCK DATA COM
C.....
C  Estas variaveis servem para controle do fluxo nos calculos da
C  pressao e gradientes para o periodo de estatica.

```

```

C.....
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  COMMON /CONTROLE/ID,ICONT
  DATA ID,ICONT /0,0/
  END
  SUBROUTINE COEFF(N)
C.....
C   Calculo dos coeficientes para o algoritmo de Stehfest
C.....
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  INTEGER I,M,N,ML,K,K1,K2,NH
  DIMENSION G(0-20),H(10),V(20)
  Common/LPL/V,ML
  IF (ML.EQ.N) GO TO 100
  ML = N
  G(0) = 1.
  G(1) = 1.
  NH = N/2
  DO 5 I = 2,N
    G(I) = G(I-1) * I
    H(1) = 2./G(NH-1)
  DO 10 I = 2,NH
    FI = I
    IF (I.EQ.NH) GO TO 8
    H(I) = FI**NH*G(2*I)/(G(NH-I)*G(I)*G(I-1))
    GO TO 10
  8   H(I) = FI**NH*G(2*I)/(G(I)*G(I-1))
  10  CONTINUE
  SN = 2*(NH-NH/2*2)-1
  DO 50 I = 1,N
    V(I) = 0.
    K1 = (I+1)/2
    K2 = I
    If(K2.GT.NH) K2 = NH
    DO 40 K = K1,K2
      IF(2*K-I.EQ.0) GO TO 37
      IF(I.EQ.K) GO TO 38
      V(I) = V(I) + H(K)/(G(I-K)*G(2*K-I))
      GO TO 40
  37  V(I) = V(I) + H(K)/(G(I-K))
      GO TO 40
  38  V(I) = V(I) + H(K)/G(2*K-I)
  40  CONTINUE
      V(I) = SN* V(I)
      SN = -SN
  50  CONTINUE
  100 CONTINUE
      RETURN
      END
C :::::::::::::::::::::: Funcoes de Bessel ::::::::::::::::::::::
  DOUBLE PRECISION FUNCTION SI8ACFCX,IFAIL)
C .....
C

```

```

C      BESSEL FUNCTION K0CX) FROM NAG LIBRARY
C.....
DOUBLE PRECISION X
INTEGER IFAIL
DOUBLE PRECISION SRNAME
DOUBLE PRECISION EGAM, G, T, XBIG, XVSMAL, Y
DOUBLE PRECISION DLOG, DEXP, DSQRT
DATA SRNAME /8H S18ACF /
DATA XVSMAL,EGAM/3.2D-9,5.77215664901532861D-1/
DATA XBIG /86.4D0/
DATA Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,Q7/1.25331414D0,-0.7832358D-1,0.2189568D-1,
*-0.1062446D-1,0.587872D-2,-0.251540D-2,0.53208D-3/
IF (X.LE.0.0D0) GO TO 120
IFAIL = 0
IF (X.LT.XBIG) GO TO 20
Y = 2.0/X
S18ACF = (DEXP(-X)/DSQRT(X))*C(Q1+Y*C(Q2+Y*C(Q3+Y*C(Q4+Y*C(Q5+Y*C(Q6+Y*
*C(Q7))))))
GO TO 140
20 IF (X.GT.4.0D0) GO TO 100
IF (X.GT.2.0D0) GO TO 80
IF (X.GT.1.0D0) GO TO 60
IF (X.GT.XVSMAL) GO TO 40
S18ACF = -(DLOG(0.5D0*X)+EGAM)
GO TO 140
40 T = 2.0D0*X*X - 1.0D0
G= +1.12896092945412762D+0+T*C +1.32976966478338191D-1+
AT*C +4.07157485171389048D-3+T*C +5.59702338227915383D-5+
BT*C +4.34562671546158210D-7+T*C +2.16382411824721532D-9+
CT*C +7.49110736894134794D-12+T*C +1.90674197514561280D-14))))))
Y= +2.61841879258687055D-1+T*C +1.52436921799395196D-1+
AT*C +6.63513979313943827D-3+T*C +1.09534292632401542D-4+
BT*C +9.57878493265929443D-7+T*C +5.19906865800665633D-9+
CT*C +1.92405264219706684D-11+T*C +5.16867886946332160D-14+
DT*C +1.05407718191360000D-16))))))
S18ACF = -DLOG(X)*G + Y
GO TO 140
60 T = 2.0D0*X - 3.0D0
Y= +9.58210053294896496D-1+T*C -1.42477910128828254D-1+
AT*C +3.23582010649653009D-2+T*C -8.27780350351692662D-3+
BT*C +2.24709729617770471D-3+T*C -6.32678357460594866D-4+
CT*C +1.82652460089342789D-4+T*C -5.37101208898441760D-5+
DT*C +1.60185974149720562D-5+T*C -4.83134250336922161D-6+
ET*C +1.47055796078231691D-6+T*C -4.51017292375200017D-7+
FT*C +1.39217270224614153D-7+T*C -4.32185089841834127D-8+
GT*C +1.34790467361340101D-8+T*C -4.20597329258249948D-9+
HT*C +1.32069362385968867D-9+T*C -4.33326665618780914D-10+
IT*C +1.37999268074442719D-10+T*C -3.19241059198852137D-11+
JT*C +9.74410152270679245D-12+T*C -7.83738609108569293D-12+
KT*C +2.57466288575820595D-12))))))))))
S18ACF = DEXP(-X)*Y
GO TO 140
80 T = X - 3.0D0

```

```

      Y= +6.97761598043851776D-1+T*(C -1.08801882084935132D-1+
AT*(C +2.56253646031960321D-2+T*(C -6.74459607940169198D-3+
BT*(C +1.87292939725962385D-3+T*(C -5.37145622971910027D-4+
CT*(C +1.57451516235860573D-4+T*(C -4.68936653814896712D-5+
DT*(C +1.41376509343622727D-5+T*(C -4.30373871727268511D-6+
ET*(C +1.32052261058932425D-6+T*(C -4.07851207862189007D-7+
FT*(C +1.26672629417567360D-7+T*(C -3.95403255713518420D-8+
GT*(C +1.23923137898346852D-8+T*(C -3.88349705250555658D-9+
HT*(C +1.22424982779432970D-9+T*(C -4.03424607871960089D-10+
IT*(C +1.28905587479980147D-10+T*(C -2.97787564633235128D-11+
JT*(C +9.11109430833001267D-12+T*(C -7.39672783987933184D-12+
KT*(C +2.43538242247537459D-12))))))))))))))))))))))))))
      S18ACF = DEXP(-X)*Y
      GO TO 140
100 T = 10.0D0/(1.0D0 + X) - 1.0D0
      Y= +1.23688664769425422D+0+T*(C -1.72683652385321641D-2+
AT*(C -9.25551464765637133D-4+T*(C -9.02553345187404564D-5+
BT*(C -6.31692398333746470D-6+T*(C -7.69177622529272933D-7+
CT*(C -4.16044811174114579D-8+T*(C -9.41555321137176073D-9+
DT*(C +1.75359321273580603D-10+T*(C -2.22829582288833265D-10+
ET*(C +3.49564293256545992D-11+T*(C -1.11391758572647639D-11+
FT*(C +2.85481235167705907D-12+T*(C -7.31344482663931904D-13+
GT*(C +2.06328892562554880D-13+T*(C -1.28108310826991616D-13+
HT*(C +4.43741979886551040D-14))))))))))))))))))))))))))
      S18ACF = DEXP(-X)*Y/DSQRT(X)
      GO TO 140
120 IFAIL = 1
      WRITE(*,99999)SRNAME,IFAIL
99999 FORMAT (1H0, 38HERROR DETECTED BY NAG LIBRARY ROUTINE , A8,
* 11H - IFAIL = , I5//)
      S18ACF = 0.0D0
140 RETURN
      END
** END OF S18ACFTEXT
*UPTODATE S18ADFTEXT
      DOUBLE PRECISION FUNCTION S18ADF(X, IFAIL)
C.....
C
C      BESSEL FUNCTION K1(X) FROM NAG LIBRARY
C.....
      DOUBLE PRECISION X
      INTEGER IFAIL
      DOUBLE PRECISION SRNAME
      DOUBLE PRECISION G, T, XBIG, XSEST, XSMALL, Y
      DOUBLE PRECISION DLOG, DEXP, DSQRT
      DATA SRNAME /8H S18ADF /
      DATA XSMALL /7.9D-10/
      DATA XBIG, XSEST /86.4D0, 5.9D-39/
      DATA Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7 /1.25331414D0, 0.234986619D0, -0.3655620D-1,
*0.1504268D-1, -0.780353D-2, 0.325614D-2, -0.68245D-3/
      IF (X.LE.0.0D0) GO TO 120
      IF (X.LE.XSEST) GO TO 140
      IFAIL = 0

```



```

IF (X.LT.XBIG) GO TO 20
Y = 2.0/X
S18ADF = (DEXP(-X)/DSQRT(X))*C Q1+Y*C Q2+Y*C Q3+Y*C Q4+Y*C Q5+Y*C Q6+Y*
*Q7))))))
GO TO 160
20 IF (X.GT.4.0D0) GO TO 100
IF (X.GT.2.0D0) GO TO 80
IF (X.GT.1.0D0) GO TO 60
IF (X.GT.XSMALL) GO TO 40
S18ADF = 1.0D0/X
GO TO 160
40 T = 2.0D0*X*X - 1.0D0
G= +5.31907865913352762D-1+T*C +3.25725988137110495D-2+
AT*C +6.71642805873498653D-4+T*C +6.95300274548206237D-6+
BT*C +4.32764823642997753D-8+T*C +1.79784792380155752D-10+
CT*C +5.33888268665658944D-13+T*C +1.18964962439910400D-15))))))
Y= +3.51825828289325536D-1+T*C +4.50490442966943726D-2+
AT*C +1.20333585658219028D-3+T*C +1.44612432533006139D-5+
BT*C +9.96686689273781531D-8+T*C +4.46828628435618679D-10+
CT*C +1.40917103024514301D-12+T*C +3.29881058019865600D-15))))))
S18ADF = 1.0D0/X + X*(DLOG(X)*G-Y)
GO TO 160
60 T = 2.0D0*X - 3.0D0
Y= +1.24316587355255299D+0+T*C -2.71910714388689413D-1+
AT*C +8.20250220860693888D-2+T*C -2.62545818729427417D-2+
BT*C +8.57388087067410089D-3+T*C -2.82450787841655951D-3+
CT*C +9.34594154387642940D-4+T*C -3.10007681013626626D-4+
DT*C +1.02982746700060730D-4+T*C -3.42424912211942134D-5+
ET*C +1.13930169202553526D-5+T*C -3.79227698821142908D-6+
FT*C +1.26265578331941923D-6+T*C -4.20507152338934956D-7+
GT*C +1.40138351985185509D-7+T*C -4.66928912168020101D-8+
HT*C +1.54458653909012693D-8+T*C -5.13783508140332214D-9+
IT*C +1.82808381381205361D-9+T*C -6.15211416898895086D-10+
JT*C +1.28044023949946257D-10+T*C -4.02591066627023831D-11+
KT*C +4.27404330568767242D-11+
LT*C -1.46639291782948454D-11))))))))))))))))))))))
S18ADF = DEXP(-X)*Y
GO TO 160
80 T = X - 3.0D0
Y= +8.06563480128786903D-1+T*C -1.60052811291327173D-1+
AT*C +4.58591528414023064D-2+T*C -1.42363136684423646D-2+
BT*C +4.55865751206724687D-3+T*C -1.48185472032688523D-3+
CT*C +4.85707174778663652D-4+T*C -1.59994873621599146D-4+
DT*C +5.28712919123131781D-5+T*C -1.75089594354079944D-5+
ET*C +5.80692311842296724D-6+T*C -1.92794586996432593D-6+
FT*C +6.40581814037398274D-7+T*C -2.12969229346310343D-7+
GT*C +7.08723366696569880D-8+T*C -2.35855618461025265D-8+
HT*C +7.79421651144832709D-9+T*C -2.59039399308009059D-9+
IT*C +9.20781685906110546D-10+T*C -3.09667392343245062D-10+
JT*C +6.44913423545894175D-11+T*C -2.02680401514735862D-11+
KT*C +2.14736751065133220D-11+
LT*C -7.36478297050421658D-12))))))))))))))))))))))
S18ADF = DEXP(-X)*Y

```

```

GO TO 160
100 T = 10.0D0/(1.0D0+X) - 1.0D0
Y= +1.30387573604230402D+0+T*( +5.44845254318931612D-2+
AT*( +4.31639434283445364D-3+T*( +4.29973970898766831D-4+
BT*( +4.04720631528495020D-5+T*( +4.32776409784235211D-6+
CT*( +4.07563856931843484D-7+T*( +4.86651420008153956D-8+
DT*( +3.82717692121438315D-9+T*( +6.77688943857588882D-10+
ET*( +6.97075379117731379D-12+T*( +1.72026097285930936D-11+
FT*( -2.60774502020271104D-12+T*( +8.58211523713560576D-13+
GT*( -2.19287104441802752D-13+T*( +1.39321122940600320D-13+
HT*( -4.77850238111580160D-14))))))))))
S18ADF = DEXP(-X)*Y/DSQRT(X)
GO TO 160
120 IFAIL = 1
WRITE(*,99998)SRNAME,IFAIL
99998 FORMAT (1H0, 38HERROR DETECTED BY NAG LIBRARY ROUTINE , A8,
* 11H - IFAIL = , I5//)
S18ADF = 0.0D0
GO TO 160
140 IFAIL = 2
WRITE(*,99998)SRNAME,IFAIL
99997 FORMAT (1H0, 38HERROR DETECTED BY NAG LIBRARY ROUTINE , A8,
* 11H - IFAIL = , I5//)
S18ADF = 1.0D0/XSEST
160 RETURN
END
** END OF S18ADFTXT
SUBROUTINE MRQMIN(X,Y,SIG,NDATA,A,MA,LISTA,MFIT,
* COVAR,ALPHA,NCA,CHISQ,FUNCS,ALAMDA,MPER)
C.....
C Esta rotina executa a regressao nao linear
C.....
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL FUNCS
PARAMETER (MMAX=20)
DIMENSION X(NDATA),Y(NDATA),SIG(NDATA),AC(MA),LISTAC(MA),
* COVAR(NCA,NCA),ALPHAC(NCA,NCA),ATRY(MMAX),BETAC(MMAX),DAC(MMAX)
IF(ALAMDA.LT.0.)THEN
KK=MFIT+1
DO 12 J=1,MA
IHIT=0
DO 11 K=1,MFIT
IF(LISTAC(K).EQ.J)IHIT=IHIT+1
11 CONTINUE
IF (IHIT.EQ.0) THEN
LISTAC(KK)=J
KK=KK+1
ELSE IF (IHIT.GT.1) THEN
PAUSE 'Improper permutation in LISTA'
ENDIF
12 CONTINUE
IF (KK.NE.(MA+1)) PAUSE 'Improper permutation in LISTA'
ALAMDA=0.001

```

```

      CALL MRQCOFC(X,Y,SIG,NDATA,A,MA,LISTA,MFIT,ALPHA,BETA,NCA,CHISQ,F
      *UNCS,MPER)
      OCHISQ=CHISQ
      DO 13 J=1,MA
        ATRY(J)=AC(J)
13      CONTINUE
      ENDIF
      DO 15 J=1,MFIT
        DO 14 K=1,MFIT
          COVAR(J,K)=ALPHAC(J,K)
14      CONTINUE
          COVAR(J,J)=ALPHAC(J,J)*(1.+ALAMDA)
          DAC(J)=BETAC(J)
15      CONTINUE
      CALL GAUSSJ(COVAR,MFIT,NCA,DA,1,1)
      IF(ALAMDA.EQ.0.) THEN
        CALL COVSRTC(COVAR,NCA,MA,LISTA,MFIT)
        RETURN
      ENDIF
      DO 16 J=1,MFIT
        ATRY(LISTAC(J))=AC(LISTAC(J))+DAC(J)
16      CONTINUE
      CALL MRQCOFC(X,Y,SIG,NDATA,ATRY,MA,LISTA,MFIT,COVAR,DA,NCA,CHISQ,FU
      *NCS,MPER)
      IF(CHISQ.LT.OCHISQ) THEN
        ALAMDA=0.1*ALAMDA
        OCHISQ=CHISQ
        DO 18 J=1,MFIT
          DO 17 K=1,MFIT
            ALPHAC(J,K)=COVAR(J,K)
17          CONTINUE
            BETAC(J)=DAC(J)
            AC(LISTAC(J))=ATRY(LISTAC(J))
18          CONTINUE
          ELSE
            ALAMDA=10.*ALAMDA
            CHISQ=OCHISQ
          ENDIF
        RETURN
      END
      SUBROUTINE MRQCOFC(X,Y,SIG,NDATA,A,MA,LISTA,MFIT,ALPHA,BETA,NALP,
      *CHISQ,FUNCS,MPER)
C.....
C      Esta rotina executa a regressao nao linear
C.....
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      EXTERNAL FUNCS
      PARAMETER (MMAX=20)
      DIMENSION X(NDATA),Y(NDATA),SIG(NDATA),ALPHAC(NALP,NALP),BETAC(MA),
      *DYDAC(MMAX),LISTAC(MFIT),AC(MA)
      DO 12 J=1,MFIT
        DO 11 K=1,J
          ALPHAC(J,K)=0.

```

```

11      CONTINUE
      BETACJ)=0.
12      CONTINUE
      CHISQ=0.
      DO 15 I=1,NDATA
        CALL FUNCSCI,X(I),A,YMOD,DYDA,MA,MPER)
        SIG2I=1./((SIG(I)*SIG(I))
        DY=Y(I)-YMOD
        DO 14 J=1,MFIT
          WT=DYDA(LISTACJ))*SIG2I
          DO 13 K=1,J
            ALPHACJ,K)=ALPHACJ,K)+WT*DYDA(LISTACK))
13      CONTINUE
          BETACJ)=BETACJ)+DY*WT
14      CONTINUE
          CHISQ=CHISQ+DY*DY*SIG2I
15      CONTINUE
      DO 17 J=2,MFIT
        DO 16 K=1,J-1
          ALPHACK,J)=ALPHACJ,K)
16      CONTINUE
17      CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE GAUSSJ(A,N,NP,B,M,MP)
C.....
C      Esta rotina executa a regressao nao linear
C.....
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      PARAMETER (NMAX=50)
      DIMENSION ACNP,NP),BCNP,MP),IPIVC(NMAX),INDXRC(NMAX),INDXCC(NMAX)
      DO 11 J=1,N
        IPIVCJ)=0
11      CONTINUE
      DO 22 I=1,N
        BIG=0.
        DO 13 J=1,N
          IF(IPIVCJ).NE.1)THEN
            DO 12 K=1,N
              IF (IPIVC(K).EQ.0) THEN
                IF (DABSCACJ,K)).GE. BIG) THEN
                  BIG=DABSCACJ,K)
                  IROW=J
                  ICOL=K
                ENDIF
              ELSE IF (IPIVC(K).GT.1) THEN
                PAUSE 'Singular matrix'
              ENDIF
            CONTINUE
12          ENDIF
13          CONTINUE
          IPIVCICOL)=IPIVCICOL)+1
          IF (IROW.NE.ICOL) THEN

```

```

DO 14 L=1,N
  DUM=ACIROW,L)
  ACIROW,L)=ACICOL,L)
  ACICOL,L)=DUM
14 CONTINUE
DO 15 L=1,M
  DUM=BCIROW,L)
  BCIROW,L)=BCICOL,L)
  BCICOL,L)=DUM
15 CONTINUE
ENDIF
INDXR(CI)=IROW
INDXC(CI)=ICOL
IF (ACICOL,ICOL).EQ.0.) PAUSE 'Singular matrix.'
PIVINV=1./ACICOL,ICOL)
ACICOL,ICOL)=1.
DO 16 L=1,N
  ACICOL,L)=ACICOL,L)*PIVINV
16 CONTINUE
DO 17 L=1,M
  BCICOL,L)=BCICOL,L)*PIVINV
17 CONTINUE
DO 21 LL=1,N
  IF (LL.NE.ICOL) THEN
    DUM=ACLL,ICOL)
    ACLK,ICOL)=0.
    DO 18 L=1,N
      ACLK,L)=ACLL,L)-ACICOL,L)*DUM
18 CONTINUE
    DO 19 L=1,M
      BCLK,L)=BCLK,L)-BCICOL,L)*DUM
19 CONTINUE
  ENDIF
21 CONTINUE
22 CONTINUE
DO 24 L=N,1,-1
  IF (INDXR(L).NE.INDXC(L)) THEN
    DO 23 K=1,N
      DUM=ACK,INDXR(L))
      ACK,INDXR(L))=ACK,INDXC(L))
      ACK,INDXC(L))=DUM
23 CONTINUE
    ENDIF
24 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE COVSRT(COVAR,NCVM,MA,LISTA,MFIT)
C.....
C  Esta rotina executa a regressao nao linear
C.....
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION COVAR(NCVM,NCVM),LISTA(MFIT)
DO 12 J=1,MA-1

```

```

DO 11 I=J+1,MA
  COVAR(I,J)=0.
11  CONTINUE
12  CONTINUE
DO 14 I=1,MFIT-1
  DO 13 J=I+1,MFIT
    IF(LISTAC(J).GT.LISTAC(I)) THEN
      COVAR(LISTAC(J),LISTAC(I))=COVAR(I,J)
    ELSE
      COVAR(LISTAC(I),LISTAC(J))=COVAR(I,J)
    ENDIF
  CONTINUE
13  CONTINUE
14  CONTINUE
  SWAP=COVAR(1,1)
DO 15 J=1,MA
  COVAR(1,J)=COVAR(J,J)
  COVAR(J,J)=0.
15  CONTINUE
  COVAR(LISTAC(1),LISTAC(1))=SWAP
DO 16 J=2,MFIT
  COVAR(LISTAC(J),LISTAC(J))=COVAR(1,J)
16  CONTINUE
DO 18 J=2,MA
  DO 17 I=1,J-1
    COVAR(I,J)=COVAR(J,I)
17  CONTINUE
18  CONTINUE
  RETURN
  END
  SUBROUTINE QMBS(X,Y,A)

```

C.....

C Esta rotina calcula os coeficientes do B-splines com quadrados

C minimos

C.....

```

IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 X(NX),Y(NX),ACO(3)
COMMON/GERAL/NP,NS,H
COMMON/VETOR2/C(0:10)
COMMON/VETOR3/T(50)
COMMON/MATRIZ/B(0:3,0:3)
COMMON/PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
NP = NX
NS = 2
H=(X(NP)-X(1))/(NS-1)
DO 10 I=0,3
  DO 10 J=I,3
    CALL SOMACI(J,0,X,Y)
10  CONTINUE
DO 20 I=0,NS+1
  SOM=0.
  DO 30 J=1,NP
    SOM=SOM+Y(J)*BSP(I,X(J),X,Y)
30  CONTINUE

```

```

      CC(I)=SOM
20    CONTINUE
      IPOS=0
      DO 40 IE=1,NS-1
        DO 50 I=1,3
          RMULT=B(0,I)/B(0,0)
          DO 60 J=1,3
            B(I,J)=B(I,J)-RMULT*B(0,J)
60        CONTINUE
          CC(IE+I-1)=CC(IE+I-1)-RMULT*CC(IE-1)
50      CONTINUE
        DO 70 J=0,3
          IPOS=IPOS+1
          TC(IPOS)=B(0,J)
70      CONTINUE
        IF (IE.NE. NS-1) THEN
          DO 80 I=0,2
            DO 80 J=I,2
              B(I,J)=B(I+1,J+1)
80          CONTINUE
            DO 90 I=0,3
              CALL SOMACI,3,IE,X,Y)
90          CONTINUE
        ENDIF
40    CONTINUE
      DO 100 K=1,2
        DO 100 I=K+1,3
          RMULT=B(K,I)/B(K,K)
          DO 110 J=I,3
            B(I,J)=B(I,J) - RMULT * B(K,J)
110        CONTINUE
          CC(NS+I-2) = CC(NS+I-2) - RMULT*CC(NS+K-2)
100    CONTINUE
      AC(NS+1)=CC(NS+1)/B(3,3)
      AC(NS)=(CC(NS)-(B(2,3)*AC(NS+1)))/B(2,2)
      AC(NS-1)=(CC(NS-1)-(B(1,2)*AC(NS)+B(1,3)*AC(NS+1)))/B(1,1)
      DO 120 I=(NS-2),0,-1
        IPOS=4*I+1
        SOM=0.
        DO 130 J=1,3
          SOM=SOM+TC(IPOS+J)*AC(I+J)
130    CONTINUE
        AC(I)=(CC(I)-SOM)/TC(IPOS)
120    CONTINUE
      RETURN
      END
C      INICIO DAS SUBROTINAS
C      SUBROUTINE SOMACI,J,IE,X,Y)
C.....
C      Esta rotina calcula os coeficientes do B-splines com quadrados mi-
C      nimos.
C.....
C      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)

```

```

REAL*8 X(NP),Y(NP)
COMMON/GERAL/NP,NS,H
COMMON/VECTOR2/C(0:10)
COMMON/VECTOR3/T(50)
COMMON/MATRIZ/B(0:3,0:3)
SOM=0.
DO 140 K=1,NP
  IF (I.EQ.J) THEN
    AUX=BSP(I+IE,X(K),X,Y)
    SOM=SOM+AUX*AUX
  ELSE
    SOM=SOM+BSP(I+IE,X(K),X,Y)*BSP(J+IE,X(K),X,Y)
  ENDIF
  B(I,J)=SOM
140 CONTINUE
RETURN
END
C INICIO DA FUNCAO BSP
REAL*8 FUNCTION BSP(I,Z,X,Y)
C .....
C Esta rotina calcula os coeficientes do B-splines com quadrados
C minimos
C .....
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 X(NP),Y(NP)
COMMON/GERAL/NP,NS,H
COMMON/VECTOR2/C(0:10)
COMMON/VECTOR3/T(50)
COMMON/MATRIZ/B(0:3,0:3)
V=(Z-X(1)-(I-1)*H)/H
IF (Z.LT. X(1)-H .OR. Z.GT. X(NP)+H) THEN
  BSP=0.
ELSE
  IF (I.EQ.NS) THEN
    IF (Z.LT. (X(NP)-2*H)) THEN
      BSP=0.
    ELSE
      IF (Z.LT. (X(NP)-H)) THEN
        BSP=RINTERV(1,V)
      ELSE
        IF (Z.LT. X(NP)) THEN
          BSP=RINTERV(2,V)
        ELSE
          BSP=RINTERV(3,V)
        ENDIF
      ENDIF
    ENDIF
  ELSE
    IF (I.EQ. NS+1) THEN
      IF (Z.LT. (X(NP)-H)) THEN
        BSP=0.
      ELSE
        IF (Z.LT. X(NP)) THEN

```



```

        BSP=RINTERVC1,V)
    ELSE
        BSP=RINTERVC2,V)
    ENDIF
ENDIF
ELSE
    IF (I .EQ. 0) THEN
        IF (Z .GT. (X(1)+H)) THEN
            BSP=0.
        ELSE
            IF (Z .LT. X(1)) THEN
                BSP=RINTERVC3,V)
            ELSE
                BSP=RINTERVC4,V)
            ENDIF
        ENDIF
    ELSEIF (I .EQ. 1) THEN
        IF (Z .GT. (X(1)+2*H)) THEN
            BSP=0.
        ELSE
            IF (Z .LT. X(1)) THEN
                BSP=RINTERVC2,V)
            ELSE
                IF (Z .LT. (X(1)+H)) THEN
                    BSP=RINTERVC3,V)
                ELSE
                    BSP=RINTERVC4,V)
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
    ELSE
        IF ((Z.LE.(X(1)+(I-3)*H)).OR.(Z.GT.(X(1)+(I+1)*H))) THEN
            BSP=0.
        ELSE
            IF (Z.LE.(X(1)+(I-2)*H)) THEN
                BSP=RINTERVC1,V)
            ELSE
                IF (Z.LE.(X(1)+(I-1)*H)) THEN
                    BSP=RINTERVC2,V)
                ELSE
                    IF (Z.LE.(X(1)+I*H)) THEN
                        BSP=RINTERVC3,V)
                    ELSE
                        BSP=RINTERVC4,V)
                    ENDIF
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDIF
RETURN

```

```

END
C  FUNCAO RINTERV
REAL*8 FUNCTION RINTERV(K,V)
C .....
C  Esta rotina calcula os coeficientes do B-splines com quadrados
C  nimos.
C .....
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
IF (K .EQ. 1) RINTERV=(V+2)*(V+2)*(V+2)
IF (K .EQ. 2) RINTERV=1+3*(V+1)*(1-V*(V+1))
IF (K .EQ. 3) RINTERV=1+3*(1-V)*(1+V*(1-V))
IF (K .EQ. 4) RINTERV=(2-V)*(2-V)*(2-V)
RETURN
END
SUBROUTINE PIKSR2CN,ARR,BRR)
C .....
C  Esta rotina ordena os valores obtidos na busca unidimensional
C  da funcao objetivo para determinar o valor inicial do Skin.
C .....
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION ARRCN),BRRCN)
DO 12 J=2,N
  A=ARRC(J)
  B=BRRC(J)
  DO 11 I=J-1,1,-1
    IF(ARRC(I).LE.A)GO TO 10
    ARRC(I+1)=ARRC(I)
    BRRC(I+1)=BRRC(I)
11  CONTINUE
  I=0
10  ARRC(I+1)=A
  BRRC(I+1)=B
12  CONTINUE
RETURN
END
REAL*8 FUNCTION TINVER(NDX)
IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
REAL*8 TALFAC90)
DATA TALFA /12.7062,4.3027,3.1824,2.7764,2.5706,2.4469,2.3646,
*2.3060,2.2622,2.2281,2.2010,2.1788,2.1604,2.1448,2.1315,2.1199,
*2.1098,2.1009,2.0930,2.0860,2.0796,2.0739,2.0687,2.0639,2.0595,
*2.0555,2.0518,2.0484,2.0452,2.0423,2.0395,2.0369,2.0345,2.0322,
*2.0301,2.0281,2.0262,2.0244,2.0227,2.0211,2.0195,2.0181,2.0167,
*2.0154,2.0141,2.0129,2.0117,2.0106,2.0096,2.0086,2.0076,2.0066,
*2.0057,2.0049,2.0040,2.0032,2.0025,2.0017,2.0010,2.0003,1.9996,
*1.9990,1.9983,1.9977,1.9971,1.9966,1.9960,1.9955,1.9949,1.9944,
*1.9939,1.9935,1.9930,1.9925,1.9921,1.9917,1.9913,1.9908,1.9905,
*1.9901,1.9897,1.9893,1.9890,1.9886,1.9883,1.9879,1.9876,1.9873,
*1.9870,1.9867/
TINVER = TALFAC(NDX)
RETURN
END
SUBROUTINE LIMPA

```

```
WRITE(*,10)Z7,Z7  
10 FORMAT(1X,A1,'[H',A1,'[J')  
END
```

Apêndice H - Programa gerador de dados de fluxo ou de um DST completo (um ciclo).

- As subrotinas Coeff, S18acf, S18adf e QMBS estão no apêndice G.4.

PROGRAM GERADOR

C....Este programa gera dados de pressao de fluxo e pressao estatica

C....Para o caso de Skin positivo e do Skin negativo.

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

REAL*8 TIME(100)

REAL*8 X(100),XT(200),VC(20)

COMMON /LPL/ V,ML

COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD

COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX

COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE

C:::::Parametros para o calculo dos coeficientes de Stehfest::::::::::::

ML = 1

N = 20

C:::::Dados relativos a leitura do fluxo e estatica::::::::::::

OPEN(1,FILE = 'TEMPOS.DAT')

OPEN(2,FILE = 'GERADOR.DAT')

OPEN(3,FILE = 'PVT.DAT')

OPEN(4,FILE = 'GERA.DAT')

READ(1,2)NLF

READ(1,4)(TIME(I),I=1,NLF)

READ(1,2)NLE

READ(1,4)(X(J),J=1,NLE)

2 FORMAT(I2)

4 FORMAT(F10.0)

NDP = NLF

NDE = NLE

NX = NDP + 1

NDX = NDP + Nde

C

CALL DSTPCTIME,X,XT

CLOSE(1)

CLOSE(2)

CLOSE(3)

CLOSE(4)

END

C

SUBROUTINE DSTPCTIME,X,XT

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

EXTERNAL FUNCS,S18ACF,S18ADF,QMBS

REAL*8 TC(100),PC(100),TIME(NDP),AC(6)

REAL*8 X(NDE),XT(NDX),VC(20)

COMMON /LPL/ V,ML

COMMON /SPL/T,P

COMMON /RESER/C1,C2,C3

COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD

COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX

```

COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
COMMON /PAR/A
C: :::: Chamam-se todos os dados do fluxo, estatica e Pvt (Via Common): ::::
CALL DADOSCTIME,X,XTD
NP = 6
CTE1 = A(1)/(PHI*VISC*CT*RW*RW)
CTE2 = 1./(2.*PI*PHI*TH*CT*RW*RW)
CTE3 = A(3) - A(6)
CSD = A(4)*CTE2
CFD = A(5)*CTE3
TPD = T(NX)*CTE1
WRITE(2,17)
17  FORMAT(10X,' CSD ',10X,' CFD ',10X,' TPD ')
WRITE(2,19)CSD,CFD,TPD
19  FORMAT(7X,F10.3,6X,E15.3,1X,E15.3)
WRITE(2,180)
180  FORMAT(/,21X,' TD ',4X,' PD ')
WRITE(4,181)
181  FORMAT(/,21X,' TCH',4X,' PC(PSIG)')
DO 55 I = 1,NDX
CALL FUNCSC(I,XT(I),A,DPWS,NP,2)
TD = XT(I)*CTE1
PD = (A(3)-DPWS)/CTE3
WRITE(2,11) TD,PD
IF(I.EQ.1) THEN
WRITE(4,*) ' DADOS DO FLUXO'
ENDIF
IF(I.EQ.NX) THEN
WRITE(4,*) ' DADOS DA ESTATICA'
ENDIF
IF(I.GT.NDP) THEN
WRITE(4,11)((XT(I))/3600.),DPWS*14.7
ELSE
WRITE(4,11)(XT(I)/3600.),DPWS*14.7
ENDIF
55  CONTINUE
11  FORMAT(15X,2F13.4)
RETURN
END
C: :::: Transformacao de todos os dados de Entrada para unidades Darcy: ::::
SUBROUTINE DADOSCTIME,X,XTD
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 TIME(NDP),T(100),P(100),A(6)
REAL*8 X(NDE),XT(NDX),V(20)
COMMON/PAR/ A
COMMON/LPL/V,ML
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
C: :::: Calculo dos parametros auxiliares PI e CPA ::::::::::::::::::::
PI = 4.*DATAN(1.DO)

```

```

CPA= 1./14.7
C:Outros dados(Unidades Americanas e SI:
C: Ct,Cw(Psi-1);Th,Pp,Fp(m);Rw(pol);Cdp(m3/m3);Do(),Phi(decimal):
C: Po,Pe(Psig):
  READC(3,6)CT
  READC(3,6)PHI
  READC(3,6)VISC
  READC(3,6)TH
  READC(3,6)RW
  READC(3,6)PP
  READC(3,6)FP
  READC(3,6)CW
  READC(3,6)CDP
  READC(3,6)DO
  READC(3,6)PK
  READC(3,6)S
  READC(3,6)PO
  READC(3,6)PE
6  FORMAT(F25.0)
C:Transformacao dados fluido e reservatorio para o sistema DARCY:
  RP = DSQRT(CDP/PI)*100.
  GRAD=DO*0.000966397
  AC(5) = (PI*RP*RP)/GRAD
  CW = CW*14.7
  RW = RW*2.54
  VW = PI*RW*RW*(FP-PP)*100.
  AC(4) = CW*VW
  CT = CT*14.7
  PO = PO*CPA
  PE = PE*CPA
  TH = TH*100.
  AC(1)=PK
  AC(2)=S
  AC(3)=PE
  AC(6)=PO
C:Calculo dos parametros auxiliares C1,C2 e C3:
  C2 = 2.*PI*TH/VISC
  C3 = DLOG(2.DO)
C:Impressao dos parametros:
  WRITE(2,120)
120  FORMAT(/,25X,'DADOS FIXADOS ',/,3X,'CTC1/ATMD ',2X,'COC1/ATMD ',
  *3X,'POROSIDADE',3X,'VISC(CP)',3X,'TH(CMD ',5X,'RW(CMD ')
  WRITE(2,140)CT,CW,PHI,VISC,TH,RW
140  FORMAT(1X,E10.3,4X,E8.3,3X,F8.3,6X,F6.3,3X,F8.2,3X,F8.3,/)
  WRITE(2,150)
150  FORMAT(25X,'DADOS DO RESERVATORIO ')
  WRITE(2,155)
155  FORMAT(10X,'PERM.(DARCY)',15X,'SKIN',10X,'P. ESTATICA(ATMD)')
  WRITE(2,158)AC(1),AC(2),AC(3)
  WRITE(2,157)
157  FORMAT(11X,'CS (CM3/ATMD ',9X,'CF (CM3/ATMD ',8X,'PO(ATMD)')
  WRITE(2,158)AC(4),AC(5),AC(6)
158  FORMAT(7X,F10.3,14X,F10.3,6X,F10.3,/)

```

```

WRITE(4,120)
WRITE(4,140)CT,CW,PHI,VISC,TH,RW
WRITE(4,150)
WRITE(4,155)
WRITE(4,158)AC(1),AC(2),AC(3)
WRITE(4,157)
WRITE(4,158)AC(4),AC(5),AC(6)
C: :::: Transformacao do Tempo e pressao para unidades Darcy: :::::
      TC(1) = 0.
      PC(1) = Po
      DO 10 I = 1,NDP
        K = I + 1
        TCK) = TIME(I)*3600.
10      XTC(I) = TCK)
      DO 17 K = NX,NDX
        IE = K-NDP
17      XTCK) = X(IE)*3600. + TC(NX)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE FUNCSCKF,X1,A,DPWF,NP,MPER)
      Implicit real*8(a-h,o-z)
      Real*8 TC(50),PC(50)
      Dimension A(Np),VC(20)
      External Coeff
      Common /Lpl/V,M1
      Common /Spl/T,P
      Common /Reser/C1,C2,C3
      Common /Controle/Id,Icont
      Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
      Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
      Save /Controle/,/Deri/
C: :::: Calculo da funcao com inversao de laplace: :::::
      If(Kf.LE.Ndp)Then
        CALL FLUXOCKf,X1,A,DPWF,NP)
        Return
      Endif
      A1 = C3/X1
      If(M1.EQ.N)Go to 9
      CALL COEFFCN)
9      If(Id.EQ.1) Go to 11
      CALL CONSTCNP,A)
11     Continue
      Sumr = 0.
      Do 30 j = 1,N
        Z = J * A1
        Y = Dsqrt(Z)
        Xs = Y* Alfa
        CALL PDESTATICACA,NP,XS,Z,PLAP)
30     Sumr = Sumr + VC(j)*Plap
        Dpwf = Sumr* A1
C      Write(*,*)(X1/3600.),Dpwf*14.7
      If(Kf.EQ.Ndx)Then
        Id = 0

```

```

Icon = 0
Return
Endif
End

```

C

```

SUBROUTINE CONST(NP,A)
Implicit Real*8 (a-h,o-z)
Dimension A(NP)
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
Save /Deri/
Gama = Dsqrt(A(1))
If(A(2).Lt.0) Then
Rwa = Rw*Dexp(-A(2))
C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rwa*Rwa)
Else
C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rw*Rw)
Endif
Alfa = C1/Gama
Cte = 1./(C2 * A(1))
Aux12 = (A(4))* Cte
Aux13 = (A(5))* Cte
Aux14 = Aux13-Aux12
Aux20 = -Aux14/A(1)
Return
End

```

C1

C

```

SUBROUTINE PDFLUXOCZE,CI)
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Qmbs,Cinteg
Dimension TC(50),PC(50),AS(0:10)
Common /Spl/T,P
Common /Controle/Id,Icon
Save /Controle/,As
If(Id.Eq.1) Go to 45
CALL QMBS(T,P,AS)
Id = 1
45 CALL CINTEGCZE,CI,T,AS)
Return
End

```

45

C

```

SUBROUTINE PDESTATICACA,NP,XS,Z,PLAPR)
Implicit Real*8(a-h,o-z)
Real*8 A(NP),TC(50),PC(50)
Common /Spl/T,P
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Deri/Gama,Alfa,Aux12,Aux13,Aux14,Aux20
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe
CALL PDFLUXOCZ,CI)
Bk0 = S18ACF(Xs,IFAIL)
Bk1 = S18ADF(Xs,IFAIL)

```



```

B = Bk0/Bk1
Zi = 1./Z
Aux10 = B/Xs
If(AC(2).Lt.0) Then
Aux11 = 1./Aux10
Else
Aux11 = 1./(Aux10 + AC(2))
Endif
Aux15 = Pff*Dexp(-T(Nx)*Z)
Aux16 = (AC(3)*Zi)*Aux11 - Aux14*(Z*CI + Aux15) + AC(6)*Aux13
Aux17 = Aux11 + Z*Aux12
Aux17i = 1./Aux17
Plapr = Aux16*Aux17i
Return
End

```

C

```

SUBROUTINE FLUXOCKf,X1,A,DPWF,NP)
Implicit real*8(a-h,o-z)
External Coeff,S18acf,S18adf
Dimension A(Np),V(20)
Dimension T(50),P(50)
Common /Spl/T,P
Common /Lpl/V,Ml
Common /Reser/C1,C2,C3
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Common /Pvt/Ct,Phi,Visc,Po,Pff,Th,Rw,PI,Cs,Cf,Pk,S,Pe

```

C.....Calculo da funcao com inversao de laplace.....

```

Gama = Dsqrt(AC(1))
If(AC(2).Lt.0) Then
Rwa = Rw*Dexp(-AC(2))
C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rwa*Rwa)
Else
C1 = Dsqrt(Phi*Visc*Ct*Rw*Rw)
Endif
Alfa = C1/Gama
Aux4 = C2*AC(1)/AC(5)
A1 = C3/X1
If(Ml.Eq.N)Go to 11
CALL COEFF(N)
Continue
Sumr = 0.
Do 30 j = 1,N
Z = J * A1
Y = Dsqrt(Z)
Xs = Y* Alfa
Bk0 = S18ACF(Xs,IFAIL)
Bk1 = S18ADF(Xs,IFAIL)
Zi = 1./Z
Aux5 = Bk0/Bk1
If(AC(2).Lt.0) Then
Aux1 = Aux5/Xs
Else
Aux1 = Aux5/Xs + AC(2)

```

11

```

Endif
Aux2 = Aux4*AC(3)*Zi
Aux3 = AC(6)*Aux1 + Aux2
Aux6 = 1.-Aux5*Aux5
Aux7 = Aux6/(2.*AC(1))
Aux8 = Z*Aux1 + Aux4
Aux8i = 1./Aux8
Aux8qi = Aux8i*Aux8i
Pressa = Aux3*Aux8i
30 Sumr = Sumr + VC(j)*Pressa
Dpwf = Sumr * A1
K = Kf + 1
PCK = Dpwf
If(Kf.Eq.Ndp) Then
Pff = Dpwf
Endif
C Write(*,*)(X1/3600.),PCK*14.7
Return
End

```

```

C
SUBROUTINE CINTEG(Z,CI,X,A)
Implicit real*8 (a-h,o-z)
Real*8 X(Nx),AC(0:10)
Common/Vetor2/C(0:10)
Common/Geral/Np,Ns,H
Common /Pontos/N,Ndp,Nx,Nde,Ndx
Tp = X(NP)
Hq = H*H
Hc = H*H*H
Hci = 1./Hc
Zi = 1./Z
Zq = Z*Z
Zqi = 1./Zq
Zc = Zq*Z
Zci = 1./Zc
C1 = 6.*Zqi*Zqi
Hg = H+Zi
Hgc = Hg*Hg*Hg
H1 = (H-Zi)
H1c = H1*H1*H1
C1 = 0.
T1 = 0
T2 = Tp
Dt = T2-T1
A1 = Dt-Zi
A1q = A1*A1
A1c = A1q*A1
A2 = Hc + 3.*H*Zqi - 9.*Dt*Zqi + 15.*Zci - 3.*A1*(A1q-A1*H-Hq)
A3 = H1c + 3.*H*Zqi + 19.*Zci
B1 = Dt+Zi
B1q = B1*B1
B1c = B1q*B1
B2 = Hc + 3.*H*Zqi - 9.*Dt*Zqi - 15.*Zci - 3.*B1*(B1q-B1*H-Hq)

```

```

      B3 = Hgc + 3.*H*Zqi - 19.*Zci
      E1 = Dexp(-Z*T2)
      E2 = Dexp(Z*Dt)*Zi
      E3 = Dexp(-Z*T1)
      E4 = -Dexp(-Z*Dt)*Zi
      Q1 = E1*(E2*(A1c + 3.*Dt*Zqi - 5.*Zci) + C1)
      Q2 = E1*(E2*A2 - A3*Zi)
      Q3 = E3*(E4*B2 + B3*Zi)
      Q4 = E3*(E4*(B1c+3.*Dt*Zqi+5.*Zci)+C1)
      CI = CI + Q1*AC(0)+Q2*AC(1)+Q3*AC(2)+Q4*AC(3)
      CI = CI*Hci
      Return
      End

```

C

```

BLOCK DATA COM
  Implicit Real*8 (a-h,o-z)
  Common /Controle/Id,Icont
  Data Id,Icont /0,0/
  End

```

Apêndice I - Otimização em um ciclo completo de um DST para calcular k , S , p_o e p_i através de diferenças finitas.

- As entradas de dados de campo para análise neste programa é idêntica ao programa Auto do apêndice G.4 cujo exemplo é:

```

41          numero de pontos do fluxo
.0000,86
.005,106.25783
.          tempo e pressao lidos
.
.470,574.68553
.500,588.89144
66          numero de pontos da estatica
.005,687.84280
.
.          tempo e pressao lidos
2.140,877.30984
2.189,877.59765
1.          M = const. calib. em psig/pol.
0.          A = const. calib. em psig.
1.          k = const. do relógio em h/pol.
10.2D-06    Ct= compress. total em 1/psig
0.062      Phi= porosidade ( )
60.        Visc = viscosidade em cp
11.5824    Th = espessura em m
4.248      Rw = raio do poço em pol.
810.39     PP = prof. packer em m.
822.61     FP = prof. poço em m.
6.0E-06    Cw = compres. fluido em 1/psig
0.007417323 Cdp = capacidade do tubo m3/m3
0.90042954 Do = densidade fluido (agua=1.)

```

PROGRAM FINITA

C.....
C ESTE PROGRAMA PRINCIPAL ABRE OS ARQUIVOS DE ENTRADA E SAIDA, DEFINE.

C OS VETORES DE TRABALHO E LE ARQUIVO DE DADOS DO FLUXO + ESTATICA, .
C E CHAMA AS ROTINAS AUXILIARES DE OTIMIZACAO. .
C ESTA VERSAO CONSIDERA O CASO DO SKIN POSITIVO E/OU NEGATIVO. .
C.....

```
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 TIME(100),PWF(100)
REAL*8 X(100),PWS(100),XT(200),DPWE(200)
CHARACTER*30 DADOS
COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
```

C::: Arquivos de entrada e saida de dados ::::::::::::::::::::::::::::::

```
CALL LIMPA
WRITE(*, '(A)') ' ENTRE NOME DO ARQUIVO DE DADOS PRESSAO E PVT: '
READ(*, '(BN,A30)') DADOS
IF(DADOS.EQ. ' ') DADOS = 'DADOS'
OPEN(1, FILE = DADOS, STATUS = 'OLD')
OPEN(2, FILE = 'GERADO.DAT')
OPEN(3, FILE = 'FINITA.DAT')
```

C::: Dados relativos a leitura do fluxo e estatica ::::::::::::::::::::::::::::::

```
READ(1,10) NLFF
READ(1,20) TEMPO,PO
NLF = NLFF -1
READ(1,20) (TIME(I),PWF(I),I=1,NLF)
READ(1,10) NLE
IF(NLE.EQ.0) GO TO 3
READ(1,20) (X(J),PWS(J),J=1,NLE)
10  FORMAT(I2)
20  FORMAT(2F15.0)
3   READ(1,30) CCM
    READ(1,30) CCA
    READ(1,30) CR
30  FORMAT(F15.0)
    PO = PO*CCM + CCA
    DO 15 I = 1,NLF
      TIME(I) = TIME(I)*CR
15  PWF(I) = PWF(I)*CCM + CCA
    DO 25 I = 1,NLE
      X(I) = X(I)*CR
25  PWS(I) = PWS(I)*CCM + CCA
    NDP = NLF
    NDE = NLE
    NX = NDP + 1
    NDX = NDP + NDE
```

C
CALL DSTPCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE)
CLOSE(1)
CLOSE(2)
CLOSE(3)
END

C
SUBROUTINE DSTPCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE)

C.....
C ESTA SUBROTINA PASSA TODOS OS DADOS DE ENTRADA PARA O SISTEMA CGS. .
C CALCULA OS PARAMETROS INICIAIS A SER USADO DURANTE A OTIMIZACAO .
C.....

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL PIKSR2
DIMENSION SW(50),CHI(50)
DIMENSION AC(6)
REAL*8 TC(100),PC(100),TIME(100),PWF(100),VC(20)
REAL*8 XC(100),PWSC(100),DPWEC(200),XTC(200)
REAL FC(200),XJACC(200,4),XJTJ(10),WORK(512),EPS,DELTA,SSQ,X1(6)
COMMON /SPL/T,P
COMMON /LPL/V,ML
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /FATOR/FATORK,FATORP
COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
COMMON /VA/A
SAVE /VA/

```

C:::: Chamam-se todos os dados do fluxo, estatica e Pvt (Via Common) ::
CALL DADOSCTIME,PWF,X,PWS,XTC,DPWEC

C:::: Estima-se pelo metodo cartesiano K e Pi como valores iniciais ::

```

CAP = PI*RP*RP
J = NDX - 5
DT = TC(NX)*(1./XTC(NDX)-1./XTC(J))
DP = (DPWEC(NDX)-DPWEC(J))*14.7
DC = -DP/DT
DPF = (PWF(NDP)-PWF(1))
DH = DPF/GRAD
DV = DH*CAP
DTF = (TIME(NDP)-TIME(1))/86400.
QW = DV*6.29D-06/DTF
PKC = 2.151888*QW*VISC/(DC*TH)
FC1 = TC(NX)/XTC(NDX)
PEI = DPWEC(NDX)*14.7 + DC*FC1
PEI = PEI/14.7
WRITE(*,*)PKC,PEI

```

C:::: Busca unidimensional para definir o valor do skin ::::::::::::::

```

AC(1) = PKC
AC(3) = PEI
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
SWMAX = 5.
SWMIN = -5.
DSW = SWMAX-SWMIN
NB = 50
DO 20 I = 1,NB+1
SWC(I) = SWMIN + DSW*(I-1)/NB
AC(2) = SWC(I)
SUMF = 0.

```

```

DO 30 KF = 1,NDP
CALL FLUXO(TIME(KF),A,DPWF,NP)
RES = PWF(KF)-DPWF
30 SUMF = SUMF + RES*RES
20 CHI(I) = SUMF
CALL PIKSR2(CNB,CHI,SW)
S = SW(1)
WRITE(*,*)'VALOR DO SKIN QUASE OTIMO = ',S
C::: Primeira Regressao(Somente no fluxo) para determinar K,S e Po :::
AC(1) = PKC
AC(2) = S
AC(3) = PEI
AC(4) = CS
AC(5) = CF
AC(6) = PO
NP = 3
X1(1) = SNGL(AC(1)*1000.)
IF(X1(1).LT.(1000.).AND.X1(1).GT.(100.)) THEN
FATORK = 100.
ELSE
FATORK = 1000.
ENDIF
IF(X1(1).LT.(100.)) THEN
FATORK = 10.
ENDIF
X1(2) = SNGL(AC(2))
X1(3) = SNGL(AC(3)*14.7)
IF(X1(3).LT.(1000.).AND.X1(3).GT.(100.)) THEN
FATORP = 100.
ELSE
FATORP = 1000.
ENDIF
IF(X1(3).LT.(100.)) THEN
FATORP = 10.
ENDIF
X1(4) = SNGL(AC(4)*4.279D-07)
X1(5) = SNGL(AC(5)*4.279D-07)
X1(6) = SNGL(AC(6)*14.7)
N1 = (NP + 1)*NP/2
N2 = 5*NP + 2*NDX + N1
CALL FINITACXT,DPWE,X1,F,XJAC,XJTJ,NP,N1,N2,WORK)
RETURN
END
SUBROUTINE FINITACXT,DPWE,X1,F,XJAC,XJTJ,NP,N1,N2,WORK)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
EXTERNAL FUNC,SLUG
REAL PARAM(4),X1(6),FC(NDX),XJAC(NDX,NP),XJTJ(N1),WORK(N2),XPC(2),
*XPP(3)
REAL*8 DPWE(NDX),XT(NDX)
COMMON /FATOR/FATOR,FATORK,FATORP
COMMON /LIDA/ TTC(200),PWE(200)
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX

```

```

COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
COMMON /PVT1/CT1,PHI1,VISC1,PO1,TH1,RW1,CS1,CF1,PI1
TTC1) = 0.
PWE(1) = PO*14.7
DO 5 I = 1,NDX
TTC(I+1) = XTC(I)/3600.
5 PWE(I+1) = DPWE(I)*14.7
M = NDP
NP = 2
IXJAC = NDP
NSIG = 3
EPS = 0.001
DELTA = 0.0001
MAXFN = 500
IOPT = 1
CS1 = X1(4)
CF1 = X1(5)
PO1 = X1(6)
PHI1 = PHI
VISC1 = VISC
CT1 = CT/14.7
TH1 = TH/30.48
RW1 = RW/30.48
XPC(1) = X1(1)/FATORK
XPC(2) = X1(2)
PI1 = X1(3)
CALL ZXSSQ(SLUG,M,NP,NSIG,EPS,DELTA,MAXFN,IOPT,PARAM,XP,SSQ,F,
*XJAC,IXJAC,XJTJ,WORK,INFER,IER)
C
XPC(1) = XPC(1)*FATORK
XPC(2) = XPC(2)
C
WRITE(3,60)(I,XPC(I),I = 1,2)
60 FORMAT(5X,'VALOR OTIMO = ',X(I3,')= ',2X,D10.4)
C
NSIG = 4
M = NDX
NP = 3
IXJAC = NDX
XPP(1) = XPC(1)/FATORK
XPP(2) = XPC(2)
XPP(3) = X1(3)/FATORP
C
CALL ZXSSQ(FUNC,M,NP,NSIG,EPS,DELTA,MAXFN,IOPT,PARAM,XPP,SSQ,F,
*XJAC,IXJAC,XJTJ,WORK,INFER,IER)
C
XPP(1) = XPP(1)*FATORK
XPP(2) = XPP(2)
XPP(3) = XPP(3)*FATORP
C
WRITE(3,10)(I,XPP(I),I = 1,3)
10 FORMAT(5X,'VALOR OTIMO = ',X(I3,')= ',2X,D10.4)

```



```

WRITE(3,40)
40  FORMAT(/,1X,'VETOR NORMA GRAD- NUM ITERACOES-NUM DIGITOS SIGNIFIC-
* E MARQUARDT CONST. ',/)
WRITE(3,50)(I,WORK(I),I=1,5)
50  FORMAT(5X,'WORK',I2,')= ',F15.5)
RETURN
END

C
C.....
C  Transformacao de todos os dados de Entrada para unidades Darcy .
C.....
SUBROUTINE DADOSCTIME,PWF,X,PWS,XT,DPWE)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
REAL*8 TIME(NDP),PWF(NDP),TC(100),PC(100)
REAL*8 XC(NDE),PWSC(NDE),DPWE(NDX),XT(NDX),VC(20)
COMMON/LPL/V,ML
COMMON /SPL/T,P
COMMON /RESER/C1,C2,C3
COMMON /CEST/VW,CW,RP,GRAD
COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,Pe
C::: DEFINICAO DOS PARAMETROS PARA A INVERSAO DE STEHFEST:::
N = 8
ML= 1
C::: Calculo dos parametros auxiliares PI e CPA :::
PI = 4.*DATAN(1.DO)
CPA= 1./14.7
C::: Outros dados(Unidades Americanas e SI :::
C::: Ct,Cw(Cpsi-1);Th,Pp,Fp(m);Rw(pol);Cdp(m3/m3);Do(),Phi(decimal) :::
READ(1,10)CT
READ(1,10)PHI
READ(1,10)VISC
READ(1,10)TH
READ(1,10)RW
READ(1,10)PP
READ(1,10)FP
READ(1,10)CW
READ(1,10)CDP
READ(1,10)DO
10  FORMAT(F25.0)
C::: Transformacao dados fluido e reservatorio para o sistema DARCY :
RP = DSQRT(CDP/PI)*100.
GRAD=DO*0.0009866397
CF = (PI*RP*RP)/GRAD
CW = CW*14.7
RW = RW*2.54
VW = PI*RW*RW*(FP-PP)*100.
CS = CW*VW
CT = CT*14.7
PO = PO*CPA
PE = PWSC(NDE)*CPA
PFF = PWF(NDP)*CPA

```

```

      TH = TH*100.
C:::: Calculo dos parametros auxiliares C2 e C3 ::::::::::::::::::::
      C2 = 2.*PI*TH/VISC
      C3 = DLOG(2.DO)
C:::: Impressao dos parametros ::::::::::::::::::::
      WRITE(2,20)
  20  FORMAT(/,25X,'DADOS DE FLUIDO E ROCHA',/,3X,'COMPRESS.(1/atm)',
    *3X,'POROSIDADE',3X,'VISC(cp)',4X,'TH(cm)',3X,'RW(cm)',/)
      WRITE(2,40)CT,PHI,VISC,TH,RW
  40  FORMAT(1X,E10.3,10X,F8.3,7X,F6.3,5X,F8.2,3X,F8.3)
C:::: Transformacao do Tempo e pressao para unidades Darcy ::::::::::
      TC(1) = 0.
      PC(1) = PO
      DO 50 I = 1,NDP
        K = I + 1
        TK(K) = TIME(I)*3600.
        TIME(I) = TK(K)
        XT(I) = TK(K)
        PK(K) = PWF(I)/14.7
        PWF(I) = PK(K)
  50  DPWE(I) = PK(K)
      DO 60 K = NX,NDX
        IE = K-NDP
        DPWE(K) = PWSC(IE)/14.7
        PWSC(IE) = DPWE(K)
        XT(K) = X(IE)*3600. + TC(NX)
  60  X(IE) = XT(K)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE FLUXO(X1,A,DPWF,NP)
C.....
C  Esta rotina calcula os valores da pressao no periodo de fluxo e
C  dos respectivos gradientes com relacao aos parametros.
C.....
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      EXTERNAL COEFF,S18ACF,S18ADF
      DIMENSION AC(NP),VC(20),TC(100),PC(100)
      COMMON /SPL/T,P
      COMMON /LPL/V,ML
      COMMON /RESER/C1,C2,C3
      COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
      COMMON /PVT/CT,PHI,VISC,PO,PFF,TH,RW,PI,CS,CF,PK,S,PE
      GAMA = DSQRT(AC(1))
      IF(AC(2).LT.0) THEN
        RWA = RW*DEXP(-AC(2))
        C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RWA*RWA)
      ELSE
        C1 = DSQRT(PHI*VISC*CT*RW*RW)
      ENDIF
      ALFA = C1/GAMA
      AUX4 = C2*AC(1)/AC(5)
      A1 = C3/X1

```

```

11      IFCML.EQ.N)GO TO 11
      CALL COEFF(N)
      CONTINUE
      SUMR = 0.
      DO 30 J = 1,N
      Z = J * A1
      Y = DSQRT(Z)
      XS = Y* ALFA
      BK0 = S18ACF(XS,IFALHA)
      BK1 = S18ADF(XS,IFALHA)
      ZI = 1./Z
      AUX5 = BK0/BK1
      IFCAC2).LT.0) THEN
      AUX1 = AUX5/XS
      ELSE
      AUX1 = AUX5/XS + AC(2)
      ENDIF
      AUX2 = AUX4*AC(3)*ZI
      AUX3 = AC(6)*AUX1 + AUX2
      AUX8 = Z*AUX1 + AUX4
      AUX8I = 1./AUX8
      PRESSAO = AUX3*AUX8I
30      SUMR = SUMR + VC(J)*PRESSAO
      DPWF = SUMR* A1
      RETURN
      END
      SUBROUTINE FUNC (X1,M,NPO,F)

```

```

C .....
C
C      NP = NUMERO DE INTERVALOS DE TEMPO NO FLUXO
C
C      NE = NUMERO DE INTERVALOS DE TEMPO NA ESTATICA
C
C      N = NUMERO DE GRID POINTS
C .....
C

```

```

      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
      REAL X1(NPO),FCMD,FRC(200)
      COMMON / TRI / AC(60),BC(60),C(60),DC(60),PDC(60),PC(200),TC(200)
      COMMON /PVT1/CT,PHI,AMI,PO,H,RW1,CS,CF,PI1
      COMMON /PONTOS/N,NDP,NX,NDE,NDX
      COMMON /LIDA/ TTC(200),PWEC(200)
      COMMON /FATOR/FATORK,FATORP

```

```

C
      AK = DBLE(X1(1)*FATORK)
      S = DBLE(X1(2))
      PI = DBLE(X1(3)*FATORP)
      WRITE(*,*)'K,S,PI',AK,S,PI
      WRITE(2,*)AK,S,PI
      NP = NDP
      NE = NDE

```

```

C      CALL RAD (AK,S,PI,NP,NE)
C
C      P(1) = PO
C      DO 3 I = 2,M + 1
C      J = I - 1
C      FR(J) = SNGL(PWE(I)-P(I))
C      WRITE(2,100)TT(I),PWE(I),P(I),FR(J)
C      F(J) = FR(J)*P(I)/PWE(I)
C      3 CONTINUE
C      100 FORMAT(F6.3,2X,F15.5,2X,F15.5,2X,F15.5)
C
C      C:::: RESIDUO
C      SSR = 0.
C      DO 4 I =1,M
C      SSR = SSR + Fr(I)*Fr(I)
C      4 CONTINUE
C      WRITE(3,*)'SSR=',SSR
C      RETURN
C      END
C
C .....
C      SUBROUTINE RAD (AK,S,PI,NP,NE)
C .....
C
C      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C      COMMON / TRI / AC(60),BC(60),CC(60),DC(60),PDC(60),PC(200),TC(200)
C      COMMON /PVT1/CT,PHI,AMI,PO,H,RW1,CS,CF,PI1
C      COMMON /LIDA/ TT(200),PWE(200)
C
C      IF (S.GE.0.0D0) RW = RW1
C      IF (S.LT.0.0D0) RW = RW1 * DEXP (-S)
C      AUX = PHI * CT * RW * RW
C      Aux1 = AUX * H * 1.11900006D0
C
C      CTD = AUX * AMI * 3792.188093D0 / AK
C      CSD = CS / aux1
C      CD = CF / aux1
C
C      N = 51
C      XN = DLOG (1.D15)
C      DX = XN / (N-1)
C
C      DIF = PI - PO
C      NT = NP + NE
C
C      CONDICAO INICIAL
C
C      TD = 0.D0
C      PDC(1) = 1.0D0
C      DO 1 I = 2,N
C      PDC(I) = 0.D0

```



```

C
C DO 2 I = 2,N-1

```

```

C     X = (I-1) * DX
C     ALFA = - DEXP (2.DO * X) * DX * DX / DT
C     AC(I) = 1.0DO
C     BC(I) = ALFA - 2.DO
C     CC(I) = 1.0DO
C     DC(I) = ALFA * PDC(I)
C 2   CONTINUE

```

```

C
C I = N -> CONDICAO DE CONTORNO EXTERNA
C

```

```

C     ALFA = - DEXP (2.DO * XN) * DX * DX / DT
C     AC(N) = 2.0DO
C     BC(N) = ALFA - 2.0DO
C     DC(N) = ALFA * PDC(N)

```

```

C     CALL TRIDAG (N)

```

```

C     RETURN
C     END

```

```

C .....
C SUBROUTINE TRIDAG (N)
C .....

```

```

C IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C COMMON / TRI / AC(60),BC(60),CC(60),DC(60),PDC(60),PC(200),TC(200)

```

```

C A -> DIAGONAL INFERIOR
C B -> DIAGONAL PRINCIPAL
C C -> DIAGONAL SUPERIOR
C D -> VETOR INDEPENDENTE
C P -> VETOR SOLUCAO
C N -> NUMERO DE EQUACOES

```

```

C DO 1 I = 1,N-1
C   L = I + 1
C   BCL) = BCL) - CC(I) * ACL) / BC(I)
C   DCL) = DCL) - DC(I) * ACL) / BC(I)
C 1 CONTINUE
C   PDC(N) = DC(N) / BC(N)
C DO 2 I = N-1,1,-1
C   L = I+1
C   PDC(I) = ( DC(I) - CC(I) * PDC(L) ) / BC(I)

```



```

AUX = PHI * CT * RW * RW
Aux1 = AUX * H * 1.11900006d0
C
CTD = AUX * AMI * 3792.188093d0 / AK
CSD = CS / AUX1
CD = CF / AUX1
C
N = 51
XN = DLOG (1.D15)
DX = XN / (N-1)
C
DIF = PI - PO
NT = NP + NE
C
CONDICAO INICIAL
C
TD = 0.DO
PDC1) = 1.0DO
DO 1 I = 2,N
PDCI) = 0.DO
1
CONTINUE
C
DO 2 I = 2,NT + 1
DT = ((TTCI)-TTC(I-1))/CTD)/1.
DO 3 J = 1,1
TD = TD + DT
C
CALL MONTAGEM (CD,DX,DT,XN,N)
C
3
CONTINUE
C
T(I) = TD * CTD
P(I) = PI - DIF * PDCI)
IF(S.GT.0.DO) THEN
  Q = CF*(P(I)-POLD)/DT
  POLD = P(I)
  P(I) = P(I) -Q*S
ENDIF
C
IF (I.EQ.CNP+1)) THEN
  CD = CSD
ENDIF
2
CONTINUE
C
RETURN
END

```